

体育院校通用教材



tiyuyuanxiaotongyongjiaocai

YUNDONG
SHENGLIXUE

quanguotiyuyuanxiao

jiaocaiweiyuanhuishending

全国体育院校教材委员会审定

运动生理学

人民体育出版社

体育院校通用教材

运 动 生 理 学

全国体育院校教材委员会审定

人民体育出版社



运动科学论坛

www.vo2max.com.cn

图书在版编目(CIP)数据

运动生理学/全国体育院校教材委员会审定. —北京:

人民体育出版社, 2002

体育院校通用教材

ISBN 978 - 7 - 5009 - 2309 - 1

I. 运… II. 全… III. 运动生理-生理学-高等学校-教材 IV. G804.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 032750 号

*

人民体育出版社出版发行
北京冶金大业印刷有限公司印刷
新华书店经销

*

787×1092 16开本 32印张 650千字
2002年9月第1版 2007年6月第7次印刷
印数:122,231—158,230册

*

ISBN 978 - 7 - 5009 - 2309 - 1
定价:45.00元

社址:北京市崇文区体育馆路8号(天坛公园东门)

电话:67151482(发行部) 邮编:100061

传真:67151483 电挂:9474

(购买本社图书,如遇有缺损页可与发行部联系)



运动科学论坛

www.vo2max.com.cn

编写组成员

主 编:

王瑞元

副 主 编:

孙学川

熊开宇

编写成员: (按姓氏笔画为序)

王瑞元	教授	北京体育大学
任建生	教授	武汉体育大学
刘善云	教授	天津体育学院
孙学川	教授	中国人民解放军体育学院
孙 飙	副教授	南京体育学院
李秋萍	副教授	沈阳体育学院
苏全生	教授	成都体育学院
郑 陆	教授	山东体育学院
郝选明	教授	西安体育学院
龚惠兰	教授	广州体育学院
谢业琪	教授	沈阳体育学院
熊开宇	副教授	北京体育大学



序

运动生理学是人体生理学的一个重要分支，以研究在体育运动的过程中人体各器官的功能所发生的变化规律及机制为主要目标。科学的体育锻炼和卓有成效地提高体育运动的技术水平，都离不开对这些规律和机制的了解。近年来，与生理学的其他分支一样，运动生理学的研究已深入到细胞和分子水平；随着新技术和新方法日益广泛地应用，运动生理学的研究也蓬勃开展起来，已成为生理学百花园中耀眼的奇葩，对增强体质和提高运动成绩起着越来越重要的作用。

我国运动生理学的研究和教学有一定的传统。改革开放以来，随着一批中青年学科带头人及研究骨干的脱颖而出和迅速成长，运动生理学领域已经形成了一支富有朝气和团结进取的队伍，在几个主要的分支取得了一系列重要的教学和研究成果，并培养了一批新生力量。由北京体育大学主持并会同全国各体育院校的专家共同编写的这本《运动生理学》，系统总结了多年的教学经验，反映这一领域的最新研究成果，为体育院校的有关系科的本科生及研究生提供了一本有特色的、有质量的教科书和参考书。

通览全书，有几个显着的特点给人印象深刻。首先，各章在提供相关的生理学背景知识的基础上，紧扣与运动相关的生理学主题。以第一章“骨骼肌的功能”为例，在介绍骨骼肌的结构和活动机制的基础上，对骨骼肌的收缩的力学表现以及肌纤维类型与运动能力的关系作了系统的阐明。其次，本书涉及面甚广，与运动相关的各种器官（或系统）的生理性表现及机制均有论及，还有专门章节论述女性和老年人的生理特点与体育运动，以及运动的时间生物学等，为读者勾画了一幅运动生理学的全景图。第三，本书充分注意了理论性和实用性的兼顾，随着读者对理论知识掌握的逐渐深入，在不少章节中提供了很多实用性强的参考资料。此外，全书以流畅的文笔，较好地把握了运动生理学知识的脉络，这是本书的另一特色。

新中国成立以来，我国民众的体质不断增强，竞技运动的水平迅速提高，特别是在奥运会上取得的优异成绩凸显了新一代中国人的风貌，其中运动生理学工作者功不可没。面临强劲的国际挑战，运动生理学将大有作为，本书的问世可谓正当其时。

作为中国生理学会的现任理事长，借本书出版之机，我代表学会向运动生理学界的同仁们表示热情的支持与祝贺。

中国科学院院士

中国生理学会理事长

杨雄里

2002年4月于复旦大学



运动科学论坛

www.vo2max.com.cn

前 言

全国体育院校通用教材《运动生理学》是根据国家体育总局全国体育院校教材委员会的委托,在中国生理学会运动生理学专业委员会的大力支持下,由全国体育院校 12 位运动生理学专家和教授共同编写的,经全国体育院校教材委员会审定,作为体育院校通用教材使用。

在新教材编写过程中,教材组多次召开编写研讨会,在认真研究并吸收 1990 年版体育学院通用教材《运动生理学》的成功经验基础上,对新教材的体系、内容、重点以及教学方法改革等方面,进行了深入研讨,并对新编《运动生理学》教材初稿进行了反复讨论和多次修改。与原《运动生理学》教材相比,新编《运动生理学》教材有以下几个特点:

1.建立了新教材体系

新编《运动生理学》首次将“运动生理学”分为基础和应用两部分,共 22 章。在基础篇中,以人体的器官、系统为章节,系统地介绍了人体生理学基本内容,并着重介绍了与运动训练及体育健身有关的生理学基础知识;在应用篇中,按运动生理学专题划分章节,突出了运动生理学的理论与方法,强调了运动生理学在运动实际中的应用,为运动训练和运动健身提供了理论指导和方法。

2.整合了基础知识

新编《运动生理学》不仅打破了原有教材的体系,而且对运动生理学的基础知识内容进行了整合。新教材在基础篇压缩了一些生理学章节的内容,加强了与运动训练和运动健身密切相关的内容介绍,如将“消化与吸收”“物质与能量代谢”和“体温”有机地合并为“物质与能量代谢”一章,把“感官”“神经系统”和“高级神经活动”有机地合并为“感觉与神经机能”一章。在节省学时的同时,保证了最基本和必要的知识教学,使相关的内容和知识点更加紧凑和协调。

3.增添了新内容

新编《运动生理学》教材中,特别是应用篇中增加了一些新的知识点和近期运动生理学新的研究成果,如“运动训练的生理学分析”“特殊环境与运动能力”“老年人的生理特点与体育锻炼”“运动处方制定的生理学基础”“生物节律与运动能力”“运动生理负荷的监测与调控”和“免疫机能与运动能力”等章节内容。

4.注重了应用性

新编《运动生理学》教材在介绍基础理论知识的同时,加强了有关应用方面的内容介绍,突出了运动生理学的理论与方法。



5.面向全民健身

新编《运动生理学》教材在为运动训练服务的同时,增加了与全民健身密切相关的运动生理学章节和内容。如在基础篇的部分章节中,增加了一些运动健身生理学的内容;在应用篇中,除增加了完整的运动健身生理学章节,如“老年人的生理特点与体育锻炼”和“运动处方制定的生理学基础”等,在其他章节中也着重强调了健身生理学的内容,从而使本教材能更好地为全民健身服务。

本教材既是全国体育院校本科生的通用教材,也可作为高等院校体育教育专业学生的教材。同时,本教材也可作为运动人体科学专业生、研究生等学制学生的参考教材和体育工作者的参考用书。

本教材由北京体育大学主持编写,参加编写的人员有(按姓氏笔画为序):王瑞元(绪论、第一章),任建生(第二章、第十九章),刘善云(第十章、第十一章的第二、三、四节),孙学川(第二十章、第二十一章),孙飘(第四章、第六章),李秋萍(第八章、第十二章),苏全生(第十一章的第一节、第十五章),郑陆(第五章、第十七章),郝选明(第七章、第十三章、第二十二章),樊惠兰(第十四章、第十八章),谢业琪(第三章),熊开宇(第九章、第十六章)。由王瑞元、孙学川、熊开宇对全书进行了最后统稿。

本教材的编写得到了中国生理学会的大力支持。中国科学院院士、中国生理学会理事长杨雄里教授亲临教材编写组指导,提出了宝贵意见,并为本教材作序。在此表示衷心的感谢。

本教材在编写过程中还得到了北京体育大学、南京体育学院、中国人民解放军体育学院和成都体育学院等各参编单位的专家、教授及有关人员的大力支持,在此也一并表示衷心的感谢。

对教材中尚存不当与错误之处,敬请批评指正。

全国体育院校教材委员会《运动生理学》教材编写组

2002年2月于北京



目 录

基础篇

绪 论	(3)
第一节 生命的基本特征	(3)
一、新陈代谢	(3)
二、兴奋性	(4)
三、应激性	(4)
四、适应性	(4)
五、生殖	(4)
第二节 人体生理机能的调节	(5)
一、神经调节	(5)
二、体液调节	(5)
三、自身调节	(6)
四、生物节律	(6)
第三节 人体生理机能调节的控制	(6)
一、非自动控制系统	(7)
二、反馈控制系统	(7)
三、前馈控制系统	(8)
第四节 运动生理学研究的基本方法	(8)
一、研究水平	(8)
二、研究方法	(9)
第五节 运动生理学的历史与研究现状	(10)
一、运动生理学的历史	(10)
二、当前运动生理学的几个研究热点	(11)
第六节 运动生理学的发展趋势	(15)
一、微观水平研究不断深入	(15)
二、宏观水平研究更加发展	(15)
三、研究方法日益创新	(16)
四、应用性研究受到重视	(16)
五、研究领域不断扩大	(16)



第一章 骨骼肌机能	(18)
第一节 肌纤维的结构	(18)
一、肌原纤维和肌小节	(18)
二、肌管系统	(20)
三、肌丝的分子组成	(21)
第二节 骨骼肌细胞的生物电现象	(22)
一、静息电位	(22)
二、动作电位	(24)
三、动作电位的传导	(27)
四、细胞间的兴奋传递	(28)
五、肌电	(29)
第三节 肌纤维的收缩过程	(30)
一、肌丝滑行学说	(30)
二、肌纤维收缩的分子机制	(31)
三、肌纤维的兴奋—收缩耦联	(33)
第四节 骨骼肌特性	(33)
一、骨骼肌的物理特性	(33)
二、骨骼肌的生理特性及其兴奋条件	(34)
第五节 骨骼肌收缩	(34)
一、骨骼肌的收缩形式	(34)
二、骨骼肌收缩的力学表现	(38)
三、运动单位的动员	(41)
第六节 肌纤维类型与运动能力	(43)
一、肌纤维类型的划分	(43)
二、不同类型肌纤维的形态、机能及代谢特征	(44)
三、运动时不同类型运动单位的动员	(47)
四、肌纤维类型与运动项目	(47)
五、训练对肌纤维的影响	(48)
第七节 肌电的研究与应用	(49)
一、利用肌电测定神经的传导速度	(49)
二、利用肌电评定骨骼肌的机能状态	(50)
三、利用肌电评价肌力	(50)
四、利用肌电进行动作分析	(51)
第二章 血液	(55)
第一节 概述	(55)
一、血液的组成	(55)

二、内环境	(56)
三、血液的功能	(56)
四、血液的理化特性	(57)
第二节 运动对血量的影响	(59)
第三节 运动对血细胞的影响	(61)
一、运动对红细胞的影响	(61)
二、运动对白细胞的影响	(64)
三、运动对血小板的影响	(66)
第四节 运动对血红蛋白的影响	(67)
一、血红蛋白的功能	(67)
二、血红蛋白与运动训练	(68)
第五节 运动对血液凝固和纤溶能力的影响	(69)
一、血液凝固和纤溶	(69)
二、运动对血凝和纤溶能力的影响	(71)
运动员血液(参考内容)	(72)
第三章 循环机能	(77)
第一节 心脏的机能	(77)
一、心脏的一般结构	(77)
二、心肌的生理特性	(78)
三、心脏的泵血功能	(81)
四、心电图	(86)
第二节 血管生理	(89)
一、各类血管的功能特点	(89)
二、血压	(90)
三、动脉脉搏	(93)
四、静脉血压和静脉回心血量	(94)
五、微循环	(95)
第三节 心血管活动的调节	(97)
一、神经调节	(97)
二、体液调节	(100)
三、局部血流调节	(102)
第四节 运动对心血管系统的影响	(102)
一、肌肉运动时血液循环功能的变化	(102)
二、运动训练对心血管系统的影响	(104)
三、测定脉搏(心率)和血压在运动实践中的意义	(105)
四、体育运动与心血管疾病	(107)



第四章 呼吸机能	(112)
第一节 呼吸运动和肺通气机能	(113)
一、肺通气的动力学	(113)
二、肺通气机能	(116)
三、肺通气机能的指标	(118)
第二节 气体交换和运输	(119)
一、气体交换	(120)
二、气体运输	(123)
第三节 呼吸运动的调节	(128)
一、调节呼吸运动的神经系统	(128)
二、呼吸运动的反射性调节	(129)
三、化学因素对呼吸的调节	(130)
第四节 运动对呼吸机能的影响	(133)
一、运动时通气机能的变化	(134)
二、运动时换气机能的变化	(135)
三、运动时呼吸的调节	(136)
四、运动时合理呼吸	(138)
第五章 物质与能量代谢	(142)
第一节 物质代谢	(142)
一、人体主要营养物质的消化与吸收	(142)
二、主要营养物质在体内的代谢	(148)
第二节 能量代谢	(158)
一、基础代谢	(158)
二、人体运动时的能量供应与消耗	(162)
第三节 体温	(168)
一、正常人体温度	(168)
二、体温调节	(169)
第六章 肾脏机能	(174)
第一节 肾脏的基本结构	(174)
一、肾单位的基本结构	(175)
二、肾脏的血液循环	(176)
第二节 尿的生成过程	(176)
一、肾小球的滤过作用	(176)
二、肾小管与集合管的重吸收作用	(179)
三、肾小管与集合管的分泌作用	(180)
四、尿的成分、理化性质及尿量	(180)

第三节 肾脏在保持水和酸碱平衡中的作用	(181)
一、肾脏在保持水平衡中的作用	(181)
二、肾脏在保持酸碱平衡中的作用	(182)
第四节 运动对肾脏机能的影响	(183)
一、尿量	(183)
二、运动性蛋白尿	(184)
三、运动性血尿	(185)
 第七章 内分泌机能	(187)
第一节 内分泌概论	(187)
一、内分泌与内分泌腺	(187)
二、激素	(188)
三、激素的作用机制	(190)
第二节 主要内分泌腺及其作用	(192)
一、下丘脑与垂体	(192)
二、甲状腺	(196)
三、肾上腺	(197)
四、胰岛	(199)
五、甲状旁腺	(200)
六、性腺	(201)
第三节 激素分泌的调控	(202)
一、激素分泌的负反馈调控	(202)
二、激素分泌的调控功能轴	(203)
内分泌对运动的反应与适应	(205)
兴奋剂(参考内容)	(208)
 第八章 感觉与神经机能	(213)
第一节 感觉器官	(213)
一、概述	(213)
二、视觉器官	(216)
三、听觉与位觉	(219)
四、本体感觉	(222)
第二节 肌肉运动的神经调控	(224)
一、神经系统概述	(224)
二、肌肉运动的神经调控	(226)
三、神经系统的运动整合作用	(232)
四、脑的高级功能	(233)
五、睡眠	(236)



应用篇

第九章 运动技能	(241)
第一节 运动技能的基本概念和生理本质	(241)
一、运动技能的基本概念	(241)
二、运动技能的分类	(241)
三、运动技能的生理本质	(242)
第二节 形成运动技能的过程及其发展	(243)
一、泛化过程	(244)
二、分化过程	(244)
三、巩固过程	(244)
四、动作自动化	(245)
第三节 影响运动技能形成与发展的因素	(246)
一、动机在运动技能形成中的作用	(246)
二、反馈在运动技能形成及教学训练中的作用	(249)
三、训练水平在运动技能形成中的作用	(252)
四、大脑皮质机能状态在运动技能形成中的作用	(252)
五、感觉机能在运动技能形成中的作用	(253)
第十章 有氧、无氧工作能力	(256)
第一节 概述	(256)
一、需氧量与摄氧量	(256)
二、氧亏与运动后过量氧耗	(257)
氧债(参考内容)	(258)
第二节 有氧工作能力	(259)
一、最大摄氧量	(259)
二、乳酸阈	(266)
三、提高有氧工作能力的训练	(269)
第三节 无氧工作能力	(271)
一、无氧工作能力的生理基础	(271)
二、无氧工作能力测试与评价	(272)
三、提高无氧工作能力的训练	(276)
第十一章 身体素质	(279)
第一节 力量素质	(279)
一、决定肌肉力量的生物学因素	(280)
二、肌肉力量的可训练因素	(282)
三、功能性肌肉肥大	(283)



四、力量训练原则	(284)
五、力量训练要素	(286)
第二节 速度素质	(287)
一、速度素质的生理基础	(287)
二、速度素质的训练	(289)
第三节 耐力素质	(290)
一、有氧耐力及其训练	(290)
二、无氧耐力及其训练	(293)
第四节 灵敏和柔韧素质	(294)
一、灵敏素质	(294)
二、柔韧素质	(295)
 第十二章 运动过程中人体机能变化规律	(299)
第一节 赛前状态与准备活动	(299)
一、赛前状态	(299)
二、准备活动	(300)
第二节 进入工作状态与稳定工作状态	(301)
一、进入工作状态	(301)
二、稳定工作状态	(304)
第三节 运动性疲劳	(305)
一、运动性疲劳的概念及其分类	(305)
二、运动性疲劳的产生机理	(306)
三、运动性疲劳的发生部位及特征	(309)
四、运动性疲劳的判断	(311)
第四节 恢复过程	(313)
一、恢复过程的一般规律	(313)
二、机体能源贮备的恢复	(314)
三、促进恢复的措施	(316)
 第十三章 运动训练原则的生理学分析	(320)
第一节 概述	(320)
一、运动训练的生理学本质	(320)
二、机体对运动负荷的反应特征	(321)
三、运动负荷与训练效果的关系	(323)
第二节 超负荷原则生理学分析	(324)
一、基本概念与意义	(324)
二、生理学分析	(324)
三、超负荷原则在训练中的应用	(326)



第三节 恢复原则的生理学分析	(327)
一、基本概念及意义	(327)
二、生理学分析	(328)
三、恢复原则在训练中的应用	(329)
第四节 周期性原则的生理学分析	(331)
一、基本概念与意义	(331)
二、生理学分析	(332)
第五节 个体化原则的生理学分析	(333)
一、基本概念与意义	(333)
二、生理学分析与应用	(333)
 第十四章 特殊环境与运动能力	(337)
第一节 高原环境与运动能力	(337)
一、高原应激	(337)
二、高原服习	(339)
三、高原训练的生理学适应	(340)
四、高原训练的要素	(344)
第二节 热环境与运动能力	(346)
一、热应激与适应	(346)
二、热病及其预防	(348)
第三节 冷环境与运动	(350)
一、冷应激与运动	(350)
二、冷服习	(351)
第四节 水环境与运动	(351)
一、水环境与运动能力	(351)
二、对水环境的适应	(352)
 第十五章 运动机能的生理学评定	(355)
第一节 运动训练对机体机能的影响	(355)
一、安静状态下运动员的生物学特征	(355)
二、运动时和恢复期运动员的生物学特征	(357)
第二节 影响运动训练效果的因素	(358)
一、运动的强度、频率和持续时间	(358)
二、遗传因素	(358)
三、年龄和性别差异	(358)
四、生物节律因素	(359)
第三节 人体机能评定的方式	(359)
一、横向比较	(359)

二、纵向追踪	(359)
三、不同机能状态的机能水平比较	(360)
第四节 人体机能评定的常用指标	(360)
一、身体形态学指标	(360)
二、生理学评定指标	(360)
三、其他机能评定指标	(362)
四、机能评定的一般步骤	(362)
第五节 适宜运动量的生理学评定	(363)
一、生理指标的检查	(363)
二、运动员的自我感觉及教育学观察	(364)
 第十六章 儿童少年生长发育与体育运动	(366)
第一节 儿童少年生长发育	(366)
一、基本概念	(366)
二、儿童少年生长发育的一般规律	(367)
三、影响儿童少年生长发育的因素	(368)
四、生长发育年龄阶段的划分与青春发育期	(373)
第二节 儿童少年的解剖生理特点和体育教学与运动训练	(374)
一、骨骼	(374)
二、关节	(376)
三、肌肉	(376)
四、血液循环	(377)
五、呼吸系统	(380)
六、神经系统	(380)
七、内分泌系统	(381)
第三节 儿童少年身体素质的发展	(382)
一、儿童少年身体素质发展规律	(382)
二、儿童少年主要身体素质发展特点	(383)
 第十七章 女子的生理特点与体育运动	(387)
第一节 女性生理特点	(387)
一、女性生理阶段划分	(387)
二、生理特点	(388)
三、运动能力特点	(389)
第二节 月经周期、妊娠与运动能力	(390)
一、月经周期及其调节	(390)
二、月经周期中运动能力的变化	(392)
三、妊娠期运动能力	(392)



第十八章 老年人的生理特点与体育锻炼	(395)
第一节 概述	(395)
一、日历年龄与生物年龄	(395)
二、衰老的概念及老年人划分标准	(396)
三、衰老的机制	(397)
第二节 老年人生理特点与健身作用	(398)
一、神经系统	(398)
二、运动系统	(398)
三、心血管系统	(400)
四、呼吸系统	(401)
五、血液系统	(401)
六、免疫系统	(402)
七、抗氧化系统	(402)
八、体成分和体重	(403)
九、血脂代谢	(403)
第三节 老年人健身运动原则	(404)
一、适宜运动项目原则	(404)
二、循序渐进原则	(404)
三、经常性原则	(404)
四、个别对待原则	(404)
五、自我监督原则	(405)
第十九章 运动处方的生理学基础	(407)
第一节 概述	(407)
第二节 运动处方的基本要素	(407)
一、运动目的	(408)
二、运动类型	(408)
三、运动强度	(410)
四、运动时间	(411)
五、运动的时间带	(411)
六、运动频度	(412)
七、注意事项	(412)
第三节 运动处方的制定	(412)
一、制定运动处方的步骤	(413)
二、运动处方的制定	(416)
第四节 运动处方的实施	(417)
一、实施过程的阶段性	(417)
二、实施过程中的自我监控	(419)

第五节 健身运动处方示例	(419)
一、健身跑	(420)
二、健身跑运动处方	(420)
第二十章 生物节律与运动能力	(425)
第一节 概述	(425)
一、生物时间结构的基本成分	(425)
二、生物时间结构的分类	(426)
三、生物节律特殊研究方法	(427)
第二节 运动员的生物节律特征	(429)
一、血气指标和心肺功能的近似昼夜节律特征	(429)
二、人体体能的近似昼夜节律特征	(430)
三、激素水平的近似昼夜节律特征	(431)
四、体温近似昼夜节律特征	(431)
第三节 运动员生物节律模型的建立和应用	(431)
一、运动员生物节律模型建立的主要步骤	(431)
二、运动员生物节律模型的应用	(432)
第四节 人体生物节律的调整	(432)
一、调整方向和跨度	(432)
二、调整方法	(433)
三、标志节律	(434)
四、时差调整	(435)
第五节 激素节律变化与运动员选材	(437)
一、某些激素的昼夜变化特点	(437)
二、用激素节律选材的主要指标	(437)
三、注意事项	(438)
第二十一章 运动生理负荷的监测与调控	(441)
第一节 概述	(441)
一、基本概念	(441)
二、运动生理负荷的基本要素	(442)
三、运动生理负荷的决定因素	(444)
第二节 运动生理负荷的监测与调控	(445)
一、监测的基本原则	(445)
二、监测的基本内容	(446)
三、监测的方法	(447)
四、实时调控的方法	(450)
第三节 运动生理负荷的实时分析	(451)



一、实时分析的概念和基本要求	(451)
二、实时分析的基本步骤与方法	(453)
第二十二章 免疫机能与运动能力	(461)
第一节 免疫系统概述	(461)
一、免疫的概念	(461)
二、免疫系统的组成	(462)
三、免疫反应	(465)
第二节 运动性免疫机能	(466)
一、运动负荷与免疫机能	(466)
二、运动性免疫模式	(467)
第三节 运动性免疫抑制	(469)
一、运动性免疫抑制的可能机理	(469)
二、运动性免疫抑制的生理意义	(471)
三、运动性免疫抑制的调理	(471)



运动

基础篇

生理学



绪 论

人体生理学(human physiology)是生命科学的一个分支,是研究人体生命活动规律的科学,是医学科学的重要基础理论学科。

运动生理学(sports physiology)是人体生理学的分支,是专门研究人体的运动能力和对运动的反应与适应过程的科学,是体育科学中一门重要的应用基础理论学科。

运动生理学的任务是:在对人体生命活动规律有了基本认识的基础之上,揭示体育运动对人体机能影响的规律及机理,阐明运动训练、体育教学和运动健身过程中的生理学原理,指导不同年龄、性别和训练程度的人群进行科学的运动锻炼,以达到提高竞技运动水平、增强全民体质、延缓衰老、提高工作效率和生活质量的目的。

第一节 生命的基本特征

生物体具有生命活动。生物体的生命现象主要表现为以下五个方面的基本特征:新陈代谢、兴奋性、应激性、适应性和生殖。

一、新陈代谢

新陈代谢(metabolism)是生物体自我更新的最基本的生命活动过程。新陈代谢包括同化和异化两个过程。生物体不断地从体外环境中摄取有用的物质,使其合成、转化为机体自身物质的过程,称为同化过程(assimilation);生物体不断地将体内的自身物质进行分解,并把所分解的产物排出体外,同时释放出能量供应机体生命活动需要的过程,称为异化过程(dissimilation)。在物质合成时,即在同化过程中需要吸收能量;而在物质分解时,即在异化过程中将释放出能量。因此,在新陈代谢过程中,物质代谢(material metabolism)和能量代谢(energy metabolism)是同时进行的,是同一过程的两个方面。任何物质都蕴藏着一定的能量,同样,物质代谢也必然伴随着能量的产生、转移和利用,任何能量的转变也必然伴有物质的合成和分解。同化过程和异化过程是同时进行和相互依存的两个生理过程。由此可见,生物体通过同化和异化过程可以不断地自我更新。生物体内的同化和异化过程是一系列十分复杂的生物化学反应过程,这些复杂的生物化学反应过程有赖于酶的存在和作用。新陈代谢是生命活动的最基本特征,新陈代谢一旦停止,生物体的生命活动也就结束。

二、兴奋性

在生物体内可兴奋组织具有感受刺激、产生兴奋的特性，称为兴奋性(excitability)。能引可兴奋组织产生兴奋的各种环境变化称为刺激(stimulus)。神经、肌肉和腺体等组织受刺激后，能迅速地产生可传布的动作电位，即发生兴奋，这些组织被称为可兴奋组织。在生理学中将这此可兴奋组织接受刺激后所产生的生物电反应过程及表现，称之为兴奋(excitation)。因此，可兴奋组织感受刺激产生兴奋能力程度的高低反映了该组织兴奋性程度的高低。

可兴奋组织有两种基本的生理活动过程：一种是由相对静止状态转变为活动状态，或是兴奋性由弱变强，这种活动是兴奋活动；另一种是由活动状态转变为相对静止状态，或是兴奋性由强变弱，这种活动是抑制(inhibition)活动。人体的各种生理功能活动，既有兴奋性活动也有抑制性活动，两者既对抗又协调，并可相互转化。因此，兴奋和抑制是对立统一的生理活动过程。

三、应激性

人体内各种组织对外界环境变化(刺激)具有不同的反应，如肌肉表现为收缩，腺体表现为分泌，神经的反应则表现为发放并传导神经冲动。而其他组织，如上皮、骨骼等受到刺激后则表现为细胞代谢发生变化等。机体或一切活体组织对周围环境变化具有发生反应的能力或特性称为应激性(irritability)。活组织应激性的表现形式是多方面的，既可以是生物电活动，也可以是细胞的代谢变化。而兴奋性则只是指可兴奋组织受到刺激后发生生物电变化的过程。因此，具有兴奋性的组织必然具有应激性，而具有应激性的组织不一定具有兴奋性。

四、适应性

生物体长期生存在某一特定的生活环境中，在客观环境的影响下可以逐渐形成一种与环境相适应的、适合自身生存的反应模式。生物体所具有的这种适应环境的能力，称之为适应性(adaptability)。例如长期居住在高原地区的居民，其血液中的红细胞数量远远超过平原地区的居民。这种适应性反应对高原居民是十分必要的，因为血中红细胞数量的增多大大提高了血液运输氧的能力，从而有效地克服了高原缺氧给人体带来的不良影响，创造了适应客观环境而生存的条件。再如，运动员经过长期的力量训练可使肌肉的力量和体积增加；长期经过耐力训练可使肌肉耐力、心肺功能得到改善等，这些都是人体对环境变化产生适应的结果。

五、生殖

生物的生命是有限的，必须通过生殖(reproduction)过程进行自我复制和繁殖，使生

命过程得到延续。生殖主要是通过两性的交配实现的，是生命的基本活动。但是，近几年由于生物技术的发展，可以通过克隆技术使生命得到复制，传统的生殖理论和观念受到挑战。

第二节 人体生理机能的调节

人体由各种细胞、组织和器官所组成。它们的生理活动在空间和时间上紧密配合，相互协调成为一个统一的整体。人体的细胞及组织与外界环境不发生直接接触，而是生存于细胞外液之中。细胞新陈代谢所需的养料由细胞外液提供，细胞的代谢产物也排到细胞外液中，通过细胞外液再与外环境发生物质交换。因此，细胞外液被称为机体的内环境(internal environment)，以别于整个机体所生存的外环境。

细胞生存要求内环境各项理化因素相对稳定。然而，内环境理化性质不是绝对静止不变的，而是各种物质在不断转换中达到相对平衡状态，即动态平衡状态。这种平衡状态称为稳态(homeostasis)。由于细胞不断进行着新陈代谢，新陈代谢本身不断扰乱内环境的稳态，外环境的强烈变化也可影响内环境的稳态，为此，机体的血液循环、呼吸、消化和排泄等生理功能必须不断地进行调节，使内环境处于相对稳定状态。

稳态是一种复杂的动态平衡过程，一方面而是代谢过程使稳态不断地受到破坏，而另一方面而机体又通过各种调节机制使其不断地恢复平衡。总之，整个机体的生命活动正是在稳态不断受到影响、而又不断得到维持的过程中得以顺利进行的。

机体与外界环境之间也保持相互联系和彼此影响。人体对内、外环境变化能产生适应性反应，这是因为人体具有十分完善的调控机制，对各种生理功能进行相应调节的结果。人体内环境相对稳定及生物节律的维持和存在，显然也是通过体内调控机制实现的。

一、神经调节

神经调节(neuroregulation)是指在神经活动的直接参与下所实现的生理机能调节过程，是人体最重要的调节方式。神经活动的基本过程是反射。反射活动的结构基础是反射弧(reflex arc)。反射弧包括感受器、传入神经、神经中枢、传出神经和效应器五个环节。感受器能接受刺激，并产生神经冲动；传入神经将感受器所产生的神经冲动传入中枢；中枢在脑和脊髓，能对各种刺激进行分析判断；传出神经则将中枢对刺激所作出的反应信息传递至效应器；效应器对刺激产生相应的生理反应。例如，当血液中氧分压下降时，颈动脉体等化学感受器发生兴奋，通过传入神经将信息传至呼吸中枢并使之兴奋，再通过传出神经使呼吸肌运动加强，吸入更多的氧使血液中氧分压回升，维持内环境的稳态。

二、体液调节

人体血液和其他体液中的某些化学物质，如内分泌腺所分泌的激素(hormone)，以



及某些组织细胞所产生的某些化学物质或代谢产物,可借助于血液循环的运输,到达全身或某一器官和组织,从而引起某些特殊的生理反应。这种调节过程是通过体液的运输来实现的,因而称为体液调节(humoral regulation)。被调节的细胞或组织称为靶细胞或靶组织。许多内分泌细胞所分泌的各种激素,就是借体液循环的通路对机体的功能进行调节的。例如,胰岛的 β -细胞分泌的胰岛素能调节组织、细胞的糖与脂肪代谢,有降低血糖的作用,内环境血糖浓度之所以能保持相对稳定,主要依靠这种体液调节。也有些内分泌腺本身直接或间接地受到神经系统的调节,在这种情况下,体液调节是神经调节的一个传出环节,是反射传出通路的延伸。这种情况可称为神经-体液调节。例如,肾上腺髓质接受交感神经的支配,当交感神经系统兴奋时,肾上腺髓质分泌的肾上腺素和去甲肾上腺素增加,共同参与机体的调节。

除激素外,某些组织和细胞产生的一些化学物质或代谢产物,虽不能随血液到身体其他部位起调节作用,但可在局部组织液内扩散,改变邻近组织细胞的活动。这种调节可看做是局部性体液调节,或称为旁分泌(paracrine)调节。

神经调节的一般特点是比较迅速而精确,体液调节的一般特点是比较缓慢、持久而弥散,两者相互配合使生理功能调节更趋于完善。

三、自身调节

自身调节(autoregulation)是指组织和细胞在不依赖于外来的神经或体液调节情况下,自身对刺激发生的适应性反应过程。例如,骨骼肌或心肌收缩前的长度能对收缩力量起调节作用。在一定范围内肌肉的初长度增加时,肌肉的收缩力量会相应增加,而肌肉的初长度缩短时收缩力量就减小。一般来说,自身调节的幅度较小,也不十分灵敏,但对于生理功能的调节仍有一定意义。

有时一个器官在不依赖于器官外来的神经或体液调节情况下,器官自身对刺激发生的适应性反应过程也属于自身调节。

四、生物节律

生物体在维持生命活动过程中,除了需要进行神经调节、体液调节和自身调节外,各种生理功能活动会按一定的时间顺序发生周期性变化,这种生理机能活动的周期性变化,称为生物的时间结构,或称为生物节律(biorhythm)。生物节律可按其发生的频率高低分为近似昼夜节律、亚日节律和超日节律三大类。

由于生物体内生理活动的节律性变化,使生物体对内、外环境的程序性变化具有生物“预见性”,产生了更完善的适应过程。

第三节 人体生理机能调节的控制

20世纪40年代产生了控制论(cybernetics)这门新学科。控制论通过运用数学和物



理学的原理和方法,分析研究各种工程技术的控制和人体的各种功能调节,得出了一些有关调节和控制过程的共同规律。运用控制论原理分析人体的调节活动时,人体的各种功能调节可分为三种控制系统。

一、非自动控制系统

在控制系统中,控制部分不受受控部分的影响,即受控部分不能通过反馈活动改变控制部分的活动,这种控制系统称为非自动控制系统。例如,在应激反应中,当应激性刺激特别强大时,可能由于下丘脑神经元和垂体对血中糖皮质激素的敏感性减退,导致血液中糖皮质激素浓度升高时不能反馈抑制它们的活动,使应激性刺激引起的促肾上腺皮质激素与糖皮质激素的持续分泌。这时,肾上腺皮质能不断地根据应激性刺激的强度作出相应的反应。在这种情况下,刺激决定着反应,而反应不能改变控制部分的活动。这种控制系统无自动控制的能力。在体内非自动控制系统的活动较少。

二、反馈控制系统

在控制系统中,控制部分不断受受控部分的影响,即受控部分不断有反馈信息返回输入给控制部分,并改变它的活动,这种控制系统称为反馈控制系统。反馈控制系统具有自动控制能力。

反馈控制系统分为比较器、控制部分和受控部分三个主要环节(图1)。输出变量的部分信息经监测装置检测后转变为反馈信息,回输到比较器,由此构成闭合回路。在不同的反馈控制系统中,传递信息的方式是多种多样的,可以是电信号(神经冲动)、化学信号(某些化学成分的浓度)或机械信号(压力、张力等),但最重要的是在这些信号的数量和强度变化中所包含的准确和足够的信息。

在人体生理功能调节的自动控制系统中,如果受控部分的反馈信息能减弱控制部分活动,这样的反馈称为负反馈(negative feedback)。负反馈是可逆的,是维持人体生理机能活动经常处于稳态的重要调节机制。如在人体正常体温、血压、心率和某些激素水平等指标的维持过程中,负反馈调节发挥着重要作用。

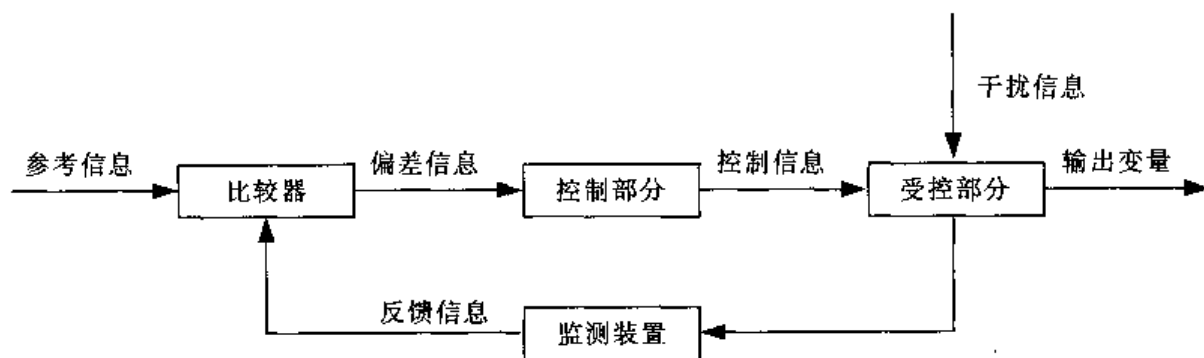


图1 反馈控制系统示意图



与负反馈相反，如果反馈信息能促进或加强控制部分活动，这种反馈称为正反馈(positive feedback)。正反馈往往是不可逆的，是不断增强的调控过程，直到整个生理过程结束为止。如排尿反射、分娩过程、血液凝固等均属于正反馈调控过程。

三、前馈控制系统

在调控系统中，有时干扰信息在作用于受控部分引起输出效应发生变化的同时，还可以直接通过受控装置直接作用于控制部分，这种干扰信息对控制部分的直接作用称为前馈(feedforward)，如图2所示。在前馈调控过程中，机体的控制部分可在其输出效应尚未发生偏差而引起反馈之前，就可对受控部分发出纠正信息，使机体的控制过程不出现较大的波动和反应滞后的现象，从而能更有效地保持生理功能活动的稳态。因此，前馈控制系统所起的作用是预先监测干扰，防止干扰的扰乱；或是超前洞察动因，及时作出适应性反应。条件反射活动是一种前馈控制系统活动。例如，动物见到食物就引致唾液分泌，这种分泌比食物进入口中后引致唾液分泌来得快，而且富有预见性，更具有适应性意义。

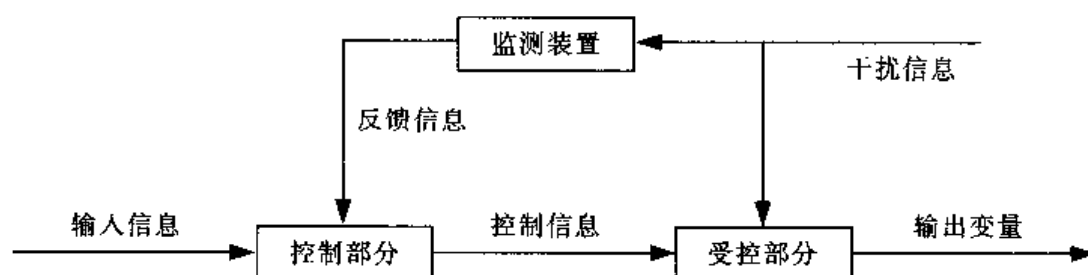


图2 前馈控制系统模式图

第四节 运动生理学研究的基本方法

实验研究法是运动生理学研究的基本方法。通过实验观察和分析人体在运动过程中机能活动的变化过程及其因果关系。

一、研究水平

根据运动生理学研究的任务和实验对象，其研究水平可分为整体水平、器官和系统水平、细胞和分子水平。整体、器官和系统水平的研究属于宏观研究，细胞、分子水平的研究属于微观研究。

整体水平研究 整体水平研究是指在整体水平上研究人体在一定的环境条件下运动时，人体各器官、系统之间的相互关系，以及人体各器官、系统对运动的适应过程。例

如,研究人体运动时心血管系统的机能、呼吸系统的机能、内分泌机能、物质与能量代谢和肌肉组织利用氧能力等的变化,以及它们对运动的适应等都属于整体水平的研究。整体水平的研究是运动生理学研究的一个重要方面。

器官、系统水平研究 人体运动时的整体机能表现,是建立在各器官、系统机能水平和机能活动的密切协调配合基础之上的。探讨人体运动时的机能变化,必须对各器官系统的机能进行研究。研究每个器官、系统在运动中的机能有何变化,这种变化是怎样发生、发展的,变化的条件是什么,受哪些因素制约,以及这种变化对运动中的整体机能变化将产生什么影响等。例如,在运动中心血管系统的机能会发生较大的变化,表现为心率、血压、心输出量升高。探讨引起这些指标升高的因素及变化特点的研究就是器官、系统水平研究。

细胞、分子水平研究 器官是由一些具有特殊功能的细胞群所组成。各器官、系统的生理机能取决于这些具有特殊功能的细胞群。而每个细胞的生理功能又依赖于构成细胞的生物分子(biomolecule)。细胞、分子水平的研究主要是研究运动时细胞内各亚微结构的机能,以及各生物分子的特殊理化变化过程。目前,研究大负荷对骨骼肌超微结构变化,收缩蛋白的结构和代谢水平变化,以及线粒体、生物膜、酶系统等机能变化,均属于细胞、分子水平的研究。

二、研究方法

(一) 动物试验法

根据生物进化观点,人同动物特别是哺乳动物,有许多结构和功能相似之处。因此,可用动物试验的研究结果间接地探讨人体的生理功能变化及其机制。

动物实验一般分为慢性实验和急性实验两类。慢性动物实验是指在完整、清醒、健康的动物体上进行各种生理实验研究的方法,如摘除或破坏动物的某个器官,以观察其生理功能及活动规律。急性动物实验又可分为在体实验和离体实验两种。所谓在体实验是指在麻醉或破坏神经中枢高级部位的条件下,解剖动物并对某个器官的功能进行观察。离体实验是指从活的或刚被处死的动物体内摘取器官、组织或细胞,置于人工控制的实验环境中,观察其生理功能。

应当指出,相当多的生理学和运动生理学的知识是从动物实验中获得的。动物实验是研究生理学和运动生理学不可缺少的手段。但是应用动物实验所得结论时,应充分考虑人和动物之间的差异,不可简单地生搬硬套。

(二) 人体实验法

在运动生理学研究中,常用的人体实验法有运动现场测试法和实验室测试法。

运动现场测试法是指在运动现场直接监测运动员运动前、运动中和运动后的恢复过程中,某些生理机能变化,借以了解不同运动项目的生理特点,或不同人群在完成同一运动项目时的生理反应。例如用心率遥测仪测定运动时运动员的心率变化,就是典型的

运动现场测试法。这种方法的特点是符合运动的实际情况。但在运动实践中往往难度较大、测试条件不易控制。因此,运动现场测试法在运动生理学研究往往受到限制。

实验室测试法是指让受试者在实验室进行按照一定的研究目的而设计的运动方案运动时(如在跑台、功率自行车和各种力量练习器上进行运动),利用各种仪器设备测试运动员在运动过程中的各种生理指标变化,以了解不同形式的运动对人体某些生理机能的影响。

科学技术的发展和实验手段的改进,为运动生理学研究创造了良好条件。利用各种遥测、换能、多导记录等技术,可以在不影响人体运动状态的条件下,获得更真实的实验数据,使对整体水平的研究有了新的发展。而肌肉活检、电镜观察、微电极、生物免疫、生物化学、组织化学以及分子生物学等技术已把实验者的视野带进了细胞分子水平的微观世界。运动生理学的各种理论和观点绝大部分是从实验中获得并总结出来,又不断在实践中受到检验。因此,运动生理学的研究只有结合体育教学、体育锻炼和运动训练的实际,同其他学科相互配合,进行系统、深入的综合研究,才能有更广阔的发展前景。

第五节 运动生理学的历史与研究现状

一、运动生理学的历史

运动生理学是在 20 世纪初发展起来的一门年轻的学科。当时英国的生理学家希尔(Hill)出版了他的三部运动生理学名著:《肌肉活动》《人类的肌肉运动-影响速度与疲劳的因素》和《有生命的机械》。这些书中的有关论点,特别是有关肌肉工作的论点至今仍为生理学工作者所引用。为此,希尔被誉为“运动生理学之父”。在同一时期,苏联的克列斯托夫尼柯甫(Krestovnikoff)出版了《运动生理学论文集》。该论文集汇集了大量的实验资料,阐述了各项运动的生理学特点,对科学训练起了重要的促进作用。英国的班布里奇(Bainbridge)出版了《肌肉运动生理学》一书。该书论述了运动时能量变化过程及其在肌肉中是怎样进行的,肌肉活动时氧及营养物质供应的调节机制,以及肌肉运动的机械装置。他的论著奠定了肌肉运动生理学理论基础。日本学者古田章信的《运动生理学》是亚洲运动生理学早期的代表作。

自 20 世纪 50 年代以来,北欧的运动生理学研究硕果累累,涌现出了许多著名的运动生理学家,如奥斯特兰德(Åstrand)、萨尔庭(Saltin)、埃森(Essen)和罗达尔(Rodahl)等。他们不仅在运动与心肺功能、最大摄氧量在运动实践中应用等宏观研究方面作出了重要贡献,而且利用组织活检法进行肌纤维类型以及运动对骨骼肌超微结构影响的研究,把运动生理学的研究推向微观水平。

我国的运动生理学发展可追溯到 20 世纪的 40 年代。生理学家蔡翘于 1940 年出版了《运动生理学》一书。但在这一阶段,有关运动生理学的教学与研究却进展缓慢。



直到 50 年代末,运动生理学的教学与研究工作才在我国有了第一次飞跃性的发展。1957 年北京体育学院为我国首次培养出运动生理学研究生。其后,在高等学校体育系中也先后成立了运动生理学教研室。1958 年成立了国家体育科学研究所,其中设置了运动生理研究室,这是我国第一个专门研究运动生理学的科研机构。70 年代末至 80 年代,是我国运动生理学的教学及科研工作的第二次飞跃发展时期。体育院系相继成立了运动生理学硕士点。北京体育大学成立了运动生理学博士点。各省、市的体育科研所相继建立了运动生理研究室,专门从事运动生理的研究,使我国的运动生理学教学和科学研究得到了蓬勃发展。

进入到新的世纪,运动生理学的发展又遇到了新的契机。在中国生理学会关怀下,中国生理学会运动生理学专业委员会于 2001 年成立,标志着运动生理学已发展成为生理科学下属的二级学科,这是中国运动生理学发展史上的一个重要里程碑。

经过半个多世纪的发展,我国的运动生理学研究在探讨人体生命活动规律、增进人民健康水平和提高运动能力等方面取得了飞跃性的进展。形成一支人员素质较高的研究队伍,知名专家在国际学术界享有一定声望。在某些研究领域,接近、达到甚至超过了世界先进水平。这一切为未来运动生理学继续发展奠定了良好的基础。

二、当前运动生理学的几个研究热点

(一) 最大摄氧量的研究

用传统的方法直接测定最大摄氧量(VO_{2max}),实验过程极其复杂。20 世纪 50 年代,瑞典著名运动生理学家奥斯特兰德(Åstrand)首创了间接测定最大摄氧量的列线图法。最大摄氧量的间接测定法被确认以后,使得这一指标的应用具有简易、经济、快速等特点。研究表明,最大摄氧量是评价耐力运动员身体机能的重要指标,两者有着极大的正相关。自动气体分析仪的出现,使得在运动实践中用直接法测定最大摄氧量成为现实。也使得最大摄氧量这一指标在运动科研和实践中的应用更加广泛和深入。目前,运动员最大摄氧能力的研究与应用仍然是运动生理学的重要课题。

(二) 对氧债学说的再认识

氧债学说是希尔(Hill)、梅耶霍夫(Meyerhof)和马格利亚(Margria)等人在 20 世纪二三十年代创立和完善的。传统的氧债理论认为:在进行剧烈的运动时,由于机体所提供的氧不能满足运动的需要,此时机体要进行无氧代谢,产生大量乳酸,从而形成氧债。在恢复期机体仍然要保持较高的耗氧水平,以氧化乳酸,偿还氧债。多年来氧债理论曾是运动生理学的重要理论支柱。

自从 20 世纪 80 年代中期一些运动生理学家展开了对氧债、氧亏和无氧阈这三个概念的争论后,引起了更多人对大强度运动后,体内是否缺氧问题的关注与兴趣。彭奇(Bang)、布鲁克斯(Brooks)、盖塞(Gasser)和哈立斯(Haris)等人的研究表明,人体在从事短时间大强度的力竭性运动之后的恢复早期,血乳酸浓度是持续升高的,而此



时的耗氧量却已恢复到安静时的水平；在从事长时间力竭性运动过程中血乳酸就已经达到峰值，并且在随后的运动过程中渐趋降低，在运动之后的恢复期继续降低到安静时的水平，而此时的耗氧量却高于安静时的水平。表现出乳酸和运动后的额外氧耗没有线性关系。从而证明了“氧债”概念的不正确性，提出了用“运动后过量氧耗(EPOC)”概念。

(三) 关于个体乳酸阈的研究

人体运动时，随着运动强度的逐渐增大，血乳酸水平会持续升高，当运动强度增至最大摄氧量的60%左右时，血乳酸开始明显升高，这个血乳酸的拐点被称为“无氧阈”。亚极限负荷运动时，肌肉组织因缺氧导致乳酸的产生是无氧阈理论建立的基础。即认为这个拐点意味着肌肉开始缺氧，由有氧供能开始向无氧供能过渡。但是有很多证据表明，在亚极限运动时，缺氧并不是肌肉产生乳酸的真正原因，因此一些运动生理学家提出，要用乳酸阈代替无氧阈的概念。

乳酸阈(LAT)的概念是根据血乳酸浓度变化和运动强度变化的关系而提出的。当运动强度逐渐加大时，血乳酸的变化出现两个非线性的拐点，即：当血乳酸为2mmol/L(毫摩尔/升)左右出现第一个拐点；当4mmol/L左右出现第二个拐点。目前，在国内外广泛地用血乳酸为4mmol/L作为乳酸阈值。

Stegmann 和 Kinderman 等人认为，乳酸阈没有考虑运动时乳酸动力学的个体特点。由于血乳酸拐点存在很大的个体差异，他们根据运动时和运动后血乳酸的动力学特点，求出每个受试者的乳酸阈值，并称此为个体乳酸阈(ILAT)，因而提出了个体乳酸阈的概念。由于个体乳酸阈的改善并依赖于最大摄氧量的提高，因此它是决定极限下运动能力的一个重要指标。实践证明，个体乳酸阈训练是提高极限下强度运动能力的最佳手段，为此受到广大教练员和运动员的青睐。目前，研究运动员在运动过程中的个体乳酸阈的变化，用个体乳酸阈指导运动训练已成为运动生理学和运动生物化学的重要研究课题。

(四) 关于运动性疲劳的研究

自1880年莫索(Mosso)研究人类疲劳开始，运动性疲劳就成为运动生理学和运动医学的核心问题之一。

卡波维奇(Karpovich)把疲劳定义为：“疲劳是工作本身引起工作能力下降的现象。”1982年第五届国际运动生化学术会议，将疲劳定义为：“机体的生理过程不能维持其机能于一特定水平上和(或)不能维持预定的运动强度。”从上述的定义中可以看出，疲劳是一种机体的整体机能水平或工作效率降低的生理现象，应同疾病和运动训练中的过度训练相区别。运动性疲劳是一个特别复杂的生理过程。它是由运动引起的全身多器官和系统机能变化的综合结果。因此，必须从整个机体的角度来考虑这一问题。

运动性疲劳可分为中枢疲劳和外周疲劳。从中枢到骨骼肌细胞再到细胞内的物质代谢过程，中间任何一个环节或这些过程综合变化，都可造成疲劳。近年来提出的疲劳控制链或运动性疲劳突变理论，都力图从多方面说明运动性疲劳的发生原因，使运动性疲劳的理论更完善，以便更科学地掌握消除疲劳的方法。



目前,对运动性疲劳产生机制的认识已从单纯的能量消耗或代谢产物的堆积,向多因素综合作用的认识发展。研究水平也已由细胞、亚细胞的结构与功能变化深入到生物分子或离子水平。

(五) 关于运动对自由基代谢影响的研究

1956年 Harman 在分子生物学的基础上提出了自由基学说,认为在生物体内进行的新陈代谢过程中会产生一些副产品,这些副产品称为自由基。自由基又称为游离基,系指外层轨道上含有一个或一个以上未配对电子的分子、原子、离子或基团。

Dillard 和 Davies 等人的研究证实,急性剧烈运动可使体内自由基的浓度增加。自由基增加可能同下列几个因素有关:一是剧烈运动时体内的代谢过程加强,氧自由基的生成增加;其次是剧烈运动时,乳酸的堆积抑制了清除自由基酶的活性,使自由基清除率下降;第三是由于运动时体内有些物质可自动氧化而生成自由基,如儿茶酚胺类、还原型细胞色素 C、血红蛋白、肌红蛋白等物质在剧烈运动时均可自动氧化而生成自由基。

运动引起体内自由基含量增多,会导致脂质过氧化反应加强,而对组织和细胞造成损伤。这些损伤表现在下列几个方面:①运动性贫血和血红蛋白尿。剧烈运动时红细胞内氧合血红蛋白自动氧化速率加强,从而产生大量自由基,使红细胞膜脂肪质过氧化,降低了细胞膜的变形能力,脆性增加,导致红细胞溶血,最终发生血红蛋白尿和运动性贫血。②造成肌肉疲劳。剧烈运动后,过多的自由基可攻击肌纤维膜和肌浆网膜,使其完整性受到破坏,造成一些离子的转运与代谢紊乱。另外也可以使线粒体的呼吸链受到破坏,使 ATP 的生成发生障碍,导致肌肉的工作能力下降,加速疲劳过程的发展。③延迟性肌肉酸痛。目前已有证据显示,延迟性肌肉酸痛与自由基损伤有关。

研究表明,有氧运动可提高体内的抗氧化酶的活性,可有效地清除运动过程中产生的过量自由基。另外可以补充外源性抗氧化剂,如维生素 E、维生素 C 及一些中药也可有效地提高人体抗氧化能力。

(六) 运动对骨骼肌收缩蛋白机构和代谢的影响

超过习惯负荷的运动训练或体力劳动能引起骨骼肌延迟性酸痛(Delayed-Onset Muscular Soreness, DOMS)、肌肉僵硬、收缩和伸展功能下降及运动成绩降低,因而受到生理学家和运动生理学研究人员的高度重视。他们对运动后骨骼肌延迟性酸痛产生机制进行了深入的研究,并提出了“组织撕裂”“痉挛”等假说。进一步的研究表明,运动后产生肌肉酸痛与肌肉损伤或肌纤维的结构改变有关。有的学者把运动引起的骨骼肌超微结构改变称为运动性肌肉损伤(Exercise induced muscle damage, EIMD),对肌肉损伤时的收缩蛋白骨架蛋白变化、肌肉损伤的变化阶段和损伤后的肌肉修复与再生等问题进行了大量研究。

卢鼎厚等人还针对大负荷运动后骨骼肌超微结构改变,尝试用针刺和静力牵张促进超微结构变化的恢复和缓解肌肉酸痛。为了探讨大负荷运动后骨骼肌超微结构变化的机理,运动生理学家还对大负荷运动后骨骼肌蛋白代谢进行了研究。

目前,利用电子显微镜、免疫电镜、微电极、色谱分析、同位素示踪、核磁共振和多聚酶链式反应(Polymerase Chain Reaction, PCR)技术先进的实验仪器和技术,通过观察大负荷运动后肌细胞内 Ca^{2+} 等离子浓度、自由基水平、酶活性、生物膜的机能、亚细胞结构和功能、收缩蛋白的代谢和基因表达等指标的变化,分析研究大负荷运动后骨骼肌机能变化,以及促进骨骼肌的机能恢复的生理机制,将运动对骨骼肌机能影响的研究提高到一个崭新的阶段。

(七) 关于肌纤维类型的研究

让威尔(Ranvier 1883)用电刺激法证明红肌、白肌的收缩机能不同。之后人们用组织学、生理学、组织化学及生物化学等方法,对动物骨骼肌纤维的结构、机能和代谢特征等进行了较为全面的研究。在组织化学、超微观察与分析技术广泛应用于体育科研的基础上,伯格斯特龙(Bergstrom 1962)创造了活检技术,使得对运动员骨骼肌的肌纤维类型的研究有了长足进展。对运动员骨骼肌中快肌、慢肌纤维的分布、机能及代谢特点等进行了较为广泛的研究,并且将这些研究的结果广泛地应用到运动实践中。例如,结合运动项目特点,根据不同类型肌纤维在运动中的募集程度指导运动训练;开创了无损测定肌纤维类型的方法;在了解各种运动项目运动员的肌纤维组成特点的基础上,为运动选材服务等。

目前,在肌纤维类型研究方面的主要任务是继续深入地研究快肌与慢肌纤维的机能和代谢特征,运动对运动员肌纤维类型组成的影响,不同类型肌纤维在运动中的参与程度,以及肌纤维类型这一指标在运动选材中的应用等。

(八) 运动对心脏功能影响的研究

1975年德国学者罗斯特(Rost)首先把超声心动图应用于运动人体科学的研究中,使得对运动员心脏功能的研究提高到一个新的阶段。用超声心动图研究运动员心脏功能具有操作简单、安全、无损伤、重复性好等优点。因此,国内外许多运动生理学学者都采用此法对各类运动员的心脏功能进行了研究。特别是对超声心动图图形分析的计算机系统的出现,使得对运动员心脏形态结构的研究、心脏泵血功能的研究以及心脏运动过程中心肌血液供应的研究更加依靠超声心动图。

1984年,心钠素(Atrial Natriuretic Polypeptide)的发现,从分子水平内分泌方面改变了人们对心脏的传统认识,证明心脏不仅是一个循环器官,而且还是人体内一个重要的内分泌器官,心脏所分泌的心钠素具有利钠、利尿和舒张血管等作用。近年来发现,心脏不仅是心钠素的分泌器官,同时也是心钠素作用的靶器官之一,长时间耐力性训练所导致的心率减慢及血压降低都与心钠素的作用有关。

(九) 运动与控制体重

目前,肥胖已经成为影响人类健康的世界性问题。有关运动与控制体重的研究越来越受到运动生理学工作者的重视。有关运动控制体重的研究主要集中于引起肥胖的机理、肥胖的评价方法、运动减肥方法和运动减肥机理等方面。

近年来,运动生理学界对肥胖机制以及运动减肥机理的研究较多,研究内容也日益加深,主要集中在肥胖的中枢调定点机制和神经内分泌机制方面。

研究表明,单纯运动或单纯节食的减肥效果不如运动加节食。限制能量摄入结合有氧运动是最佳减肥方案。有大肌肉群参加的长时间、中等强度运动能量消耗多,且不会引起运动性损伤,因此能有效地达到减肥目的。一般减肥运动的运动后即刻心率达到自身最高心率的70%~80%,运动时间为20分钟左右或更长,每周运动3~4天。常用的减肥运动方式有慢跑、越野跑、自行车、健美操和游泳等。

(十) 运动与免疫机能

运动对人体免疫机能的影响是近年来运动生理学十分关注的课题之一。虽然人们习惯地认为运动员抗病能力高于一般人,但科学研究却显示,运动员和非运动员安静状态下的免疫机能没有显著差异。大量的研究表明,适当的运动对免疫机能有良好的影响。中等强度运动能提高人体的免疫机能,增强抗病能力。

尽管适当的中等强度运动可以提高人体的免疫机能,但越来越多的研究表明,大负荷运动后,人体的免疫机能却下降。而且,运动强度越大,持续时间越长,对机体免疫学机能下降越明显。大负荷运动后,由于人体的免疫机能下降,病毒和细菌易侵入人体而发病。因此有学者提出了运动后免疫机能变化的“开窗(open windows)”理论。

由于运动形式的多种多样,而且影响人体免疫机能的因素很多,造成运动对人体的免疫机能影响的多样性。可以预言,在相当长的时间内,运动对人体免疫机能的影响仍然是运动生理学要研究的重要课题。

第六节 运动生理学的发展趋势

运动生理学的发展与科学技术的发展密切相关,在世界科学技术迅速发展的今天,运动生理学的发展具有如下的趋向。

一、微观水平研究不断深入

随着研究的不断深入和研究手段的不断提高,运动生理学研究从宏观水平研究深入到细胞和分子的微观水平。例如,在对骨骼肌的研究中,对骨骼肌纤维在大负荷运动后超微结构变化、蛋白代谢和细胞内离子浓度变化,以及自由基变化和酶的氧化反应等进行了较广泛的研究。而且微观水平的研究正不断向纵深发展。

二、宏观水平研究更加发展

提示在运动中人体的整体机能变化和运动对整个人体的影响是运动生理学研究的最終任务。虽然进行细胞、分子水平研究的优点是可直接、客观地研究分析某一生理现象



的机制,但是只能得到一些零散的生理生化指标,解释一些孤立的微观生理现象,或揭示一些相互独立的生理机能的成因。因此,在运动生理学研究中,必须在宏观研究的指导下,开展深入的微观研究,然后再将微观研究的结果进行综合分析,在整体水平上分析人体的机能变化及其规律,为运动实践服务。

三、研究方法日益创新

随着科学技术的发展,许多新仪器、新技术和新的研究方法应用到运动生理学的研究中。用核磁共振(NMR)光谱技术,可测定ATP、CP、Pi、H⁺、pH、水、脂肪和代谢物的浓度,在测定时具有无损伤、无疼痛和连续测试等特点。可用核磁共振光谱技术获得身体的某个横断面的影像。因此,核磁共振技术在对人体运动时的代谢、疲劳及身体成分等研究中将发挥重要作用。阳离子放射技术(PET)对研究局部血流和物质代谢具有较大潜力,应用阳离子放射技术不仅能获得有关组织的影像,同时可得到组织摄取、物质代谢和衰变的大量资料。此技术在体育科研中也具有广阔的应用前景。质谱分析技术可用来分析运动员运动过程中的呼出气的气体成分,研究运动时的能量代谢等。另外,放射免疫技术、高效液相色谱技术、超声诊断技术和PCR技术等也将在体育科研中发挥重要作用。

计算机技术在运动生理学研究中的应用对运动生理学的发展起到了巨大的推动作用。计算机图像分析处理技术的应用,使生物学图像的处理更加精确和方便,计算机模拟技术等也为运动生理学研究提供了新方法、开辟了新领域。而互联网技术的发展更为运动生理学工作者获取信息、进行学术交流提供了极大的方便。

另外,研究简易测试方法的科学性、准确性和可重复性,也受到了运动生理学工作者的关注。例如,间接测定最大摄氧量,间接推算肌纤维类型的百分比,用运动中的心率变化推算个体无氧阈等简易的运动生理学研究测试方法将进一步改进和发展。

四、应用性研究受到重视

运动生理学必须为运动实践服务。为此运动生理学的研究将在以下几个方面同运动训练紧密结合,如监测运动员的生理机能,合理安排运动负荷,探讨加速运动员机能恢复的手段等。

运动生理学在为运动实践服务的同时也在积极地加强运动健身的基础理论和应用的研究。这些研究包括:运动与免疫机能、运动与抗衰老、运动与身体成分、运动与心血管疾病等将在运动健身的基础理论研究中占有重要位置。在研究运动健身基础理论的同时,研究全民健身的方法,也将是运动生理学研究的重要课题。

五、研究领域不断扩大

近代自然科学的发展趋势是:一方面学科的划分有越来越细的趋向;另一方面各

学科的相互渗透和交错在学科发展上相互促进。运动生理学这门年轻的学科从一诞生起就与运动医学、生理学和运动生物化学等学科有着密切的联系。在细胞、分子水平的研究中,许多生化指标被用来解释生理现象。除此之外,运动生理学还同运动解剖学、运动医学、运动生物化学、运动生物力学、运动心理学、遗传学、生物学以及其他自然学科有着密切联系。而且这种联系正在日益加强。

在新的世纪,我国的运动生理学研究面向全民健身、而向运动实践、为提高我国国民的健康水平及提高运动成绩服务仍然是运动生理学工作者的神圣职责。而立足中国特色、坚持不断创新、迎接新的挑战、赶超世界水平则是我们奋斗的远大目标。

【思考题】

- 1.运动生理学的研究任务是什么?
- 2.生命活动的基本特征是什么?
- 3.人体生理机能是如何调节的?
- 4.人体生理机能调节的控制是如何实现的?
- 5.运动生理学的研究方法有哪些?
- 6.目前运动生理学研究的热点有哪些?

【主要参考文献】

- 1.张镜如等:《生理学》,第四版,北京,人民卫生出版社,1994。
- 2.钟国隆等:《生理学》,第三版,北京,人民卫生出版社,1998。
- 3.朱思明等:《医学生理学》,北京,人民卫生出版社,1998。
- 4.William D, Victor L: Exercise Physiology, Philadelphia, 1981.
- 5.Я.М.科查编,王步标等译:《运动生理学》,湖南,湖南师大出版社,1991。
- 6.杨锡让编著:《实用运动生理学》,北京,北京体育学院出版社,1986。
- 7.乔奇 A.布茹克司和汤姆士 D.法哈著,杨锡让等译:《运动生理学》,北京,北京体育学院出版社,1988。
- 8.Edward L.Fox: Sports Physiology, W.B.Saunders Company, 1979.

(北京体育大学 王瑞元)

第一章

骨骼肌机能

【提要】本章将首先介绍骨骼肌的超微结构，生物电的产生及神经冲动的传导、传递机制，阐明骨骼肌的收缩原理。在此基础上介绍骨骼肌不同收缩形式的生理特点和骨骼肌收缩的力学表现。在这一章里还将介绍骨骼肌肌纤维类型的划分；不同类型肌纤维的形态、生理学和生物化学特点；在不同负荷运动时不同类型肌纤维的动员，以及运动训练对肌纤维类型组成的影响；最后简单介绍肌电图在体育科研中的应用。

肌肉收缩是完整机体的主要活动形式之一，许多生理功能都藉此才得以实现。人体内的肌肉组织包括骨骼肌、心肌和平滑肌三种。在运动过程中，骨骼肌是人体运动的动力，其他器官和系统的机能改变都是为了保证骨骼肌的收缩顺利进行。

第一节 肌纤维的结构

肌细胞（又称肌纤维）是肌肉的基本结构和功能单位。成人肌纤维直径约 60 微米（ μm ），长度为数毫米到数十厘米。每条肌纤维外面包有一层薄的结缔组织膜，称为肌内膜。许多肌纤维排列成束（即肌束），表面被肌束膜包绕。许多肌束聚集在一起构成一块肌肉，外面包以结缔组织膜，称为肌外膜。

每一块肌肉的中间部分一般膨大而称为肌腹，两端为没有收缩功能的肌腱。肌腱直接附着在骨骼上。骨骼肌收缩时通过肌腱牵动骨骼面产生运动。

一、肌原纤维和肌小节

每个肌细胞含有数百至数千条与肌纤维长轴平行排列的肌原纤维。肌原纤维的直径约 1~2 微米，纵贯肌细胞全长。每条肌原纤维的全长都由暗带（A 带）和明带（I 带）呈交替规则排列，在显微镜下呈现有规律的横纹排列，故骨骼肌也称横纹肌（图 1-1）。

肌原纤维由粗、细两种肌丝按一定规律排列而成。实际上由于粗肌丝的存在而形成了 A 带。细肌丝连接于 Z 线，纵贯 I 带全长，并伸入 A 带部位，与粗肌丝交错对插。在一个肌小节中，来自两侧 Z 线的细肌丝在 A 带中段未相遇而隔有一段距离，即为 H 区，此时 H 区的肌丝成分只有粗肌丝，而 H 区以外的 A 带中，粗、细肌丝并存，当肌肉被动拉长时，肌小节长度增大，此时细肌丝从暗带重叠区拉出，使 I 带长度增大，H 区也相应增宽（图 1-2）。

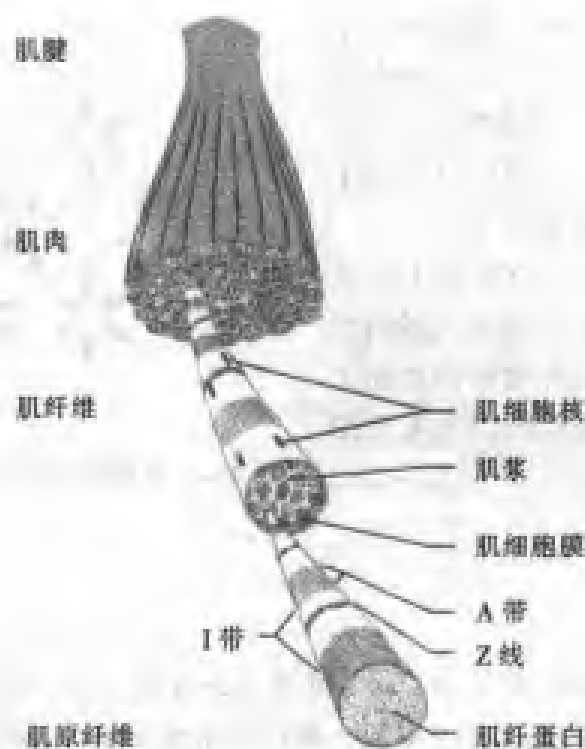


图 1-1 骨骼肌超微结构示意图
(依 Donald K. Mathews and Edward L. Fox)

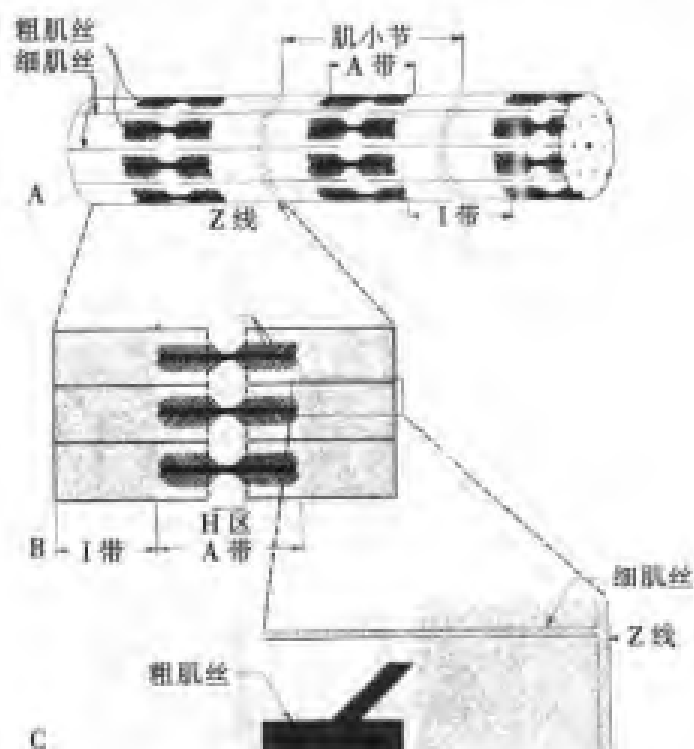


图 1-2 肌原纤维的结构示意图

- A: 一段肌原纤维结构示意图, A 带由粗肌丝和细肌丝组成。
 B: 一个肌小节的放大结构示意图, 粗肌丝上有伸向细肌丝的横桥结构, H 区没有细肌丝。
 C: 横桥的超微结构示意图。

(依 Donald K. Mathews and Edward L. Fox)



两条Z线之间的结构是肌纤维最基本的机构和功能单位，称为肌小节(sarcomere)。肌小节的长度变化范围为1.5~3.3微米，肌肉收缩时较短，舒张时较长，肌肉安静时肌小节的长度约为2.0~2.2微米(见图1-2)。

粗、细肌丝相互重叠时，在空间上呈现严格的规则排列，每一根粗肌丝被六根细肌丝所包围。粗、细肌丝间这种密切的空间关系，为肌细胞收缩时粗、细肌丝的相互作用创造了条件(图1-3)。

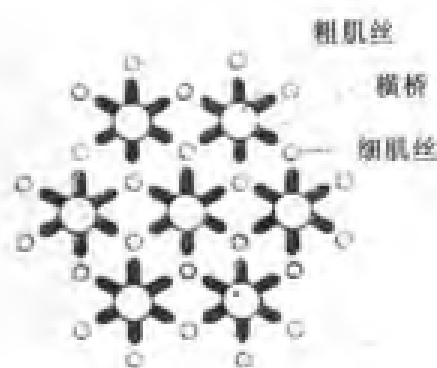


图1-3 粗肌丝和细肌丝的空间排列示意图

二、肌管系统

肌原纤维间有两种不同的小管系统，即横小管系统和纵小管系统。这些肌管系统是骨骼肌兴奋引起收缩耦联过程的形态学基础。横小管系统(transverse tubular system, 又称T-system)是肌细胞膜从表面横向伸入肌纤维内部的膜小管系统，纵小管系统(longitudinal tubular system)即肌质网(sarcoplasmic reticulum)系统。细胞内肌质网常围绕每条肌原纤维，形成花边样的网，其走行方向和肌纤维纵轴平行。肌质网在接近横小管处形成特殊的膨大，称为终池(terminal cistern)。每一个横小管和来自两侧的终末池构成复合体，称为三联管(triad)结构。横小管与纵小管的膜在三联管结构处并不接触，中间有约12纳米(nm)的间隙，故这两种小管的内腔并不相通(图1-4)。

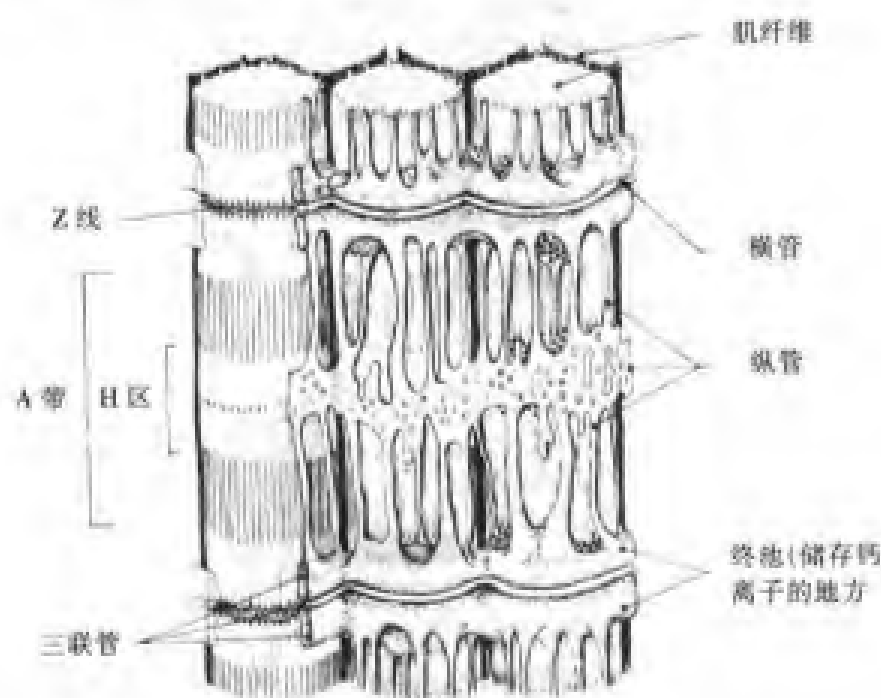


图1-4 肌管系统结构示意图

(依 Donald K. Mathews and Edward L. Fox)

三、肌丝的分子组成

蛋白质占肌肉干重的 75%~80%，与收缩机制有关的蛋白质占肌肉蛋白质的 50%~60%。肌细胞收缩的物质基础是粗、细蛋白质肌丝。

(一) 粗肌丝

粗肌丝主要由肌球蛋白(myosin, 又称肌凝蛋白)组成。一条粗肌丝中约有 200 个肌球蛋白分子。每个肌球蛋白分子呈双头长杆状。许多肌球蛋白的杆状部分集束构成粗肌丝的主干, 其头部向外突出, 形成横桥(cross-bridge), 如图 1-5A 所示。横桥部具有 ATP (三磷酸腺苷)酶活性, 可分解 ATP 而获得能量, 用于横桥的运动。在一定条件下, 头部可与细肌丝上的肌动蛋白呈可逆结合。

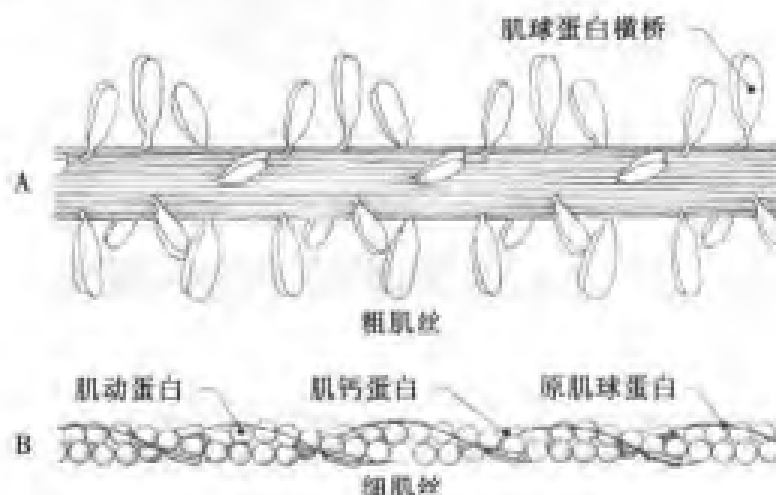


图 1-5 细肌丝与粗肌丝结构示意图
(依 Donald K. Mathews and Edward L. Fox)

(二) 细肌丝

细肌丝主要由肌动蛋白(actin, 又称肌纤蛋白)、原肌球蛋白(tropomyosin, 又称原肌凝蛋白)和肌钙蛋白(troponin, 又称原宁蛋白)组成(图 1-5B)。

1. 肌动蛋白

肌动蛋白单体呈球状(称 G-肌动蛋白)。许多 G-肌动蛋白单体以双螺旋聚合成纤维状肌动蛋白(F-肌动蛋白), 构成细肌丝的主干(见图 1-5B)。

2. 原肌球蛋白

原肌球蛋白也呈双螺旋状, 位于 F-肌动蛋白的双螺旋沟中并与其松散结合。在安静状态下, 原肌球蛋白分子位于肌动蛋白的活性位点之上, 阻碍横桥与肌动蛋白结合。

每个原肌球蛋白分子大约掩盖 7 个活性位点(见图 1-5B)。

3. 肌钙蛋白

肌钙蛋白是含有三个亚单位的复合体。亚单位 I、亚单位 T 和亚单位 C 分别对肌动蛋白、原肌球蛋白和 Ca^{2+} 具有高亲和力。肌钙蛋白的作用之一是把原肌球蛋白附着于肌动蛋白上。当细胞内 Ca^{2+} 浓度增高时, 肌钙蛋白亚单位 C 与 Ca^{2+} 结合, 引起整个肌钙蛋白分子构型改变, 进而引起原肌球蛋白分子变构, 暴露肌动蛋白分子上的活性位点使肌动蛋白与横桥得以结合(图 1-6), 最终导致肌纤维收缩。



图 1-6 Ca^{2+} 通过和肌钙蛋白结合, 诱发横桥和肌动蛋白之间的相互作用

第二节 骨骼肌细胞的生物电现象

一切活组织的细胞都存在电活动, 这种电活动称为生物电 (bioelectricity)。生物电现象是一种普遍存在又十分重要的生命现象。可兴奋组织细胞在受到刺激发生兴奋时, 出现一种称为动作电位 (action potential) 的电变化。动作电位在组织细胞产生其他生理反应之前发生, 对其他反应起着先导和触发作用。因此, 将动作电位的出现作为可兴奋组织细胞兴奋的标志, 并且将组织细胞产生动作电位的能力称为兴奋性。利用适当的仪器设备, 可以将动作电位记录下来。临床上和运动人体科学研究中广泛应用的心电图 (ECG)、脑电图 (EEG) 和肌电图 (EMG) 就是所记录的各相应组织细胞动作电位的综合电位变化。生物电在运动人体科学研究中的应用也非常广泛。如应用心电图评定运动员的心脏功能; 利用脑电图评定在运动过程中大脑的机能变化; 利用肌电图评定骨骼肌的机能和运动技术分析等。本节将对静息电位、动作电位及动作电位的传导进行叙述。

一、静息电位

(一) 静息电位的概念

细胞处于安静状态时, 细胞膜内外所存在的电位差称为静息电位 (resting potential)。这种电位差存在于细胞膜两侧, 所以又称跨膜电位, 或简称膜电位 (membrane

potential)。静息电位相对恒定，据测定，哺乳类动物神经细胞的静息电位绝对值约为70~90mV(毫伏)。若以细胞膜外电位为零，细胞膜内电位则为-70~-90mV(图 1-7)。

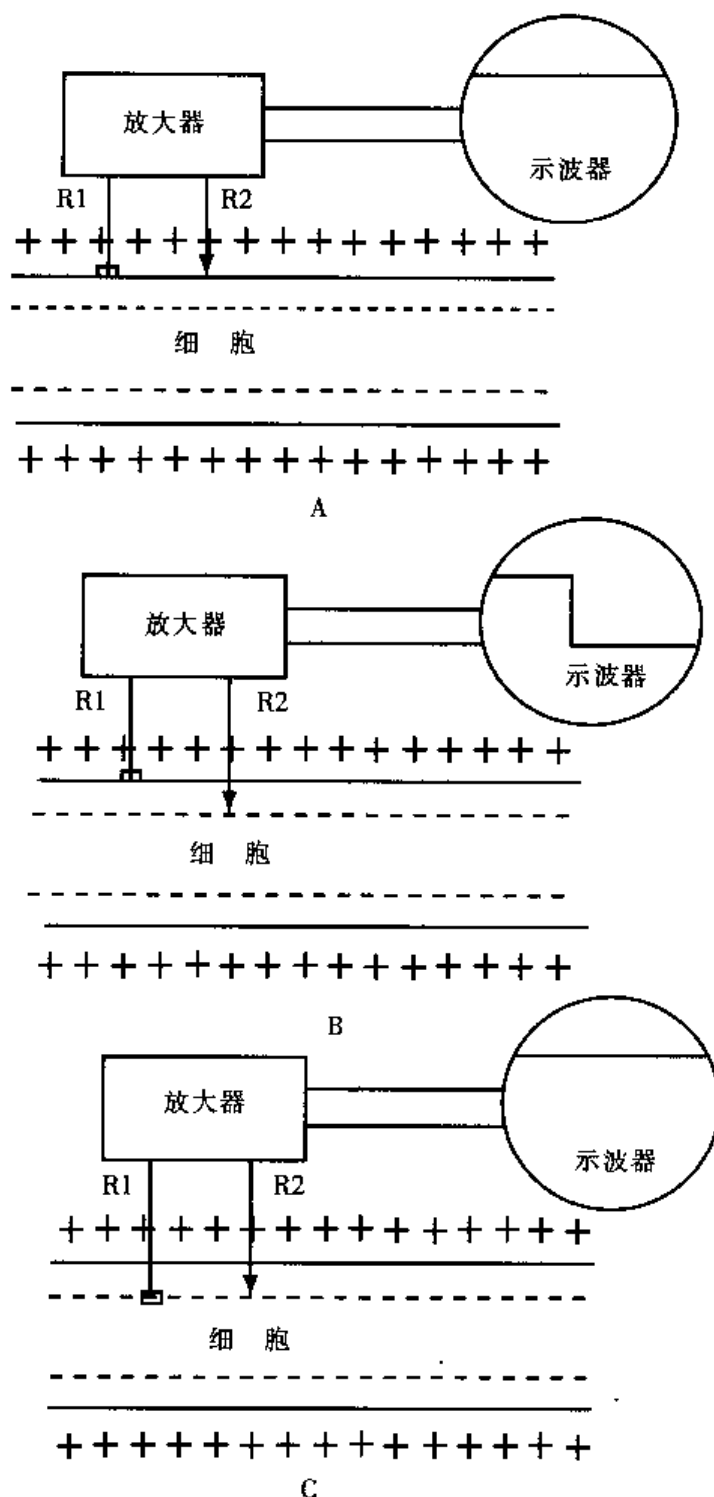


图 1-7 静息电位测试示意图

A: 电极 R1 与 R2 置于细胞膜外，由于两个电极之间没有电位差，在示波器上只显示出一条直线。B: 电极 R1 置于细胞膜外，电极 R2 置于细胞膜内，由于两个电极之间存在电位差，当 R2 插入神经细胞的瞬间，示波器上会立即显示出电位变化。C: 电极 R1 与 R2 置于细胞膜内，此时两个电极之间同样没有电位差，在示波器上也只显示出一条直线。



(二) 静息电位产生原理

静息电位产生原理可以用“离子学说”来解释。离子学说认为：①细胞内外各种离子的浓度分布是不均匀的。②细胞膜对各种离子通透具有选择性。由于神经细胞和骨骼肌细胞静息电位与动作电位的产生原理相似，下面就以神经细胞为例叙述静息电位与动作电位的产生原理。哺乳类动物神经细胞内的 K^+ 浓度高于细胞外 28 倍(表 1-1)，而 Na^+ 、 Cl^- 细胞外浓度分别高于细胞内 13 和 30 倍。另外细胞内的负离子主要是大分子有机负离子，如蛋白质等(以 A^- 表示)。因此，如果细胞膜允许离子自由通过的话，它们将以扩散的方式顺浓度梯度产生 K^+ 和 A^- 的外流(由细胞内向细胞外流动)以及 Na^+ 和 Cl^- 的内流(由细胞外向细胞内流动)。但是细胞膜对离子的通透是有选择的。当细胞处于静息状态时，细胞膜对 K^+ 的通透性大，而对 Na^+ 的通透性较小，仅为 K^+ 通透性的 $1/100 \sim 1/50$ ，面对 A^- 则几乎没有通透性，所以就形成在静息时 K^+ 向细胞外流动。离子的流动必然伴随着电荷的转移，结果使细胞内因丧失带正电荷的 K^+ 而电位下降，同时使细胞外因增加带正电荷的 K^+ 而电位上升，这就必然造成细胞外电位高而细胞内电位低的电位差。所以， K^+ 的外流是静息电位形成的基础。随着 K^+ 外流，细胞膜两侧形成的外正内负的电场力会阻止细胞内 K^+ 的继续外流，当促使 K^+ 外流的由浓度差形成的向外扩散力与阻止 K^+ 外流的电场力相等时， K^+ 的净移动量就会等于零。这时细胞内外的电位差值就稳定在一定水平上，这就是静息电位。由于静息电位主要是 K^+ 由细胞内向细胞外流动达到平衡时的电位值，所以又把静息电位称为 K^+ 平衡电位。

表 1-1 哺乳动物神经轴突膜内外的离子浓度 (mmol/L)

	K^+	Na^+	Cl^-
细胞膜内	140	10	4
细胞膜外	5	130	120
膜内外浓度比	28:1	1:13	1:30
离子流动方向	膜内流向膜外	膜外流向膜内	膜外流向膜内

二、动作电位

(一) 动作电位的概念

可兴奋细胞兴奋时，细胞内产生的可扩布的电位变化称为动作电位(action potential)。动作电位是一个连续的电位变化过程。另外，它在细胞的某一部位一旦产生，就会迅速向四周扩布。动作电位是在静息电位的基础上产生的电位变化。

(二) 动作电位的变化过程

以神经轴突为例，把用细胞内记录法所得到的动作电位变化过程简述如下(图 1-8)。

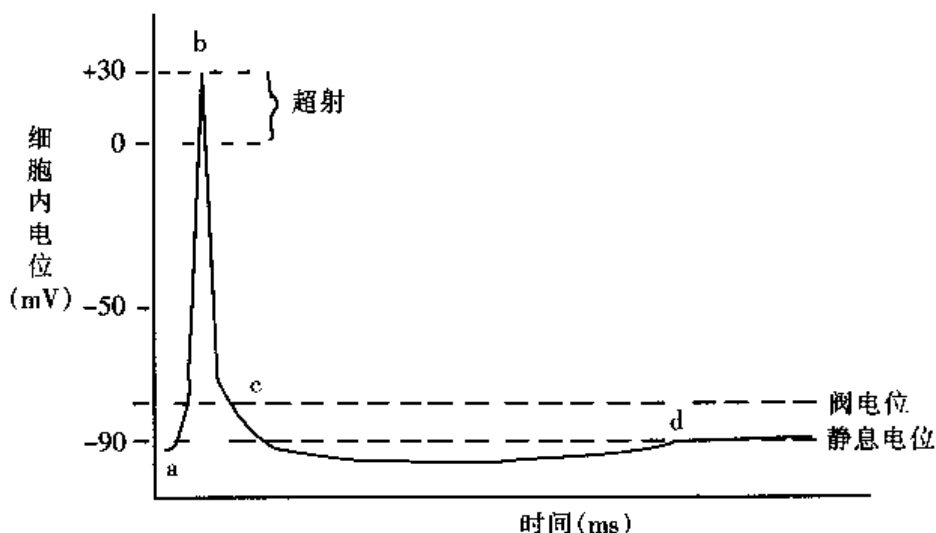


图 1-8 动作电位示意图(细胞内记录)

ab: 动作电位的上升支 bc: 动作电位的下降支
abc: 动作电位的锋电位 cd: 动作电位的后电位

1. 静息相

在静息时细胞处于极化状态。所谓极化状态是指细胞膜内外存在外正内负的电位差，即静息电位的状态。这是动作电位的初始状态。

2. 去极相

神经细胞感受刺激后，在静息电位基础上受刺激处的细胞膜会立刻爆发一次快速而连续的电位变化。首先静息电位的绝对值很快减小到零，进而膜电位发生反转，由原来的外正内负转变为外负内正，由原来 -90mV 反转到约 $+30\text{mV}$ ，电位变化的幅度约为 120mV ，形成动作电位曲线的上升支(图 1-8ab)。上升支进行的时间很短，大约在 0.5 毫秒(ms)内完结。细胞膜的静息电位由 -90mV 减小到 0mV 的过程被称为去极化(depolarization phase)，去极化是膜电位消失的过程；细胞膜电位由 0mV 转变为外负内正的过程称为反极化。反极化的电位幅度称为超射(over shoot)。

3. 复极相

动作电位的上升支很快从顶点($+30\text{mV}$)快速下降，膜内电位由正变负，直到接近静息电位的水平，形成曲线的下降支(图 1-8bc)，称为复极化时相(repolarization phase)。所谓复极化是指在去极化的前提下膜极化状态的恢复。

动作电位的上升支和下降支持续时间都很短，历时不超过 2.0 毫秒。所记录下来的图形很尖锐，因此称为锋电位(spike potential)，如图 1-8abc 所示。锋电位之后还有一个缓慢的电位波动，这种时间较长波动较小的电位变化过程称为后电位(after potential)，如图 1-8cd 所示。它是膜电位恢复到静息电位前的微小波动。后电位完结后细胞膜电位才完全恢复到静息电位水平。

动作电位是在静息电位基础上爆发的一次电位快速上升又快速下降以及随后的缓慢



波动过程。它包括锋电位和后电位两种电位变化，或者说包括去极化和复极化两个时相。其中锋电位特别是它的上升支是动作电位的主要成分。一般所说的动作电位就是指锋电位而言。

在动作电位过程中，神经细胞的兴奋性也发生相应的变化。兴奋性变化分为绝对不应期、相对不应期、超常期和低常期。从时间关系来说，锋电位相当于细胞的绝对不应期，后电位的前段相当于相对不应期和超常期，后电位的后段相当于低常期(图 1-9)。

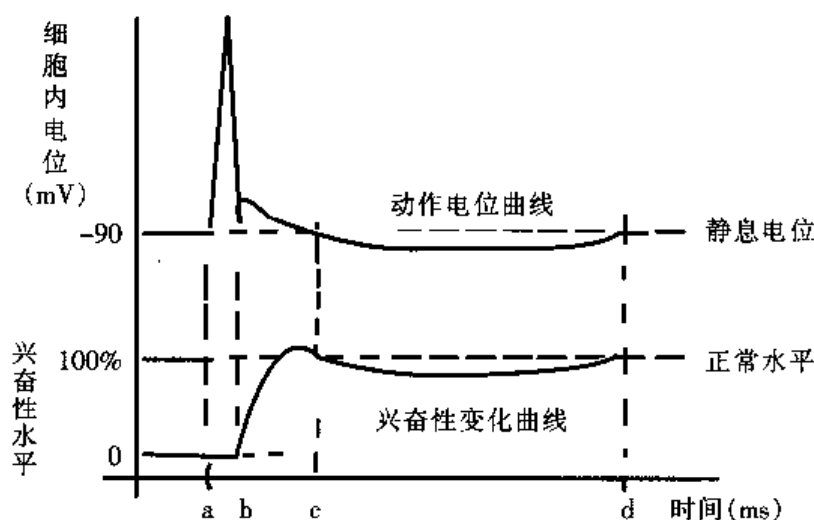


图 1-9 动作电位变化与兴奋性变化之间的关系

ab: 锋电位—绝对不应期

bc: 后电位前部—相对不应期、超常期

cd: 后电位后部—低常期

动作电位有以下特点：①“全或无”现象。任何刺激一旦引起膜去极化达到阈值，动作电位就会立刻产生，它一旦产生就达到最大值，动作电位的幅度不会因刺激加强而增大。②不衰减性传导。动作电位一旦在细胞膜的某一部位产生，它就会向整个细胞膜传播，而且其幅度不会因为传播距离增加而减弱。③脉冲式。由于不应期的存在使连续的多个动作电位不可能融合，两个动作电位之间总有一定间隔。

(三) 动作电位的产生原理

动作电位的产生原理也可以用离子流学说来解释。由于 Na^+ 在细胞外的浓度比细胞内高得多，它有由细胞外向细胞内扩散的趋势。而离子进出细胞是由细胞膜上的离子通道来控制的。在安静时膜上 Na^+ 通道关闭。当细胞受到刺激时，膜上的 Na^+ 通道被激活而开放， Na^+ 顺浓度梯度瞬间大量内流，细胞内正电荷增加，导致电位急剧上升，负电位从静息电位水平减小到消失，进而出现膜内为正膜外为负的电位变化，形成锋电位的上升支，即去极化和反极化时相。当膜内正电位所形成的电场力增大到足以对抗 Na^+ 内流时，膜电位达到一个新的平衡点，即 Na^+ 平衡电位。与此同时， Na^+ 通道逐渐失活而关闭， K^+ 通道逐渐被激活而重新开放，导致 Na^+ 内流停止，产生 K^+ 快速外流，细胞内电

位迅速下降，恢复到兴奋前的负电位状态，形成动作电位的下降支，亦即复极化时相 (repolarization phase)。

三、动作电位的传导

动作电位一旦在细胞膜的某一点产生，就沿着细胞膜向各个方向传播，直到整个细胞膜都产生动作电位为止。这种在单一细胞上动作电位的传播叫做传导 (conduction)。如果发生在神经纤维上，动作电位的传导是双向的。

在无髓神经纤维上动作电位是以局部电流的形式进行传导的。如图 1-10A 所示，当 e 点发生动作电位时，膜出现反极化，即膜外负电位膜内正电位状态，而与之相邻的没有兴奋的部位仍然处在膜外为正膜内为负的状态。由于细胞外液和细胞内液都具有良好的导电性，而 e 点附近又有电位差存在，所以必然产生局部的电流流动，其流动的方向在膜外是由未兴奋点流向兴奋点 e，在膜内是由兴奋点 e 流向未兴奋点。这种局部流动的电流称为局部电流。局部电流流动的结果使与 e 点相邻的未兴奋点的膜内电位上升，而膜外电位下降，即产生膜去极化，从而触发邻近部位的膜产生动作电位。就这样兴奋部位的膜与相邻未兴奋部位的膜之间产生的局部电流不断地流动下去，就会使产生在 e 点的动作电位迅速地进行传播，一直到整个细胞膜都发生动作电位为止 (图 1-10B、C)。因此，动作电位的传导实质上是局部电流流动的结果。

有髓神经纤维外面包裹着一层电阻很高的髓鞘，动作电位只能在没有髓鞘的朗飞氏结处产生局部电流。因此动作电位是越过每一段带髓鞘的神经纤维呈跳跃式传导的 (图 1-10D)。因为，有髓神经纤维较粗大、电阻较小，而且动作电位的传导是跳跃式的，所以，动作电位在有髓神经纤维上的传导速度要比在无髓神经纤维上快得多。如人的粗大有髓神经纤维的传导速度超过每秒 100 米，而一些纤细无髓神经纤维的传导速度还不到每秒 1 米。

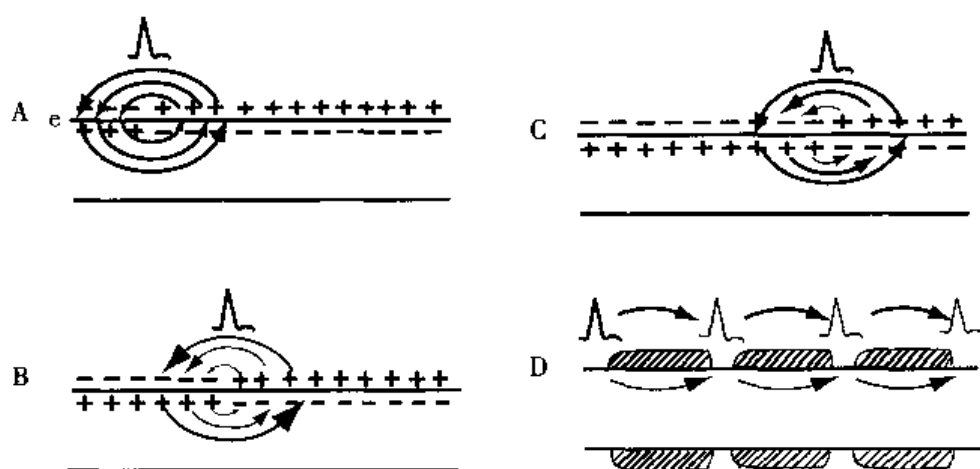


图 1-10 动作电位传导示意图

A、B、C：动作电位在无髓神经纤维上的传导过程，在无髓神经纤维上动作电位以局部电流的方式进行传导。D：动作电位在有髓神经纤维上的传导过程，在有髓神经纤维上动作电位呈跳跃式传导。



四、细胞间的兴奋传递

细胞间的兴奋传递有两种情况：一种是神经细胞之间的兴奋传递；另一种是神经细胞与肌细胞之间的兴奋传递。这两种传递过程有相似之处，在此仅对神经细胞与肌细胞之间的兴奋传递进行叙述。

（一）神经—肌肉接头的结构

神经—肌肉接头的结构又称为运动终板。运动神经的末梢发出许多细小分支，并且在终末部分膨大。此处的细胞膜较正常部位要厚些，被称为接头前膜(终板前膜)，与之相对应的骨骼肌细胞膜称为接头后膜(终板后膜)，接头前膜与接头后膜之间的间隙称为接头间隙(终板间隙)，如图 1-11 所示。

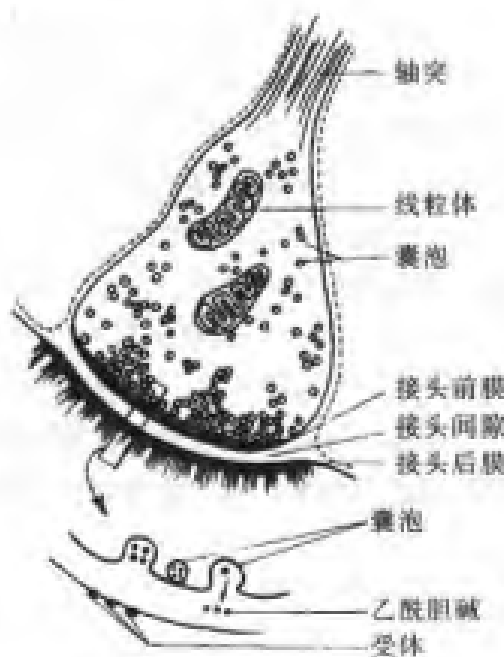


图 1-11 神经—肌肉接头示意图

（二）神经—肌肉接头的兴奋传递

如图 1-11 所示，当动作电位沿神经纤维传到轴突末梢时，引起轴突末梢处的接头前膜上的钙离子通道开放， Ca^{2+} 从细胞外液进入轴突末梢，促使轴浆中含有乙酰胆碱的突触小泡向接头前膜移动。当突触小泡到达接头前膜后，突触小泡膜与接头前膜融合进而破裂，将乙酰胆碱释放到接头间隙。乙酰胆碱通过接头间隙到达接头后膜后和接头后膜上的特异性的乙酰胆碱受体结合，引起接头后膜上的 Na^+ 、 K^+ 通道开放，使 Na^+ 内流， K^+ 外流，结果使接头后膜处的膜电位幅度减小，即去极化。这一电位变化称为终板电位(end-plate potential)。当终板电位达到一定幅度(肌细胞的阈电位)时，可引发肌细胞膜

产生动作电位，从而使骨骼肌细胞产生兴奋。

五、肌电

骨骼肌在兴奋时，会由于肌纤维动作电位的传导和扩布而发生电位变化，这种电位变化称为肌电。用适当的方法将骨骼肌兴奋时发生的电位变化引导、放大并记录所得到的图形，称为肌电图(Electromyogram, EMG)。

骨骼肌收缩时的肌电活动通过电极引导、生物放大器放大、显示器显示和计算机数据采集等过程，转变成成为可通过计算机进行计算和处理的数据，然后用适当的计算机软件进行分析处理，为医学诊断和科学研究提供可靠的依据。

采集肌电信号的电极有两种，一种是针电极，另一种是表面电极。用针电极采集肌电时需要将电极插入受试者的肌肉内，这会造成一定程度的损伤，故不适宜用于体育科学研究中。用针电极所引导记录的肌电图是运动单位电位，其波形可分为单相波、双相波、三相波和多相波(图 1-12)。在体育科学研究中一般用表面电极采集肌电信号。在记录时将电极贴于皮肤表面即可，不会造成损伤。用表面电极引导记录的肌电图往往是许多运动单位电位叠加而成干扰相肌电图(图 1-13)。

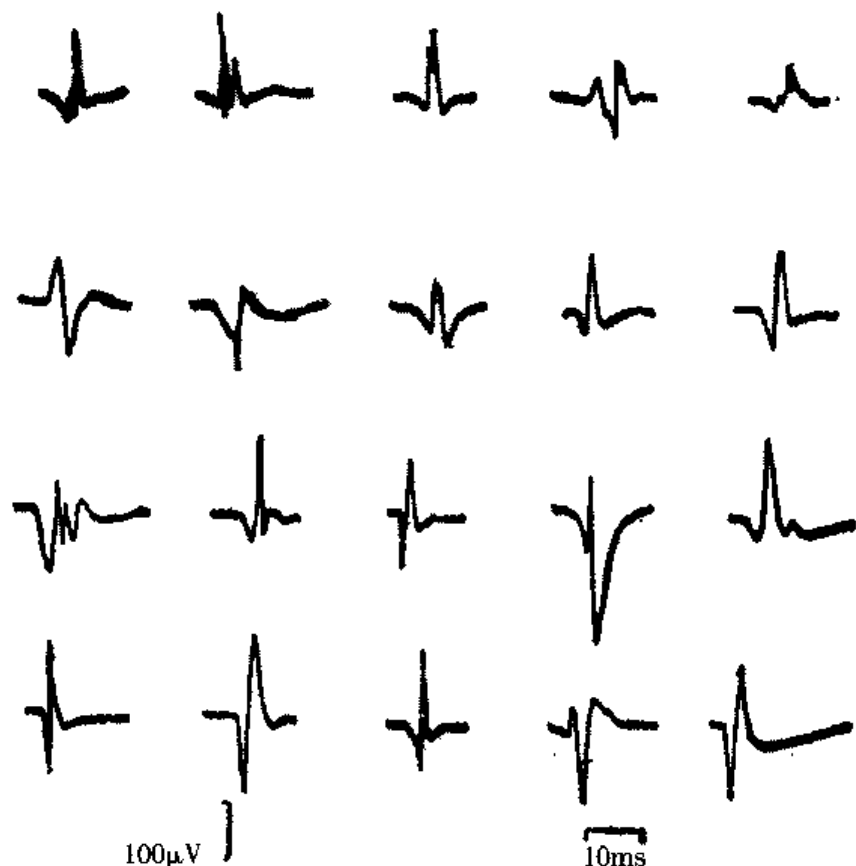


图 1-12 轻度用力时用针电极从 20 个不同部位记录到的
正常人肱二头肌的运动单位电位



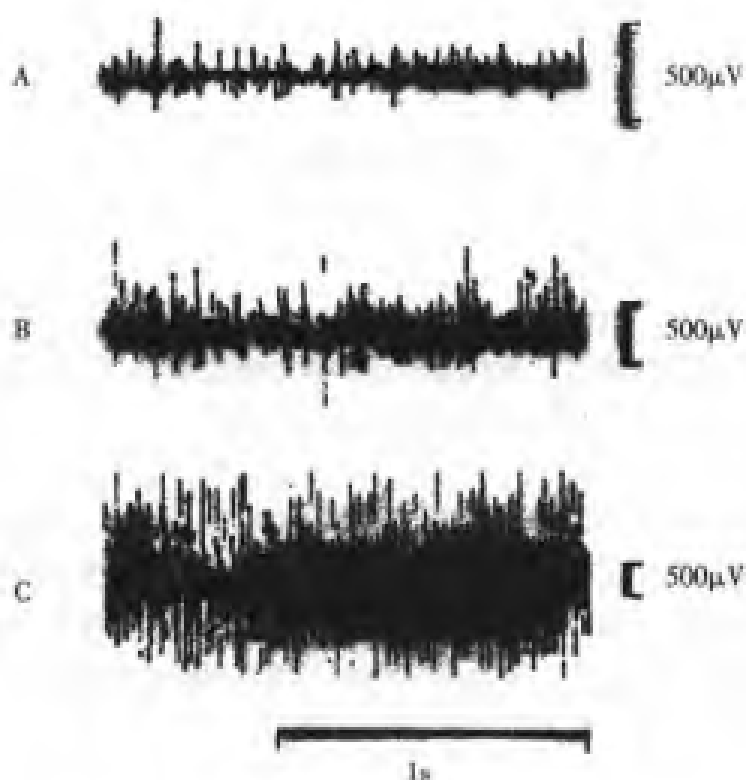


图 1-13 不同程度收缩时骨骼肌肌电图(表面电极引导)

- A 轻度用力收缩(单纯相)
- B 中度用力收缩(混合相)
- C 重度用力收缩(干扰相)

第三节 肌纤维的收缩过程

一、肌丝滑行学说

Huxley 等人发现,肌肉缩短时 A 带的长度不变,而 I 带和 H 区变窄。在肌肉被拉长时, A 带的长度仍然不变, I 带和 H 区变宽。同时发现,无论肌小节缩短或被拉长时,粗肌丝和细肌丝的长度都不变,但两种肌丝的重叠程度发生了变化。根据以上发现, Huxley 等人提出了滑行学说(sliding-filament theory)。滑行学说认为:肌肉的缩短是由于肌小节中细肌丝在粗肌丝之间滑行造成的。即当肌肉收缩时,由 Z 线发出的细肌丝在某种力量的作用下向 A 带中央滑动,结果相邻的各 Z 线互相靠近,肌小节的长度变短,从而导致肌原纤维以至整条肌纤维和整块肌肉的缩短(图 1-14)。

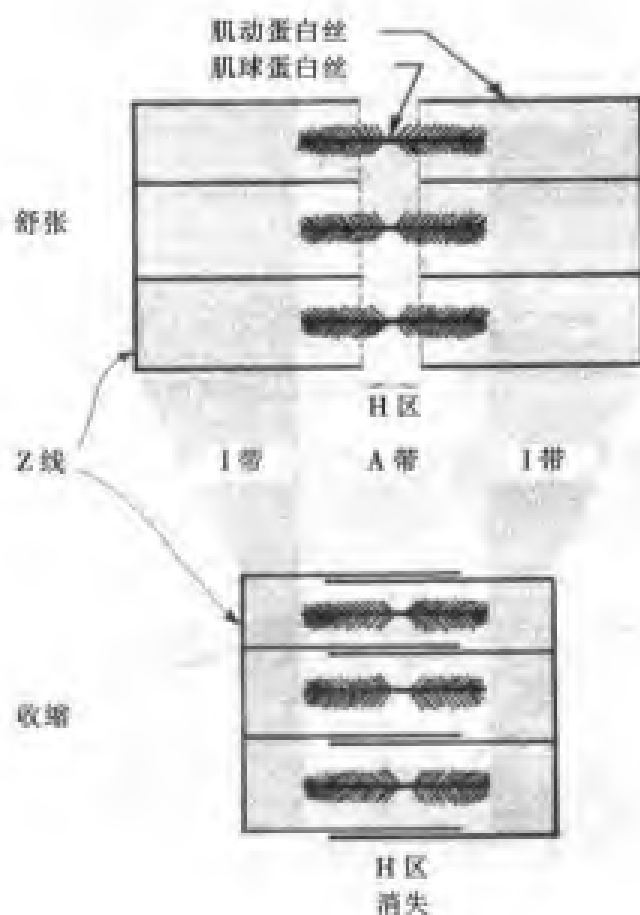


图 1-14 骨骼肌收缩示意图
(依 Donald K. Mathews and Edward L. Fox)

二、肌纤维收缩的分子机制

当运动神经上的神经冲动(动作电位)到达神经末梢时,通过神经-肌肉接头处的兴奋传递,使肌细胞膜产生兴奋。之后,肌质网向肌浆中释放 Ca^{2+} (肌质网中的 Ca^{2+} 浓度远远大于肌浆中的 Ca^{2+} 浓度),肌浆中的 Ca^{2+} 浓度瞬时升高。肌钙蛋白亚单位 C 与 Ca^{2+} 结合,引起肌钙蛋白的分子结构改变,进而导致原肌球蛋白的分子结构改变,原肌球蛋白滑入 F-肌动蛋白双螺旋沟的深部,肌动蛋白分子上的活性位点暴露。一旦肌动蛋白分子上的活性位点暴露,粗肌丝上的横桥即与之结合。横桥与肌纤维蛋白结合后会产生两种作用:①激活了横桥上的 ATP 酶,使 ATP 迅速分解产生能量,供横桥摆动之用;②激发横桥的摆动,拉动细肌丝向 A 带中央移动。然后,横桥自动与肌动蛋白上的活性位点分离,并与新的活性位点结合,横桥再次摆动,拖动细肌丝又向 A 带中央前进一步。如此,横桥头部前后往复地运动,一步一步地在细肌丝上“行走”,拖动细肌丝 A 带中央滑行。肌肉收缩时形成的横桥数目越多,肌肉的收缩力量也就越大(图 1-15)。



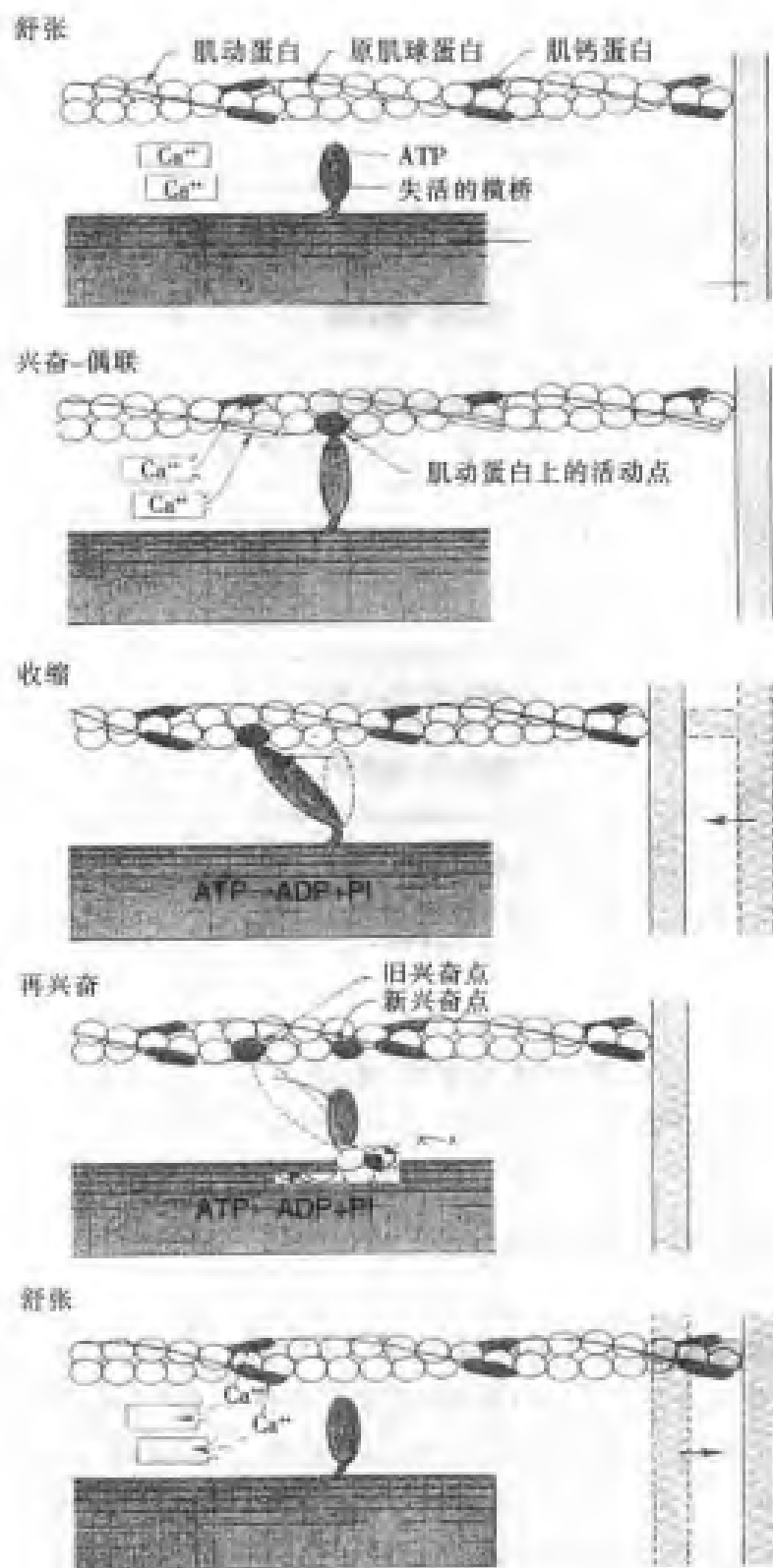


图 1-15 肌丝滑行原理示意图

肌肉舒张时原肌球蛋白掩盖了肌动蛋白上的结合位点，横桥不能与之结合；当 Ca^{2+} 与肌钙蛋白亚单位 C 结合时，肌钙蛋白和原肌球蛋白的构型发生改变，使肌动蛋白上被原肌球蛋白掩盖的结合位点暴露出来，横桥与之结合，并拉动细肌丝滑行，肌肉表现为收缩。

(依 Donald K. Mathews and Edward L. Fox)

当肌浆中的 Ca^{2+} 浓度升高时，肌浆网膜上的钙泵被激活。在钙泵的作用下，肌质网把 Ca^{2+} 泵入肌质网内，使肌浆中 Ca^{2+} 浓度降低， Ca^{2+} 与肌钙蛋白亚单位 C 分离，肌钙蛋白和原肌球蛋白恢复原先的构型，原肌球蛋白再次掩盖肌动蛋白上的活性位点，阻止横桥与肌动蛋白的相互作用，细肌丝回至肌肉收缩前的位置，肌肉表现为舒张。

三、肌纤维的兴奋—收缩耦联

通常把以肌细胞膜的电变化为特征的兴奋过程和以肌丝滑行为基础的收缩过程之间的中介过程称为兴奋—收缩耦联(excitation-contraction coupling)。兴奋—收缩耦联过程包括以下三个主要步骤。

1. 兴奋(动作电位)通过横小管系统传导到肌细胞内部 横小管是肌细胞膜的延续，动作电位可沿着肌细胞膜传导到横小管，并深入到三联管结构。

2. 三联管结构处的信息传递 横小管膜上的动作电位可引起与其邻近的终末池膜及肌质网膜上的大量 Ca^{2+} 通道开放， Ca^{2+} 顺着浓度梯度从肌质网内流入胞浆，肌浆中 Ca^{2+} 浓度升高后， Ca^{2+} 与肌钙蛋白亚单位 C 结合时，导致一系列蛋白质的构型发生改变，最终导致肌丝滑行。

3. 肌质网对 Ca^{2+} 再回收 肌质网膜上存在的 Ca^{2+} - Mg^{2+} 依赖式 ATP 酶(钙泵)，当肌浆中的 Ca^{2+} 浓度升高时，钙泵将肌浆中的 Ca^{2+} 逆浓度梯度转运到肌质网中贮存，从而使肌浆 Ca^{2+} 浓度保持较低水平，由于肌浆中的 Ca^{2+} 浓度降低， Ca^{2+} 与肌钙蛋白亚单位 C 分离，最终引起肌肉舒张。

第四节 骨骼肌特性

一、骨骼肌的物理特性

骨骼肌在受到外力牵拉或负重时可被拉长，这种特性称为伸展性。而当外力或负重取消后，肌肉的长度又可恢复，这种特性称为弹性。虽然骨骼肌具有伸展性和弹性，但肌肉的伸展程度和所受外力或负荷并不呈线性关系，而是当外力和负荷逐渐增大时，其长度增加幅度逐渐降低。而且，当外力或负荷取消后肌肉的长度也不是立即恢复。这种现象是由于骨骼肌在被拉长或回缩时肌浆内各分子间的摩擦力造成的。因此，除上述两种物理特性外，骨骼肌还具有粘滞性。粘滞性是由于肌浆内各分子之间的相互摩擦作用所产生的。可见骨骼肌不是一个完整的弹性体，而是一个粘弹性体。骨骼肌的物理特性受温度影响。当温度下降时，肌浆内各分子间的摩擦力加大，肌肉的粘滞性增加，伸展性和弹性下降；当温度升高时，肌肉粘滞性下降，伸展性和弹性增加。在运动实践中，做好充分准备活动，使肌肉温度升高，降低粘滞性，提高肌肉伸展性和弹性，有利于运动员提高运动成绩。



二、骨骼肌的生理特性及其兴奋条件

骨骼肌是可兴奋组织,受到刺激后可产生兴奋(即产生动作电位),这种特性称为兴奋性。肌肉受到刺激产生兴奋后,立即产生收缩反应,这种特性称为收缩性。肌肉的兴奋性和收缩性是紧密联系而又不同的两种基本生理过程。

要引起骨骼肌兴奋必须给予适当的刺激。刺激应满足以下条件。

刺激强度 要使肌肉产生兴奋,刺激必须达到一定强度。引起肌肉兴奋的最小刺激强度称为阈刺激。大于阈刺激强度的刺激称为阈上刺激;低于阈刺激强度的刺激称为阈下刺激。阈刺激可以作为评定组织兴奋性高低的指标。阈刺激小表示组织的兴奋性高,阈刺激大则表示兴奋性低。

用阈下刺激刺激单个肌纤维,不能引起肌纤维收缩。而用阈刺激或阈上刺激刺激肌纤维可以引起肌纤维收缩。由于一块肌肉是由许多肌纤维组成的,而且每条肌纤维的兴奋性是不同的,因此,给予肌肉较小的刺激强度,只能引起那些兴奋性较高的肌纤维兴奋。这时参加收缩的肌纤维数量较少,肌肉收缩力量也较小。如果逐渐加大刺激强度,兴奋并参加收缩的肌纤维逐渐增多,肌肉产生的力量也越来越大。当刺激强度适宜时,整块肌肉中的肌纤维全部兴奋而产生收缩,肌肉将产生最大的收缩力量。

刺激的作用时间 无论刺激强度多大,要使可兴奋组织兴奋,刺激必须持续足够时间。在一定范围内,刺激强度越小,需要刺激的作用时间就越长。相反,刺激强度越大,需要刺激的作用时间就越短。

刺激强度变化率 要使可兴奋组织兴奋,刺激必须有足够的变化率。如果用瞬间的电流刺激组织,只有通电和断电的瞬间可以引起组织兴奋。而在继续通电的过程中,由于电流强度没有发生变化,组织不产生兴奋。所谓刺激强度变化率是指刺激电流由无到有或由小到大的变化速率。同样电流强度,变化速率越大越容易引起组织兴奋。

第五节 骨骼肌收缩

一、骨骼肌的收缩形式

当肌肉收缩时,肌原纤维内的肌动蛋白丝和肌球蛋白丝相对滑动。其滑动幅度根据肌肉工作需要而定。肌肉收缩可表现为整块肌肉的长度发生变化,也可不发生变化。根据肌肉收缩时的长度变化,把肌肉收缩分为四种基本形式,即向心收缩(concentric contraction)、等长收缩(isometric contraction)、离心收缩(eccentric contraction)和等动收缩(isokinetic contraction)。在完成工作或对抗地心引力对身体的作用时,这几种收缩往往同时或按顺序发生。

(一) 向心收缩

肌肉收缩时，长度缩短的收缩称为向心收缩。向心收缩时肌肉长度缩短、起止点相互靠近，因而引起身体运动。而且，肌肉张力增加出现在前，长度缩短发生在后。但肌肉张力在肌肉开始缩短后即不再增加，直到收缩结束。故这种收缩形式又称为等张收缩(isotonic contraction)。有时也称为动力性或时相性收缩。肌肉向心收缩时，是做功的。其数值为负荷重量与负荷移动距离的乘积。

在向心收缩过程中，所谓的等张收缩是相对的，尤其是在在体情况下，更是如此。由于肌肉在收缩过程中，往往是通过骨的杠杆作用克服阻力做功。在负荷不变的情况下，要使肌肉在整个关节活动范围内以同样的力量收缩是不可能的。如当肌肉收缩克服重力垂直举起杠铃时，随着关节角度变化，肌肉做功的力矩也会发生变化。因此，需要肌肉用力的程度也不同。在整个运动范围内，肌肉用力最大的一点称为“顶点”。出现“顶点”主要是因为在此关节角度下杠杆效率最差，加上肌肉缩短损失一部分力量，而促成了“顶点”的产生。

如图 1-16 所示，当肱二头肌收缩使肘关节屈曲举起某一恒定负荷时，它产生的张力随着关节角度变化而变化。肱二头肌收缩时所产生的张力，在关节角度为 120° 时最大，而在 30° 时最小。因此，在整个关节的运动范围内，只有在“顶点”肌肉才有可能达到最大力量收缩。这是等张训练的不足之处。

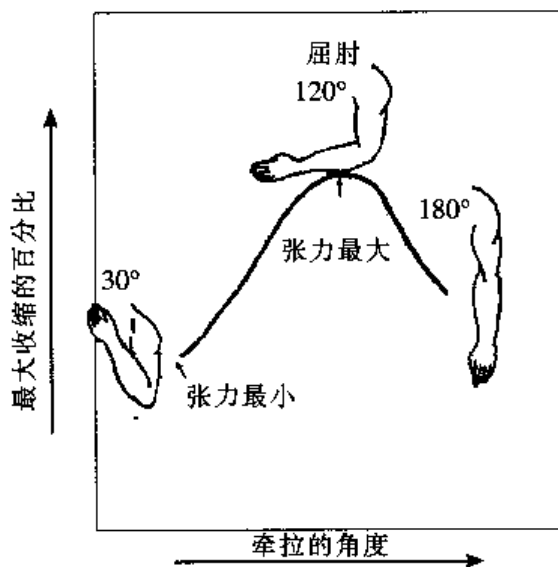


图 1-16 当屈肘举起一恒定负荷时肌肉收缩产生的张力随关节角度而变化
(依 Edward L. Fox)

(二) 等长收缩

肌肉在收缩时其长度不变，这种收缩称为等长收缩，又称为静力收缩。肌肉等长收缩时由于长度不变，因而不能克服阻力做机械功。

等长收缩有两种情况：其一，肌肉收缩时对抗不能克服的负荷，如试图拉起根本不



可能拉起的杠铃时，肱二头肌所进行的收缩就是等长收缩。其二，当其他关节由于肌肉离心收缩或向心收缩发生运动时，等长收缩可使某些关节保持一定的位置，为其他关节的运动创造适宜的条件。要保持一定的体位，某些肌肉就必须做等长收缩。如做蹲起动作时，肩带和躯干的某些肌肉发生等长收缩以保证躯干的垂直姿势，同时腿部和臀部的某些肌肉做向心收缩。当蹲下时，肩带和躯干的某些肌肉同样发生等长收缩以保证躯干的垂直姿势，但腿部和臀部的某些肌肉做离心收缩，在更复杂的运动中，身体姿势不断发生变化，因此肌肉的收缩形式也不断发生变化。在体育运动中，如体操中的“十字支撑”“直角支撑”和武术中的站桩，参加工作的肌肉就是进行等长收缩。

(三) 离心收缩

肌肉在收缩产生张力的同时被拉长的收缩称为离心收缩。如下蹲时，股四头肌在收缩的同时被拉长，以控制重力对人体的作用，使身体缓慢下蹲，起缓冲作用。因此，肌肉做离心工作也称为退让工作。再如搬运重物时，将重物放下，以及下坡跑和下楼梯等也需要肌肉进行离心收缩。肌肉离心收缩可防止运动损伤。如从高处跳下时，脚先着地，通过反射活动使股四头肌和臀大肌产生离心收缩。由于肌肉离心收缩的制动作用，减缓了身体的下落速度，不至于使身体造成损伤。离心收缩时肌肉做负功。

(四) 等动收缩

在整个关节运动范围内肌肉以恒定的速度，且肌肉收缩时产生的力量始终与阻力相等的肌肉收缩称为等动收缩。由于在整个收缩过程中收缩速度是恒定的，等动收缩有时也称为等速收缩。在运动实践中，自由泳的划水动作就具有等动收缩的特点。

等动收缩和等张收缩具有本质的不同。肌肉进行等动收缩时在整个运动范围内都能产生最大的肌张力(图 1-17)，等张收缩则不能。此外，等动收缩的速度可以根据需要进行调节。因此，理论和实践证明，等动练习是提高肌肉力量的有效手段。

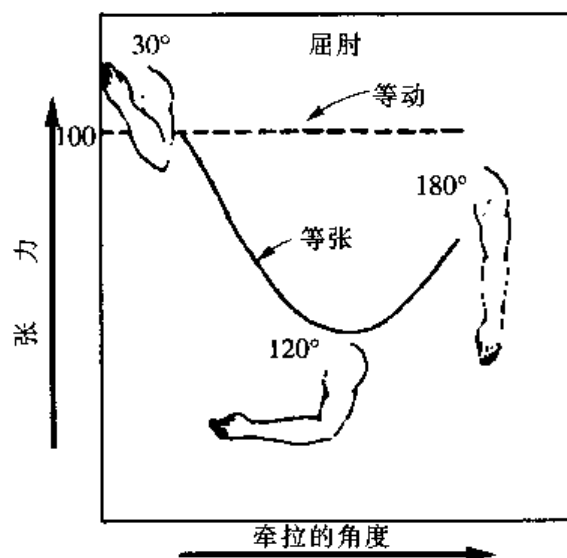


图 1-17 等动收缩时在整个运动范围内肌肉都产生最大张力

(依 Edward L. Fox)

要让肌肉做等动收缩,必须有专门的仪器设备,即等动练习器。仪器的主要部件是速度控制器。速度控制器可以保证无论参与工作的肌肉在收缩时产生多大的张力,其收缩速度不变,同时速度可调。在练习中可根据不同的目的和要求选择适当的速度。另外还有力量的测试和记录装置,用来评定运动时的肌肉力量。

(五) 骨骼肌不同收缩形式的比较

1. 力量

肌肉最大收缩时产生张力的大小取决于肌肉收缩的类型和收缩速度。同一块肌肉,在收缩速度相同的情况下,离心收缩可产生最大的张力。离心收缩产生的力量比向心收缩大 50%左右,比等长收缩大 25%左右。

关于肌肉离心收缩为何能产生较大的张力,一般认为有如下两个方面的原因:首先是牵张反射,肌肉受到外力的牵张时会反射性地引起收缩。在离心收缩时肌肉受到强烈的牵张,因此会反射性地引起肌肉强烈收缩。其次是离心收缩时肌肉中的弹性成分被拉长而产生阻力,同时肌肉中的可收缩成分也产生最大阻力。而向心收缩时,只有可收缩成分肌纤维在收缩时产生克服阻力的肌肉张力。肌肉在向心收缩时,一部分张力在作用于负荷之前,先要拉长肌肉中的弹性成分。一旦肌肉中的弹性成分被充分拉长,肌肉收缩产生的张力才会作用于外界负荷上。因此,肌肉收缩产生的张力,有一部分是用来克服弹性阻力的,这就使表现出来的张力小于实际肌肉收缩产生的张力。

2. 肌电

在等速向心收缩和离心收缩时,在一定范围内,积分肌电(IEMG)与肌肉张力成正比。在负荷相同的情况下,离心收缩的 IEMG 较向心收缩低(参见本章第二节和第七节)。

3. 代谢

在输出功率相同的情况下,肌肉离心收缩时所消耗的能量低于向心收缩,其耗氧量也低于向心收缩。肌肉离心收缩时其他与代谢有关的生理指标的反应(如心率、心输出量、肺通气量、肺换气效率、肌肉的血流量和肌肉温度等)均低于向心收缩。

4. 肌肉酸疼

很早就发现,肌肉做退让工作时容易引起肌肉酸疼和损伤。近来研究表明,大负荷肌肉离心收缩比向心收缩更容易引起肌肉酸疼和肌纤维超微结构以及收缩蛋白代谢的变化。

从诱发肌肉酸疼的实验中发现,肌肉酸疼程度与肌肉的收缩形式有关。图 1-18 显示的是诱发肌肉酸疼的实验结果。男女受试者各用杠铃完成两组力竭的屈肘运动。在离心收缩时只是主动地放下杠铃,而在向心收缩时只是主动地举起杠铃,在等长收缩时保持杠铃不动。从图中可以看出,无论是何种形式的收缩,肌肉酸疼均在练习后的 1~2 天才明显出现。肌肉离心收缩引起的肌肉酸疼最显著,等长收缩次之,向心收缩最不明显。



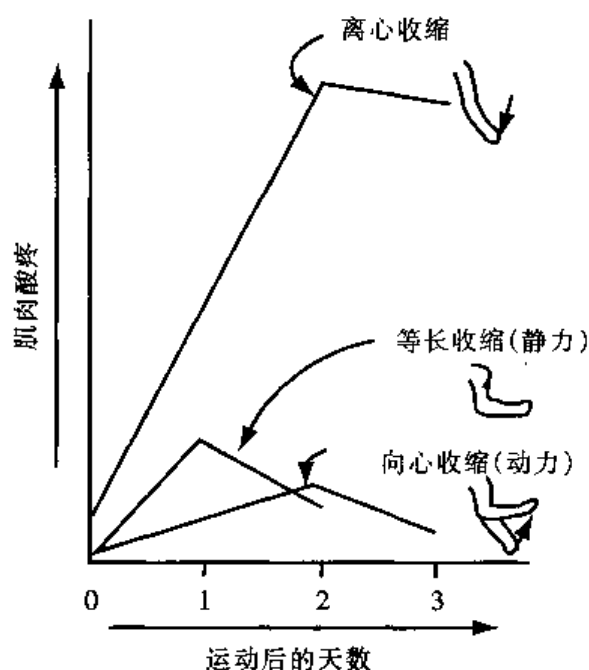


图 1-18 离心收缩、等长收缩和向心收缩后的肌肉酸疼之比较
离心收缩导致的肌肉酸疼最明显，向心收缩导致的肌肉酸疼最不明显

二、骨骼肌收缩的力学表现

人体所有的运动都是在对抗阻力的情况下产生的，因此，肌肉力量在运动中具有至关重要的作用。运动员在其他条件相同的情况下，肌肉力量的大小是决定运动成绩的主要因素。

(一) 绝对力量与相对力量

某一块肌肉做最大收缩时所产生的张力为该肌肉的绝对肌力。肌肉的绝对肌力和肌肉的横断面大小有关，肌肉的横断面越大，其绝对肌力越大。而肌肉横断面的大小又取决于组成该肌肉的肌纤维数量和每条肌纤维的粗细。绝对肌力只能反应肌肉力量的大小，而不能反应肌肉每条肌纤维力量的大小，由此引出了相对肌力的概念。相对肌力是指肌肉单位横断面积(一般为 1 平方厘米肌肉横断面积)所具有的肌力。如果某一块肌肉的绝对肌力为 60 公斤，肌肉横断面积为 20 平方厘米，则相对肌力为 $60/20=3$ (公斤/平方厘米)。

在整体情况下，一个人所能举起的最大重量称为该人的绝对力量。绝对力量的大小和体重有关，在一般情况下，体重越大绝对力量越大。如果将某人的绝对力量被他的体重除，可得到此人的相对力量，即每公斤体重的肌肉力量。如有甲乙两名受试者的绝对力量都是 150 公斤，甲的体重为 75 公斤，乙的体重为 60 公斤，则甲的相对力量为每公斤体重 2 公斤 ($150/75=2$)，乙的相对力量为每公斤体重 2.5 公斤 ($150/60=2.5$)。因此，相对力量可以更好地评价运动员的力量素质。

(二) 肌肉力量与运动

1. 力量—速度曲线

肌肉收缩的快慢和所克服的外部阻力相关。当负荷较小时，肌肉收缩速度加快；当负荷较大时，肌肉收缩速度减慢。实验证明，逐渐增加负荷量时，肌肉收缩力量也逐渐增加，而收缩速度则逐渐降低。当负荷量超过极限负荷时，肌肉张力达到最大值，但此时的收缩速度为零，肌肉所做的外功为零。如果逐渐减小负荷量，肌肉的收缩速度逐渐加快。当负荷量为零时，肌肉的收缩速度达到最大值，此时肌肉所做的功从理论上讲也是零（图 1-19）。肌肉收缩时产生的张力大小，取决于活化的横桥数目；而收缩速度则

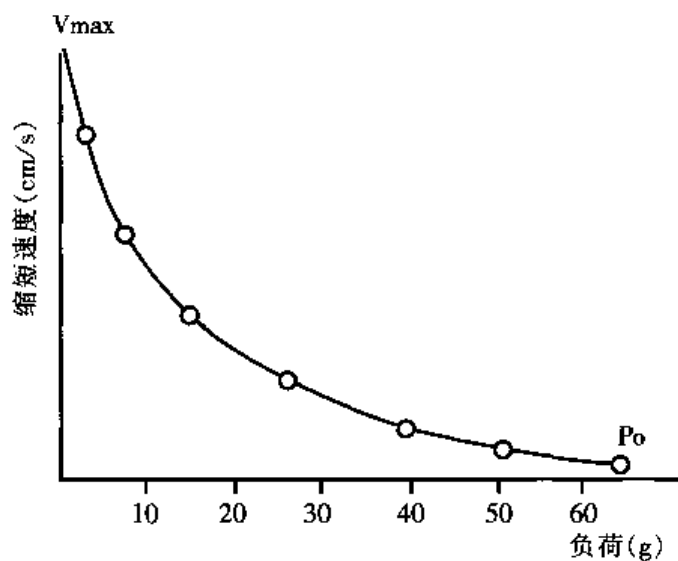


图 1-19 力量—速度曲线（离体肌肉）

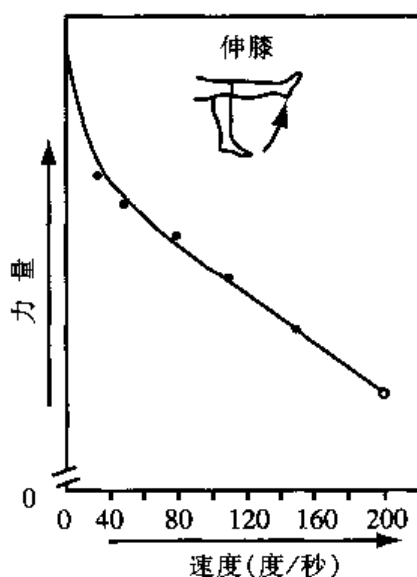


图 1-20 力量—速度曲线（在体肌肉）
（依 Edward L. Fox）



取决于能量释放速率和肌球蛋白 ATP 酶活性，与活化的横桥数目无关。

图 1-20 表示的是在运动中产生最大力量与运动速度之间的关系。当受试者在等动练习器上以每秒从 0~180°的速度伸膝时，记录下最大力量。当收缩速度为每秒 0°时，此时产生的张力最大，这就是所谓的等长收缩。当运动速度增加时，肌肉产生的张力下降。

从力量—速度曲线上可以看出，在其他因素相同的情况下，要想得到较快的收缩速度，就必须降低负荷量。如果要克服更大的负荷阻力，肌肉的收缩速度就要减慢。通过不同负荷量的训练，可得到不同的训练效果。小负荷训练可使肌肉的收缩速度得到提高。用大负荷进行训练，虽然可使肌肉力量得到较好的发展，但无助于收缩速度的提高。如果要达到最大的输出功率，得到最佳的训练效果，就必须采用最适的负荷和速度。

2. 肌肉力量与运动速度

肌肉力量增加可以提高运动速度。一个人的力量从 100 公斤增加到 120 公斤，那么他克服 100 公斤负荷的速度就会比力量增加前快。当负荷量依次下降到 90 公斤、80 公斤、70 公斤或 60 公斤，运动速度会越来越快。最大等长力量与肢体运动速度相关的研究显示，力量越大的人动作速度越快。图 1-21 表示力量水平不同的人在各种负荷下的运动速度。在负荷相同的条件下，力量越大动作速度越快。当以同样的速度运动时，力量大者所表现出来的力量也越大。

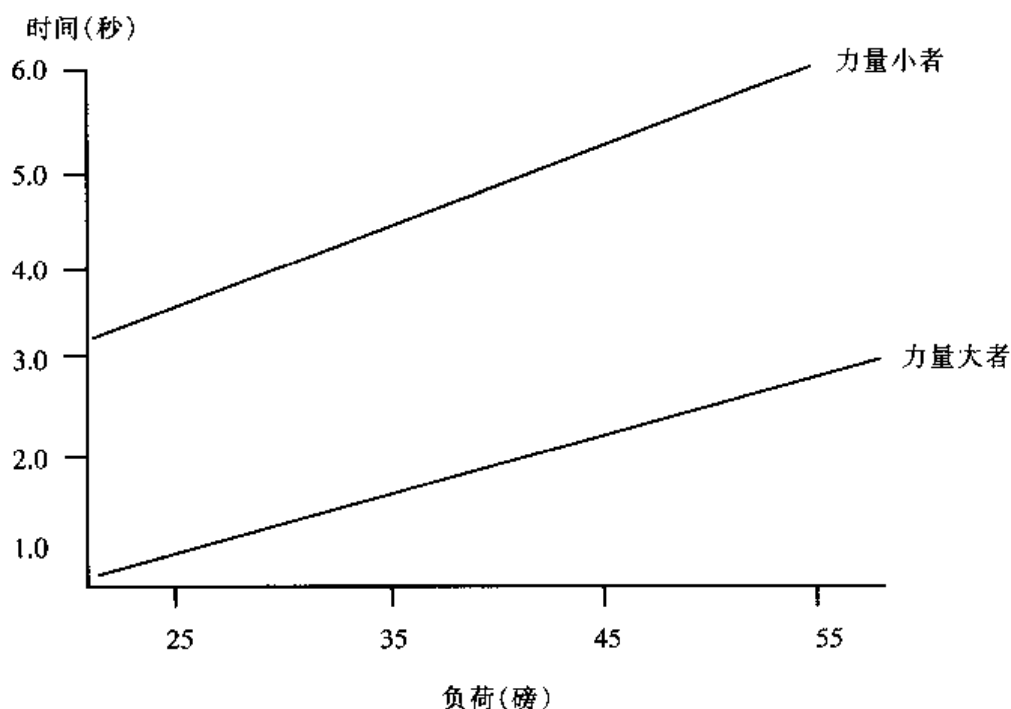


图 1-21 握推力量不同的人在不同负荷下的运动时间
(依 Richard A. Berger)

3. 肌肉力量与爆发力

人体运动时所输出的功率, 实际上就是运动生理学中所说的爆发力, 是指人体单位时间内所做的功。爆发力的计算公式为:

$$P = \frac{F \times D}{t} \quad (1)$$

$$\text{由于 } F = m \times a, \quad (2)$$

$$\text{所以公式(1)又可以写成: } P = \frac{m \times a \times D}{t} \quad (3)$$

式中: P 表示功率(爆发力), 单位是公斤·米/秒; F 表示力, 单位是公斤; D 表示位移的距离, 单位是米; m 表示质量; a 表示加速度; t 表示做功时间, 单位是秒。

在运动中使器械或人体体重(m)产生加速度(a)所需要的力(F)来自肌肉收缩。肌肉收缩使力量和加速度增加。加速度的增加使完成运动所需要的时间(t)减少。从而使运动的输出功率(P)增加。在某些运动项目中, 如投掷、短跑、跳跃、举重、拳击和橄榄球等项目, 运动员必须有较大的爆发力。

在训练中是极大地提高相对爆发力还是绝对爆发力, 取决于在所从事的运动项目中哪种素质更为重要。如短跑、跳跃等项目的运动员应保持较轻的体重, 使肌肉的相对力量得到提高。同时又要通过训练使肌肉的收缩速度得到提高。对需要提高绝对爆发力的运动员, 如投掷项目运动员、美式橄榄球防守运动员及相扑运动员等, 应增加肌肉的体积, 提高运动员的绝对爆发力。这样可能使加速度有所下降, 但不应下降到引起绝对爆发力下降的水平。问题在于找到使绝对爆发力与加速度两者结合能达到最佳运动能力的那一点。

三、运动单位的动员

(一) 运动单位

一个 α -运动神经元和受其支配的肌纤维所组成的最基本的肌肉收缩单位称为运动单位(motor unit, 简称 MU)。

根据解剖和生理功能的不同, 可将运动单位分为两类, 即运动性运动单位(kinetic motor unit)和紧张性运动单位(tonic motor unit)。运动性运动单位的肌纤维兴奋时发放的冲动频率较高, 收缩力量大, 但容易疲劳, 氧化酶的含量较低, 属于快肌运动单位。紧张性运动单位的肌纤维兴奋时冲动频率较低, 但发放可持续较长的时间, 氧化酶的含量较高, 属于慢肌运动单位。

运动单位的大小是不同的。一个运动单位中的肌纤维数目因肌肉不同而有所差别。眼外直肌每个运动单位只有 5~7 条肌纤维, 而腓肠肌有 200 多条肌纤维。一般说来, 一个运动单位中的肌纤维数目越少就越灵活, 而越多则产生的张力越大。每个运动单位又可分成许多亚单位。每个亚单位由 10~30 条肌纤维组成。



在同一运动单位中的肌纤维的兴奋与收缩是同步的，而同一肌肉中不同运动单位的肌纤维的活动则不一定是同步的。

(二) 运动单位动员

肌肉收缩时产生张力的大小与兴奋的肌纤维数目有关。肌肉收缩时参与的肌纤维数目越多，产生的张力就越大。由于肌肉中所有的肌纤维都属于不同的运动单位，因此同时兴奋的运动单位数目决定了张力的大小。张力不但与兴奋的运动单位数目有关，而且也与运动神经元传到肌纤维的冲动频率有关。参与活动的运动单位数目与兴奋频率的结合，称为运动单位动员(motor unit involvement, 简称 MUI)。运动单位动员也可称为运动单位募集(motor unit recruitment)。

当肌肉做持续最大收缩时，MUI 可以达到最大水平，肌肉力量会随收缩时间的延长而下降，但 MUI 基本保持不变(图 1-22A)。这说明在最大力量收缩时，肌肉 MUI 已经达到了最大值，随着疲劳程度的增加不会有新的运动单位再参与工作。由于肌纤维动作电位的产生和传导是相对不疲劳的，因此，在整个肌肉收缩过程中，MUI 始终保持最大水平。但由于肌肉疲劳时每个运动单位的收缩力量相对下降，因此在持续最大用力收缩过程中，肌肉张力逐渐下降(图 1-22B)。但是，如果让肌肉保持次最大力量(50%最大力量)收缩至疲劳，可以发现，在持续的收缩过程中，肌肉的张力可以基本保持不变(图 1-23A)，但 MUI 却逐渐升高(图 1-23B)。这是因为在次最大用力的收缩中，在开始阶段只需要动员较少数量的运动单位就可以产生足够的力量，随着疲劳程度增加，参与工作的每个运动单位的收缩力量会有所下降。为了维持肌肉力量，就必须动员较多的运动单位参与工作。因此，在一定范围内，肌肉力量可以得到维持，但 MUI 却随着疲劳程度的增加而增加。

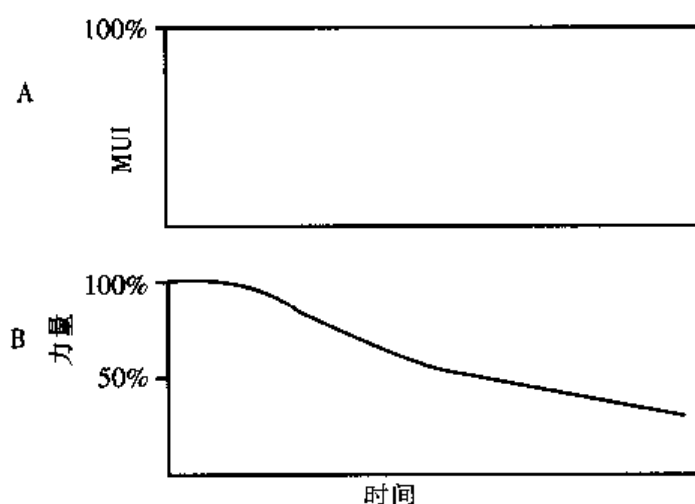


图 1-22 肌肉用最大力量收缩时肌力与运动单位动员的关系

当肌肉做持续最大收缩时运动单位的动员达到最大水平，肌肉力量会随时间延长而下降，运动单位的动员基本保持不变(依 Richard A. Berger)

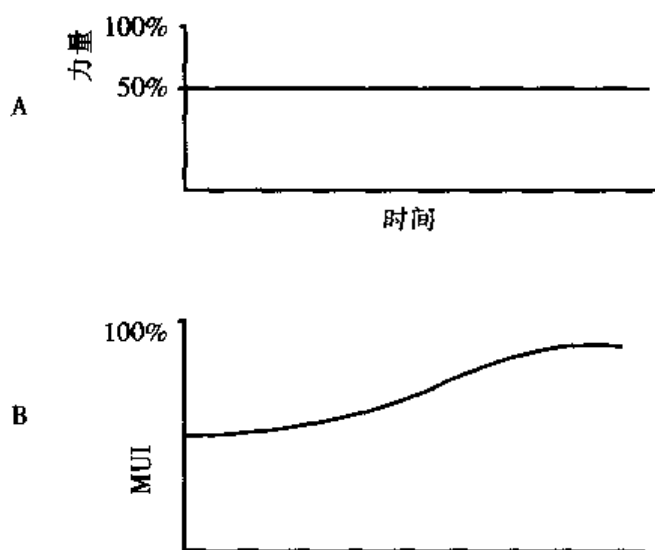


图 1-23 肌肉用 50%最大力量持续收缩时肌力与运动单位动员的关系
随着收缩时间的延长参与工作的运动单位会发生疲劳，
要保持力量不变就需要动员更多的运动单位，因而运动单位的动员会逐渐增加
(依 Richard A. Berger)

第六节 肌纤维类型与运动能力

让威尔在 1883 年即对肌纤维类型进行了研究，二十世纪六十年代由于肌肉活检技术的发明，使得对人体骨骼肌肌纤维类型的研究有了飞跃性的发展。对运动员骨骼肌快、慢肌纤维的分布、机能及代谢特点等进行了较为广泛的研究。

一、肌纤维类型的划分

划分肌纤维类型有许多种方法，根据不同分类方法，可将肌纤维划分为不同的类型。有如下几种划分肌纤维类型的方法：①根据收缩速度，可将肌纤维划分为快肌纤维(fast-twitch, FT)和慢肌纤维(slow-twitch, ST)；②根据收缩及代谢特征，可将肌纤维划分为快缩、糖酵解型(fast glycolytic, FG)，快缩、氧化、糖酵解型(fast oxidative glycolytic, FOG)和慢缩、氧化型(slow oxidative, SO)；③根据收缩特性及色泽，也可将肌纤维划分为快缩白、快缩红和慢缩红三种类型；④布茹克司(Brooks, 1970)将肌纤维分为 I 型和 II 型，其中 II 型肌纤维又分为 II a、II b、II c (II c 是一种介于 II a 和 II b 之间的过度型肌纤维)三个亚型。根据不同的分类方法将肌纤维进行分类及其对应关系如表 1-2 所示。



表 1-2

肌纤维分类对应表

快肌	白肌	II	II b	快缩白	FG
			II a	快缩红	FOG
慢肌	红肌	I		慢缩红	SO

二、不同类型肌纤维的形态、机能及代谢特征

(一) 不同肌纤维的形态特征

不同的肌纤维其形态学特征也不同。快肌纤维的直径较慢肌纤维大，含有较多的收缩蛋白。快肌纤维的肌浆网也较慢肌纤维的发达。慢肌纤维周围的毛细血管网较快肌纤维丰富。并且，慢肌纤维含有较多的肌红蛋白，因而导致慢肌纤维通常呈红色。与快肌纤维相比，慢肌纤维含有较多的线粒体，而且线粒体的体积较大。在神经支配上，慢肌纤维由较小的运动神经元支配，运动神经纤维较细，传导速度较慢，一般为2~8米/秒；而快肌纤维由较大的运动神经元支配，神经纤维较粗，其传导速度较快，可达8~40米/秒。

(二) 生理学特征

1. 肌纤维类型与收缩速度

快肌纤维收缩速度快，慢肌纤维收缩速度慢。

在人体的骨骼肌中，快肌运动单位与慢肌运动单位是相互混杂的，一般不存在单纯的快肌与慢肌。但每块肌肉中快肌与慢肌运动单位的分布比例是不同的。通过肌肉收缩时所表现出的力量—速度曲线(图 1-24A)可以看出，肌肉中如果快肌纤维的百分比较高，肌肉的收缩速度较快，力量—速度曲线向右上方转移。

2. 肌纤维类型与肌肉力量

肌肉收缩的力量与单个肌纤维的直径和运动单位中所包含的肌纤维数量有关。由于快肌纤维的直径大于慢肌纤维，而且快肌运动单位中所包含的肌纤维数量往往多于慢肌运动单位。因此，快肌运动单位的收缩力量明显大于慢肌运动单位。

在人体中快肌纤维百分比较高的肌肉收缩时产生的张力较大。让受试者进行最大力量伸膝时发现，股外肌快肌纤维百分比较高的人，最大伸膝力量也较大；最大伸膝力量与快肌纤维百分比成正比关系。

由于收缩力量和速度均与肌肉中快肌纤维百分比有关。快肌纤维百分比较高的肌肉的收缩速度和力量均大于慢肌纤维百分比较高的肌肉。故快肌纤维百分比较高的肌肉的力量—速度曲线向右上方转移(见图 1-24A)。因此，运动员在完成某一动作时，如果参与工作的肌肉中快肌纤维百分比较高，则在同样的运动速度下能发挥较大的力量，当肌肉力量相同时能产生较大的收缩速度。

图 1-24B 表示的是不同项目运动员的力量—速度曲线。可以看到，快肌纤维百分

比越高的运动员，其力量—速度曲线在图中的位置越靠近右上方。那些从事需要发挥较大爆发力的运动项目(如短跑、跳跃及投掷等项目)的运动员，比其他运动员能在更高的运动速度下发挥更大的力量。也可以看到，快肌纤维百分比最低的耐力项目运动员(如越野跑)，其曲线甚至低于无训练者。

从图 1-24B 中也可看出，尽管无训练者的快肌纤维百分比仅稍低于短跑和跳跃项目的运动员(56%对 61%)，但是由于缺乏训练，其肌肉的收缩力量及速度均较低，甚至低于快肌纤维百分比分别为 52%和 41%的下降滑雪和竞走项目的运动员。说明运动训练可以对肌肉的收缩力量和速度均有明显的影响。运动员通过运动训练可以使力量—速度曲线向右上方转移。

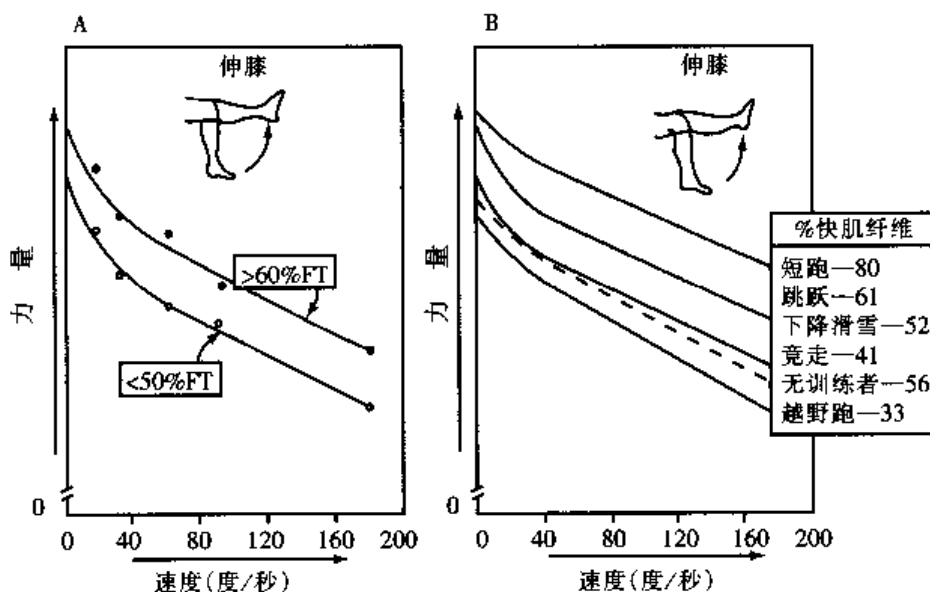


图 1-24 无训练者(A)和快肌纤维百分比不同的运动员(B)的力量—速度曲线
快肌纤维百分比高者，力量—速度曲线向右上方转移(依 Edward L. Fox)

3. 肌纤维类型与疲劳

不同类型的肌纤维抗疲劳能力不同。图 1-25 比较了人的快肌纤维和慢肌纤维的抗疲劳特性。当以每秒 180° 的角速度重复完成最大用力伸膝运动时，在开始阶段股外肌中快肌纤维百分比为 61% 的受试者，其伸膝时股外肌的肌肉力量远远大于快肌纤维百分比为 38% 的受试者。而当继续进行重复收缩时，快肌纤维百分比为 38% 的受试者的力量下降速度较慢，而快肌纤维占 61% 的受试者的力量下降速度较快，并且很快低于快肌纤维百分比低的受试者。由此可以认为和慢肌纤维相比，快肌纤维在收缩时能产生较大的力量，但容易疲劳。

慢肌纤维抵抗疲劳的能力比快肌纤维强得多。这是因为慢肌纤维中的线粒体体积大而且数目多，线粒体中有氧代谢酶活性较高，肌红蛋白的含量也比较丰富，毛细血管网较为发达，因而慢肌纤维的有氧代谢潜力较大。快肌纤维比较容易疲劳，这与快肌纤维的有氧代谢能力较低有关。快肌纤维含有较丰富的葡萄糖酵解酶，有氧代谢能力低，而无氧酵解能力较高。所以在收缩时所需的能量大都来自糖的无氧代谢，从而引起乳酸大量积累，最终导致肌肉疲劳。



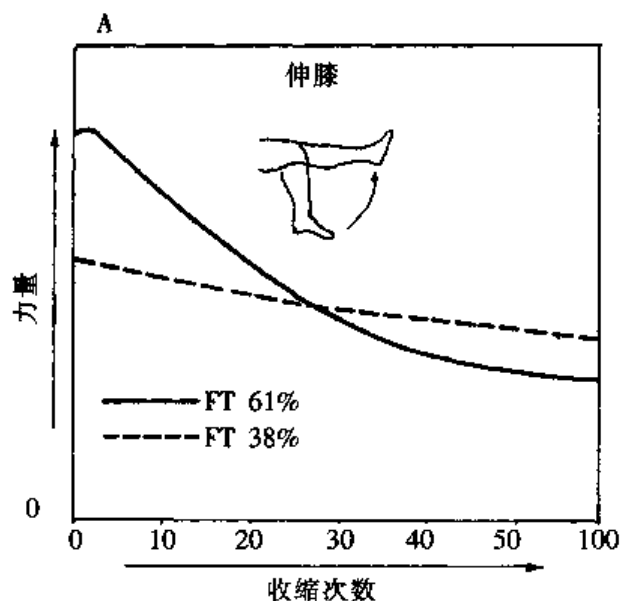


图 1-25 快肌纤维和慢肌纤维与疲劳的关系

(三) 代谢特征

慢肌纤维中氧化酶系统如细胞色素氧化酶(CYTOX)、苹果酸脱氢酶(MDH)和琥珀酸氢酶(SDH)等的活性都明显高于快肌纤维。慢肌纤维中作为氧化反应场所的线粒体大而多,线粒体蛋白(主要是各种氧化酶)的含量也较快肌纤维多;快肌纤维中线粒体的体积小,而且数量少,线粒体蛋白含量也少。实验证明,慢肌纤维氧化脂肪的能力为快肌纤维的4倍。

快肌纤维中一些重要的与无氧代谢有关酶的活性明显高于慢肌纤维。如镁-三磷酸腺苷酶(Mg-ATPase)活性为慢肌纤维的3倍;肌激酶(MK)活性为慢肌纤维的1.8倍;磷酸肌酸激酶(CPK)活性为慢肌纤维的1.3倍;乳酸脱氢酶(LDH)的活性为慢肌纤维的2~2.5倍。可见快肌纤维的无氧代谢能力较慢肌纤维高。快肌纤维和慢肌纤维的一些不同的特性如表1-3所示。

表 1-3 快肌和慢肌运动单位的比较

特性	快肌(FT)	慢肌(ST)
有氧能力	低	高
无氧能力	高	低
毛细血管密度	低	高
收缩时间	快	慢
收缩力量	大	小
动员模式	速度类活动	耐力类活动
在运动员中的分布	高(非耐力运动员)	高(耐力运动员)
疲劳性	快	慢

三、运动时不同类型运动单位的动员

在运动中不同类型的肌纤维参与工作的程度依运动强度而定。高耐克 (Gollnick) 等人让受试者以 $2/3$ 最大摄氧量强度运动, 发现慢肌纤维中的糖原首先被消耗, 继而转向快肌纤维。甚至当慢肌纤维中的糖原完全空竭时, 快肌纤维中还有糖原剩余。而以 150% 最大摄氧量强度运动时, 快肌纤维中的糖原首先被消耗。这说明: 在以较低的强度运动时, 慢肌纤维首先被动员; 而在运动强度较大时, 快肌纤维首先被动员。

在运动训练时, 采用不同强度的练习可以发展不同类型的肌纤维。为了增强快肌纤维的代谢能力, 训练计划必须包括大强度的练习; 如果要提高慢肌纤维的代谢能力, 训练计划就要由低强度、持续时间较长的练习组成。

四、肌纤维类型与运动项目

据研究, 一般人上下肢肌肉的慢肌纤维百分比平均为 $40\% \sim 60\%$ 。但从每个受试者来看, 慢肌纤维百分比最低的为 24% , 最高的为 74.2% , 相差范围很大。这说明在一般人中肌纤维的百分比分布范围很大。

研究发现, 运动员的肌纤维组成具有项目特点。参加时间短、强度大的项目的运动员, 其骨骼肌中快肌纤维百分比从事耐力项目运动员和一般人高; 而从事耐力项目运动员的慢肌纤维百分比却高于非耐力项目运动员和一般人; 既需要耐力又需要速度项目的运动员(如中跑、自行车等), 其肌肉中快肌纤维和慢肌纤维百分比相当(图 1-26、27)。

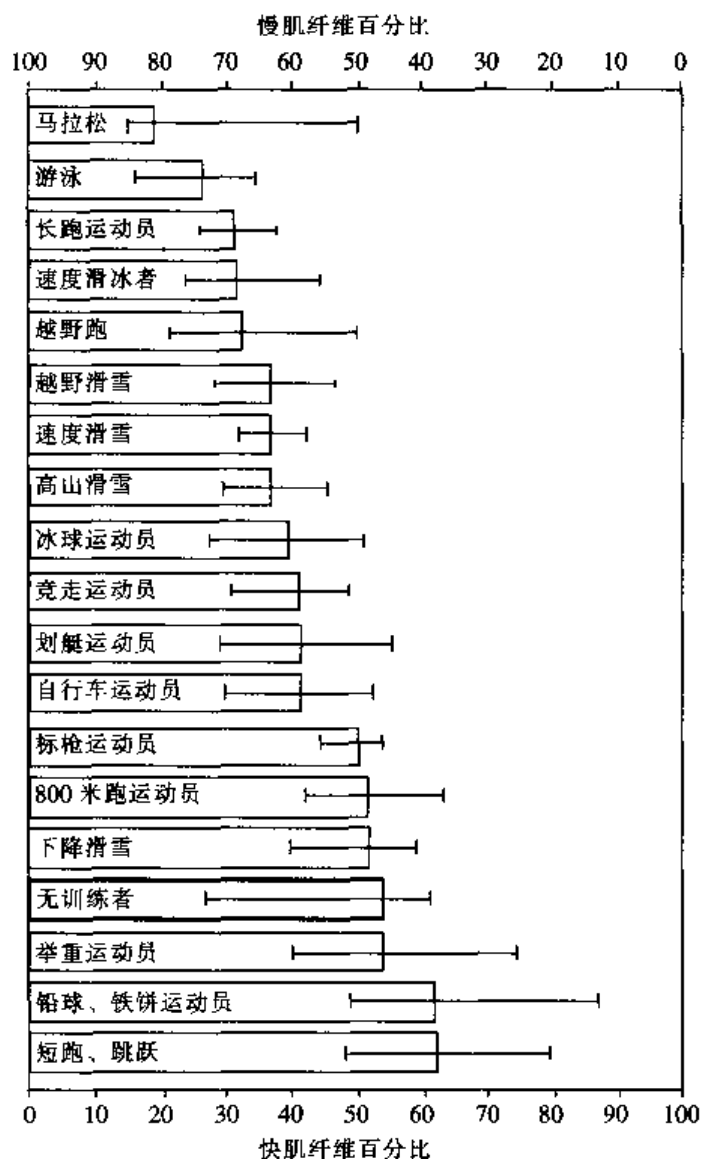


图 1-26 男运动员肌纤维类型分布 (依 Edward L. Fox)



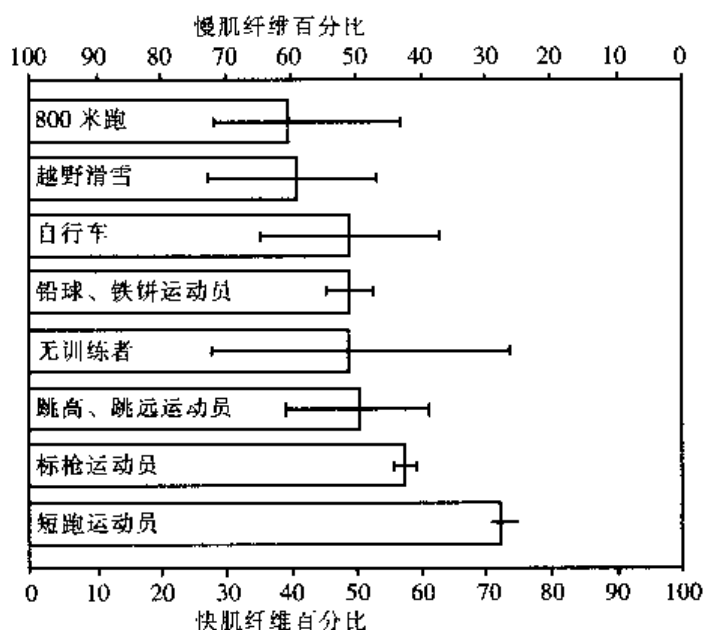


图 1-27 女运动员肌纤维类型分布 (依 Edward L. Fox)

五、训练对肌纤维的影响

关于运动训练能否导致肌纤维类型转变目前还有争论。一种观点认为,每个人生来肌纤维类型的分布比例就已经确定,而且这种比例是不能通过训练和其他方法得到改变。持这种观点的人认为,优秀运动员某种肌纤维占优势的现象是“自然选择”的结果。也就是说人的肌纤维类型组成是先天决定的。只有那些肌纤维组成占优势的运动员才能取得好成绩。另一种观点则认为,运动员长时间系统地从事某一专项运动训练,可使肌肉结构和机能产生适应性变化,通过训练可导致运动员肌纤维组成发生适应性改变。即“训练适应”的观点。上述两种观点各有一些实验支持,但都缺乏足够的证据。

不论运动训练能否改变肌纤维类型,但运动训练能使肌纤维形态和代谢特征发生较大的变化是毋庸置疑的。运动训练至少可以从以下两个方面对肌纤维类型发生较大的影响。

(一) 肌纤维选择性肥大

萨尔庭 (Saltin)发现耐力训练可引起慢肌纤维选择性肥大,速度、爆发力训练可引起快肌纤维选择性肥大。通过 10 周的举重训练,快肌纤维面积由 5473 平方微米增加到 7140 平方微米。考斯特尔(Costil)发现长跑运动员慢肌纤维的相对面积(STarea%)要比快肌纤维的相对面积大 22%。不同项目的赛跑运动员慢肌纤维相对面积如表 1-4。

表 1-4 赛跑运动员慢肌纤维相对面积

项目	性别	例数	STarea(%)
短跑	男	2	22.7
	女	2	28.6
中跑	男	18	62.1
	女	7	60.4
长跑	男	14	82.9

(依 Costil, 1976)

萨尔德对 6 名成年男受试者进行了 5 个月的长跑训练。在训练前后测定了受试者的最大摄氧量、慢肌纤维百分比、慢肌纤维面积、琥珀酸脱氢酶活性和磷酸丙糖激酶等指标后发现,受试者的最大摄氧量、慢肌纤维面积、琥珀酸脱氢酶活性和磷酸丙糖激酶在训练后都显著提高了,但慢肌纤维百分比却没有明显提高,如表 1-5 所示。

表 1-5 长跑训练对肌纤维的影响

指 标	训练前	训练后	P
最大摄氧量(升/分)	3.9	4.5	<0.01
慢肌纤维百分比(ST%)	32	36	>0.05
慢肌纤维面积(STarea%)	27.9	38.1	<0.001
琥珀酸脱氢酶(SDH)活性(毫克分子/克·分)	4.7	9.1	<0.001
磷酸丙糖激酶(微克分子/克·分)	27.1	58.8	<0.01

(二) 酶活性改变

肌纤维对训练的适应还表现为肌肉中有关酶活性的有选择性增强(表 1-5、1-6)。考斯特尔研究了不同项目赛跑运动员和无训练者腿肌中 SDH(琥珀酸脱氢酶)、LDH(乳酸脱氢酶)及 PHOSP(磷酸化酶)的活性,发现在长跑运动员的肌肉中,与氧化供能有密切关系的 SDH 活性较高,而与糖酵解及磷酸化供能有关的 LDH 及 PHOSP 则活性最低。短跑运动员则相反,LDH 和 PHOSP 活性较高,而 SDH 活性较低。中跑运动员居短跑和长跑运动员之间。

表 1-6 短、中、长跑运动员肌肉中酶活性的差异

项目	性别	例数	SDH	LDH	PHOSP
短跑	男	2	12.9	1287	15.3
中跑	男	7	14.8	868	8.4
长跑	男	5	16.6	767	8.1
无训练者	男	11	7.4	822	7.6

(依 Costil, 1976)

第七节 肌电的研究与应用

在体育科学研究中,肌电图已被广泛地应用,其应用主要在以下几个方面。

一、利用肌电测定神经的传导速度

如果在神经通路的两个或两个以上的点上给予电流刺激,从该神经所支配的肌肉上记录诱发电位,然后根据下列公式可计算出神经的传导速度。

$$V = S/t$$

式中:V 为神经传导速度,单位为米/秒;t 为两刺激点从刺激开始到肌肉开始收缩



的时间差,单位为秒;S为两刺激点之间的距离,单位为米。

二、利用肌电评定骨骼肌的机能状态

肌肉疲劳时其肌电活动也会发生变化,因此可以用肌电评定骨骼肌的机能状态。

(一) 肌肉工作过程中肌电幅值的变化

肌电幅值是指肌电的信号振幅大小。在肌电研究过程中,反应肌电幅值的指标有 IEMG(积分肌电)和 RMS(均方根振幅)。

在肌肉等长收缩至疲劳的研究过程中发现,在一定的范围内,肌电幅值随着肌肉疲劳程度的加深而增加。帕特甫斯基(Petrofsky)让受试者的抓握肌以 20%~70%MVC(最大肌力)的五种不同力量做等长收缩至疲劳的过程中,发现 RMS 呈线性增加。70%MVC 以上的等长收缩至疲劳时,虽然 RMS 在整个收缩过程中也随疲劳的加深而增大,但增大的幅度逐渐减小。

帕特甫斯基也观察了等张收缩至疲劳过程中的 RMS 的变化。让受试者在功率自行车上以 20%~100%VO_{2max}(最大摄氧量)的负荷蹬踏功率自行车,同时测试并分析了股四头肌肌电。发现在 20%~40%VO_{2max} 的负荷下, RMS 随着疲劳程度的加深,其增大程度不明显;而负荷为 60%~100%VO_{2max} 时, RMS 却随着疲劳的增加而明显增加。并且,负荷越大其增加越明显。

让受试者作等长收缩至疲劳,发现随着肌肉疲劳程度的增加, IEMG 逐渐加大。

疲劳时肌电振幅的升高,可能是由于肌肉在持续的工作过程中,先参与工作的运动单位发生疲劳。为了维持工作,必须动员其他的新的运动单位参与工作。这就是所谓的运动单位的募集。由于运动单位的数量的增加,而使 IEMG 增加。

(二) 肌肉工作过程中肌电频谱变化

研究表明,在肌肉工作过程中,肌电的频率特性可随着肌肉机能状态的改变而发生变化。反应肌电频率特性的指标有 MPF(平均功率频率)和 FC(中心频率)。

在研究肌肉持续工作至疲劳过程中发现,随着疲劳程度加深,肌电频谱左移,即平均功率频率降低。肌肉工作负荷强度越大,疲劳程度越大,平均功率频率减小越明显。

三、利用肌电评价肌力

当肌肉以不同负荷进行收缩时, IEMG 同肌力成正比关系,即肌肉产生的张力越大, IEMG 越大。柯米(Komi)让受试者以 4.5cm/s 的速度做匀速的屈肘运动,肌肉的收缩形式分别为向心收缩和离心收缩。不论是疲劳前还是疲劳后,肱桡肌在工作中的 IEMG 都随着肌张力的加大而增高,并存在线性关系。

柯菲因(Chaffin)等人发现当肌肉用 40%MVC 以下强度收缩时,肌力与肌电呈线性关

系。60%MVC 以上强度时,肌力与肌电也呈线性关系,但此时的直线斜率较大。而肌力在 40%~60%MVC 时,肌力与肌电之间的线性关系往往就不存在了。这可能因为,在 40%MVC 以下强度时,肌电的变化反映慢肌运动单位的电活动。60%MVC 以上的强度时,肌电的变化反映快肌运动单位的电活动。40%~60%MVC 之间的强度,可能两种运动单位都参与活动,故肌力与肌电之间的线性关系就不存在了。

四、利用肌电进行动作分析

在运动过程中可用多导肌电记录仪将肌电记录下来。然后,根据运动中每块肌肉的放电顺序和肌电幅度,结合高速摄像等技术,对运动员的动作进行分析诊断。

【小结】

1.肌细胞(又称肌纤维)是肌肉的基本结构和功能单位。每个肌细胞含有数百至数千条与肌纤单长轴平行排列的肌原纤维。肌原纤维由粗肌丝(主要由肌球蛋白组成)和细肌丝(主要由肌动蛋白组成)组成,全长都由暗带(A带)和明带(I带)呈交替规则排列,在显微镜下呈现有规律的横纹排列。

2.一切活组织的细胞都存在生物电,细胞处于安静状态,细胞膜内外存在静息电位。生物电现象是一种普遍存在又十分重要的生命现象。可兴奋组织细胞在受到刺激发生兴奋时,出现一种称为动作电位的电变化。利用适当的仪器设备可以将动作电位记录下来。临床上和运动人体科学研究中广泛应用的心电图(ECG)、脑电图(EEG)和肌电图(EMG)就是所记录的各相应组织细胞动作电位的综合电位变化。

膜电位的产生原理可以用“离子学说”来解释。离子学说认为:①细胞内外各种离子的浓度分布是不均匀的;②细胞膜对各种离子通透具有选择性。当细胞处于静息状态时,细胞膜对 K^+ 的通透性大,而对 Na^+ 的通透性较小,所以就形成在静息时 K^+ 向细胞外流动。使细胞外因增加带正电荷的 K^+ 而电位上升。当促使 K^+ 外流的由浓度差形成的向外扩散力与阻止 K^+ 外流的电场力相等时,细胞内外的电位差值就稳定在一定水平上,这就是静息电位。

当细胞受到刺激时,膜上的 Na^+ 通道被激活而开放, Na^+ 顺浓度梯度瞬间大量内流,细胞内正电荷增加,导致电位急剧上升,负电位从静息电位水平减小到消失进而出现膜内为正膜外为负的电位变化,当膜内正电位所形成的电场力增大到足以对抗 Na^+ 内流时,膜电位达到一个新的平衡点,即动作电位。

3.动作电位一旦在细胞膜的某一点产生,就沿着细胞膜向各个方向传播,直到整个细胞膜都产生动作电位为止。在无髓神经纤维上动作电位是以局部电流的形式进行传导的。在有髓神经纤维上动作电位是越过每一段带髓鞘的神经纤维呈跳跃式传导的。

4.神经细胞与肌细胞之间的兴奋传递是通过运动终板实现的。当动作电位沿神经纤维传到轴突末梢时,在 Ca^{2+} 的作用下,交触小泡将乙酰胆碱释放到接头间隙。乙酰胆碱通过接头间隙到达接头后膜,并和接头后膜上的特异性的乙酰胆碱受体结合,最后导致接点后膜产生终板电位。当终板电位达到一定幅度,可引发肌细胞膜产生动作电位。



5.骨骼肌纤维的收缩可以用“肌丝滑行学说”来解释。“滑行学说”认为,当动作电位到达肌纤维后可沿着肌细胞膜传导到横小管,并深入到三联管结构。横小管膜上的动作电位可引起与其邻近的终末池膜及肌质网膜上的大量 Ca^{2+} 通道开放, Ca^{2+} 顺着浓度梯度从肌质网内流入胞浆,肌浆中 Ca^{2+} 浓度升高后, Ca^{2+} 与肌钙蛋白亚单位 C 结合时,导致一系列蛋白质的构型发生改变,最终导致粗肌丝和细肌丝相对滑行,肌纤维缩短。当肌浆中的 Ca^{2+} 浓度降低时, Ca^{2+} 与肌钙蛋白亚单位 C 分离,最终引起肌肉舒张。

6.骨骼肌可表现出物理特性和生理特性。骨骼肌的物理特性有伸展性、弹性和粘滞性。骨骼肌的生理特性包括兴奋性和收缩性。

7.根据肌肉收缩时的长度变化,把肌肉收缩分向心收缩、等长收缩、离心收缩和等动收缩。

8.根据不同分类方法,可将肌纤维划分为不同的类型。根据收缩速度,可将肌纤维划分为快肌纤维和慢肌纤维;根据收缩及代谢特征,可将肌纤维划分为快缩、糖酵解型,快缩、氧化、糖酵解型和慢缩、氧化型;根据收缩特性及色泽,也可将肌纤维划分为快缩白、快缩红和慢缩红三种类型;布茹克司将肌纤维分为 I 型和 II 型,其中 II 型肌纤维又分为 IIa、IIb、IIc 三个亚型。

不同的肌纤维其形态学特征、生理学特征和代谢特征不同,在运动时的动员程度也不同。在以较低的强度运动时,慢肌纤维首先被动员,运动强度较大时,快肌纤维首先被动员。

运动员的肌纤维组成具有项目特点。从事时间短、强度大项目的运动员,骨骼肌中快肌纤维百分比较从事耐力项目运动员和一般人高。相反,从事耐力项目运动员的慢肌纤维百分比却高于非耐力项目运动员和一般人。

运动训练至少可以从以下两个方面对肌纤维类型发生较大的影响,即:肌纤维选择性肥大和酶活性选择性改变。

9.在体育科学研究中,利用肌电图法可以测定神经的传导速度、评定骨骼肌的机能状态、评价肌力、进行动作分析和诊断。

【思考题】

1. 试述骨骼肌纤维的收缩原理。
2. 试述静息电位和动作电位的产生原理。
3. 试述在神经纤维上动作电位是如何进行传导的。
4. 试述在神经—肌肉接头处动作电位是如何进行传递的。
5. 骨骼肌有几种收缩形式?它们各有什么生理学特点?
6. 为什么在最大用力收缩时离心收缩产生的张力比向心收缩大?
7. 试述绝对力量、相对力量、绝对爆发力和相对爆发力在运动实践中的应用及其意义。
8. 骨骼肌纤维类型是如何划分的?不同类型肌纤维的形态学、生理学和生物化学特征是什么?
9. 从事不同项目运动员的肌纤维类型的组成有什么特点?

- 10.运动时不同类型肌纤维是如何被动员的?
- 11.运动训练对肌纤维类型组成有什么影响?
- 12.试述肌电图在体育科研中的应用。

【主要参考文献】

- 1.Rodgers, K. L., and Berger, R. A.: Motor-unit involvement and tension during maximum voluntary concentric, eccentric, and isometric contractions of the elbow flexors. *Med. Sci. Sports*, 6:253, 1974.
- 2.Knuttgen, H. G., and Klausen, K.: Oxygen debt in short term exercise with concentric and eccentric muscle contractions. *J. Appl. Physiol.*, 30:623, 1971.
- 3.Curtin, N. A., Svensson, S. M., and Davies, R. E.: Force development and the braking mechanism in stretching activated muscle is not limited by the energy from ATP splitting. *Fed. Proc.*, 29:714, 1970.
- 4.Infante, O. A., Klaupiks, D., and Davies, R. E.: Adenosine triphosphate: changes in muscles doing negative work. *Science*, 144 :1577, 1964.
- 5.Knuttgen, H. G., Petersen, F. B., and Klausen, K.: Oxygen uptake and heart rate responses to exercise performed with concentric and eccentric contractions. *Med. Sci. Sports*, 30:1, 1971.
- 6.Smith, L. E., and Whitley, J. D.: Relation between muscular force of a limb, under different starting conditions and speed of movement. *Res. Q.*, 34:489, 1963.
- 7.Penman, K. A.: Ultrastructural changes in human striated muscle using three methods of training. *Res. Q.*, 40:764, 1969.
- 8.Penman, K. A.: Human striated muscle ultrastructural changes accompanying increased strength without hypertrophy. *Res. Q.*, 41 :418, 1970.
9. Я·М·科查编, 王步标等译:《运动生理学》, 湖南, 湖南师大出版社, 1991。
- 10.杨锡让编著:《实用运动生理学》, 北京, 北京体育学院出版社, 1986。
- 11.体育学院通用教材:《运动生理学》, 北京, 人民体育出版社, 1978。
- 12.Brian J. Sharkey, *Physiology of Fitness*, Human Kinetics Publishers, Inc. 1984.
- 13.佩尔·奥洛夫·奥斯特朗和卡尔·罗道尔编著, 杨锡让等译:《运动生理学》, 北京, 人民体育出版社, 1982。
- 14.Richard A. Berger, *Applied Exercise Physiology*, Lea & Febiger Philadelphia, 1982.
- 15.乔奇 A·布茹克司和汤姆士 D·法哈著, 杨锡让等译:《运动生理学》, 北京, 北京体育学院出版社, 1988。
- 16.Edward L. Fox, *Sports Physiology*, W. B. Saunders Company, 1979.
- 17.Knuttgen, H. G. Human Performance in High-Intensity Exercise with Concentric and eccentric contractions. *Int. J. Sports Med.* 7:6-9, 1986.
- 18.Chaffin, D. B. Muscle strength assessment from EMG analysis. *Med. & Sci. in*



Sports and Exercise, Vol. 12, No.3, 205-211, 1980.

19.Toshio Moritani, Akira Nagata, and Masuo Muro, Electromyographic manifestations of muscular fatigue. Med.& Sci. in Sports and Exercise, Vol. 14, No.3, 198-202, 1982.

20.Antti Mero, and Paavo V. Komi, Force -, EMG -, and elasticity -velocity relationships at submaximal, maximal and supramaximal running speeds in sprinters. Enr. J. Appl. Physiol. 55:553-561, 1986.

21.Willian, J. G., Digby, G. S., Francine B. G., and Alan Mikesky, Exercise induced increases in muscle fiber number. Enr. J. Appl. Physiol. 55:137-141, 1986.

(北京体育大学 王瑞元)



第二章

血液

【提要】血液在机体物质运输、机能调节、免疫和体温维持等方面发挥着重要作用。本章将系统介绍血液的组成成分、血液的生理功能及理化特征。在此基础上，就运动对血液系统的影响进行讨论。

第一节 概述

一、血液的组成

(一) 血细胞与血浆

血液是一种粘滞的液体，由血细胞和血浆组成。血细胞也称血液的有形成分，包括红细胞、白细胞和血小板。血浆是血细胞以外的液体部分。血浆除含有大量的水分外，还含有多种化学物质、抗体和激素等。血细胞内的物质不断地透过细胞膜而与血浆中的物质进行交换。

从血管中取出的血液，一般称全血。如将全血中加入适量抗凝剂，血液不凝固，保持液态。经离心沉淀后，血液可分为两层，上层呈淡黄色的透明液体称为血浆，约占全血中的 50%~60%，下层呈暗红色的不透明固体部分称红细胞。在红细胞的上方，有一薄层的白色物质，是血小板和白细胞。血细胞约占全血的 40%~50%。在血细胞中主要是红细胞，它在全血中所占的容积百分比称为红细胞比容或压积。健康成人的红细胞比容，男子约为 40%~50%，女子约为 37%~48%。血小板和白细胞约占全血的 1%。

在流出体外的血液中如不加抗凝剂和进行其他处理，几分钟后就会凝固成胶冻血块。在室温内搁置 1 小时以上，血块缩小，并在血块周围出现少量黄色澄清液，称为血清。血清与血浆虽是血液的液体成分，但内容不完全相同。主要区别在于血浆含有纤维蛋白原，而血清不含有纤维蛋白原。这是因为血液凝固时，血浆中的液体纤维蛋白原转化为固体的纤维蛋白，网罗血细胞成为血块。

(二) 血液与体液

人体内含有大量的液体，即体内的水分和溶解于水中的各种物质，统称为体液，



约占体重的 60%~70%。体液的大部分存在于细胞内部,称为细胞内液,是构成细胞质的基本部分,约占体重 30%~40%。小部分存在于细胞外部的液体,称为细胞外液,约占体重的 15%~20%。细胞外液主要包括存在于血液中的血浆和存在于各种组织细胞间隙的液体(也称组织间液),以及各种腔室中的液体脑脊液等。血浆约占体重的 5%;组织间液约占体重的 15%。

二、内环境

(一) 内环境的概念

细胞外液是细胞直接生活的环境。血浆和组织液都是细胞外液。它们的化学成分和理化特性,如酸碱度、渗透压以及温度等的变化,都将不同程度地影响细胞的生命活动。因此,为了区别人体生存的外界环境,把细胞外液称为机体的内环境。

人体绝大部分细胞与外界隔绝而生活在细胞外液中,只有通过细胞外液,人体的细胞才能与外界环境之间进行物质交换。人体摄入的各种营养物质及水分等,必须先通过细胞外液才能进入细胞内,而细胞的代谢产物也是先进入细胞外液,最后再排出体外,这样才能维持人体正常机能。

(二) 内环境相对稳定的生理意义

人体的外界环境经常变化,而内环境变化甚小。这是由于人体内有多种调节机制,使内环境中理化因素的变动不超出正常生理范围,以保持动态平衡,这一生理现象就称为内环境的相对稳定性。

内环境相对稳定,细胞新陈代谢才能正常进行,才有可能保持细胞的正常兴奋性和各器官的正常机能活动。所以,内环境的相对稳定是机体正常生命活动的必需条件。

在运动时,人体的机能活动会发生一系列的显著变化,如体温升高、排汗增加、代谢产物增多等,使血液的酸碱度、渗透压等发生明显变化,内环境的平衡遭到破坏。当运动停止后机能活动又逐渐使机体内环境的平衡得到恢复,达到新的平衡状态。可见,机体内环境总是在一定范围内变动的,没有绝对的稳态;当机能活动显著变化,使内环境的稳态遭到破坏时,机体总是通过各种机能变化使内环境恢复稳态。但当内环境变动持续超过一定生理限度后,就会导致各种疾病。例如,持续的过度大运动量训练所导致的过度疲劳等。

三、血液的功能

(一) 维持内环境的相对稳定作用

血液能维持水、氧和营养物质的含量;维持渗透压、酸碱度、体温和血液有形成分等的相对稳定。这些因素的相对稳定会使人体的内环境相对稳定。只有在内环境相对稳

定时，人体组织细胞才有正常的兴奋性和生理活动。

（二）运输作用

血液不断地将从呼吸器官吸入的氧和消化系统吸收的营养物质运送到身体各处，供给组织细胞进行代谢；同时，又将全身各组织细胞的代谢产物二氧化碳、水和尿素等运输到肺、肾和皮肤等器官排出体外。

（三）调节作用

血液将内分泌的激素运输到周身，作用于相应的器官(称靶器官)改变其活动，起着体液调节作用。所以，血液是神经—体液调节的媒介。

通过皮肤的血管舒缩活动，血液在调节体温过程中发挥重要作用。温度升高时，皮肤的血管舒张，血液将体内深部产热器官产生的热运送到体表散发；温度降低时，皮肤血管则收缩，减少皮肤的血流量，以维持体温。

（四）防御和保护作用

血液有防御和净化作用，白细胞对于侵入人体的微生物和体内的坏死组织都有吞噬分解作用，称为细胞防御。血浆中含有多种免疫物质，如抗毒素、溶菌素等，总称为抗体。能对抗或消灭外来的细菌和毒素(总称为抗原)，从而免于传染性疾病的发生。血小板有加速凝血和止血作用，机体损伤出血时，血液能够在伤口发生凝固，防止继续出血，对人体具有保护作用。

四、血液的理化特性

血浆和血细胞含有大量的水和化学物质。因此，使血液表现出以下理化特性：

（一）颜色和比重

血液的颜色决定于红细胞内的血红蛋白的含量。动脉血含氧多，呈鲜红色；静脉血含氧少，呈暗红色；皮肤毛细血管的血液近似鲜红色。血浆和血清因含胆红质，故呈淡黄色。正常人全血的比重约为 1.050~1.060 之间，全血液的比重主要取决于红细胞的数量和血浆蛋白的含量。

（二）粘滞性

血液在血管内运行时，由于液体内部各种物质的分子或颗粒之间的摩擦而产生阻力，使血液具有一定的粘滞性。流体的流动性一般是通过粘度来反映和度量的，因此，反映血液流动性和粘滞性的最重要标志就是血液的粘度。液体的粘滞性和流动性互成反比关系，即粘性越大流动性越小。正常人血液的粘滞性约为蒸馏水的 4~5 倍，血浆约为蒸馏水的 1.6~2.4 倍。

血液粘滞性主要取决于红细胞的数量和血浆蛋白的含量，另外，还有血细胞形状及



在血流中的分布特点、表面结构和内部状态、易变形性以及它们之间的相互作用等。例如：登山运动由于空气稀薄，氧分压低，使红细胞增多，血液粘滞性升高；长跑运动，由于大量出汗，其结果引起血液浓缩，红细胞比例相对增大，血流阻力加大，血流速度缓慢，导致血压升高。所以，血液粘滞性对血流速度和血压都有一定影响。

(三) 渗透压

渗透压是一切溶液所固有的一种特性，它是由溶液中溶质分子运动所造成的。水分子通过半透膜向溶液扩散的现象称为渗透现象，简称渗透。

溶液促使膜外水分子向内渗透的力量即为渗透压或渗透吸水力，也就是溶液增大的压强，其数值相当于阻止水向膜内扩散的压强。血液的渗透压一般指血浆渗透压。

血浆渗透压由两部分组成，绝大部分来自血浆中的晶体物质，包括各种电解质的离子，其中最主要的是氯化钠，其次是碳酸氢钠和非电解质的小分子化合物，如葡萄糖、尿素等。由晶体物质所产生的渗透压称为晶体渗透压。血浆渗透压主要为晶体渗透压。另一部分来自血浆中的胶体物质，包括各种蛋白，其中最主要的是白蛋白，其次为球蛋白。由胶体物质所产生的渗透压称为胶体渗透压。胶体渗透压较小，大约为25~30mmHg，胶体渗透压虽小，但可防止过多水分渗透出毛细血管外，对水分出入毛细血管起着调节作用。所以，胶体渗透压对水在体内各部体液中的分布具有重要作用。

正常人在体温37℃时，血浆渗透压约为5800mmHg，以血浆的正常渗透压为标准，与血浆正常渗透压近似的溶液称为等渗溶液，如0.9%NaCl（称为生理盐水）、5%葡萄糖溶液等。高于血浆正常渗透压的溶液称为高渗溶液，而低于血浆正常渗透压的溶液则称为低渗溶液。

血浆渗透压相对稳定，这是维持细胞正常机能活动所必需的条件。通常血细胞和组织细胞的渗透压都与血浆渗透压相等，从而使细胞保持正常形态和功能。红细胞在高渗NaCl溶液中，由于高渗溶液吸水力强，红细胞失水发生皱缩，丧失功能。在低渗NaCl溶液中，由于水分进入红细胞内过多，引起膨胀，最终破裂，红细胞解体，血红蛋白被释放，这一现象总称为红细胞溶解，简称溶血。红细胞对低渗溶液具有不同的抵抗力，表示红细胞具有不同的脆性。对低渗溶液抵抗力小，表示脆性大，反之则表示脆性小。

血浆渗透压在正常生理情况下有一定的变动。在进行剧烈肌肉运动时，由于大量排汗和代谢产物（乳酸、硫酸等）进入血液，渗透压暂时升高，大量饮水后，可以降低渗透压。但是这些变化可以很快通过肾脏排泄和皮肤泌汗进行调节，从而维持相对恒定的状态。

(四) 酸碱度

正常人血浆的pH值约为7.35~7.45，平均值为7.4。人体生命活动所能耐受的最大pH值变化范围为6.9~7.8。血浆pH值经常维持相对恒定，之所以能维持恒定，是由于血浆是一种缓冲溶液。血液中还有数对具有抗酸和抗碱作用的物质，称为缓冲对，统称为缓冲体系。缓冲体系中每一个缓冲对是由于一种弱酸与该种弱酸的盐组成的。血液中



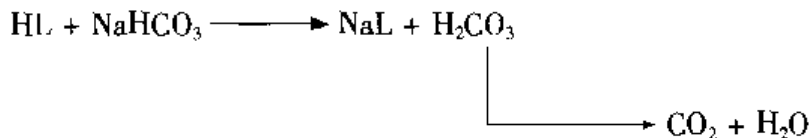
的缓冲对如下:

血浆中主要缓冲对有: NaHCO_3 (碳酸氢钠)/ H_2CO_3 (碳酸); 蛋白质钠盐/蛋白质;
 Na_2HPO_4 (磷酸氢钠)/ NaH_2PO_4 (磷酸二氢钠)。

红细胞中的主要缓冲对有: KHCO_3 (碳酸氢钾)/ H_2CO_3 (碳酸); 血红蛋白钾盐/血红蛋白;
氧合血红蛋白钾盐/氧合血红蛋白; K_2HPO_4 (磷酸氢二钾)/ KH_2PO_4 (磷酸二氢钾)。

血液中的缓冲对以血浆 H_2CO_3 与 NaHCO_3 这一对缓冲对最为重要。在正常情况下
 $\text{NaHCO}_3/\text{H}_2\text{CO}_3$ 比值为 20:1。若要保持这一正常比值, 需要通过呼吸功能调节血浆中
 H_2CO_3 浓度和通过肾脏调节血浆中的 NaHCO_3 浓度, 以及代谢等方面的配合作用。

例如, 组织代谢所产生的酸性物质进入血浆, 与血浆中的 NaHCO_3 发生作用, 形成
 H_2CO_3 (弱酸)。在碳酸酐酶作用下 H_2CO_3 又解离为 CO_2 由呼吸器官排出, 从而减低酸度,
保持血液的酸碱度。又如, 肌肉运动时的代谢产物——乳酸(HL)等进入血液后, 部分
被肝脏重新合成为肝糖原, 另一部分在血浆中与碳酸盐类结合形成碳酸, 缓冲血液的酸
度, 其反应如下:



当碱性物质 (主要来自食物) 进入血浆后与弱酸发生作用, 形成弱酸盐, 降低碱度。
经过这两方面的调节, 血液的酸碱度就能维持相对恒定。体内产生酸性物质大大胜于碱
性物质, 所以, 血液中的缓冲物质抗酸的能力远远大于抗碱的能力。

血液酸碱度的相对恒定, 对生命活动有重要意义。如果血液 pH 值的变动超过正常
范围, 就会影响各种酶的活性, 从而引起组织细胞的新陈代谢、兴奋性及各种生理机能的
紊乱, 甚至会出现酸或碱中毒现象。

碱贮备: 血液中缓冲酸性物质的主要成分是碳酸氢钠, 通常以每 100 毫升血浆的碳
酸氢钠含量来表示碱贮备量。常采用 HL 和 NaHCO_3 结合生成 H_2CO_3 , H_2CO_3 再解离出
 CO_2 , 通过 CO_2 含量来推算出 NaHCO_3 的含量。碱贮备的单位是以每 100 毫升血浆中
 H_2CO_3 能解离出的 CO_2 的毫升数来间接表示, 正常约为 50%~70%。

碱贮备是一个很重要的生理生化指标, 它能反映身体在运动时的缓冲能力, 从而了
解体内的代谢情况。有人测定运动员的碱贮备量比未受过训练的人高 10%。经常锻炼的
人可使血液的缓冲能力提高, 碳酸酐酶的活性增强。

第二节 运动对血量的影响

正常成年人的血量占体重的 7%~8%。人体在安静状态下, 大部分的血量都在心血
管中迅速流动, 这部分血量称为循环血量。还有一部分血量滞留在肝、肺、腹腔静脉以
及到下静脉丛等处, 流动缓慢, 血浆较少, 红细胞较多, 这部分血量称为贮存血量。



运动时由于贮存的血液被动员,使循环血量增加。运动员循环血量增加比无训练者大得多,而且尤以耐力性项目运动员增加更显著。一般人约增加10%,而运动员可增加25%~30%以上。同时,由于各部位血管口径发生了变化,使血液大部分可能流向工作肌。运动时骨骼肌血流量比安静时可增加4~20倍,心肌可增加3~5倍,而内脏和皮肤等部位的血流量却比安静时减少2~5倍。

表 2-1 耐力训练运动员和无训练男子的循环血量及其成分

指 标	运 动 员	非 运 动 员
循环血量(L)	6.4	5.5
循环血量(ml/kg 体重)	95.4	76.3
循环血浆量(L)	3.6	3.1
循环血浆量(mg/kg)	55.2	43.0
循环红细胞量(L)	2.8	2.4
循环红细胞量(mg/kg)	40.4	33.6
血细胞容积	42.8	44.6

(依廖克尔, 1977)

血容量即人体循环血量的总量。包括血浆容量和血细胞容量。一次性运动对血容量的影响,取决于运动的强度、持续时间、项目特点、环境温度及湿度、热适应和训练水平等。

从事短时间大强度运动时,血浆容量和血细胞容量都明显增加,而血细胞容量增加较明显。短时间运动时总血容量增加,主要是由于储血库里的血被动员入循环,使循环血量增加;而短时间运动出现的血液相对浓缩,其原因可能由于储血库的血中血浆量相对较少,血细胞容量较大,进入循环血中使血细胞浓度相对增高。

在长时间耐力性运动时,虽然由于种种原因引起红细胞的溶血,肾脏和消化道也常常排出少量红细胞,但一般数量极少,对循环血中红细胞总数影响不大,红细胞不会发生显著变化。血容量的改变主要是由血浆水分转移情况决定,如果血浆中的水分从毛细血管中渗出到组织间液或排出体外,将引起血浆容量减少,产生血液浓缩现象。反之,如果组织间液的水分渗入到毛细血管,血浆容量增加,则血液稀释。

进行长时间的耐力运动时,体内产热明显增加,通常以出汗的方式散热。汗液中水分占99%以上。环境温度在35℃时每蒸发一克汗,散放0.58千卡的热量。温度越高,运动强度越大,或运动时间越长,血浆的水分损失也越多。一次性长时间运动可使血浆容量减少10%左右。有资料报道,高温环境运动脱水时若体重下降3%~8%,血浆容量可减少6%~25%。脱水将使人体心输出量及有氧能力下降,代谢产物堆积增多,疲劳加剧,运动能力下降。

第三节 运动对血细胞的影响

一、运动对红细胞的影响

(一) 红细胞的生理特性

正常成熟的红细胞(erythrocyte, or red blood cell, RBC)没有细胞核,形状圆而扁,边缘较厚(约2微米),中央薄(约1微米),直径约6~9微米。红细胞在血管中流动时可因血流速度和血管口径不同而暂时改变形态,这种变形能力是影响血液的流变性的重要因素。红细胞的寿命平均为120天。衰老的红细胞被巨噬细胞吞噬。正常成年男子每立方毫米血液中含有红细胞约450~550万个,平均为500万个,成年女子每立方毫米血液中含有红细胞约380~460万个,平均为420万个。

红细胞的作用是运输氧和二氧化碳、缓冲血液的酸碱度。

(二) 运动对红细胞数量的影响

红细胞数目因运动而发生变化,其数量变化与运动的种类、运动强度和持续时间有关。有报道,在100%VO₂max强度运动后即刻,红细胞数目比运动前增加10%左右,运动后30分钟也还有5%的增加。

1. 一次性运动对红细胞数量的影响

一般认为,进行短时间大强度快速运动比进行长时间耐力运动红细胞增加得更明显。在同样时间的运动中,运动量越大,红细胞增加越多。不过这种增多在很大程度上是与血浆的相对和绝对减少有关,不能以单位容积血中红细胞的绝对数值作为评定红细胞数量变化的依据。

运动后即刻观察到的红细胞数增多,主要是由于血液重新分布的变化所引起。长时间运动时,排汗和不感蒸发的亢进引起血液浓缩。运动中肌细胞中代谢产物如乳酸、无机磷酸盐等浓度升高,使细胞内渗透压增高,与毛细血管中血浆渗透压梯度增大,钾离子进入细胞外液使肌肉毛细血管舒张,这些因素均造成血浆水分向肌细胞和组织液移动,也使血液浓缩增加。而对于短时间运动后即刻的红细胞增多,有人认为这主要是贮血库释放的较浓缩的血液进入循环血,相对提高了红细胞的浓度。在短时间的静力性或动力性运动中,肌肉持续紧张收缩使静脉受到压迫,血液流向毛细血管增多,并贮留在那儿使毛细血管内压升高,血浆中的水分渗出,也使血液出现浓缩。

运动中红细胞数量的暂时性增加,在运动停止后便开始恢复,1~2小时后可恢复到正常水平。



2. 长期运动训练对红细胞数量的影响

经过长时间的系统的运动训练,尤其是耐力性训练的运动员在安静时,其红细胞数并不比一般人高,有的甚至低于正常值,被诊断为运动性贫血。这种现象在耐力性项目运动员中较为常见。值得注意的是,在运动训练中如何区别真性贫血和假性贫血的问题。目前国内运动员所采用的检测贫血的指标是按照临床医学的方法和标准,即以单位容积中血红蛋白的含量(g/dl)和以单位体积中红细胞的数量进行评定。这样,无法从整体上(如红细胞总量或单位体重中红细胞数和血红蛋白含量)加以评定。实际上,很多资料表明,运动员红细胞总量较一般人有明显增加。Astrand 等人报道,耐力训练可使人体血容量增加 8%,其中血浆容量增加较多,红细胞容量增加相对较少。Elite 等报道,耐力项目运动员红细胞容量增加 15%,但血浆容量增加得更多。

由于运动员血容量增加与红细胞量增加相比在很大程度上是以增加血浆量为前提,所以血细胞容量的相应指标如红细胞数、红细胞压积、血红蛋白含量等比一般人有降低的趋势。虽然单位体积的红细胞数和血红蛋白量不高,但红细胞总数和血红蛋白总量较高。

安静时运动员红细胞和血红蛋白总量增加,与进行紧张训练和比赛时(特别是跑时)红细胞的工作性溶解作用刺激加强了红细胞和血红蛋白的生成机制有关。

由于红细胞和血红蛋白生成仅保证所增加的循环血量中红细胞和血红蛋白维持“正常”浓度,维持运动员的红细胞和血红蛋白生成之间的正常比值,所以,单位容积内红细胞中血红蛋白的含量同正常值无明显差别甚至偏低。这种现象应视为运动员血液系统对训练的一种适应性反应。

安静时运动员的红细胞浓度下降和红细胞压积下降具有一定的意义,因为它降低了血粘度,减少血循环的阻力,减轻了心脏负荷。而在肌肉运动时,血浆的水分丧失使血液比安静时相对浓缩,保证血红蛋白含量的相应提高,但又不至于明显影响血液的流变性,所以优秀的运动员运动中血粘度、红细胞压积等没有明显变化。这表明,他们能承受血液中较大幅度在工作性变化而使血液能维持在正常状态,并且对于提高氧的运输能力仍有较大的机能潜力。

由上述原因造成的红细胞数量偏低或血红蛋白含量下降而诊断为运动性贫血者,我们称之为假性贫血,是红细胞机能性稀释的反映,是一种适应及健康的表现,不能误认为“贫血”。但另外也不能忽视还有一些运动员是由于真正的运动性贫血而造成的红细胞数和血红蛋白含量的下降,虽然血液某些指标的测定结果相似,但发生机制和机能反应是与假性贫血有区别的。总之,对真性贫血和假性贫血须加以具体分析才能确定。

(三) 运动对红细胞压积的影响

红细胞压积即红细胞比容,是指红细胞在全血中所占的容积百分比,健康成年人为全血标本中 0.37~0.5、即 37%~50%,女子低于男子。运动时红细胞数量的变化直接影响到红细胞压积的变化。其红细胞压积值的变化基本与红细胞数的变化相一致。

在一定的温度和切变率条件下,正常人红细胞压积是影响血液粘度的主要因素。当压积超过 50%以上时,血粘度将随细胞压积变化呈指数关系上升。红细胞压积是红细胞



数量的单一函数。此时，单位体积血液中的红细胞数目越多，则红细胞压积越高，血液粘度也越高，使血循环阻力增加，对运动产生不利的影响。有人误认为红细胞压积增加也会相应使血红蛋白浓度提高，这对于运动中增加氧的运输是非常有利的。当然，在正常粘度范围内增加红细胞数和血红蛋白浓度将有利于更好地运输氧，增加带氧能力。但如果红细胞压积增加过多，超过正常血粘度，由于血流阻力增加，血流速度减慢，反而降低氧运输和其他养料的运输，也降低体内体温调节和清除废物的能力，使运动能力下降。因此，红细胞压积变化对循环效能的影响，要从带氧能力和血粘度变化这两个方面来分析。红细胞压积增高不仅能增大血液粘度，而且还能促使红细胞聚集，形成“缗钱状”叠连，进一步加重血流障碍。与此相反，红细胞比容降低时，虽红细胞数量减少，但却能降低血粘度，增加血液流动性，因而在全身或局部血压降低时可改善微循环血流，增加氧气供应。

运动中红细胞数量和红细胞压积的变化与训练水平有关。运动员与一般人之间有差别。优秀运动员与训练水平较低的运动员之间也有差别。另外，从事不同类型的项目和运动也会有差别。对我国自行车运动员定量负荷前后红细胞压积的测定表明，优秀运动员运动前后红细胞压积没有明显变化。而训练水平较低的运动员红细胞压积在运动后即刻明显增加。这提示：训练水平较低的运动员，运动时由于红细胞压积增加(血液浓缩)，使血粘度增加，致使循环阻力增加和心脏负担加重，从而限制或降低了运动能力。当然，血粘度增加的同时还引起一系列的连锁反应，如清除代谢产物、调节体温和运送营养物质的能力降低等。这些因素都会加速运动性疲劳的发生。因此，红细胞压积的变化和血粘度可作为评定耐力运动员机能的参考指标。

(四) 运动对红细胞流变性的影响

1. 红细胞流变性

正常情况下红细胞各自呈分散状态存在于流动的血液中，并在切应力作用下很容易变形，即被动地适应于血流状况而发生相应的改变，以减少血流的阻力。红细胞的这一特性称为细胞的流变性。红细胞流变性主要表现为红细胞的变形能力、红细胞的轴向集中以及红细胞内的胞浆流动等。正常形态的红细胞呈双面凹陷的盘形，有较大的表面积/容积比值，很容易发生变形。在层流时，各层液体产生速度梯度的力量(通常为血压)即切变应力(切应力)。红细胞在切应力作用下会变形、伸长，长轴指向血流方向，并且其细胞膜被迫产生的指向轴心的力量还使红细胞膜不断旋转变形，迅速发生轴向集中，而在靠近管壁的周边部分形成一低粘度血浆的光滑的流动层。红细胞的流变性保证了即使在红细胞压积较高的情况下，也能顺利发生轴流现象，从而减少流动的阻力。红细胞的高度变形能力使它能顺利通过小于自身直径的微血管和狭窄部位。因此，红细胞的流动性是影响血液流动的重要因素，也是影响体内红细胞寿命和微循环有效灌注的重要因素。此外红细胞膜的不断变形运动还有助于促进细胞内成分的充分扩散转运，大大增加氧气的转运效率。

在某些情况下，如果红细胞的流变性下降，红细胞可发生聚集及变形性低下的改变，这将增加血粘度，影响血液的流速和氧气的交换。

红细胞流变性可通过测定红细胞渗透脆性、红细胞悬液粘度、红细胞滤过率、红细胞压积和红细胞电泳率等指标反映出来。

2. 运动时红细胞流变性的变化

运动时红细胞流变性依运动强度不同、运动持续时间不同和训练水平不同而有所差别。一次性极限强度运动也会使红细胞滤过率下降、悬浮粘度增加及红细胞变形性降低。并且这种变化可持续 1 小时以上。对马拉松跑等超长距离项目运动员血液流变学研究结果发现,男、女马拉松运动员跑后红血球滤过能力降低 10%~20%,血浆渗透压升高。

影响红细胞变形能力的因素主要有三种:①红细胞表面积与容积的比值;②红细胞内部粘度;③红细胞膜的弹性。高渗血浆可以影响上述所有三种因素。血浆渗透压升高是造成红细胞变形能力降低的主要原因。

红细胞变形性降低可使血液流变性降低,并影响组织供氧和使心脏负荷加重,使运动成绩下降,对运动后恢复也有不良影响。运动后心血管意外的发生可能与此有关。因此,无训练者不宜进行一次性高强度的极限运动。

经过系统训练的运动员安静时红细胞变形能力增加。有人认为,这是因为运动加快了对衰老红细胞的淘汰,代替以年轻的红细胞,降低了红细胞膜的刚性,增加了红细胞膜的弹性。

二、运动对白细胞的影响

(一) 白细胞的生理特性

白细胞(leukocyte, or white blood cell, WBC)无色,有核,体积比红细胞大。根据形态差异可分为颗粒和无颗粒两大类。颗粒白细胞的细胞浆含有颗粒,根据颗粒染色的不同分为中性、嗜酸性和嗜碱性粒细胞;无颗粒白细胞分为淋巴细胞和单核细胞。各种白细胞在白细胞总数中所占的百分比叫白细胞分类计数,简称白细胞分类。白细胞是机体实施免疫功能的最重要成分,白细胞数量的变化直接影响机体的免疫功能。

正常人安静时血液中白细胞数为每立方毫米 4000~10000 个,白细胞的生理变动范围较大,一日之内,下午比早晨多,运动时比安静时多,进食后、炎症、月经期和分娩期都增多。训练程度、季节气候对白细胞也有影响。白细胞静止时呈圆形,膜表面有很多小褶皱,白细胞内粘度及细胞核的存在使其被动变形能力明显低于红细胞。正常状态下,白细胞可以引起微血管中血流呈间歇流。而在低驱动压时,可以引起微血流的永久性闭塞。实验证明,心肌缺血后发生的无再流现象与白细胞流变行为改变有关。

(二) 运动时白细胞变化的三个时相

早在 20 世纪 30 年代就有人报道运动后外周血中白细胞增多的现象,之后又有众多的研究观察到这一现象。前苏联叶果罗夫(A.B.ЕТОРОВ)和兰道斯把运动引起的白细胞

增多称为肌动白细胞增多,并将其分为三个时相,即淋巴增多时相、中性粒细胞时相和中毒时相(表 2-2)。

表 2-2 运动过程中白细胞三个时相的变化

时 相	中性粒细胞(%)			嗜碱性 粒细胞	嗜酸性 粒细胞	淋巴 细胞	单核 细胞	白细胞总数
	幼稚	杆状	分叶					
安静时	1~2	2~5	55~65	0.5~1	2~5	25~30	3.8	5000~8000
淋巴细胞时相	1~2	2~5	44~55	0.5~1	2~5	40~50	3.8	10000~12000
中性粒细胞时相	1~2	26	65~75	0.5~1	1	12	3.8	10000~18000
中毒再生阶段	1~2	10~12	60	0.5~1	0	5~10	3.8	30000~50000
中毒变质阶段	1~2	26	60	0.5~1	0	5~10	3.8	20000~25000

(依 A.H 克列托甫尼科夫)

淋巴细胞增多时相的主要特点是白细胞总数略有增加,可达每立方毫米 1~1.2 万个;淋巴细胞数增加到 40%~50%,中性粒细胞相对减少了 10%~15%,这种时相在肌肉始动工作时,短时间轻微体力活动后及赛前状态都可出现。此时淋巴细胞增多的原因,主要是由于肌肉活动使贮血库释放血入循环、淋巴结也释放大量淋巴细胞入血循环所致。

中性粒细胞增多时相的主要特点是白细胞数明显增加,可达每立方毫米 1.6~1.8 万个。其中,中性粒细胞明显增加,淋巴细胞减少到 10%~12%,嗜酸性粒细胞减少到 1%~2%。此时相是有训练的运动员在进行长时间中等强度运动或大强度运动后出现的。

中毒时相可分为两个阶段,再生阶段和变质阶段。再生阶段的特点是白细胞总数大大增加,可达每立方毫米 3~5 万个,嗜酸性粒细胞消失。变质阶段的血液中白细胞被破坏,白细胞总数开始减少。出现中毒时相是没有训练的人在进行长时间的、大强度的力竭性运动时,引起造血器官机能下降的不良反应。

(三) 运动时白细胞的变化

研究表明,白细胞总数和淋巴细胞增加的最大幅度出现在最大负荷运动停止后即刻。其增加的幅度随最大负荷运动的持续时间延长而增加。以较低的强度运动时,无论是短时间(5 分钟)还是持续长时间(30 分钟),运动停止后即刻白细胞总数和淋巴细胞数的增加幅度都显著低于最大负荷运动后即刻。随着运动时间的延长,白细胞总数和淋巴细胞数的增加幅度反而减少。检测结果还表明,不同持续时间的运动后淋巴细胞数量的增加幅度总是大于白细胞总数的增加幅度。这些结果说明,运动后即刻白细胞总数和淋巴细胞数的增加幅度主要与运动负荷有关,而与运动负荷的持续时间关系较小。在 30 分钟以内的一次性运动后,无论运动的强度如何,白细胞增多的主要成分是淋巴细胞。

(四) 运动后白细胞的恢复

运动后白细胞的恢复与运动强度和持续时间有关。运动强度越大,持续时间越长,白细胞的恢复速度越慢。

运动引起的白细胞数量变化对机体的免疫功能有何影响,许多学者在这方而进行了

探讨,爱德华(Edward)等发现,运动后外周血中白细胞数增加的同时伴有淋巴T细胞百分比的下降,TH/TS细胞比例下降(即辅助性T细胞与抑制性T细胞之比下降),这是细胞免疫功能下降的重要标志。运动后所发生的白细胞数量变化能否影响机体免疫功能,主要取决于白细胞数变化的幅度和持续的时间。如果变化幅度小且变化持续时间短,不会影响免疫功能。但如果变化幅度大,持续时间长(恢复慢),将对机体免疫功能发生深刻影响。

三、运动对血小板的影响

(一) 血小板生理特点及功能

血小板(platelets, thrombocyte)又称血栓细胞,主要来自骨髓中的巨核细胞,其数量正比于巨核细胞。全身三分之一以上的血小板储藏于脾脏内。血小板在止血、凝血及纤溶过程中起着重要作用,还与毛细血管完整性的保持有关。其发挥作用与本身所具有的粘附、聚集和释放等生理功能是分不开的。正常成人血小板的含量为每立方毫米10~30万个,其寿命约为8~12天,代谢十分旺盛。在运动后、饭后、组织损伤、大量失血及传染病后恢复期,血小板增加;月经开始时,血小板减少。血小板减少到五分之一(每立方毫米2万~5万个)时,就会引起皮肤和粘膜下出现血瘀点。

血小板的功能和生理特性主要表现有粘着、聚集、释放、收缩和吸附。这些特性与血小板的止血和凝血功能密切相关,一旦这些特性失常,血小板的功能也就发生紊乱。

1. 血小板的粘着

当血管损伤暴露其内膜下的胶原物质时,血小板就会粘附于胶原组织上。这是血小板发挥生理作用第一步。血小板与胶原的粘着有赖于双方的结构状态和功能正常,如果抑制血小板外衣上的葡萄糖基转移酶,或封闭胶原纤维上的自由氨基,则血小板几乎完全丧失粘着胶原组织的作用。

2. 血小板的聚集

聚集是血小板与血小板之间的相互粘着能力。在血管的损伤部位,血小板粘附出现后,损伤的组织或红细胞释放出ADP(二磷酸腺苷)等诱聚物质使血小板发生第一相聚集。在此基础上促使血小板释放出内源性诱聚剂,例如ADP等,激发第二相聚集反应。如果第一相聚集后,血小板没有发生自身释放反应,则聚集后的血小板又可自行解聚,从而不能形成血栓。这被视为血小板聚集的功能障碍。某些出血性疾病患者或正常人服用某些药物(如阿司匹林)后,血小板聚集功能可能发生障碍,可能会导致某些出血时间延长。血小板聚集功能障碍或亢进都会导致机体疾病。

3. 血小板的释放

继粘附和聚集后,血小板将所含生物活性物质分泌到血小板周围环境中,如ADP、

5-羟色胺(5-HT)、儿茶酚胺等,可以使小动脉收缩,有助于止血。血小板的这一生理过程称为血小板的释放反应。

4. 血小板的收缩

血小板的收缩是指血小板依赖其固有的收缩蛋白所产生的收缩作用。血小板收缩可使血凝块回缩硬化,使止血过程更加牢固。

5. 血小板的吸附

悬浮于血浆中的血小板能吸附许多凝血因子于其表面。一旦血管破损,随着血小板的黏着与聚集的发生,破损的血管局部的凝血因子增多,促进并加速凝血过程的发生和进行。

(二) 运动对血小板数量和功能的影响

据测定,一次性剧烈运动后即刻血小板数量、血小板平均容积增加,血小板活性增强,循环血中血小板聚集趋势也增加。这些变化可能与运动时肾上腺素分泌增多有关,也可能与ADP、血小板激活因素和花生四烯酸等因素有关。

研究表明,血小板数的增加只在大强度运动下发生,其增加的幅度与负荷强度呈高度正相关($r=0.94$),增加幅度最大达18%。这些血小板多是以脾脏中贮存的那部分“中老年”血小板。

运动后,血小板粘附率和最大聚集率有明显增加。血小板由血流轴心向外周移动的过程中,受到血流的冲击可发生损伤,加之剧烈运动使体内循环血流加快和管壁出现不易察觉的损伤,促使红细胞释放ADP,这两种因素中短时间引起血小板活化,使血小板粘附率与聚集率增加。另外,运动所导致的应激状态也是导致运动后血小板粘附性和聚集性增强的一个重要原因。血小板的这些变化可能对运动中血管微细损伤的修复和通透性的调节等过程具有十分重要的作用。

第四节 运动对血红蛋白的影响

一、血红蛋白的功能

血红蛋白是红细胞内的主要成分,其缩写为Hb,是一种结合蛋白质。每一血红蛋白分子由一分子的珠蛋白和四分子亚铁血红素组成,珠蛋白约占96%,血红素占4%。红细胞携带 O_2 (氧)和 CO_2 (二氧化碳)这一机能是靠红细胞内的Hb来完成的。Hb中的亚铁(Fe^{2+})在氧分压高时(肺内),易与氧结合,生成氧合血红蛋白(HbO_2),这种现象称氧合作用。在氧分压低时(组织内),与氧容易分离,把氧释放出来,供细胞代谢之需要,这种现象称为氧离作用。

Hb 也能与 CO_2 结合成氨基甲酸血红蛋白, 又称碳酸血红蛋白, 在组织内(CO_2 分压高)与 CO_2 结合, 到肺内(CO_2 分压低)放出 CO_2 。Hb 如此不断地运输 O_2 和 CO_2 , 进行吐故纳新。Hb 不仅有运输氧和二氧化碳的作用, 还有缓冲血液酸碱度的作用。

由于 Hb 指标相对稳定, 又能较敏感的反映身体机能状态, 所以, 在运动训练中经常利用这一指标评定运动员机能状态、训练水平, 预测运动能力。

运动员经过系统的运动训练, 血液的有形成分会发生一些变化。正常情况下 Hb 的变化与红细胞的变化是一致的, 运动中凡能影响红细胞的因素都能影响 Hb。

二、血红蛋白与运动训练

(一) 对运动员血红蛋白正常值评定

血红蛋白过低或过高都会影响运动员的运动能力。低于正常值, 即出现贫血, 氧和营养物质供给不足, 必然导致工作能力下降。Hb 值过高时, 血液中红细胞数量和压积也必然增多。这样, 血流的粘滞性增大, 造成血流阻力增加和心脏负担加重, 使血液动力学改变, 也会引起身体一系列的不适应和紊乱。当 Hb 为 14 克%时, 血粘度为 4 单位; 血红蛋白为 20 克%时, 血粘度为 6 单位。正常生理活动应保持血粘度在 4~5 单位。因此, 保持 Hb 值在最适程度范围, 可使运动员达到最佳机能状态, 这也是科学地进行训练的有效途径之一。

由于运动员 Hb 值存在个体差异, 不能用一个统一的正常值标准来评定运动员 Hb 含量。应针对每一个体情况进行测定和分析。有人做了较长时间的观察, 提出了血红蛋白半定量分析的方法。应用这一方法, 可以了解每名运动员 Hb 含量的正常范围。通过观察和分析运动员 Hb 含量的变动, 掌握运动员机能状态情况, 有的放矢地调整运动员身体机能达最佳状态。还可通过测定运动员的 Hb 预测运动成绩。

在应用 Hb 指标时应注意以下几个问题:

1. 冬训期间评价标准应略低, 女运动员月经期间亦稍低, 这是正常的生理波动。
2. 运动员 Hb 含量存在个体差异。每名运动员存在季节、生物周期等的周期性差异。
3. 虽然 Hb 含量存在个体差异, 但一般男运动员 Hb 值不应超过 17 克(170g/l), 女运动员不应超过 16 克(160g/l)。最低值不得低于本人全年平均的 80%。同一次检测中, 如果个别运动员 Hb 值与同队平均值相差过大时, 应引起注意。

4. 运动员在大运动量后的调整期, Hb 由低向高恢复时, 运动员的自我感觉与运动成绩也最好, 可能这一时期是运动员身体机能状态“最佳期”。这个“最佳期”并不是出现在人们想象的“超量恢复期”。

5. Hb 指标主要用于评定某个训练周期或阶段, 如根据 1~2 周时间内运动员对运动量和运动强度的反应来评定运动员的机能状态等, 而不能用于评定每次训练课的情况。在观察分析 Hb 指标变化时, 应结合其他指标(如无氧阈、尿蛋白、心率等), 以及运动员的自我感觉和运动能力进行综合分析。

6. Hb 指标的应用主要针对有氧工作为主的项目。其他项目只能以此作为参考指标。



(二) 用 Hb 指标进行运动员选材

实践证明,按每名运动员的 Hb 平均值,可将 Hb 值的个体差异分为三个类型,即偏高型、正常型和偏低型。每一个基本类型中又可分为两个亚型,即:按标准差(SD)大于1克%为波动大者,小于1克%为波动小者。因此,理论上可以把运动员的血红蛋白分为六个类型。但在实际工作中经常遇到的只有四个类型:即偏高波动小者、正常波动大者、正常波动小者和偏低波动小者。运动训练实践证明,以血红蛋白值高、波动小者为最佳。这种类型运动员能耐受大负荷运动训练,从事耐力性项目运动较好。而以血红蛋白值偏低波动小者为较差。

在运动员训练期间,每周或每隔一周测定一次血红蛋白,1~2个月左右就可以基本判定运动员属哪种类型。但也要注意,分析时应根据运动训练的实际情况综合分析,并和同队的其他队员进行横向比较才较为客观。这个指标在耐力性项目或速度耐力性项目运动员选材时可做参考。

第五节 运动对血液凝固和纤溶能力的影响

一、血液凝固和纤溶

正常情况下,人体具有极为完善的止血机能。这一止血机能主要是通过血管壁、血小板和血浆三方面因素的协同作用来实现。当小血管受损伤时,止血的全过程大致可分为三个时相:首先出现血管收缩,阻碍血流,从而产生暂时的止血效应。然后,血小板粘着在受损伤暴露出来的胶原上,聚集起来,形成血栓,以堵塞血管的破口。在血小板粘着胶原的同时,凝血过程也开始启动,受损血管所暴露出的胶原组织或其他组织,可激活血浆内的凝血因子,最后使血浆内的纤维蛋白原转变为纤维蛋白,形成止血凝块。这三个时相虽然有先后次序,但是又互相重叠和密切地联系着。

在血管无明显破损的情况下,心血管内也经常有少量的纤维蛋白形成,并覆盖在毛细血管内膜的表面上,这是维持毛细血管正常通透性的一个重要因素。但是纤维蛋白不断地生成,又不断地溶解。人体内的血液凝固和纤维蛋白溶解这两个过程是处于动态平衡的状态,所以,机体的血管既不会由于通透性失常而发生出血或渗血现象,也不会由于出现血凝块而产生血栓以堵塞血流。一旦这两个对立过程出现明显的不平衡,就可能出现病理变化。

(一) 血液凝固

当血管受伤出血时,会立即形成凝血止血。止血由血管的损伤部位收缩,血小板粘附、聚集、变态,从而形成白色血栓,然后由血液凝固系统形成纤维蛋白(胶冻状血块)完成止血过程。血液凝固的过程简称凝血(blood coagulation)或血凝。



血液凝固最终是血浆中纤维蛋白原转变为纤维蛋白，成为很细小的网状构造，并网罗许多血细胞而成为血凝块。血凝过程大致可分为三个主要步骤：第一步为凝血酶原激活物的形成；第二步为凝血酶原激活物催化凝血酶原转变为凝血酶；第三步为凝血酶催化纤维蛋白原转变为纤维蛋白，从而形成冻胶状的血块。

凝血是十分复杂的生物化学过程，参与这一过程的许多物质统称为凝血因子(blood coagulation factor)，通过国际学术会议的推荐，按这些因子被发现的先后次序以罗马数字命名，作为国际上通用的名称。分别命名为因子Ⅰ、Ⅱ直到Ⅻ，其中因子Ⅵ被取消，现已确定的共有12个因子。在这些因子中，除因子Ⅳ和磷脂外，其余的因子均为蛋白质。

当血液被泄露到血管外，其凝固过程很快。相比在血管内就像装在具有不亲水的内表面的容器里那样，血液很难凝固。这样，血凝的形成过程就被考虑为内源性凝固系统和外源性凝固系统。前者是指参与血凝过程的全部物质都是存在于血液之中，后者则是血凝过程中有其他组织的凝血物质参加。

在凝血过程中，每一个凝血因子都是以无活性的形式存在于血浆中，它们一经活化，就变成有催化活性的酶，进而活化下一相应的凝血因子。这样，一个既受上一个因子的激活、又可激活相应的下一个因子，再加上有的凝血因子具有加速凝血的作用，使凝血过程越来越快，直至凝血过程完结。

(二) 纤维蛋白溶解

在正常生理条件下，凝血过程中生成的纤维蛋白可在一系列水解酶的作用下，变成可溶性的纤维蛋白降解产物。这种血液凝固后出现的血凝块重新液化的现象称为纤维蛋白溶解，简称纤溶。纤维蛋白溶解的基本过程可分为两个阶段，即纤溶酶原的激活和纤维蛋白的降解。

1. 纤溶酶的激活

正常血管内血液有时会轻度凝血，除了有抗凝血物质外，还有相应的纤维蛋白溶解系统，简称纤溶系统。纤溶酶通常以纤溶酶原形式存在于血中。

纤溶酶的主要作用是分解纤维蛋白。另外，它还可分解其他凝血因子如纤维蛋白原、因子Ⅴ、Ⅶ、Ⅷ和Ⅸ。纤溶酶原的激活物有三类：

血管激活物 由小血管的内皮细胞合成和释放。当血管内出现纤维蛋白或血小板释放5-羟色胺，以及交感—肾上腺髓质系统活动加强时，这类激活物的合成和释放都可增加。

组织激活物 这类激活物存在于很多组织中，在组织修复和伤口愈合时释放较多。如肾脏合成和释放的尿激酶就属于这一类激活物。

血浆激活物 血浆中的因子Ⅺa可以将前激肽释放酶激活成激肽释放酶，而激肽释放酶可将纤溶酶原激活。由于因子Ⅺa既是内源性凝血途径的启动因子，又可以导致纤溶酶原的激活，这一类激活物可能使血凝与纤溶两个系统互相配合并保持平衡。

当血凝块形成时，大量的纤溶酶原被吸附于其中。但这并不能马上引起纤溶，因为此时纤溶酶原并没有被大量激活。随后，受损的组织 and 血管内皮细胞缓慢地释放出纤溶酶原激活物，特别是强有力的组织纤溶酶原激活物，激活纤溶酶原，最终导致血凝块的溶解。许多被血凝块堵塞的小血管即可通过此机制而被疏通，重新开放。

2. 纤维蛋白的降解

纤溶酶是一种内切酶，可逐步将整个纤维蛋白或纤维蛋白原分子分割成可溶性的小肽，总称为纤维蛋白降解产物。这些降解产物一般不会再凝固，且其中一部分具有抗凝作用。

3. 纤溶抑制

阻碍纤维蛋白溶解的物质统称为纤溶抑制物。它们存在于血浆、组织以及各种体液中。根据其作用可把抑制物分为两大类：一类抑制纤溶酶原的激活，这类抑制物叫做抗活化素；另一类抑制纤溶酶原的活性，叫做抗纤溶酶。据测定，血浆中抗纤溶酶的浓度很高，为纤溶酶浓度的 20~30 倍。因此在正常情况下，血液中的纤溶酶不易发挥其活性。在凝血块中由于纤维蛋白能吸附溶酶原和激活物而不吸附抑制物，因此凝血块中有大量纤溶酶形成并发挥其作用，从而使纤维蛋白溶解。这样，纤溶和抗纤溶这两个相互对立的过程，就在不同的条件下表现其最后效应。

二、运动对血凝和纤溶能力的影响

(一) 一次性运动对血凝和纤溶能力的影响

一次性运动引起血凝系统和纤溶系统机能亢进。在凝固系统中，激烈运动时可以观察到内源系统凝固因子，特别是以因子Ⅷ为中心的活性亢进。这种因子Ⅷ活性亢进可以延续到运动后 8 小时以上。当给予 β 阻断剂后进行运动，因子Ⅷ活性不变；给予肾上腺素后进行运动，因子Ⅷ活性亢进；而在运动后给予肾上腺素，因子Ⅷ活性在短时间内也不亢进。这表明，由运动引起的血中肾上腺素的增加，是伴随着因子Ⅷ从血管壁等体内贮备中释放。此外，也可以观察到因子的活性亢进和纤维蛋白原的增加。

另外，在步行这样的轻微运动中，也能观察到在纤溶系统中活性亢进。此外，纤溶系统的活性亢进与运动强度呈正比，即使在 70% VO_{2max} (最大吸氧量) 的运动中延长运动时间时，纤溶系统的活性亢进也能达到相当于在 100% VO_{2max} 强度的运动时一样。所以纤溶系统的活性亢进与运动强度和运动时间有关。这种活性亢进的机理，一般认为和凝血系统一样，是由于运动使血中儿茶酚胺增加，引起血管壁释放纤溶酶原激活酶。纤溶酶原激活酶从作为体内贮备的血管壁中释放出来。

关于纤溶系统的影响，人们已知道长时间低强度运动后的恢复期中，激活酶的抑制因子会有增加。

(三) 长期运动对血凝和纤溶能力的影响

研究表明, 血凝能力及凝血酶原时间 PT、部分凝血活素及时间 PTT 等指标在运动者与非运动者之间没有差别, 而纤溶能力(ELT)则运动者比非运动者亢进。此外, 对纤溶能力异常值的出现率进行比较时, 运动者比非运动者的出现率为低。这表明, 长时间坚持体育锻炼对血凝系统不产生明显影响, 但可提高血液的纤溶能力。

对训练年限与纤溶能力的关系进行观察时发现, 由于非运动者纤溶能力随年龄增长而下降, 所以纤溶能力的值分布范围很大(10~40 小时)。与此相比, 运动者纤溶能力与年龄没有明显的关系, 而是随着运动锻炼的年限增加, 进入正常值范围的越多(6~8 小时)。并且表现出随着训练年限的延长, 纤溶能力的异常值出现率越趋下降。通过系统长期的运动锻炼, 能使血液纤溶能力保持在正常范围, 并且不致因年龄的增长而下降。

运动员血液 (参考内容)

由于运动训练可以使运动员的血液系统产生某些适应性变化, 且这些变化有别于一般人(非运动员)。因此, 有些学者提出了“运动员血液”的概念。

一、“运动员血液”概念

“运动员血液”是指经过良好训练的运动员, 由于运动训练使血液的性状发生了一系列适应性变化, 如纤维蛋白溶解作用增加, 血容量增加, 红细胞变形能力增加, 血粘度下降等。这种变化在运动训练停止后是可以恢复的。具有这种特征的血液称为运动员血液。

Berry 等(1949)首先报道了经过良好训练的耐力运动员血红蛋白浓度及红细胞压积低于一般人, 它与过去传统认为的运动员血液指标的概念完全相反。过去的很多报道包括教科书上都认为, 运动员经过训练后血液的红细胞数增多, 血红蛋白含量增高, 红细胞压积也增高。并认为这些变化将有利于运动中携带更多的氧。之后, 有很多资料也报道了与 Berry 相似的结果, 但这种结果却被解释为是由于运动引起的“贫血”。随着对运动员血液研究的逐步广泛深入和越来越多的资料证实, 运动员的血液具有与一般人不同的特征, 包括红细胞压积较低, 血红蛋白浓度较低等, 而且这种特征在有良好训练的耐力运动员血液中较为普遍。1979 年日本 Yoshimura 等首先提出了“运动员血液”的概念。直到 1988 年, Eichner 等对运动员血液特点进行了研究分析, 才作为一个专有名词明确提出了“运动员血液”的概念, 并认为运动员血液系统的改变是对运动良好适应的反映。

二、运动员血液特征

运动员血液应具备以下几方面的特征:

(一) 纤维蛋白溶解作用增加

大约 40 年前已经知道运动可以刺激组织释放纤维蛋白溶酶, 能激活纤维性蛋白的溶解作用。近年来更进一步研究认为, 运动具有抗血栓形成作用, 适度地参加运动训练能中等程度地增加纤维蛋白溶解作用。无论是休息状态或静脉血栓形成闭塞性的刺激后, 进行 5 分钟的功率自行车运动到参加马拉松跑, 都可以增加纤维蛋白溶解作用。5

分钟激烈运动后的纤维蛋白溶解作用的增强可以保持 90 分钟。关于运动对纤溶能力的影响已在前面作了介绍。“运动员血液”的纤溶能力增加与一般人进行一次性运动所出现的纤溶作用暂时性增加是不同的。首先，“运动员血液”纤溶能力增加是由于长时间系统的运动训练所引起的适应性改变，纤溶能力与训练年限成正比。其次，“运动员血液”纤溶能力增加不是一时性的，只要保持有规律的经常性运动，就可使纤溶能力的增加持续性的存在。另外，“运动员血液”的纤溶能力增加并不完全表现为“亢进”，而是具有双向性调整作用，即对纤溶能力不足的通过运动训练可调整变为增加，而对于过分“亢进”的，通过运动作用又可调整为正常。虽然也有文献指出马拉松运动员偶有深部静脉血栓形成，但发病率极少，可能是运动时损伤所造成。大量研究证明，经常性运动训练有助于抗血栓形成。运动员血液的纤溶能力增加是训练的良好反映。

（二）血容量增加

运动员血液的第二个特征表现为血容量增加，这种血容量增加包括血浆容量和红细胞容量都增加，但是由于血浆容量增加相对于红细胞容量增加更显著，所以形成红细胞压积减少和单位容积中的红细胞数和血红蛋白含量减少，血液相对稀释。Sanny 等认为，运动训练使人体血浆容量相对增加更多的机制是因为血浆蛋白总量增多，尤其是白蛋白总量增多，使胶体渗透压升高，促使更多的水分贮留在血液循环之中。白蛋白分子量小于球蛋白，占蛋白质胶体渗透压 65%。耐力训练的运动员血浆总蛋白量比一般人增加 28 克，其中 86% 为白蛋白。1 克血浆蛋白可以贮留水分 14~15 毫升，28 克蛋白质共可增加血浆量约 390~420 毫升。由于血浆蛋白增加也伴随着水分的相应增加，所以虽然总血浆容量增加，但单位体积中的血浆蛋白浓度仍与一般人相似。至于红细胞增多的机制至今仍不太明了，有人认为是与紧张训练和比赛时红细胞的工作性溶解作用增加、红细胞减少而刺激加强了红细胞的生成机制有关；还有人认为是因运动时肾血流量降低，使肾小管近旁细胞促使红细胞生成素分泌增多。总之，如果对运动训练所引起的血容量、血浆容量、红细胞容量变化的绝对及相对关系不能正确地了解，就会对运动员血液的特点作出错误的判断和结论。

（三）红细胞变形能力增加

红细胞变形能力增加是运动员血液的又一特点。经过系统训练的运动员在安静时红细胞变形能力增加。有人认为，这是因为运动加快了对衰老红细胞的淘汰，代替以更年轻的红细胞，降低了红细胞膜的刚性，增加了膜的弹性。红细胞变形能力增加和血液稀释使红细胞压积减少，这两个因素都可使血液的粘度下降，从而改善血液流变性。

（四）血粘度下降

耐力训练引起血粘度下降的最主要原因是血液相对稀释，除了红细胞压积增加较少之外，更重要的是大多数血浆不对称蛋白质，例如纤维蛋白原也得到了稀释。因为对血粘度影响最大的是血液中不对称蛋白质的浓度，在这些蛋白质得到了稀释后血粘度较容易出现下降，因此，红细胞变形能力增加是促使血粘度下降的第三个原因。此外血浆本身粘度下降也起一定的作用。运动员血粘度下降的生理意义在于改善了血液的流变特性，使静脉血栓的发生率明显减少，有利于血液对各器官及工作肌灌注，改善微循环，增强血液的携氧能力和运输营养物质的能力，也加快对代谢废物的排出率。



三、“运动员血液”的生理意义

运动员血液对人体的生理意义在于：

(一) 血容量增加更有利于增大运动时的心输出量，对于提高总体的运动能力尤其是有氧耐力意义重大。在运动竞赛中，有人采用自身血液回输的办法来改善心输出量、最大有氧能力和提高血液的运氧能力，并取得较好的效果即说明增加血容量的意义。但血液回输法已作为“血液兴奋剂”而被禁用。

(二) 运动员血液粘滞性下降，血容量增多，这些因素有利于减少血流阻力，加快血流速度，使营养物质、激素等运输以及代谢物排除更迅速，也有利于体温调节和大强度运动时散热，使有足够多的血量流到皮肤。

(三) 减低因运动时血浆水分转移、丢失而造成的血液过分浓缩的程度。从血液流变学的角度来认识是有利于维持正常的血粘度和血流速度，满足机体运动中代谢、运输的需要从而维持运动能力。在运动时间较长的情况下，大量的流汗易使血浆水分丧失过多而出现高渗状态，这将危及红细胞的变形能力，产生血液流变学的异常，影响血液对组织灌注，也降低运动能力。近年通过对马拉松等超长距离项目的运动员血液流变学进行研究的结果发现，男性和女性马拉松运动员跑后红细胞滤过能力明显降低(约20%)，血浆渗透压明显升高，两种变量之间呈高度负相关，血浆纤维蛋白原粘度无明显变化。马拉松跑后红细胞滤过能力下降的机制目前还不太清楚。一般认为，影响红细胞变形能力的因素主要有三种：①红细胞表面积与容积的比值；②红细胞内部粘度；③红细胞膜的弹性。

高渗血浆可以影响上述所有三种因素，因此可以认为是运动时影响红细胞滤过能力的最常见原因。此外，血浆中乙醇、葡萄糖和尿素浓度增高也能降低红细胞的滤过能力。实际上，观察红细胞形态学的变化也表明，血浆渗透压升高是使红细胞滤过能力降低的主要原因。马拉松运动员跑后血液中呈皱缩、粘附状态的红细胞增多，表明由于血浆渗透压升高使红细胞内部水分丢失。还有资料报道，引起血浆渗透压升高原因是血浆容量降低及血浆中电解质浓度升高。运动训练的作用在于增加了血浆容量，血液相对稀释，这可以解释为是机体对运动时血浆水分丧失过多、血液相对浓缩的一种代偿性适应。运动时血浆渗透压升高，在运动后的恢复期不仅使血浆渗透压能降低恢复到正常水平，还能降低到超过正常水平，使血液相对稀释(当然此处所指的渗透压降低到超过正常水平并非指出现低渗状态)。这样在一定程度上能减轻机体下一次运动时血液浓缩，经常从事运动的人血液的机能适应便出现血容量增加，并且血浆容量相对增加更多。这种变化反过来又有利于运动时机体的机能需要，促进了运动能力，所以说运动员血液的粘度下降、血液相对稀释是对运动的一种适应性反应。训练水平高的人安静状态血浆粘度及纤维蛋白原的浓度在正常的低限范围，定量运动时血浆浓度和纤维蛋白原虽然也升高，但其幅度低于一般人。

另外也有资料报道，高水平运动员运动时血浆容量没有明显减少。原因是由于运动时淋巴液的回流加速，而高水平运动员淋巴回流速度比一般人快。淋巴液中含有较高浓度的蛋白质，进入血液后有利于贮留血浆水分，减轻血浆渗透压的升高。

(四) 血浆清蛋白浓度升高，有利于运载脂肪酸供能。根据 Coyle(1985)报道，耐



力训练引起血容量的适应性变化是可逆的,停训一个月左右运动员血容量减少9%。

【小结】

1.细胞外液是细胞直接生活的环境,其化学成分和理化特性,如酸碱度、渗透压以及温度等的变化,都将不同程度地影响细胞的生命活动。为了区别人体生存的外界环境,又把细胞外液称为机体的内环境。

2.机体处于相对安静状态下,其内环境总是在一定范围内变动的,没有绝对的稳态;当机能活动显著变化,使内环境的稳态遭到破坏时,机体总是通过各种机能变化使内环境恢复稳态,非稳态是暂时的。

3.以血浆的正常渗透压为标准,与血浆正常渗透压很相似的溶液称为等渗溶液,如0.9%NaCl(称为生理盐水)、5%葡萄糖溶液等。高于血浆正常渗透压的溶液称为高渗溶液,而低于血浆正常渗透压的溶液则称为低渗溶液。

4.由于运动员血容量增加与红细胞量增加相比在很大程度上是以增加血浆量为前提,所以血细胞容量的相应指标如红细胞数、红细胞压积和血红蛋白含量等比一般人有降低的趋势。

5.经过系统训练的运动员安静时红细胞变形能力增加,这是因为运动加快了对衰老红细胞的淘汰,代替以年轻的红细胞,降低了红细胞膜的刚性,增加了膜的弹性。

6.在血管无明显破损的情况下,心血管内经常有少量的纤维蛋白形成,并覆盖在毛细血管内膜的表面上,这是维持毛细血管正常通透性的一个重要因素。纤维蛋白不断地生成,又不断地溶解。人体内,血液凝固和纤维蛋白溶解这两个过程是处于动态平衡的状态。

7.运动锻炼能改善血液的纤溶能力,使纤溶能力亢进者减弱,不足者增强,正常者仍保持正常,并可消除由于年龄的增长而使纤溶能力下降的影响。

【思考题】

- 1.试述血液的组成与功能。
- 2.何谓内环境?血液对维持内环境相对稳定的作用及意义。
- 3.试述血液在维持酸碱平衡中的作用。
- 4.试述一次性运动对红细胞的影响。
- 5.何谓红细胞流变性?影响因素有哪些?试述运动对红细胞流变性的影响。
- 6.试述长期运动对红细胞的影响。
- 7.试述一次性运动对血液的影响。
- 8.试述血小板的生理特点及功能。
- 9.试述运动对血凝和纤溶能力的影响。
- 10.如何应用血红蛋白指标指导科学训练。

【主要参考文献】

- 1.体育学院通用教材:《运动生理学》,北京,人民体育出版社,1990。



2. 北京医学院主编:《生物化学》,北京,人民卫生出版社,1981。
3. 湖南医学院主编:《人体生理学》,北京,人民卫生出版社,1978。
4. 奥斯特朗等著,杨锡让等译:《运动生理学》,北京,人民体育出版社,1982。
5. 许豪文著:《运动生物化学进展》,上海,华东师范大学出版社,1989。
6. 佟启良、杨锡让等编:《运动生理学》,北京,北京体育大学出版社,1991。
7. B.潘斯基著,王焕葆等译:《动态解剖与生理学》,北京,科学出版社,1982。
8. 范振华等编著:《运动医学》,上海,上海医科大学出版社,1991。
9. 任建生:《一次性运动对血液流变学的影响》,中国运动医学杂志第六卷第3期,1996。
10. 任建生:《长期运动对血液流变学的影响》,中国运动医学杂志第六卷第4期,1996。
11. 小野三嗣等编著:《运动的生理科学》,朝会书店,1978。
12. Guegue, D.M., et al. Effects of maximal physical exercise on hemorheological parameters in top level sportsmen. Clin. Hemorheol. 1989, 9: 625-632.
13. Greenleaf, J.E., et al. Plasma volume during stress in man; osmolality and red cell volume. J. Appl. Physiol. 1979, 47: 1031-1038.
14. Letcher, R.L., et al. Effects of exercise on plasma viscosity in athletes and sedentary normal subjects. Clin. Cardiol. 1981, 4: 172-179.
15. Martin, D.L., et al. Blood viscosity response to maximal exercise in endurance trained and sedentary female subjects. J. Appl. Physiol. 1985, 59: 348-353.
16. R. Jiansheng Echocardiographic study of the heart structure in female athletes. Sports cardiology. Vol. 2. 1989.
17. Wood, S.C., et al. Effects of endurance training and long distance running on blood viscosity. Med Sci. Sports Exerc. 1991, 23: 1265-1269.
18. Herman K. Hellerstein, M.D. and T. William Moir, M.D. Distance Running in the 1980s: Cardiovascular Benefits and Risks. Exercise and The Heart. 75, 1982.

(武汉体育学院 任建生)



第三章

循环机能

【提要】心脏和血管系统构成了人体的循环系统。本章主要介绍心肌的生理特性，心脏的泵血功能及其评定，各类血管的生理特点，动脉血压及其影响因素，心血管活动的神经调节、体液调节及局部血流调节，运动对心血管系统的影响，测定脉搏（心率）和血压在运动实践中的意义及体育运动与心血管疾病等内容。

血液在循环系统中按一定方向周而复始地流动称为血液循环。血液循环系统的主要功能是完成体内物质运输，使机体的新陈代谢不断进行；体内各内分泌腺分泌的激素或其他体液因素通过血液的运输，作用于相应的靶细胞，实现机体的体液调节机能；机体内环境理化特性的相对稳定的维持和血液防卫机能的实现，也依赖于血液循环。

第一节 心脏的机能

心脏是一个由心肌组织构成并具有瓣膜结构的空腔器官，是血液循环的动力装置，是实现泵血功能的肌肉器官。生命过程中，心脏不断做收缩和舒张的交替活动，舒张时容纳静脉血返回心脏，收缩时把血液射入动脉，为血液流动提供能量。通过心脏的这种节律性活动以及由此而引起的瓣膜的节律性开启和关闭，推动血液沿单一的方向循环流动。心脏的这种活动形式与水泵相似，因此可以把心脏看做是实现泵血功能的肌肉器官。

几个世纪以来，生物学家一直认为心脏是一个单纯的循环器官，近些年通过对心钠素等的研究，认识到心脏除循环功能外，还具有内分泌功能，可合成和分泌心钠素和某些生物活性多肽。

一、心脏的一般结构

心脏有四个腔室，在心脏右侧为右心房和右心室，左侧为左心房和左心室。构成心房的肌肉与构成左右两心室的肌肉之间，一般无直接肌纤维联系，靠结缔组织及房室环将心房和心室联结在一起。在心房和心室之间有房室瓣。右边是三尖瓣，左边是二尖瓣。每一心室和大动脉之间有半月瓣，右心室和肺动脉之间是肺动脉瓣，左心室和主动脉之间是主动脉瓣。瓣膜的功能是保证血流在心脏内朝着一个方向流动，防止血液逆



流。这些瓣膜朝着一个方向的启闭是由于心房、心室和大动脉之间的压力差所引起的。心室壁乳头肌与房室瓣相连的腱索仅仅起着防止房室瓣翻转的作用,并不主动参与瓣膜的开闭。

右心房接受来自身体各组织的含氧量较少的静脉血,然后再由右心室泵入肺动脉输送到肺部(肺循环)。左心房接受来自肺静脉带有饱和氧气的血液,再由左心室泵入主动脉输送到机体各器官和组织(体循环)。

心房主要是贮血器,仅起着辅助泵的作用,泵血功能主要是由肌肉较厚的心室来完成的。心室肌肉由两层螺旋方式排列的肌纤维组成,在两层之间还夹着一层大致为环形的肌纤维。螺旋状排列的肌纤维起源于房室之间的腱环,其纤维向下行围绕两心室直到心尖部,然后向上折回形成乳头肌。心室肌纤维的这种排列方式具有一定的生理意义,当它收缩时使心室同时发生上下方向及由四周向内的缩小,产生的排血力较强。左心室壁的肌肉比右心室的约厚三倍,因此左心室收缩力比右心室强。

二、心肌的生理特性

心肌具有自动节律性、传导性、兴奋性和收缩性。前三种特性都是以肌膜的生物电活动为基础,故又称为电生理特性。心肌的收缩性是指心肌能够在肌膜动作电位触发下产生收缩反应的特性,是心肌的一种机械特性。

(一) 自动节律性

自动节律性是指心肌在不受外来刺激的情况下,能自动地产生兴奋和收缩的特性。当切断支配心脏的神经或将动物的心脏取出,保存于适宜的生理环境中,心脏在一定时间内仍能自动地、节律地收缩和舒张。心肌自律性起源于心肌中的自律细胞,自律细胞存在于心脏的特殊传导系统内。特殊传导系统内的心肌细胞具有自动产生节律性兴奋并传导兴奋的能力,但无收缩功能。特殊传导系统中以窦房结的自律细胞自律性最高,为正常心脏活动的起搏点,以窦房结为起搏点的心脏活动称为窦性心率。

窦房结自律细胞的自动兴奋频率约为每分钟 100 次。但健康成人安静时由于窦房结的自律性经常处于迷走神经的抑制作用下,使安静时的心率维持于每分钟约 75 次。窦性心率的正常范围在每分钟 60~100 次之间,若超过 100 次称为窦性心动过速,慢于 60 次称为窦性心动过缓。

(二) 传导性

心肌细胞有传导兴奋的能力称为传导性,心脏的传导系统和心肌纤维均有传导性,但因房室间心肌细胞不相连,所以房室之间兴奋的传导要靠心脏特殊传导系统传递。

心脏的特殊传导系统包括窦房结、结间束、房室结、房室束(房结区、结区、结束区)和与普通心肌细胞相连的浦肯野氏纤维。正常情况下心脏内兴奋传导的途径为:窦房结→结间束→房室结→房室束→浦肯野氏纤维→心室肌(图 3-1)。心肌细胞与心肌细胞之间的闰盘为低电阻区,局部电流可以通过此处,使兴奋得以在心肌细胞间扩布。

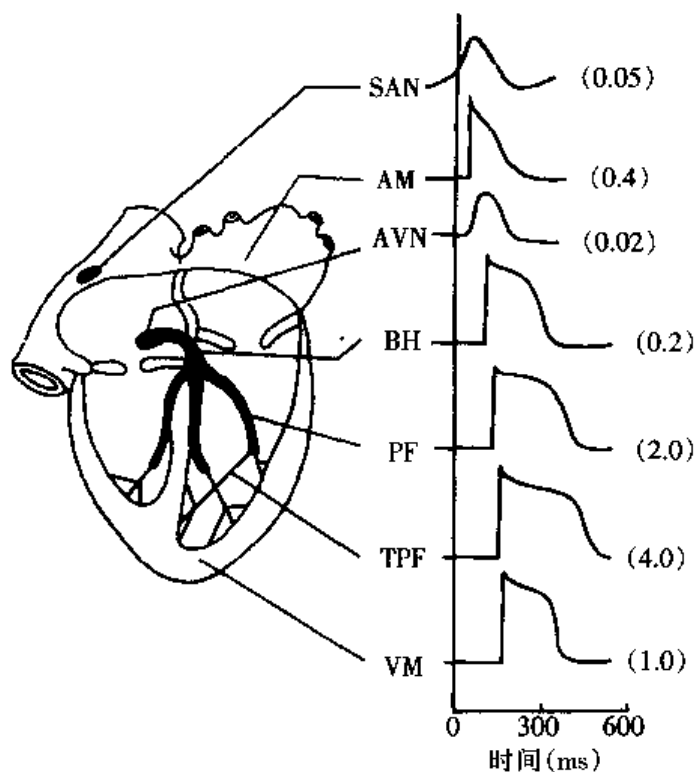


图 3-1 心脏的特殊传导组织

SAN: 窦房结, AM: 心房肌, AVN: 结区, BH: 房室束, PF: 浦肯野氏纤维,
TPF: 末梢浦肯野氏纤维, VM: 心室肌 传导速度单位: m/s
(依张镜如主编的《生理学》, 1996)

兴奋在房室交界处传导的速度较慢, 传导延搁时间较长, 这就使心房收缩后, 要经过较长时间才引起心室收缩, 因此, 心房收缩可进一步将血液挤入心室, 使心室在收缩前有充分的血液充盈, 有利于心室的射血。心房内和心室内兴奋传导的速度较快, 这就使兴奋几乎同时传到所有的心房肌或所有的心室肌, 从而使心房肌或心室肌产生同步收缩。

(三) 兴奋性

心肌细胞具有对刺激产生反应的能力, 即具有兴奋性。与神经或骨骼肌一样, 心肌细胞每产生一次扩布性兴奋之后, 兴奋性总要经历有效不应期、相对不应期和超常期, 然后才恢复到正常这样一段周期性变化(图 3-2)。

心肌细胞兴奋后不能立即产生第二次兴奋的特性, 称为不应性。在有效不应期, 如果心肌细胞再接受第二个刺激, 则不论刺激有多强, 肌膜都不会进一步发生任何程度的去极化, 或虽可发生局部去极化但不能引起扩布的动作电位。在相对不应期, 如果给予心肌细胞高于正常阈刺激的强刺激, 则可能引起扩布性兴奋, 但产生动作电位的幅度和速度都比正常为小, 动作电位的传导速度也比较慢。在超常期, 引起心肌细胞发生兴奋所需要的刺激阈值比正常的要低, 其兴奋性水平高于正常水平。

和骨骼肌细胞相比, 心肌细胞兴奋性变化的特点是有效不应期特别长, 正是这种特

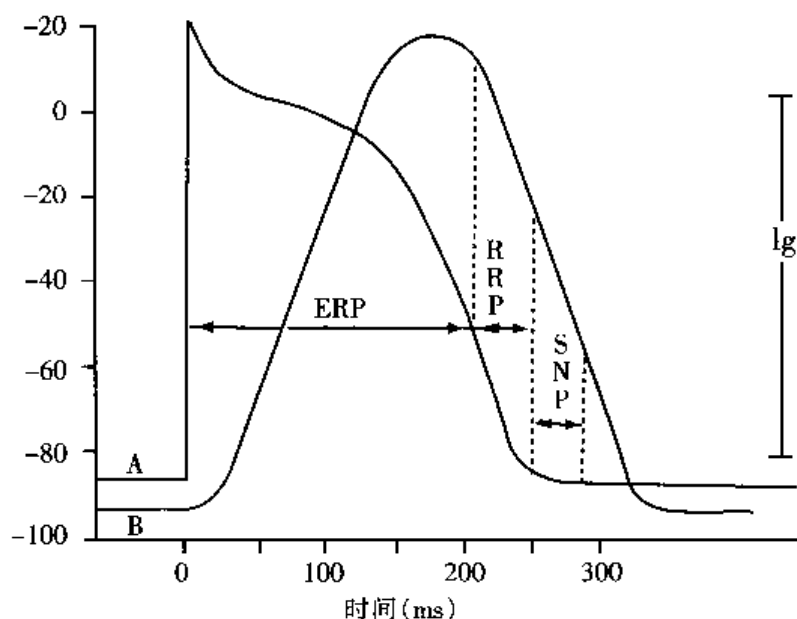


图 3-2 心室肌动作电位期间兴奋性变化及其与机械收缩的关系

A: 动作电位曲线 B: 机械收缩曲线 ERP: 有效不应期 RRP: 相对不应期 SNP: 超常期
(依张镜如主编的《生理学》，1996)

点使心脏不会像骨骼肌那样产生强直收缩，从而保证心脏有节律的单收缩。正常的心脏都是按窦房结的节律进行活动，窦房结发出的兴奋都是在前一次兴奋的不应期过了之后才传到心房和心室。因此，心房和心室都能按窦房结的节律，进行收缩和舒张的交替活动。如果在某些实验和病理情况下，心室在有效不应期之后受到人工的或窦房结之外的病理的异常刺激，都可能引起心室收缩活动，而这次心室收缩活动发生于下次窦房结兴奋所产生的正常收缩之前，称期前收缩，又称额外收缩。由于期前收缩也有自己的有效不应期，所以紧接着期前收缩之后的一次窦房结的兴奋传到心室时，往往正好落在有效不应期中，因此不能引起心室兴奋，要等到再一次窦房结的兴奋传到时才发生收缩。因而在一次期前收缩之后，往往有一段较长的心舒张期，称为代偿间歇（图 3-3）。随之，才恢复窦性节律。

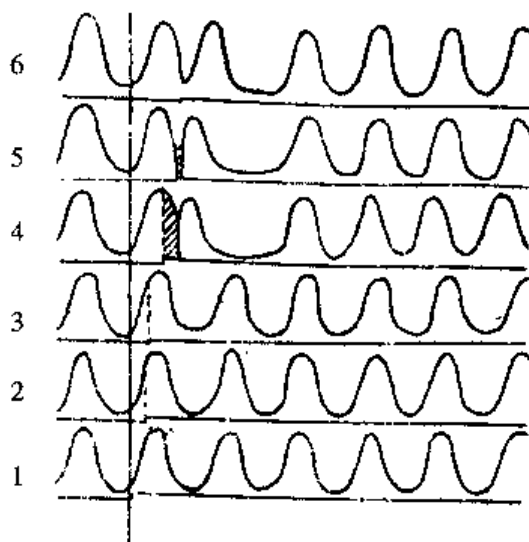


图 3-3 期前收缩和代偿间歇

每条曲线下的电磁标记号指示给予电刺激的时间；

曲线 1~3，刺激落在有效不应期内，不引起反应；

曲线 4~6，刺激落在相对不应期内，引起期前收缩和代偿间歇

(依张镜如主编的《生理学》，1996)

(四) 收缩性

心肌细胞和骨骼肌细胞一样，在受刺激发生兴奋时，首先是细胞膜爆发动作电位，然后通过兴奋—收缩耦联引起肌丝滑行，致使肌细胞缩短。但心肌细胞的收缩与骨骼肌细胞也不完全相同，其特点如下：

1. 对细胞外液的 Ca^{2+} 浓度有明显的依赖性

心肌细胞和骨骼肌细胞都是以细胞外液的 Ca^{2+} 作为兴奋—收缩耦联的媒介，但是，心肌细胞的肌质网终池很不发达，容积很小，贮存 Ca^{2+} 量比骨骼肌少。因此，心肌兴奋—收缩耦联所需的 Ca^{2+} 除终池释放外，需要依赖于细胞外液中的 Ca^{2+} 通过肌膜和横管内流。兴奋过后，肌浆中的 Ca^{2+} 一部分返回终池贮存，另一部分则转运出细胞。

2. “全或无”同步收缩

心房和心室内特殊传导系的传导速度快，而心肌细胞间闰盘处的电阻又低，所以兴奋—传到心房或心室，几乎同时遍及整个心房或心室肌细胞，从而引起所有心房肌或心室肌同时收缩。显然，对心室肌来说，这种同步收缩可大大提高心室的泵血效果。由于存在同步收缩，心脏要么不收缩，如果一旦发生收缩，其收缩就达到一定强度，称为“全或无”式收缩。

3. 不发生强直收缩

心肌发生一次兴奋后，其有效不应期特别长，可达 200 毫秒(ms)，而骨骼肌有效不应期仅为 2 毫秒。在有效不应期内，任何刺激都不能使心肌细胞再发生扩布性兴奋和收缩，因此，心脏不会产生强直收缩而始终保持收缩和舒张交替的节律活动，从而保证了心脏的充盈与射血。

三、心脏的泵血功能

(一) 心动周期与心率

心房或心室每收缩和舒张一次，称为一个心动周期(cardiac cycle)。心动周期的长短与心率有关，如以成人平均心率 75 次/分计算，则一个心动周期为 0.8 秒(s)，其中心房收缩约为 0.1 秒，舒张期约为 0.7 秒；心室收缩期约为 0.35 秒，舒张期约为 0.45 秒。如果心率加快，心动周期也相应地缩短，但以舒张期缩短更为显著。可见，心率过分增快时，由于舒张期的显著缩短而使心室充盈不足，从而影响心脏的泵血功能(表 3-1)。

表 3-1 不同心率时每个心动周期中心室的收缩期与舒张期的时间

心率(次/分)	收缩期(s)	舒张期(s)
75	0.35	0.45
90	0.32	0.34
120	0.28	0.22
150	0.23	0.17



心率是每分钟心脏搏动的次数。正常人安静时, 心率约在 60~100 次/分之间。心率有明显的个体差异, 不同年龄、性别和不同的生理状况, 心率都不相同。新生儿的心率可达 130 次/分以上, 随着年龄增长, 心率逐渐减缓, 到 15~16 岁时, 已接近成年人水平。在成年人中, 女性的心率较男性快 3~4 次/分。训练良好的耐力运动员, 安静时心率较慢。同一人在不同的生理条件下, 心率也有很大差别, 熟睡时心率最慢, 卧位比站立时慢; 体力活动、进食后、体温升高时及情绪激动和精神紧张时心率都可以加快。

每个人的心率增加都有一定的限度, 这个限度叫最大心率(又称极限心率, HR_{max}), 最大心率(次/分) = 220-年龄(岁)。

心率是了解循环系统机能的简单易行指标。在运动实践中常用心率来反映运动强度和生理负荷量, 并用于运动员的自我监督或医务监督。

(二) 心脏的泵血过程

每一心动周期心脏射血一次, 它开始于两侧心房收缩, 称心房收缩期。心房收缩时心房内压升高, 将其中血液挤入心室, 而使心房容积缩小。心房收缩结束后即舒张, 房内压下降, 与此同时心室开始收缩。根据心室内压力和容积的改变、瓣膜开闭与血流情况, 可将心室从收缩开始到舒张结束划分为等容收缩期、快速射血期、减慢速血期、等容舒张期、快速充盈期和减慢充盈期, 各时相心室内压力、容积改变、瓣膜开闭及血流情况如表 3-2 所示。

表 3-2 一个心动周期各时相中心脏(左侧)内压力、容积、瓣膜开闭及血流情况各种变化

腔室	时相	时程(S)	压力比较	房室瓣	半月瓣	腔容积	血流方向
心房	房缩期	0.1	房内压>室内压	开	闭	缩小	心房→心室
心室	等容收缩期	0.06	房内压<室内压<动脉内压	闭	闭	无变化	无流动
	快速射血期	0.11	房内压<室内压>动脉内压	闭	开	迅速减小	心室→动脉
	减慢射血期	0.14	房内压<室内压>动脉压	闭	开	继续缩小	心室→动脉
	等容舒张期	0.06	房内压<室内压<动脉内压	闭	闭	无变化	无流动
	快速充盈期	0.11	房内压>室内压<动脉内压	开	闭	迅速增大	心房→心室
	减慢充盈期	0.20	房内压>室内压<动脉内压	开	闭	继续扩大	心房→心室

(三) 心音

在一个心动周期中, 心肌的收缩、瓣膜的启闭、血液流动冲击瓣膜和血管壁的机械震动, 都可通过周围组织而传递到胸壁, 如果把听诊器的听头放置在胸前壁左下部, 就可以听到这种振动而产生的声音, 这种声音称为心音(heart sound)。若用换能器将这些机械震动转换成电信号记录下来, 便可得到心音图。

在每一个心动周期中, 一般可以听到两个心音, 分别称第一心音和第二心音。在某些健康儿童或青年人, 有时可听到第三心音。

心室开始收缩时听到的是第一心音, 主要由房室瓣关闭和心室肌收缩造成。第一心音的音调较低、持续时间较长。心室开始舒张时听到的是第二心音, 主要由主动脉和肺动脉半月瓣关闭造成。第二心音的音调较高, 持续时间较短。

当循环系统特别是心脏瓣膜有病变时, 心音可发生变化, 亦可伴有杂音, 故听取心音是诊断心血管疾病的重要方法之一。

(四) 心脏泵功能评定

心脏泵功能是否正常, 是强还是弱, 这是运动实践及实验研究工作中经常遇到的问题, 用什么样的方法和指标来测定和评价心脏功能, 在理论上和实践上都很重要。

1. 心输出量

心输出量(cardiac output)一般是指每分钟左心室射入主动脉的血量。在同一时期, 左心与右心接纳回流的血量大致相等, 输出的血量也大致相等。

(1) 每搏输出量与射血分数

一侧心室每次收缩所射出的血量称为每搏输出量(stroke volume), 简称搏出量。每搏输出量是心室舒张末期容积与收缩末期容积之差。正常成年人, 左心室舒张末期容积约 145ml (毫升), 收缩末期容积约 75ml, 每搏输出量约 70ml。这表明心室每次收缩并没有将心室内血流全部射出, 也就是说, 每搏输出量只占心室舒张末期容积的一定比例。每搏输出量占心室舒张末期的容积百分比, 称为射血分数(ejection fraction)。

$$\text{射血分数} = \frac{\text{每搏输出量(ml)}}{\text{心室舒张末期容积(ml)}} \times 100\%$$

健康成年人, 静息时的射血分数约为 55%~65%。在评定心脏泵血功能时, 若单纯以每搏输出量作指标而不考虑心室舒张末期的容积是不全面的。心脏功能正常时, 每搏输出量与舒张末期的容积是相适应的。就是说心室舒张末期容积增大时, 每搏输出量相应增加, 其射血分数不变。但若心室病理性扩大时, 心室功能减退, 每搏输出量可能与正常人无异, 但其射血分数明显下降。

(2) 每分输出量与心指数

通常所说的心输出量是指每分输出量。每分输出量等于每搏输出量与心率的乘积。心输出量除与机体代谢水平相适应外, 还因性别、年龄和生理状况不同而异。健康成年男性静息状态下, 心率平均每分钟 75 次, 每搏输出量约为 70ml, 心输出量为 5L/min (升/分) 左右。女性比同体重男性的心输出量约低 10%, 青年时期的心输出量高于老年, 优秀运动员在剧烈运动时, 心输出量可高达 25~35L/min。

心输出量是以个体为单位计算的, 身材矮小的人和身材高大的人, 新陈代谢水平并不相等, 因此, 用心输出量的绝对值作为指标进行不同个体间心脏功能的比较是不全面的。实验表明, 人体静息时的心输出量与体表面积成正比。以每一平方米体表面积计算的心输出量, 称为心指数(cardiac index)。中等身材的成年人体表面积为 1.6~1.7 平方米, 安静和空腹情况下心输出量约为 5~6 升/分, 故心指数约为 3.0~3.5L/min·m² (升/分·每平方米)。安静或空腹情况下的心指数称为静息心指数, 是分析比较不同个体心脏功能的常用评定指标。

心指数随生理条件不同而异。年龄在 10 岁左右时, 静息心指数最大, 可达 4L/min·m²



以上,以后随着年龄的增长而逐渐下降,到80岁时,静息心指数接近 $2\text{L}/\text{min}\cdot\text{m}^2$ 。肌肉运动时心指数随运动强度的增加大致成比例增高。妊娠、情绪激动和进食时心指数均增高。

(3) 心输出量的测定

测定心输出量的方法很多,经典的费克氏法是从气体代谢率来计算单位时间经过肺循环的血液量来测定心输出量的。先测定被试者每分钟耗氧量,即每分钟由肺循环吸收的氧量,再测定动静脉血含氧量的浓度差,然后根据以下公式计算出每分输出量。

$$\text{每分输出量} = \frac{\text{每分钟由肺循环所吸收的氧量}}{\text{每毫升动脉血含氧量} - \text{每毫升静脉血含氧量}}$$

例如,被试者每分吸氧量为 250ml ,其每毫升动脉血含氧量为 0.2ml ,混合静脉血含氧量为 0.15ml ,动静脉血含氧量差为 0.05ml ,代入上述公式即可算出每分钟经过肺循环的血量为:

$$\frac{250}{0.2-0.15} = 5000\text{ml}, \text{即每分钟心输出量为 } 5\text{L}。$$

(4) 心输出量的影响因素

心输出量的大小决定于心率和每搏输出量,而每搏输出量又决定于心肌收缩力和静脉回流量。

① 心率和每搏输出量

心输出量等于每搏输出量与心率的乘积,因此心率加快和每搏输出量增多都能使心输出量增加。如果每搏输出量不变,在一定的范围内,心率加快,可使每分输出量增加。但心率过快时,每个心动周期缩短,特别是舒张期缩短更加明显,因此心室没有足够的充盈时间,以致使每搏输出量减少。心率加快了,但由于每搏输出量显著减少,每分输出量仍然减少了,故一般体力较差者,当心率超过 $140\sim 150$ 次/分时,每分输出量减少。反之,如果心率过缓(低于 40 次/分),虽然舒张期延长了,心脏能获得足够的血液充盈,使每搏输出量有所增加,但因心率过低,每分输出量同样会减少。运动员、特别是耐力项目运动员,虽然心率较低,但由于心肌发达,收缩力强,每搏输出量高,从而能保证正常的心输出量。

② 心肌收缩力

如果心率不变,每搏输出量增加,则每分输出量也增加,因此,心肌收缩力是决定每搏输出量的主要因素之一。一般地说,心肌收缩力强,每搏输出量就多;反之则少。因为在正常情况下,心室每次收缩并不能把其中血液完全排出,在心缩末期,心室腔内仍存留部分血液。心肌收缩力越强,射血分数越高,心室内的血液排出更加完全,心室收缩末期容积越小,心室内余血量减少,则每搏输出量越多,心输出量增加。反之心肌收缩力越弱,心缩末期心室内余血量越多,则每搏输出量越少,心输出量减少。

在一定的范围内,心肌纤维收缩力与心肌纤维收缩前的“初长度”有关。在生理范围内,心肌纤维初长度越长,收缩力也越强。对于心脏来说,心肌纤维初长度取决于心室血液的充盈度。离体实验证明:在一定的范围内,心室舒张时充盈量越多,则心肌纤维被拉长的程度越大,心室收缩力也越强,从而使每搏输出量增多;反之,则心室舒张

时容积小，每搏输出量少。

在完整的机体内，心肌收缩力的变化是受神经体液因素调节的。运动时，支配心脏的交感神经兴奋，血浆中肾上腺素和去甲肾上腺素增多，促使心肌收缩力显著增强，射血分数增加，每搏输出量也随之提高；另一方面，心搏频率加快，每分输出量亦增加。当然，这种心输出量的增加只有在静脉回流量相应增加的情况下才能得到保证。

③静脉回流量

心脏输出的血量来自静脉回流，静脉回流量的增加是心输出量持续增加的前提。血液由腔静脉流入右心房，主要取决于静脉血压与右心房内压的压差。只有在压差增大、静脉回流量增加时，心输出量才能有所增加。

在正常人体内，静脉回流量与心输出量保持着动态平衡。当神经体液因素引起心肌收缩加强时，每搏输出量增加，同时心缩末期心室容积减小。待心室舒张时，心室内压下降更加明显，因而静脉血液由心房流入心室更快更多，故心肌收缩力加强，一方面可增加心输出量，另一方面又可加速静脉血液回流心脏，使二者达到新的平衡。

静脉回流量还与肌肉收缩和胸内压密切相关。强烈的肌肉运动时，交感—肾上腺系统总动员，不仅增加心率和每搏输出量，而且还可以使静脉血管广泛收缩，提高静脉充盈压，加速血液回流。实验表明，安静时静脉充盈压约为 7mmHg，强烈的肌肉运动时，静脉充盈压可升至正常值的 2.5 倍。此外，心室舒张吸力、呼吸动作和四肢肌肉对静脉的挤压作用，都有助于静脉回流，从而保证在极短促的心舒期中，不影响心室充盈量。

总之，在神经系统的作用下，肌肉运动时心输出量的增加主要是心肌收缩、心搏频率和外周血管的紧张性(加速血液回流)等各种调节机制所起的整合效应。

2. 心脏做功

血液在循环系统内流动过程中所消耗的能量是由心脏做功得到补充的，换句话说，心脏做功供给了血液在循环过程中所失去的能量，血液才能循环流动。

左心室一次收缩所做的功，称为搏功，单位为 $\text{g} \cdot \text{m}$ (克·米)。搏功乘以心率即为每分功，单位为 $\text{kg} \cdot \text{m}/\text{min}$ (公斤·米/分)。计算左室搏功和每分功的简式如下：

$$\text{搏功} (\text{g} \cdot \text{m}) = \text{搏出量} (\text{cm}^3) \times (1/1000) \times (\text{平均动脉压} - \text{平均左房压 mmHg}) \times (13.6 \text{g}/\text{cm}^3)$$

$$\text{每分功} (\text{kg} \cdot \text{m}/\text{min}) = \text{搏功} (\text{g} \cdot \text{m}) \times \text{心率} \times (1/1000)$$

设搏出量为 70ml，收缩压 120mmHg，舒张压 80mmHg，平均左房压 6mmHg，心率 75 次。代入上式，则求得左心室搏功为 $83.1 \text{g} \cdot \text{m}$ ；每分功为 $6.23 \text{kg} \cdot \text{m}/\text{min}$ 。

右心室的搏出量与左心室的相等，但肺动脉平均压为主动脉平均压的 1/6，故右心室的做功量也只有左心室的 1/6。

用心脏的做功量来评价心脏的泵血功能有着重要的意义。因为心脏收缩不仅仅是射出一定量的血液，而且这部分血液必须具有很高的压力和很快的流速。在动脉压增高的情况下，心脏要射出与原先同等数量的血液时，就需要心脏加强收缩，如果心肌的收缩强度不变，搏出量必将减少。实验表明，心肌的耗氧量与心肌的做功量是平行的，其中心输出量的变动不如心室射血压力和动脉压的变动对心肌耗氧量的影响大，这就是说，



心肌收缩产生的能量主要用于维持血压。由此可见,用心脏做功量作为评价心脏的泵血功能指标要更好。在需要对动脉压不同的人以及同一个人动脉压发生变动前后的心脏泵功能进行分析比较时,情况更是如此。

3.心脏泵功能的贮备

心脏的泵血功能能够广泛适应机体不同生理条件下的代谢需要,表现为心输出量可随机体代谢率的增长而增加。健康成年人静息状态下的心率为每分钟 75 次,搏出量约 70ml, 每分输出量为 5L 左右。剧烈体育运动时,心率可达每分钟 180~200 次,搏出量可增加到 150ml 左右,故每分输出量可达 25~30L,为静息时的 5~6 倍。心脏每分钟能够射出的最大血量,称最大输出量。在静息状态下,心输出量并不是最大的,但能够在需要时成倍增加,表明健康人心脏泵血功能有一定的贮备力量。心输出量随机体代谢需要而增长的能力,称为泵功能贮备,或心力贮备(cardiac reserve)。

心脏的贮备能力取决于心率和搏出量可能发生的最大最适宜的变化,心率的最大最适宜的变化约为静息时心率的两倍。动用心率贮备,是心输出量调节中的主要途径,充分动用心率贮备,就可以使每分输出量增加 2~2.5 倍。心输出量调节的另一个主要途径是搏出量,搏出量的贮备又主要取决于心室收缩末期的贮备量,通过充分动用收缩期贮备就可以使搏出量增加 55~60ml。当进行激烈的体育运动时,由于交感肾上腺系统的活动增强,主要通过动用心率贮备和收缩期贮备使心输出量增加。

心力贮备的大小反映心脏泵血功能对代谢需要的适应能力,也反映心脏的训练水平。有耐力的人,心力贮备明显高于一般人,其最大心输出量可达静息输出量的 5~6 倍。个别优秀的耐力运动员甚至可达到静息输出量的 8 倍(40L/min)。有些研究资料认为,坚持体育锻炼的人,心肌纤维较粗,心肌收缩能力增强,因此收缩期贮备增加;同时,由于静息心率因训练而减慢,故心率贮备也增大。例如,优秀耐力运动员的静息心率可低到每分钟 50 次以下,而运动时的最高心率达每分钟 190~200 次时,搏出量仍不减少,故最大心输出量大幅度增加。

四、心电图

在正常人体内,由窦房结发出的兴奋按一定的途径和时程,依次传向心房和心室,引起整个心脏的兴奋,因此,心脏各部分兴奋过程中出现的电变化的方向、途径、次序和时间等都有一定的规律。这种生物电变化通过心脏周围的导电组织和体液反映到体表,使身体各部位在每一个心动周期中都发生有规律的电变化。用引导电极置于肢体或躯体的一定部位记录出来的心脏电变化曲线称心电图(electrocardiogram, ECG)。心电图反映心脏兴奋的产生、传导和恢复过程中的生物电变化,它与心脏的机械收缩活动无直接关系。分析研究心电图对了解心脏活动情况和诊断心脏疾病有重要的价值。

(一) 正常典型心电图的描记及导联

心电图记录纸上有横线和纵线画出长和宽均为 1 毫米的小方格。记录心电图时,首

先调节仪器放大倍数,使输入 1mV 信号时,描笔在纵向上产生 10 毫米偏移,这样,纵线上每一小格相当于 0.1mV 的电位差。横向小格表示时间,每一小格相当于 0.04 秒(即走纸速度为每秒 25 毫米)。因此,可以在记录纸上测量出心电图各波的电位数值和经历的时间。

在记录心电图时,测量电极在人体安放位置和连线方式称导联。导联不同,记录到的心电图在波形上亦有所不同,临床上常规采用的导联有以下几种方式:

1. 肢体导联

- (1) 肢体导联 I: 左上肢接正极,右上肢接负极。
- (2) 肢体导联 II: 左下肢接正极,右上肢接负极。
- (3) 肢体导联 III: 左下肢接正极,左上肢接负极。

2. 加压肢体导联

由于肢体导联描记的图形较小,为弥补不足,在每条线上附加 5000 欧姆的电阻,消除肢体各部电阻差异的影响,使描记的心电图波形及振幅加大,便于分析。

- (1) 加压右上肢导联(aVR): 右上肢联接正极,左上肢和左下肢共同联接负极。
- (2) 加压左上肢导联(aVL): 左上肢联接正极,右上肢和左下肢共同联接负极。
- (3) 加压左下肢导联(aVF): 左下肢联接正极,左上肢和右上肢共同联接负极。

3. 心前区导联

中心电极联接心电图机的负极,探查电极联接心电图机的正极。各探查电极的具体安放部位如下:

- V1: 胸骨右缘第四肋间。
- V2: 胸骨左缘第四肋间。
- V3: 在 V2 与 V4 联线的中点。
- V4: 左腋前线与第五肋间相交处。
- V5: 左腋前线与 V4 同一水平高度。
- V6: 左腋中线与 V4、V5 同一水平高度。

一般心电图机的导线可分为红、黄、蓝、白、黑五种颜色,红色连线接右上肢,黄色连线接左上肢,蓝色连线接左下肢,黑色连线接右下肢,白色连线接心前导线(V1~V6)。操作时不必去记正负极的连线,记住以上各种颜色的连线即可。

(二) 正常典型心电图的波形及生理意义

从不同导联上描写出来的心电图波形各有特点,但基本上包括一个 P 波、一个 QRS 波程和一个 T 波,T 波之后还可能出现一个 U 波。在心电图上,除各波的形状有特定的意义外,各波以及它们之间的时程关系 also 具有重要的理论和实践意义,其中比较重要的有 P-R(或 P-Q)间期,Q-T 间期和 ST 段(图 3-4)。

P 波,表示左右心房兴奋除极时产生的电变化。

P-Q(P-R)间期,指从P波的起点到QRS波起点之间的时程,表示心房除极化开始到心室除极化开始所需要的时间。

QRS波群,表示左右心室先后除兴奋极化所产生的电变化。

ST段,指从QRS波群终了到T波起点之间的与基线平齐的线段,表示心室除极完毕,复极尚未开始,各部位之间无电位差。

Q-T间期,指从QRS波起点到T波终点的时程,表示心室开始兴奋除极化到全部复极化所需的时间。

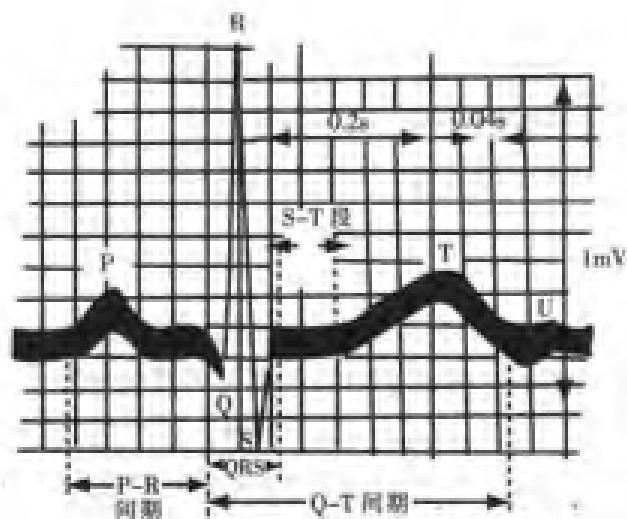


图 3-4 正常人心电模式图

(三) 动态心电图

动态心电图或称 Holter 心电监测,系 Holter 提出并于 1961 年应用于临床。动态心电图检查仪器包括监示记录器和分析系统两部分组成,监示记录器可记录 24 小时或更长时间的持续心电信息,经分析后,可发现常规心电图难以显示的一过性心律失常和 ST-T 的改变等一系列心电变化。因此在临床医学中,动态心电图可提高心律失常的检出率,在判断某些症状与心率失常的关系和冠心病的诊断等方面有重要的价值。

近年来,由于训练强度的不断加大,运动员心律失常的发生率逐年增加,尤其在高水平运动员中更加明显,动态心电图在运动心脏学领域中的应用也日益增多,目前已成为诊断运动员心率失常、评定运动员机能状态及安排科学训练和比赛的重要方法。

(四) 心电图运动负荷试验

通过运动以诱发心肌缺血,导致心电图异常,借以诊断冠心病或判断受试者心脏功能的方法,称为心电图运动负荷试验。目前,临床常用的运动负荷试验方法有二阶梯双倍运动试验、跑台运动试验和功率自行车运动试验。本节仅介绍跑台运动试验。二阶梯双倍运动试验其运动负荷在每级 23 厘米高的两级阶梯上往返运动,其注意事项及禁忌症与跑台运动试验大致相同,但敏感性和阳性率较低。功率自行车运动试验的运动负荷是在功率自行车上完成的,其试验的注意事项、禁忌症、预期心率及终止运动指标、心

电图描记与监护、评定标准等与跑台运动试验相同。

跑台运动试验时受试者在有一定坡度和速度的跑台上行走，运动负荷根据跑台的坡度和速度每3分钟增加一次，一般从10°的坡度和1.7公里/小时的速度至22°的坡度和6.0公里/小时的速度，共分7级。

试验前进行常规12导联心电图描记，以便与监护导联心电图对照。试验过程中随时观察示波器上显示的心电图变化，如有异常应随时进行描记。在每次递增运动负荷前要先描记一次监护心电图，运动后即刻及2、4、6、10分钟各描记一次心电图。

当达到预期心率(可按195-年龄计算)或当受试者出现典型心绞痛、严重心率失常、头晕、面色苍白、步态不稳或下肢无力不能坚持运动、运动中心电图出现ST段下降或下垂性下降大于1毫米，以及在运动前ST段原基础上下降1毫米时终止试验。

跑台运动试验主要用于可疑冠心病患者的诊断，亦可用于判断受试者心脏功能。

第二节 血管生理

血管分为动脉、毛细血管和静脉三大类。各类血管的结构特点不同，在血液循环系统中发挥着不同的生理作用。

一、各类血管的功能特点

由左心室或右心室射出的血液都要经由动脉、毛细血管和静脉串连构成的血管系统，然后返回心房。各类血管因其在整个血管系统中所处的部位不同，故具有不同的功能。与之相适应，各类血管不仅管径和管壁厚度不同，而且构成管壁的内皮、弹性纤维、平滑肌和胶原纤维四种主要成分的相对比例也有很大差别(图3-5)。

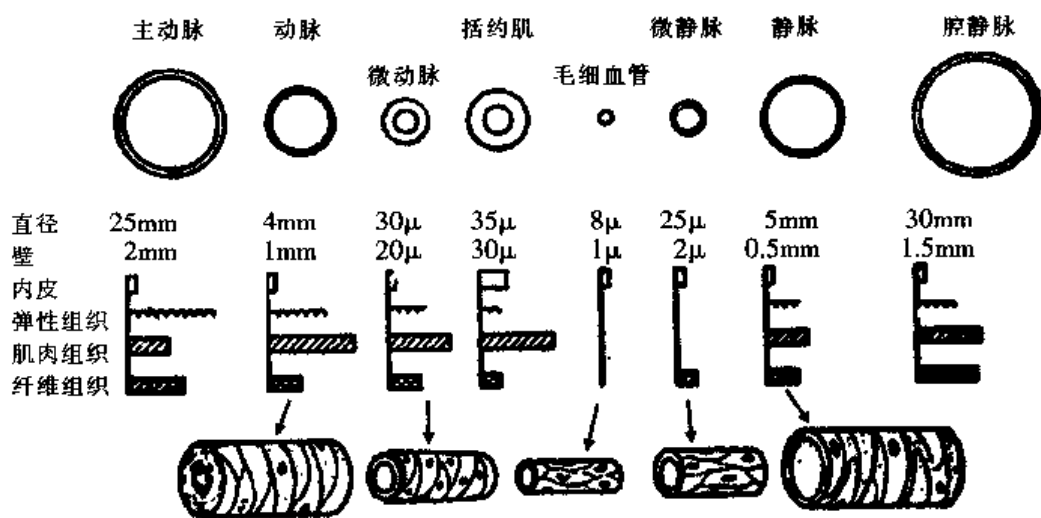


图3-5 各类血管的管径、管壁厚度和管壁四种基本组织示意图

(依张镜如主编的《生理学》，1996)



主动脉和大动脉管壁较厚,含有丰富的弹力纤维。在左心室射血时,主动脉和大动脉壁能被动扩张,容量增大,将一部分血液暂时贮存起来并缓冲血压波动。当心室舒张而主动脉瓣关闭后,被扩张的动脉管壁发生弹性回缩,把射血期贮存的那部分血液继续向外周方向推动。所以从功能上说,主动脉和大动脉可称为弹性贮器血管。

动脉一再分支,口径逐渐变细,管壁逐渐变薄,管壁中的弹力纤维逐渐减少,而平滑肌的成分逐渐增多。最细的小动脉(即微动脉)内径只有 $20\sim 30\mu\text{m}$,对血流阻力很大。血液在血管系统中流动时所受到的总阻力,大部分发生在微动脉,故从功能上将微动脉称为毛细血管前阻力血管。微动脉的管壁中仍有完整的平滑肌层。分布在某一器官的微动脉,其管壁平滑肌的收缩和舒张可使管径发生明显变化,从而改变对血流的阻力和该器官的血液量。在身体的许多部位,微动脉可再分支为后微动脉。后微动脉是微动脉和毛细血管之间的过渡形式,其管壁的平滑肌逐渐稀少。由微动脉和后微动脉成直角地发出许多分支,即毛细血管,也称为真毛细血管。真毛细血管的起始部有平滑肌环绕,构成毛细血管前括约肌。毛细血管前括约肌属于毛细血管前阻力血管的一部分,主要是控制毛细血管的启闭,起着控制毛细血管血流量的阀门样作用。

毛细血管的口径很细,但因数量多,故总的截面积非常大,因此血液在毛细血管内的流速十分缓慢。毛细血管壁仅由一层扁平内皮细胞构成,其外层只有一薄层基膜,故通透性很大,成为血管内血液与血管外组织液进行物质交换的场所,因此毛细血管又称交换血管。

毛细血管汇合成为微静脉,较大的微静脉的壁中又逐渐出现平滑肌,至小静脉管壁已有完整的平滑肌层。微静脉和小静脉对血流的阻力虽远比微动脉小,但其管壁平滑肌收缩时仍足以使管径变小而增加血流阻力,因此微静脉和小静脉在功能上属于毛细血管后阻力血管。毛细血管前阻力和毛细血管后阻力比值的改变会影响毛细血管血压,从而影响血液和组织液之间液体的转移。

静脉和相应的动脉比较,其数量较多、口径较大而管壁较薄,故容量大。此外,静脉管的可扩张性也大,也就是说,较小的压力变化可使容量发生较大的变化。在安静状况下,循环血量的 $60\%\sim 70\%$ 容纳在静脉中。静脉的口径发生较小的变化时,静脉的血量就可发生较大的变化,而压力的变化并不大。静脉的这种特性使它在血管系统中起着血液贮存库的作用,故功能上把静脉血管称为容量血管。容量血管的舒缩活动可改变回心血量,从而使心输出量发生相应的变化。

二、血压

血压是指血管内的血液对单位面积血管壁的侧压力(压强)。以前习惯用毫米汞柱(mmHg)表示血压的高低,但压强的法定计量单位为帕(Pa),即牛顿/每平方米。帕的单位较小,一般用千帕(KPa)表示($1\text{mmHg}=0.133\text{KPa}$)。为阅读和学习方便,本书仍使用以前习惯的表示方法,即 mmHg 。血压形成的前提条件是心血管系统内有血液充盈。循环系统中血液充盈的程度可用循环系统平均充盈压来表示。在动物实验中如果使心脏暂时停止射血,血流也就暂停,因此循环系统中各处的压力很快就取得平衡,此时循环

系统中各处所测得的压力是相同的,这一压力数值就是循环系统平均充盈压。这一数值的高低取决于血量和循环系统容量之间的相对关系,如果血量增多,或血管容量缩小,则循环系统平均充盈压就增高;反之,如果血量减少或血管容量增大,则循环系统平均充盈压就降低。

血液的流动主要是由于心室收缩时造成主动脉首端与右心房之间的压力差,血流在各段血管中遇到的阻力不同,因此压力降落是不均匀的。此外,由于各段血管的总口径不一样,各段血管中血流速度也不相同,因此各段血管中血压也不一样。一般所谓血压,多指体循环中动脉血压。

(一) 动脉血压的形成

动脉血压是在有足够量的血液充满血管的前提下,由心室收缩射血、外周阻力和大动脉弹性的协同作用产生的。

一般情况下,每次心脏收缩时,左心室向主动脉射出约 60~80ml 血液。此时由于血液质点的相互摩擦,以及血液与血管壁的摩擦而产生阻力(外周阻力),阻止血液顺利地从主动脉流向外周。一般在心缩期只有搏出量的三分之一,即约 20~30ml 的血液流向外周,其余的三分之二血液留在主动脉内,对管壁施加侧压力,拉长了管壁的弹性纤维,使动脉管壁被动扩张。这不但缓冲了动脉管壁突然增大的压力,而且更主要的是通过这种方式,将一部分能量以势能的形式贮存于被拉长了的弹性纤维中。心室收缩将血液射入主动脉后,如果没有外周阻力,左心室收缩释放的能量将全部表现为动能,推动射出的全部血液迅速流向外周,因而不能对动脉壁产生侧压力;反之,如果只有外周阻力而没有心室的收缩射血,缺乏能量的来源,当然也不能形成动脉血压。由此可见,心室收缩射血(心输出量)和外周阻力是形成动脉血压的两个重要因素。

心室舒张时射血停止。此时,在心缩期被扩张了的主动脉,由于管壁弹性纤维的回缩,压迫血液继续向外周流动,并保持一定的血压。因此,主动脉管的弹性对血液循环起着两种作用:一是把心室收缩时释放的一部分能量以势能的形式贮存起来,于心舒期推动血液继续流动;二是缓冲动脉血压的变化,使心室收缩时动脉血压不致过高,舒张时动脉内血压不致过低。

(二) 动脉血压的正常值

在一个心动周期中,动脉血压随着心室的收缩和舒张而发生规律性的波动。心室收缩时,动脉血压的最高值称为收缩压,心室舒张时动脉血压的最低值称为舒张压。收缩压和舒张压之差称为脉搏压或脉压。整个心动周期内各瞬间动脉血压的平均值称为平均动脉压,由于心脏的收缩期比舒张期短,所以平均动脉压的数值较接近舒张压,约等于舒张压+脉压/3。临床医学中动脉血压的习惯写法是“收缩压毫米汞柱或 KPa/舒张压毫米汞柱”。

一定高度的动脉血压,是推动血液循环和保持各器官组织足够血流量的必要条件之一。正常人安静时的动脉血压较为稳定,变动范围较小,收缩压为 100~120mmHg,舒张压为 60~80mmHg,脉压为 30~40mmHg。正常人的血压随性别、年龄及其他生理情况



而变化。男性一般比女性略高。年龄增长动脉血压也逐渐升高，但收缩压的升高比舒张压的升高更加显著。体力劳动、运动或情绪激动时血压可暂时性升高。我国人动脉血压的平均值如表 3-3 所示。安静时，舒张压持续超过 95mmHg，即可认为是高血压；如舒张压低于 50mmHg，收缩压低于 90mmHg，则认为是低血压。

我国人动脉血压平均值
表 3-3 (上海 112419 人调查结果) (单位: mmHg)

年龄	男 性		女 性	
	收缩压	舒张压	收缩压	舒张压
11~15	114	72	109	70
16~20	115	73	110	70
21~25	115	73	111	71
26~30	115	75	112	73
31~35	117	76	114	74
36~40	120	80	116	77
41~45	124	81	122	78
46~50	128	82	128	79
51~55	134	84	134	80
56~60	137	84	139	82
61~65	148	86	145	83

(三) 动脉血压的影响因素

前文提到，动脉血压的形成主要是心室射血和外周阻力相互作用的结果。心室射血对动脉血压的影响取决于单位时间内左心室射入主动脉的血量，即每分输出量或每搏输出量。另外，动脉血压的形成又与外周阻力密切相关。因此，凡是能影响心输出量和外周阻力的因素都能影响动脉血压。循环血量和血管系统容量之间的相互关系，即循环系统的血液充盈程度，也能影响动脉血压。现将影响动脉血压的各种因素分别叙述如下：

1. 心脏每搏输出量

在正常情况下，动脉因有足够的血液充盈而饱满，管壁有一定的张力。由于外周阻力的存在，当心室收缩时，射入主动脉的血液只有一部分流至外周血管，另一部分贮存于主动脉和大动脉中，所以主动脉和大动脉管壁的张力增大。每搏输出量越多，则贮存在主动脉和大动脉中的血量也越多，管壁所受的张力也越大，收缩期血压的升高也就越明显。由于收缩压明显升高，血液流速加快。假如这时外周阻力和心率的变化不大，则大动脉内增加的血量大部分仍可在心舒期流至外周，所以舒张期末，大动脉内存留的血液即使比每搏输出量未增加以前略有增多，但也不会增加得太多。因此，当每搏输出量增加而外周阻力和心率变化不大时，动脉血压的变化主要表现在收缩压升高，而舒张压升高不多，故脉压增大。反之，当每搏输出量减少时，则收缩压减低，脉压减小。在一般情况下，收缩压主要反映每搏输出量的多少。运动中，每搏输出量增加，故收缩压也升高。

2. 心率

如果心率加快,而每搏输出量和外周阻力都没有变化时,由于心舒期缩短,在心舒期内流至外周的血液也就减少,所以心舒期末,贮存于大动脉中的血液就多,舒张期血压也就升高,脉压减小;反之,心率减慢时,则舒张压减低,脉压增大。

3. 外周阻力

如果搏出量不变而外周阻力加大时,心舒期中血液向外周流动的速度减慢,心舒期末存留在动脉中的血量增多,舒张压升高。外周阻力增加时,收缩期血压也升高,收缩压升高使血流速度加快,由于收缩压的升高不如舒张压的升高明显,所以脉压变小。反之,当外周阻力减小时,舒张压的降低比收缩压的降低更为明显,故脉压加大。可见,在一般情况下,舒张压的高低主要反映外周阻力的大小。

4. 主动脉和大动脉的弹性贮器作用

主动脉和大动脉管壁的可扩张性和弹性具有缓冲动脉血压变化的作用,也就是有减小脉压的作用。主动脉和大动脉管壁的可扩张性和弹性在短时间内不会有明显的变化,但老年时,由于动脉管壁中的弹力纤维变性,主动脉和大动脉口径变大,容量也增大,而可扩张性和弹性变小,作为弹性贮器的作用减弱,因此老年人动脉血压的波动(即脉压)较青年人大。

5. 循环血量与血管容量的关系

循环血量与血管容量相适应才能使血管足够地充盈,产生一定的体循环平均充盈压。体循环平均充盈压(正常时约为7mmHg)是形成动脉血压的前提。在正常机体内,循环血量与血管容量相适应,血管系统的充盈情况变化不大。但在失血时,循环血量减少,此时如果血管容量改变不大,则体循环平均压必将降低,使回心血量减少,心输出量随之减少,动脉血压显著降低。如果循环血量不变,而血管容量大大增加,也会造成回心血量减少,导致心输出量减少,动脉血压降低。

在以上对影响动脉血压各种因素的讨论中,为了便于分析,都是在假设其他因素不变的前提下,讨论某一因素变化对动脉血压发生的影响。实际上,在完整机体中这样的情况是几乎不存在的。也就是说,在各种不同的生理情况下,上述各种影响动脉血压的因素都可能发生改变。因此,在某种生理情况下动脉血压的变化,往往是各种因素相互作用的综合结果。

三、动脉脉搏

在每个心动周期中,动脉内的压力发生周期性的波动,这种周期性的压力变化可引起动脉血管发生搏动,称为动脉脉搏。动脉脉搏产生后沿着血管壁向末梢传播出去,因此在浅表的动脉上可用手触摸到这种搏动。我国传统医学的切脉就是以手指的触觉



和压觉,分析桡动脉脉搏的频率、强弱以及其他特征,作为诊断疾病的重要指标之一。运动实践中,常用测定脉搏来了解训练课的运动强度,运动训练后的恢复状况和运动员的训练水平。

四、静脉血压和静脉回心血量

(一) 静脉血压

当体循环血液经过动脉和毛细血管到达微静脉时,血压下降至约 2.0~2.7KPa(15~20mmHg)。右心房作为体循环的终点,血压最低,接近于零。通常将右心房和胸腔内大静脉的血压称为中心静脉压,而各器官静脉的血压称为外周静脉压。中心静脉压的高低取决于心脏射血能力和静脉回心血量之间的相互关系。如果心脏射血能力较强,能及时地将回流入心脏的血液射入动脉,中心静脉压就较低。反之,心脏射血能力减弱时,中心静脉压就升高。另一方面,如果静脉回流速度加快,中心静脉压也会升高。因此,在血量增加,全身静脉收缩,或因微动脉舒张而使外周静脉压升高等情况下,中心静脉压都可能升高。可见,中心静脉压是反映心血管功能的又一指标。

(二) 静脉回心血量及其影响因素

单位时间内的静脉回心血量取决于外周静脉压和中心静脉压的差,以及静脉对血流的阻力。故凡能影响外周静脉压、中心静脉压以及静脉阻力的因素,都能影响静脉回心血量。

1. 体循环平均充盈压

体循环平均充盈压是反映血管系统充盈程度的指标。实验证明,血管系统内血液充盈程度越高,静脉回心血量也就越多。当血流量增加或容量血管收缩时,体循环平均充盈压升高,静脉回心血量也就增多。反之,血量减少或容量血管舒张时,体循环平均充盈压降低,静脉回心血量减少。

2. 心脏收缩力量

心脏收缩时将血液射入动脉,舒张时则可从静脉抽吸血液。如果心脏收缩力量强,射血时心室排空较完全,在心舒期心室内压就较低,对心房和大静脉内血液的抽吸力量也就较大,静脉回心血量也就较高。

3. 体位改变

当人体从卧位转变为立位时,身体低垂部分静脉扩张,容量增大,故回心血量减少。站立时下肢静脉容纳血量增加的程度可受到若干因素的限制,例如下肢静脉内的静脉瓣,以及下而将叙述的下肢肌肉收缩运动和呼吸运动等。下肢静脉瓣膜受损的人,常

不能持久站立。即使是在正常人,如长久站立不动,也会导致回心血量减少,动脉血压降低。体位改变对静脉回心血量的影响在高温环境中更加明显。在高温环境中,皮肤血管舒张,皮肤血管中容纳的血量增多,如果人在高温环境中长时间站立不动,回心血量就会明显减少,导致心输出量减少和脑血供不足,可引起头晕甚至昏厥。长期卧床的病人,静脉管壁的紧张性较低,可扩张性较高,加之腹壁和下肢肌肉的收缩力量减弱,对静脉的挤压作用减小,故由平卧位突然站起来时,可因大量血液积滞在下肢,回心血量过少而发生昏厥。

4. 骨骼肌的挤压作用

人体在站立位的情况下,如果下肢进行肌肉运动,回心血量和没有肌肉运动时不一样。一方面,肌肉收缩时可对肌肉内和肌肉间的静脉发生挤压,使静脉血流加快;另一方面,因静脉内有瓣膜存在,使静脉内的血液只能向心脏方向流动而不能倒流。这样,骨骼肌和静脉瓣膜一起,对静脉回流起着“泵”的作用,称为“静脉泵”或“肌肉泵”。

5. 呼吸运动

呼吸运动也能影响静脉回流。由于胸膜腔内压为负压,胸腔内大静脉的跨壁压较大,故经常处于充盈扩张状态。在吸气时胸膜腔加大,胸膜负压值进一步增高,使胸腔内的大静脉和右心房更加扩张,压力也进一步降低,因此有利于外周静脉内的血液回流至右心房。由于回心血量增加,心输出量也相应增加。呼气时,胸膜腔负压值减小,由静脉回流入右心房的血量也相应减少。可见,呼吸运动对静脉回流也起着“泵”的作用。

五、微循环

微循环(microcirculation, MC)是指微动脉和微静脉之间的血液循环。血液循环最根本的功能是进行血液和组织之间的物质交换,这一功能就是在微循环部分实现的。

(一) 微循环的组成

典型的微循环由微动脉、后微动脉、毛细血管前括约肌、真毛细血管、微静脉、通血毛细血管和动-静脉吻合支组成(图 3-6)。另外,微动脉和微静脉之间还可通过直捷通路和动-静脉短路发生沟通。直捷通路是指血液从微动脉经后微动脉和通血毛细血管进入微静脉的通路。通血毛细血管是后微动脉的直接延伸,其管壁平滑肌逐渐稀少以至消失。直捷通路经常处于开放状态,血流速度较快,其主要功能并不是物质交换,而是使一部分血液能迅速通过微循环而进入静脉。直捷通路在骨骼肌组织的微循环中较为多见。动-静脉短路是吻合微动脉和微静脉的通道,其管壁结构类似微动脉。在人体某些部分的皮肤和皮下组织,特别是手指、足趾、耳廓等处,这类通路较多。动-静脉吻合支在功能上不是进行物质交换,而是在体温调节中发挥作用的。



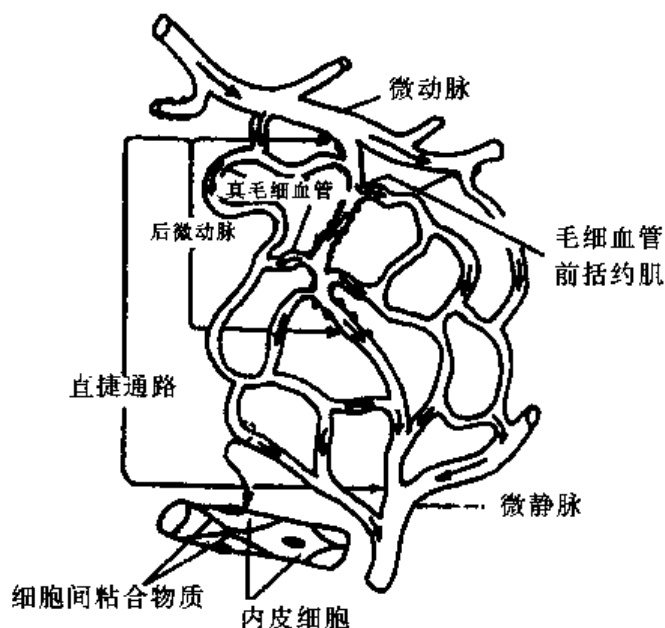


图 3-6 微循环模式图

(二) 毛细血管的数量和交换面积

人体全身约有 400 亿根毛细血管。不同器官组织中毛细血管的密度有很大差异，例如在心肌、脑、肝、肾中，毛细血管的密度为每立方毫米组织 2500~3000 根；骨骼肌为每立方毫米组织 100~400 根；骨、脂肪、结缔组织中毛细血管密度较低。假设毛细血管的平均半径为 $3\mu\text{m}$ ，平均长度为 $750\mu\text{m}$ ，则每根毛细血管的表面积约为 $14000\mu\text{m}^2$ 。由于微静脉的起始段也有交换功能，故估计每根毛细血管的有效交换面积将近 $22000\mu\text{m}^2$ 。由此可以估计全身毛细血管(包括有交换功能的微静脉)总的有效交换面积将近 1000 平方米。

(三) 血液和组织液之间的物质交换

组织液是组织、细胞直接所处的环境。组织、细胞通过细胞膜和组织液发生物质交换，组织液与血液之间则通过毛细血管壁进行物质交换。因此组织、细胞和血液之间的物质交换需通过组织液作为中介。

血液和组织液之间的物质交换主要是通过以下几种方式进行的：

1. 扩散

扩散是指液体中溶质分子的热运动，是血液和组织液之间进行物质交换的最主要的方式。毛细血管内外液体中的分子，只要其直径小于毛细血管壁的孔隙，就能通过管壁进行扩散运动。故当血液流经毛细血管时，血液内的溶质分子可以扩散入组织液，组织液内的溶质分子也可以扩散入血液。对于某一种物质来说，其通过毛细血管壁进行的扩散的驱动力是该物质在管壁两侧的浓度差，即从浓度高的一侧向浓度低的一侧发生净移动。溶质分子在单位时间内通过毛细血管壁进行扩散的速率与该溶质分子在血浆和组织

液中的浓度差、毛细血管壁对该溶质分子的通透性、毛细血管壁的有效交换面积等因素成正比,与毛细血管壁的厚度(即扩散距离)成反比。

2. 滤过和重吸收

当毛细血管壁两侧的静水压不等时,水分子就会通过毛细血管壁从压力高的一侧向压力低的一侧移动。当毛细血管壁两侧的渗透压不等时,可以导致水分子从渗透压低的一侧向渗透压高的一侧移动。在生理学中,由于管壁两侧静水压和胶体渗透压的差异而引起的液体由毛细血管内向毛细血管外的移动称为滤过,而将液体向相反方向的移动称为重吸收。血液和组织液之间通过滤过和重吸收方式发生的物质交换,和通过扩散方式发生的物质交换相比,仅占很小一部分,但在组织液的生成中却起着重要的作用。

3. 吞饮

在毛细血管内皮细胞一侧的液体可被内皮细胞膜包围并吞饮入细胞内,形成吞饮囊泡。囊泡被运送至细胞的另一侧,并被排出至细胞外。因此,这也是血液和组织液之间通过毛细血管壁进行物质交换的一种方式。一般认为,较大的分子如血浆蛋白等可以由这种方式通过毛细血管壁进行交换。

第三节 心血管活动的调节

人体在不同的生理状况下,各器官、组织的新陈代谢情况不同,对血流量的需要也不相同。机体内存在着神经的和体液的调节机制,可以对心脏和各部分血管的活动进行调节,从而满足各器官、组织在不同情况下对血流量的需要,协调地进行各器官之间的血流量分配。

一、神经调节

(一) 心脏和血管的神经支配

1. 心脏的神经支配

支配心脏的传出神经为交感神经中的心交感神经和副交感神经中的迷走神经。

(1) 心交感神经及其作用:支配心脏的两侧交感神经节前纤维起自脊髓胸段1~5节灰质侧角的神经元,在星状神经节或颈神经节中更换神经元,节后纤维组成心上、心中、心下神经进入心脏,支配窦房结、房室交界、房室束、心室肌和心房肌等心脏的所有部分。心交感神经节后纤维末梢释放的递质是去甲肾上腺素,它对心脏有兴奋作用,可使心率加快,心肌收缩力量加强。

(2) 心迷走神经及其作用:两侧迷走神经的节前纤维起源于延髓的疑核,到达心脏后,在心内神经节换元,节后纤维支配窦房结、心房肌、房室交界、房室束及其分支,



可能也有少数迷走神经纤维支配心室肌。心迷走神经节后纤维末梢释放的递质是乙酰胆碱,它对心脏有抑制作用,可使心率减慢,心肌收缩力量减弱。

2. 血管的神经支配

(1) 人体大多数血管只接受交感缩血管神经的单一神经支配。交感缩血管神经的节前纤维起源于胸Ⅰ~腰Ⅲ各段的中间外侧柱内,节后神经元位于椎旁和椎前神经节,其节后纤维一部分沿动脉管壁分布,还有一部分加入到躯体神经干内,分布到四肢及头部末梢血管。交感缩血管神经经常保持一定的紧张性活动,通过改变这种紧张性活动的强度,就可调节血管的口径来改变循环系统的外周阻力。反之,当紧张性活动减弱时,小动脉舒张,外周阻力减小,血压就下降。

(2) 少数血管除接受交感缩血管神经支配外,还接受舒血管神经支配。舒血管神经纤维主要有交感舒血管纤维和副交感舒血管纤维两种。交感舒血管纤维的末梢释放的递质是乙酰胆碱。交感舒血管神经纤维不同于交感缩血管神经纤维,它在静息时不参与血管调节,只有当情绪激动、恐慌和准备做剧烈肌肉活动时才发挥调节作用,使肌肉中的血管扩张,血流量增加。人体骨骼肌可能也有这类交感舒血管神经纤维。副交感舒血管神经纤维只限于脑血管、肝血管及外生殖器等的血管,其末梢释放的递质也是乙酰胆碱。由于这类神经纤维的分布只局限于少数器官,因此只有调节局部血流量的作用,而对整个循环系统的外周阻力影响很小。

(二) 心血管中枢

在中枢神经系统中,与心血管反射有关的神经元集中的部位称为心血管中枢。实际上,与心血管活动有关的神经元广泛地分布在自脊髓至大脑皮层的各级部位。在不同的生理状况下,控制心血管活动的各部分神经元之间,以及调节心血管活动的神经元与调节身体其他机能活动的各种神经元之间经常发生不同的整合,使心血管活动和机体其他功能活动协调一致。下面分别介绍中枢神经系统各级水平与心血管活动有关的神经中枢。

1. 延髓心血管中枢

延髓的心血管中枢是调节控制心血管活动的基本中枢,它可在相当大的程度上对血压、心输出量和器官血流量分配等进行调节,但在正常情况下,延髓心血管中枢并不是独立地完成心血管活动的调节。

一般认为,延髓心血管中枢至少可以包括以下四个部分的神经元,即位于延髓头端腹外侧部的缩血管区、位于延髓尾端腹外侧部的舒血管区、位于孤束核的传入神经接替站和位于延髓的迷走神经背核和疑核的心抑制区。

2. 延髓以上部位的心血管神经元

一般说来,中枢神经系统中,越是高位的神经元,对机体各种功能的整合也越完善。在心血管活动的调节中,下丘脑是十分重要的整合部位。在大脑中,特别是边缘系统的一些结构能够影响下丘脑或脑干其他部位的心血管神经元的活动,使心血管活动适

应于身体所处的各种生理、心理状态。此外，大脑皮层运动区兴奋时，可引起骨骼肌中的血管舒张。刺激小脑的一些部位也可引起心血管活动的反应。

(三) 心血管反射

心血管活动的神经调节是通过心血管反射实现的。各种心血管反射的生理意义都在于维持体内环境的相对稳定以及使有机体适应于外界环境的各种变化。在大多数情况下，机体对环境变化所引起的反射都是相当复杂的，许多器官的活动都会发生变化，而心血管反射只是复杂反应中的一个组成部分。

1. 颈动脉窦和主动脉弓压力感受性反射（简称减压反射）

人和许多哺乳动物的颈脉窦和主动脉弓的血管外膜下有丰富的对压力变化非常敏感的感觉神经末梢，分别称为颈动脉窦和主动脉弓压力感受器(图 3-7)。当动脉血压升高时，颈动脉窦和主动脉弓的传入冲动分别经窦神经(入舌咽神经)和迷走神经进入延髓后，一方面使心迷走中枢的活动加强，另一方面又使心交感中枢和交感缩血管中枢活动减弱。这些中枢通过改变心迷走神经、心交感神经和交感缩血管神经的兴奋性来调节心脏和血管的活动，其总的效果是使心脏的活动不致过强，血管外周阻力不致过高，从而使动脉血压保持在较低的水平上，因此这种压力感受性反射又称为减压反射。减压反射是一种典型的负反馈调节，它的生理意义在于保持动脉血压的相对稳定。此外，减压反射主要对迅速出现的动脉血压变化发生调节作用，对维持脑、心正常血液供应具有特别重要意义。

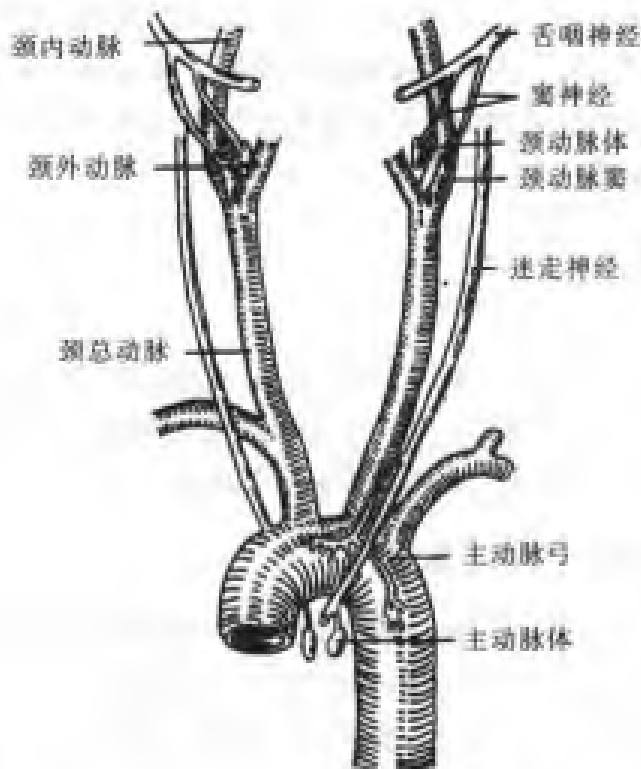


图 3-7 颈动脉窦区与主动脉弓区的压力感受器与化学感受器



2. 颈动脉体和主动脉体化学感受性反射

当血液缺氧、二氧化碳过多或 H^+ 浓度升高时，可刺激颈动脉体和主动脉体的化学感受器，使其兴奋，冲动沿窦神经和迷走神经传入延髓，一方面刺激呼吸中枢，引起呼吸加强，另一方面也刺激心血管中枢，使心率加快、心输出量增加、脑和心脏的血流量增加，而腹腔内脏和肾脏的血流量减少。

在正常情况下，化学感受性反射对呼吸起经常性调节作用，但对心血管活动的影响却很小。只有在缺氧窒息、失血及酸中毒等异常情况下，才对心血管活动产生比较明显的作用，使血压升高，改善血液循环。

3. 本体感受性反射

骨骼肌的肌纤维、肌腱和关节囊中有本体感受器。肌肉收缩时，这些感受器受到刺激，反射性地引起心率加快，血压升高。目前认为，强烈的肌肉运动一开始心率立即加快是神经反射所引起的，而本体感受性反应可能是其中的一部分。

(四) 心血管反射的中枢整合型式

不同部分的交感神经、副交感神经的活动都是有分化的。对于某种特定的刺激，不同部分的交感神经的反应方式和程度是不同的，即表现为一定整合型式的反应，使各器官之间的血流分配能适应机体当时的功能活动的需要。例如，当动物的安全受到威胁而处于警觉和戒备状态时，可出现一系列复杂的行为和心血管反应，称为防御反应。猫的防御反应表现为瞳孔扩大、竖毛、耳廓平展、呼吸加深、怒叫，最后发展为搏斗或逃跑；伴随防御反应的心血管整合型式，最具特征性的是骨骼肌血管舒张，同时心率加快，心输出量增加，内脏和皮肤血管收缩，血压轻度升高。肌肉运动时心血管活动的整合型式与防御反应相似，但血管舒张仅发生在进行运动的肌肉，不进行运动的肌肉的血管发生收缩。

二、体液调节

体液调节是指血液和组织液中的化学物质对心肌和血管平滑肌的调节作用。这些体液因素中，有些是通过血流携带的，可广泛作用于心血管系统；有些则在组织中形成，主要作用于局部的血管，对局部组织的血流起调节作用。

(一) 肾上腺素和去甲肾上腺素

肾上腺素和去甲肾上腺素均由肾上腺髓质分泌，它们在化学结构上同属于儿茶酚胺类。当情绪激动、体力劳动或剧烈的肌肉运动时，交感神经兴奋，刺激肾上腺髓质细胞分泌一定量的肾上腺素和少量去甲肾上腺素进入血液，调节心血管活动。肾上腺素可使心率加快，心肌收缩力量加强，心输出量增加，血压升高；对外周血管的作用可使皮肤、肾脏、肠胃等内脏的血管收缩，而使骨骼肌和肝脏中的血管及冠状血管舒张，这对

保证肌肉运动时外周血液的重新分配,使血液大量流经骨骼肌,满足其代谢增强的需要具有重要意义。去甲肾上腺素虽然也能使心脏活动加强,但其作用比肾上腺素小。去甲肾上腺素对血管的作用是对体内大多数血管(冠状血管除外)都有明显的缩血管作用,导致外周阻力增大,动脉血压升高。

(二) 肾素-血管紧张素

肾脏的近球细胞可分泌一种蛋白水解酶,称肾素。肾素进入血流后可将血浆中的血管紧张素原转变成有活性的血管紧张素。

血管紧张素可通过直接对心血管的作用,也可通过刺激交感神经中枢以及促使交感神经末梢释放去甲肾上腺素的方式使心脏收缩加快、力量增强、心输出量增加,使皮肤及内脏器官血管显著收缩,最终导致外周阻力增加,血压升高。当人体大量失血时,由于血压显著下降,肾血流量减少而使肾素大量分泌,血管紧张素也相应增加,使机体的外周血管出现广泛而持续的收缩,从而防止血压过度下降。可见血管紧张素的产生是机体抵抗低血压的一种应急措施。

(三) 血管升压素

血管升压素是在下丘脑视上核和室旁核一部分神经元内合成的。这些神经元的轴突行走在下丘脑垂体束中并进入垂体后叶,其末梢释放的血管升压素作为垂体后叶激素进入血循环。血管升压素的合成和释放过程也称为神经分泌。

血管升压素在肾集合管可促进水的重吸收,故又称为抗利尿激素。在正常情况下,血浆中血管升压素浓度升高时首先出现抗利尿效应,只有当其血浆浓度明显高于正常时,才引起血压升高。血管升压素对体内细胞外液量的调节起重要作用。在禁水、失水、失血等情况下,血管升压素释放增加,不仅对保留体内液体量,而且对维持动脉血压都起重要的作用。

(四) 心钠素

心钠素是由心房肌细胞合成和释放的一类多肽,可使血管舒张,外围阻力降低;也可使每搏输出量减少,心率减慢,心输出量减少。心钠素作用于肾的受体还可以使肾排水和排钠增多。此外,心钠素还能抑制肾近球细胞释放肾素,抑制肾球状带释放醛而酮,从而导致体内细胞外液量减少。在脑内,心钠素可以抑制血管升压素的释放。心钠素还是体内调节水盐平衡的一种重要体液因素。

(五) 其他的体液调节因素

其他的各类体液调节因素包括血管内皮生成的血管活性物质、激肽、组织胺及前列腺素等。

血管内皮细胞可以生成并释放若干种血管活性物质,引起血管平滑肌舒张或收缩从而调节血压的升降。其中血管内皮生成的舒血管物质包括前列环素和内皮舒张因子,后者可能是一氧化氮(NO);而血管内皮生成的多种缩血管物质则称为内皮缩血管因子,其



中的内皮素是已知的最强烈的缩血管物质之一。

激肽是一类具有舒血管作用的多肽类物质,最常见的有舒缓激肽和血管舒张素。这两种激肽对腺体周围的毛细血管有极强的舒血管作用,使局部血流量增加,从而为腺细胞的活动提供足够的原料。

组织胺是由组氨酸脱羧基而成。组织胺具有强烈的舒血管作用,并可使毛细血管和微静脉的管壁通透性增加。当组织受到损伤或发生炎症以及过敏反应时,都可释放组织胺,从而使血浆渗入组织形成局部组织水肿。

前列腺素是一组脂肪酸类物质,几乎存在于全身各种组织中。在多数组织中,前列腺素具有舒血管作用。

三、局部血流调节

如果将调节血管活动的外部神经、体液因素都去除,则在一定血压变动范围内,器官、组织的血流量仍能通过局部的机制得到适当的调节。这种调节机制存在于器官组织或血管本身,故也称为自身调节。一般认为主要有以下两类:

(一) 代谢性自身调节机制

组织细胞代谢需要氧,并产生各种代谢产物。局部组织中的氧和代谢产物对该组织局部的血流量起代谢性自身调节作用。当组织代谢活动增强时,局部组织中氧分压降低,代谢产物积聚增加。组织中氧分压降低以及多种代谢产物如 CO_2 、 H^+ 、腺苷、ATP、 K^+ 等,都能使局部的微动脉和毛细血管前括约肌舒张。因此,当组织的代谢活动加强(例如肌肉运动)时,局部的血流量增多,故能向组织提供更多的氧,并带走代谢产物。

(二) 肌源性自身调节机制

许多血管平滑肌本身经常保持一定的紧张性收缩,称为肌源性活动。血管平滑肌还有一个特性,即当被牵张时其肌源性活动加强。因此,当供应某一器官的血管的灌注压突然升高时,由于血管跨壁压增大,血管平滑肌受到牵张刺激,于是肌源性活动增强。这种现象在毛细血管前阻力血管段特别明显。其结果是器官的血流阻力增大,器官的血流量不致因灌注压升高而增多,即器官血流量能因此保持相对稳定。当器官血管的灌注压突然降低时,则发生相反的变化,即阻力血管舒张,血流量仍保持相对稳定。

第四节 运动对心血管系统的影响

一、肌肉运动时血液循环功能的变化

骨骼肌收缩时,耗氧量明显增加。循环系统的适应性变化就是提高心输出量以增加

血流供应,从而满足肌肉组织的氧耗,并及时运走过多的代谢产物,否则肌肉运动就不可能持久。

(一) 肌肉运动时心输出量的变化

运动一开始,心输出量就急剧增加,通常一分钟达到高峰,并维持在该水平。运动时心输出量的增加与运动量或耗氧量成正比。

运动时,由于肌肉的节律性舒缩和呼吸运动加强,回心血量大大增加,这是增加心输出量的保证。另外,运动时交感缩血管中枢兴奋,使容量血管收缩,体循环平均充盈压升高,也有利于增加静脉回流。

在回心血量增多的基础上,由于运动时心交感中枢兴奋和心迷走中枢抑制,使心率加快,心肌收缩力加强,因此心输出量增加。交感中枢兴奋还能使肾上腺髓质分泌增多,循环血液中儿茶酚胺浓度升高,也进一步加强心肌的兴奋作用。

(二) 肌肉运动时各器官血液量的变化

运动时心输出量增加,但增加的心输出量并不是平均分配给全身各个器官的。通过体内的调节机制,各器官的血流量将进行重新分配。其结果是使心脏和进行运动的肌肉的血流量明显增加,不参与运动的骨骼肌及内脏的血流量减少。在运动开始时,皮肤血流也减少,但以后由于肌肉产热增加,体温升高,通过体温调节机制,使皮肤血管舒张,血流增加,以增加皮肤散热。

运动时各器官血流量的重新分配具有十分重要的生理意义,即通过减少对不参与活动的器官的血流分配,保证有较多的血流分配给运动的肌肉。由于阻力血管舒张,肌肉中开放的毛细血管数目增加,使血液和肌肉组织之间进行气体交换的面积增大,气体扩散的距离缩短,从而能满足肌肉运动时增加的氧耗。有人曾经推算,人在做剧烈运动时,由于内脏器官、皮肤和不参与运动的肌肉的阻力血管收缩,可以从心输出量中省出大约 $3\text{L}/\text{min}$ 的血液,分配至运动的肌肉。如果动脉血的含氧量为 $20\text{ml}\%$,则即使心输出量不增加,仅通过血流量的重新分配,就可向运动的肌肉多提供 $600\text{ml}/\text{min}$ 的氧。对于心脏机能不健全的人来说,运动时心输出量的增加有限,因此,血流量的重新分配就显得更为重要。

运动时血流量重新分配的生理意义,还在于维持一定的动脉血压。如果没有不活动器官的缩血管效应,仅有运动的肌肉的舒血管效应,总的外周阻力就会减小,动脉血压也就要降低。或者说,必须使心输出量大大增加,才能使动脉血压维持在原先的水平。

(三) 肌肉运动时动脉血压的变化

肌肉运动时动脉血压的变化,是许多因素改变后的总的结果。换句话说,运动时的动脉血压水平取决于心输出量和外周阻力两者之间的关系。如果心输出量的增加和外周阻力的降低两者的比例恰当,则动脉血压变化不大。否则,动脉血压就会升高或降低。在有较多肌肉参与运动的情况下,如步行时,肌肉血管舒张对外周阻力的影响大于其他不活动器官血管收缩的代偿作用,故总的外周阻力仍有降低,表现为动脉舒张压的降



低；另一方面，由于心输出量显著增加，故收缩压升高，而平均动脉压则可能比安静时稍低。

二、运动训练对心血管系统的影响

经常进行体育锻炼或运动训练，可促使人体心血管系统的形态、机能和调节能力产生良好的适应，从而提高人体工作能力。运动训练对心血管的长期性影响概括起来有以下几个方面：

（一）窦性心动徐缓

运动训练，特别是耐力训练可使安静时心率减慢。某些优秀的耐力运动员安静时心率可低至 40~60 次/分，这种现象称为窦性心动徐缓。这是由于控制心脏活动的迷走神经作用加强，而交感神经的作用减弱的结果。窦性心动徐缓是可逆的，即使安静心率已降到 40 次/分的优秀运动员，停止训练多年后，有些人的心率也可恢复接近到正常值。

一般认为，运动员的窦性心动徐缓是经过长期训练后心功能改善的良好反应，故可将窦性心动徐缓作为判断训练程度的参考指标。

（二）运动性心脏增大

研究发现，运动训练可使心脏增大，运动性心脏增大与病理性增大在功能上是有极显著差别的。病理性增大的心脏扩张、松弛，收缩时射血能力弱，心力贮备低，心肌纤维内 ATP 酶活性下降，不能承受哪怕是轻微的体力负荷。而运动性增大的心脏，外形丰实，收缩力强，心力贮备高，其重量一般不超过 500 克。因此，运动性心脏增大是对长时间运动负荷的良好适应。

近年来运动员超声心动图的研究结果表明，运动性心脏增大对不同性质的运动训练具有专一性反应。例如，以静力及力量性运动为主的投掷、摔跤和举重运动员心脏的运动性增大是以心肌增厚为主；而游泳和长跑等耐力性运动员的心脏增大却以心室腔增大为主，也有报道心肌厚度也增加，但心腔内半径与心壁厚之比维持在正常范围。

（三）心血管机能改善

一般人和运动员在安静状态下及从事最大运动时每搏输出量与每分输出量（每分输出量 = 心率 × 每搏输出量）的变化可用下列数据说明：

安静时

一般人： $5000\text{ml}/\text{min}=71\text{ml}/\text{次}\times 70\text{次}/\text{min}$

运动员： $5000\text{ml}/\text{min}=100\text{ml}/\text{次}\times 50\text{次}/\text{min}$

最大运动时

一般人： $22000\text{ml}/\text{min}=113\text{ml}/\text{次}\times 195\text{次}/\text{min}$

运动员： $35000\text{ml}/\text{min}=179\text{ml}/\text{次}\times 195\text{次}/\text{min}$

从上列数据可以看出，安静状态下两者每分输出量相等，但运动员的心率较低，故

每搏输出量较大。从事最大运动时,两者的心率都可达到同样的高度,但运动员的每搏输出量可从安静时的 100ml 增加到 179ml,每分输出量可高达 35L。无训练者的每搏输出量只能从安静时的 71ml 增加到 113ml,每分输出量只能提高到 22L,运动员每搏输出量的增加是心脏对运动训练的适应。

此外,经过训练心肌微细结构会发生改变,心肌纤维内 ATP 酶活性提高,心肌肌浆网对 Ca^{2+} 的贮存、释放和摄取能力提高,线粒体与细胞膜功能改善,ATP 再合成速度增加,冠脉供血良好,使心肌收缩力增加。

运动训练不仅使心脏在形态和机能上产生良好适应,而且也可使调节机能得到改善。有训练者在进行定量工作时,心血管机能动员快、潜力大、恢复快。运动开始后,能迅速动员心血管系统功能,以适应运动活动的需要。进行最大强度运动时,在神经和体液的调节下可发挥心血管系统的最大机能潜力,充分动员心力贮备。运动后恢复期短,也就是说运动时机能变化很大,但运动一停止就能很快恢复到安静时水平。

三、测定脉搏(心率)和血压在运动实践中的意义

(一) 脉搏(心率)

脉搏是指动脉血管壁随心脏的收缩和舒张而发生的规律性搏动。在正常情况下,脉搏频率和心率是一致的,所以运动实践中常用测量脉搏来代替心率的测定。

1. 基础心率及安静心率

清晨起床前静卧时的心率为基础心率。身体健康、机能状况良好时,基础心率稳定并随训练水平及健康状况的提高而趋平稳下降。如身体状况不良或感染疾病等,基础脉搏则会有有一定程度的波动。

在运动训练期间,运动量适宜时,基础心率平稳,如果在没有其他影响心率因素(如疾病、强烈的精神刺激、失眠等)存在的情况下,在一段时间内基础心率波动幅度增大,可能是运动量过大,身体疲劳积累所致。

安静心率是空腹不运动状态下的心率。运动员的安静心率低于非运动员,有的运动员的安静心率可减慢到每分钟三十余次。不同项目运动员的安静心率也有差别,一般来说,耐力项目运动员的安静心率低于其他项目运动员,训练水平高的运动员安静心率较低。评定运动员安静心率时,应采用运动训练前后自身安静心率进行比较,运动后心率恢复的速度和程度也可衡量运动员对负荷的适应水平。

2. 评定心脏功能及身体机能状况

安静时一般人和运动员心脏机能差异并不十分明显,只有在进行强度较大运动时,这种差异才能明显地表现出来。通过定量负荷或最大强度负荷试验,比较负荷前后心率的变化及运动后心率恢复过程,可以对心脏功能及身体机能状况作出恰当的判断。目前常用的定量负荷试验有联合机能负荷试验及台阶试验等。



测试受试者在定量负荷中或负荷后的心率还可测定 PWC170 或间接推测受试者的最大吸氧量。根据 PWC170 功率的大小可评定运动员的机能能力, 根据最大吸氧量可评定运动员有氧工作能力。

心率的测定还可以检查运动员的神经系统的调节机能, 对判断运动员的训练水平有一定的意义, 常用的卧倒一直立试验和直立一卧倒试验, 通过测定试验前后的心率并根据心率增减次数可评定受试者植物性神经系统机能。

3. 控制运动强度

运动中的吸氧量是运动负荷对机体刺激的综合反应, 目前在运动生理学中广泛使用吸氧量来表示运动强度。

阿斯特朗德等在 50 年代对 80 名男女成年人的研究证明, 心率和吸氧量及最大吸氧量呈线性相关, 并发现最大心率百分比和最大吸氧量的百分比也呈线性相关, 这就为使用心率控制运动强度奠定了理论基础。

在耐力训练中, 使用心率控制运动强度最为普遍, 有人提出耐力训练心率 = (最大负荷后心率 - 运动前心率) ÷ 2 + 运动前心率。在耐力训练中保持这样的心率, 5 分钟才能收到良好的效果。

耐力负荷的适宜强度也可以用安静时心率修正最大心率百分比的方法来确定, 即运动时心率 = 安静时心率 + 60% (最大心率 - 安静时心率)。

卡尔森等提出了运动强度心率测定方法, 目的是用心率控制在不同状态下的运动强度而获得良好的训练效果。常用的卡尔森公式为: (最大心率 - 运动前安静心率) ÷ 2 + 运动前心率。所测定的心率可为教学、训练及健身锻炼提供生理学依据。

在涉及游泳等运动的间歇训练中, 一般多将心率控制在 120~150 次/分的最佳范围内。一般学生在早操跑步中的强度, 可控制在 130~150 次/分之间。成年人健身跑可用 170 减去年龄所得的心率数值来控制运动强度。

近年来, 有关无氧阈的研究, 为较精确地判断运动强度开辟了新途径。当由低强度转换到高强度的运动过程中, 体内产生的乳酸和气体交换, 在某一点上会产生一种规律性的变化。这种规律性的变化反映了机体内能量代谢的变化。因此, 有人认为可以通过测定递增负荷运动中产生的血乳酸非线性变化时的心率, 间接推测运动时身体能量代谢方式——有氧或无氧代谢。

由于心率反映的是心脏机能, 而无氧阈主要是反映骨骼肌利用氧的能力, 两者在生理机制上有较大的差别, 因此, 用心率反映无氧阈水平是否有机能上的根据需要进行进一步的研究, 但用心率来间接推测身体能量代谢的方式在运动实践中显然有一定的应用价值。

(二) 血压

血压也是反映心血管机能状态的重要生理指标, 在运动实践中有广泛的应用。

1. 清晨卧床时血压和一般安静时血压较为稳定, 测定清晨卧床血压和一般安静时血压对训练程度和运动疲劳的判定有重要参考价值。

随着训练程度的提高,运动员安静时的血压可略有降低,如果清晨卧床血压比同年龄组血压高15%~20%,持续一段时间不复原,又无引起血压升高的其他诱因,就可能是运动负荷过大所致。如果清晨卧床血压比平时高20%左右且持续两天,往往是机能下降或过度疲劳的表现。

2.测定定量负荷前后血压及心率的升降幅度及恢复状况可检查心血管系统机能并区别其机能反应类型,从而对心血管机能作出恰当的判断。

3.运动训练时,可根据血压变化了解心血管机能对运动负荷的适应情况。由于收缩压主要反映心肌收缩力量和每搏输出量,舒张压主要反映动脉血管的弹性及外周小血管的阻力,因此运动后理想的反应应当是收缩压升高而舒张压适当下降或保持不变。一般而言,收缩压随着运动强度的加大而上升。大强度负荷时,收缩压可高达190mmHg或更高,舒张压一般不变或轻度波动。根据运动训练时血压的变化可判断心血管机能对运动负荷是否适应。

四、体育运动与心血管疾病

(一) 运动在心血管疾病防治中的作用及机制

适当的有氧运动可强体质,并对防治心血管疾病具有重要意义。研究表明,运动可以预防和治疗高血压病,可以延缓动脉粥样斑块的进展,增加冠状动脉的贮备,在冠心病的康复中有重要作用。以前对心功能不全的患者,很多人主张绝对卧床休息。近年研究表明,除急性期外,一般情况下适当地进行运动可使病人体能及症状改善,运动能提高上述心血管病人的生活质量和存活率。

运动对心血管疾病防治作用的机制可归纳为三方面,即中心效应、周围效应及其他效应。

1.中心效应

(1) 维持或增加心肌氧的供应:运动可预防或延缓冠脉粥样硬化的进展,并且能增加冠脉侧枝循环,增加冠脉直径,从而改善心肌的血液灌注和分布。

(2) 减少心肌工作的氧耗量:运动训练能降低安静和运动时的心率,降低安静和运动时的收缩压和平均动脉压,从而使心脏的做功减少;另外,运动训练还可减少循环血液中儿茶酚胺的水平,从而使心脏的氧耗量下降。

(3) 增进心肌的功能:运动可增加休息和运动时的每搏输出量、射血分数,增加心肌收缩力,其原因是由于后负荷减少和生理性心肌肥大所致。

(4) 增加心肌电稳定性:运动训练可减轻运动时心肌的局部缺血,减少安静和运动时血浆儿茶酚胺的水平,从而增加室颤阈值。

2.周围效应

(1) 骨骼肌功能增强:运动训练后骨骼肌内线粒体数目和体积增加,有氧代谢酶活

性增强,同时肌动蛋白及肌组织糖原含量增加。

(2) 血管贮备力增强:运动训练可致肌肉内毛细血管数增加;运动训练后血管舒张功能增强,血管内皮可产生内皮舒张因子(EDRF),参与心血管功能的调节;另外,运动后血管对缩血管物质的反应性减弱,从而造成心脏负荷降低,心功能改善。

(3) 其他方面,包括增加 HDL-c/LDL-c 的比值,改善糖的代谢,增加胰岛素的敏感性,减少血小板聚集性,增加纤溶酶活性,减轻肥胖,从而使抗动脉粥样硬化的能力增强,致动脉粥样硬化的能力减弱等。另外,运动可消除情绪紧张,增加病人生活的信心和乐趣。

总之,运动对心血管疾病的治疗和康复有重要的理论和实际意义。

(二) 慢性心血管病患者进行体育运动时的注意事项

1. 患者的锻炼项目和运动量应与疾病性质与功能水平相适应,可以用简易生理指标,如心率和血压的变化控制运动量,保持心率和血压适当增高而不引起症状。患者应学会测量脉搏和血压,同时注意自我感觉,判断个人的疲劳程度,在出现症状前停止活动。

2. 从小运动量开始,随机体功能状态的改善而逐渐增加,然后维持适宜运动量并经常进行。

3. 与医生保持联系,并在医生指导下学习一些急救知识。

4. 鼓励参加集体活动,这样在发生运动损伤或心脏意外等情况时,有同伴在场,可给以帮助。但作为集体项目运动,运动量不易个别对待,因此要妥善安排。

5. 参加体育运动的同时,要注意饮食、生活制度及用药等问题。

6. 动力(等张、有氧)活动较好,静力(等长、无氧)活动宜采用低负荷、多重复的训练法,避免以增强力量为主的一般力量训练。

7. 要区别对待,根据个人运动习惯、运动能力、机能状态、年龄及性别等特点安排运动活动计划,特别要注意与病情相适应,不要参加激烈比赛,注意安全。

(三) 高血压和冠心病患者的体育锻炼

1. 高血压

高血压也称原发性高血压,它是一种初期以血压增高,继而引起心、脑、肾脏等器官损害的独立的全身性疾病。其病理为中枢神经系统功能失调,使全身小动脉长期处于收缩状态而造成血流阻力增大,致血压升高。有些患者的高血压仅仅是某些病症的一种症状,称之为继发高血压,一般只要原发疾病治愈了,血压便可降至正常。

按世界卫生组织规定,将血压超过 160/95mmHg 列为高血压,我国高血压的发病率一般为 7.30%~11.19%。现代医学认为,高血压是脑中风和冠心病的主要危险因素。在我国,高血压病的最后结果是 70%为脑中风,20%为心脏病(常与冠心病共存),10%为肾脏病变,成为主要的致残疾病和死因。

国内外的治疗经验都肯定,运动是高血压病的有效辅助疗法,具有降压、改善自觉症状、减少降压用药量和巩固疗效的作用。高血压运动疗法多采用步行、体操、游泳、太极拳及其他游戏等有氧运动,运动方式和手段可根据患者条件适当选择,表 3-4 是一

种推荐的治疗高血压病的运动处方。

表 3-4

高血压病运动处方

运动种类	①快走与慢跑, 速度: 120 步/分(约 7 公里/小时=2 米/秒) ②缓慢上下自家楼梯或蹬功率车
运动强度	50% $\dot{V}O_{2max}$ 、心率为 120 次/分或最大体力的 50%
运动时间	每次 60 分钟, 约消耗 1255 千焦耳(300 千卡)
运动频度	每周 3 次, 持续 20 周
运动总量	累计运动时间达到 1000 分钟以上
锻炼方法	①隔日 1 次, 每次 60 分钟, 周计为 180 分钟 ②每日 1 次, 每次 30 分钟(星期日休息) ③隔日 1 次, 每次 30 或 60 分钟交替, 周计为 180 分钟

2. 冠心病

冠心病全称为冠状动脉粥样硬化性心脏病。冠心病患者血胆固醇和甘油三酯增高, 是产生动脉粥样硬化的主要原因, 动脉粥样斑块内的胆固醇来源于血胆固醇的沉积。由于动脉粥样硬化, 可使血管腔变小, 影响心脏供血, 故又称为缺血性心脏病。当冠状血管某些部分堵塞时, 它所供血的区域就断绝了血液供应, 该部分的心肌细胞就会因缺氧而死亡, 医学上称心肌梗塞。

在冠心病中心绞痛是一种突出的症状, 常在过度兴奋、疲劳、受凉或饱食之后发生。疼痛的位置常在胸骨上、中段之后, 可从心前区放射至左肩、上肢、颈或背部。有各种疼痛的性质, 如胸闷、压迫感、紧束感。疼痛发作时使人有濒死的恐惧, 发作持续 1~5 分钟。心绞痛发作时可有血压升高、心率加快等现象。多数心电图可有短暂的 ST 段下降或 T 波改变。

运动及体力活动可改善冠心病症状, 主要是通过适当的运动或体力活动使冠状动脉口径和侧枝循环增加; 使心肌发达, 收缩力增强, 心率减慢, 每搏输出量增加, 静脉回流加速; 使血液中胆固醇含量降低, 高密度脂蛋白和低密度脂蛋白比值提高; 使体重稳定甚至降低, 从而相对减少心脏负荷, 纠正脂质代谢异常, 有助于防止病变加重, 使患者情绪稳定, 改善焦虑、抑郁等不良心理状态。

冠心病患者在不同的康复治疗阶段应有不同的运动或体力活动要求。对慢性冠心病(稳定型心绞痛及陈旧性心肌梗塞)患者, 建议从事运动强度为最大摄氧量的 60% 的有氧耐力运动, 从小强度逐渐过渡到中等强度, 较为理想的是进行症状限制性运动试验, 运动时心率在 110~130 次/分为宜。运动持续时间可考虑主项耐力性运动每次 20~30 分钟, 辅助性放松运动可每天进行 10~20 分钟。运动次数以每周至少 3~4 次为宜。有人认为, 如果一次运动强度等于或大于最大摄氧量 60%, 持续 20 分钟, 则每周 3 次即隔日一次最好。对冠心病患者来说, 运动或体力活动必须循序渐进进行, 表 3-5 为轻度冠心病患者步行运动安排。



表 3-5

循序渐进步行运动

星期	距离(米)	时间(分)	每周次数
1	1600	22	3
2	1600	21	3
3	1600	20	3
4	1600	18	4
5	1600	17	4
6	1600	16	4
7	2400	24	4
8	2400	23	4
9	3200	32	4
10	3200	31	5
11	3200	31	5
12	4000	39	5
13	4000	38	5
14	4000	37	5
15	4800	48	5
16	4800	47	5
17	4800	46	4
18	4800 或 6400	<45 或 <60	3

注：为轻度冠心病患者制定，运动前要得到医生的同意

【小结】

1.心脏是一个由心肌组织构成的具有瓣膜结构的空腔器官，是血液循环的动力装置，同时还具有一定的内分泌功能。

2.构成心脏的心肌具有自动节律性、传导性、兴奋性和收缩性，心肌细胞的电生理特性和机械特性保证心脏不断自动的、协调的、舒缩交替的“全或无”的同步收缩，完成心脏的泵血功能。

3.心脏泵功能可以用心输出量、心指数、射血分数、心力贮备及心脏做功能力等指标反映。心脏泵功能的调节是在复杂的神经和体液参与下，通过对心脏和血管活动的综合调节来实现的。

4.心电图反映了心脏兴奋的产生、传导和恢复过程中的生物电变化，对了解心脏活动情况和诊断心脏疾病有重要价值。

5.动脉、毛细血管和静脉三类血管结构特点不同而机能亦不相同，其中进行血液和组织之间物质交换这一血液循环的基本功能是在微动脉与微静脉之间的微循环来完成的。

6.血管内血液对单位面积血管壁的侧压力即为血压。在不同的生理状况下，完整机体的动脉血压是心脏每搏输出量、心率、外周阻力、主动脉和大动脉的弹性贮器作用及循环血量和容量血管间关系等各种因素相互作用的结果。

7.在不同的生理状况下,机体通过神经、体液及局部血流调节等机制对心血管活动进行调节,以适应各器官组织对血流量的需要,协调地进行各器官间的血流分配。

8.肌肉运动可引起血流循环功能的变化,经常进行体育运动可促进心血管系统的形态、机能和调节能力产生良好的适应,从而提高人体工作能力。脉搏(心率)和血压的测定在运动实践中有重要的应用价值。

9.体育运动对心血管疾病有预防和治疗作用,因此高血压和冠心病等心血管疾病患者应适当参加体育运动。

【思考题】

1. 心肌的各种生理特性有何生理意义?
2. 正常心脏的节律性兴奋是如何传导的?
3. 在心脏泵血过程中,左心室内压力、容积改变和瓣膜开闭是如何保证血液正常流动的?
4. 各种因素是如何影响心输出量的?
5. 用心脏作功量来评价心脏的泵功能有何重要意义?
6. 心力贮备在反映心脏机能上有何生理意义?
7. 各类血管的结构特点与其生理机能间有何联系?
8. 各种因素是如何影响动脉血压的?
9. 肌肉运动时,人体血液循环系统发生哪些主要的功能变化?这些变化是如何引起的?
10. 以减压反射为例,说明心血管活动神经调节的生理过程。
11. 运动训练对心血管系统有何影响?
12. 何谓窦性心动徐缓?它是如何产生的?
13. 有训练的人和一般人在进行定量工作时心血管机能有何不同?
14. 测定脉搏(心率)和血压在运动实践中有何意义?

【主要参考文献】

1. 张镜如等:《生理学》,北京,人民卫生出版社,1996。
2. 曲绵域等:《实用运动医学》,北京,北京科学技术出版社,1996。
3. 杨锡让等:《实用运动生理学》,北京,北京体育大学出版社,1994。
4. 体育院校函授教材:《人体生理学》,北京,人民体育出版社,1995。
5. 体育学院通用教材:《运动生理学》,北京,人民体育出版社,1989。

(沈阳体育学院 谢业琪)



第四章

呼吸机能

【提要】呼吸机能是保证机体在新陈代谢过程中实现气体交换的重要条件。本章主要介绍肺的通气机能，气体在血液中的运输，呼吸运动的调节及运动对呼吸机能的影响。学习这一章时，既要对呼吸理论部分进行系统学习，又要紧密联系运动实践，尤其是对运动过程中肺通气的适应性变化、神经和化学因素对呼吸运动的调节及合理地进行呼吸等内容要求能重点掌握，并学会运用。

人体在进行新陈代谢过程中所需的能量，都是通过氧化体内的营养物质而获得。为此，人体必须从外界不断地摄取 O_2 (氧气)，同时不断地将体内所产生的 CO_2 (二氧化碳) 排出体外。这种人体与外界环境之间进行的气体交换，称为呼吸。

呼吸的全过程由三个环节组成，如图 4-1 所示：

外呼吸 在肺部实现的外界环境与血液间的气体交换，它包括肺通气(外界环境与肺之间的气体交换过程)和肺换气(肺与肺毛细血管中血液之间的气体交换过程)。

气体运输 气体由血液载运，血液在肺部获得的 O_2 ，经循环将 O_2 运送到组织毛细血管；组织细胞代谢所产生的 CO_2 通过组织毛细血管进入血液，经循环将 CO_2 运送到肺部。

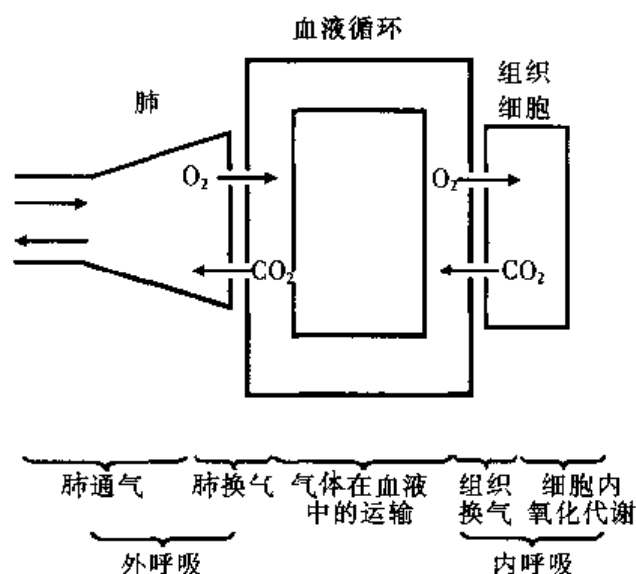


图 4-1 呼吸全过程示意图

内呼吸 组织毛细血管中血液通过组织液与组织细胞间实现的气体交换(又叫组织换气)。

由此可见,呼吸的功能是包含着外呼吸、气体运输和内呼吸这三个环节的生理过程,需要通过血液循环和组织细胞的协调活动,来实现人体对 O_2 的摄取和 CO_2 的排出;通常所说的呼吸功能,仅指外呼吸的功能,是通过呼吸系统来完成的,也是本章所要重点阐述的内容。

呼吸系统包括了呼吸道和肺泡。呼吸道分上、下两部分,上呼吸道由鼻、咽、喉组成,下呼吸道由气管及各级支气管组成。呼吸道有加温、润湿和净化空气的功能,有通过调节支气管平滑肌的舒缩来改变呼吸道的口径进而影响气流阻力的功能,但呼吸道不具备气体交换的功能。人体左右肺共有 6~7 亿个肺泡,总面积约为 70~100 平方米。从由单层上皮细胞构成的肺泡膜到肺毛细血管壁,是气体交换必须穿越的结构,该结构称做呼吸膜,呼吸膜共有六层结构,其厚度仅为 $1\mu m$,厚度越薄,气体的通透性越强。

第一节 呼吸运动和肺通气机能

一、肺通气的动力学

(一) 呼吸运动

肺存在密闭的胸腔中,其本身无平滑肌,不能主动扩大和缩小。但肺富有弹性纤维,肺泡具有一定的表面张力,因此可以被动地扩大和缩小。胸廓的节律性扩大和缩小称为呼吸运动,它是通过呼吸肌的舒缩活动来实现的,构成肺的通气动力。呼吸肌分主要吸气肌、辅助吸气肌和呼气肌:主要吸气肌由膈肌和肋间外肌组成,辅助吸气肌由胸肌、斜方肌、胸锁乳突肌和背阔肌等组成,呼气肌由肋间内肌和腹壁肌组成。按照呼吸的深浅,可把呼吸运动分为平静呼吸与用力呼吸。

1. 平静呼吸

安静状态下的呼吸运动称平静呼吸,其特点是:吸气时,依靠膈肌和肋间外肌的收缩使胸廓扩大,完成吸气过程;呼气时通过膈肌和肋间外肌的舒张,使扩大的胸廓回位(恢复),完成呼气过程。膈肌形似钟罩,向上的隆起形成穹窿,膈肌收缩使穹窿顶下移,并推挤腹腔脏器向下,扩大胸廓上下径。肋间外肌收缩,肋骨沿肋脊关节旋转轴上提并向外侧翻转,同时胸骨也随之推向前上方,使胸廓前后及左右径扩大。胸廓扩大时,肺随之扩张,肺容积的增大使肺内压下降,当低于大气压时,空气进入肺泡,形成吸气;膈肌和肋间外肌的舒张,加之肺和胸廓的弹性回缩与重力作用,以及腹腔脏器恢复到原状的作用,使得膈肌、肋骨回位,胸廓缩小,肺亦随之缩小,随着肺容积的缩小,肺内压上升,当高于大气压时,肺内气体排出体外,形成呼气(图 4-2)。



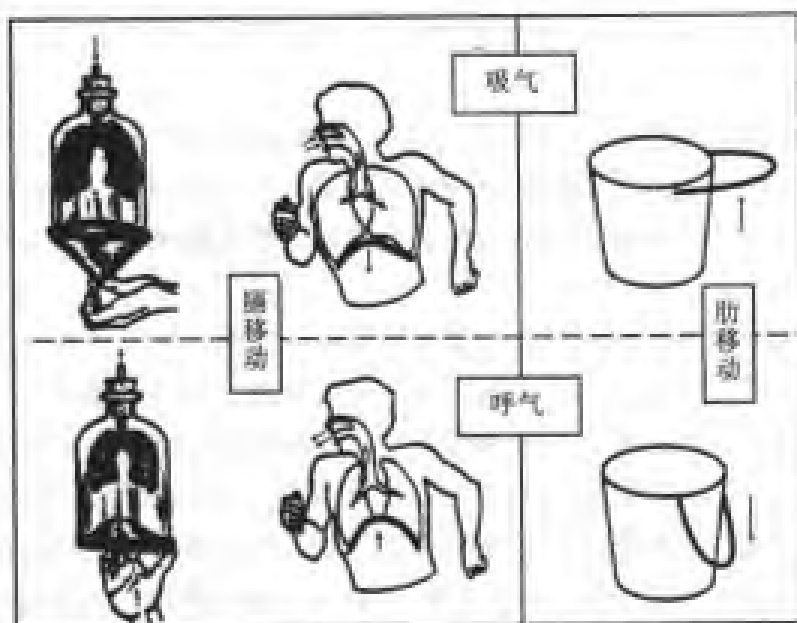


图 4-2 吸气、呼气与膈移动、肋移动的关系图

2. 用力呼吸

用力呼吸的特点是吸气与呼气过程均伴有肌肉的收缩活动。用力吸气时，除主要的吸气肌膈肌和肋间外肌加强收缩外，辅助吸气肌也参与收缩，使胸廓进一步扩大，从而增加吸气气量。用力呼气时，除上述吸气肌舒张外，还有肋间内肌与腹壁肌的同时收缩，前者使肋骨充分下降，后者牵动胸骨向下，并使腹内压增加，使内脏推挤膈肌上移，从而促使胸廓进一步缩小，呼气加深。

3. 呼吸形式

膈肌舒缩时，腹部随之起伏，以膈肌活动为主的呼吸运动称为膈式呼吸或腹式呼吸。肋间肌的活动使肋骨发生提降移动，胸部也随之起伏，以肋间肌活动为主的呼吸运动称为肋式或胸式呼吸。儿童以腹式呼吸为主，成年人的呼吸形式一般都是混合式的，但女性偏重胸式呼吸，男性偏重腹式呼吸。

运动时可通过改变呼吸形式而不影响动作的正常发挥。如在双杠或地上做倒立的动作，由于臂和肩胸固定，使胸式呼吸受到限制，再用胸式呼吸既会影响臂和肩胸的固定，也会造成身体重心的不稳，故在做倒立时可采用腹式呼吸；若做屈体直角动作造型，腹肌的用力使得腹式呼吸受到限制，此时再用腹式呼吸会造成身体造型的抖动，影响做直角动作的质量，则应采用胸式呼吸。

(二) 肺内压

肺泡内的压力称肺内压。气体进出肺泡是借助于肺内压与大气压之间的压差。在呼吸道畅通的情况下，吸气之末、呼气之末或胸廓停止运动，呼吸均会暂停，此时肺内压与大气压相等，气体停止流动。在平静吸气过程中，肺随胸廓扩大而容积增加，肺内压

下降, 低于大气压 2~3mmHg 时, 空气在压差的推动下进入肺泡, 随着肺内的压力逐渐上升, 直至肺泡与大气之间压差消失, 气体才停止入肺; 在平静呼气过程中, 胸廓缩小, 肺弹性回缩, 肺内压上升, 当高于大气压 2~4mmHg 时, 肺内气体顺压差呼出, 随着肺内压的逐渐下降, 直到肺内压与大气压相等, 呼气停止。

人体运动时, 呼吸气体出入肺的流量与流速随运动强度和运动形式而增减, 肺内压的波动幅度也发生相应变化。此外, 若紧闭声门或口鼻, 再用力做呼气动作 (憋气) 时, 肺内压可高于大气压 60~140mmHg。若此时做用力吸气动作, 肺内压可低至 -30~-100mmHg。

(三) 胸内压

胸内压指的是胸膜腔内的压力。胸膜位于肺表面的部分为胸膜脏层, 位于胸壁内表面的部分为胸膜壁层。这两个部分延续相连, 形成密闭的间隙, 即胸膜腔。正常的胸膜腔内没有空气而仅有一薄层浆液, 从而使胸膜腔两层间的摩擦阻力减小且相互紧贴。由此可见, 胸膜腔并不存在有实际意义的空隙。

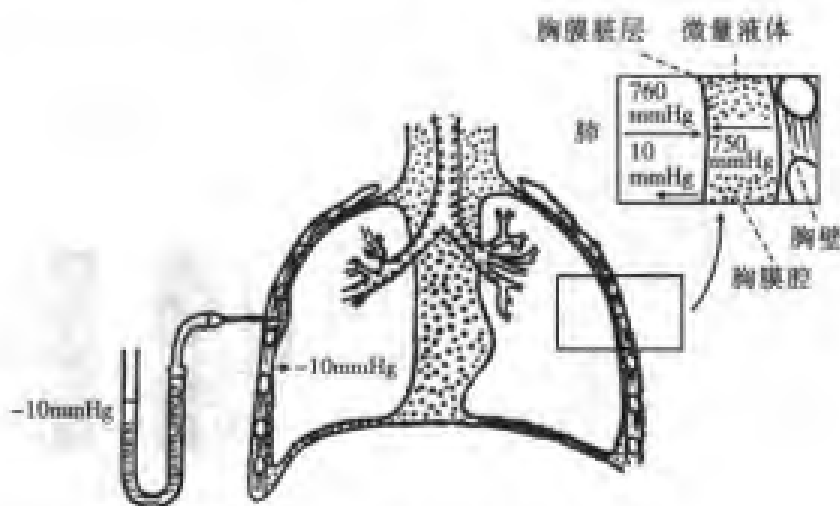


图 4-3 胸膜腔及胸内负压示意图

胸膜腔内的压力可以通过特制的检压计进行测定, 如图 4-3 所示。测定发现, 胸内压在呼吸过程中始终低于大气压, 为负压。通常平静呼气之末胸内压为 -5~-3mmHg, 平静吸气之末胸内压为 -10~-5mmHg, 用力吸气时负压可达 -30mmHg。

胸膜腔内这种负压的形成是与人的生长发育密切相关的。婴儿出生后, 胸廓和肺发育的速度不均衡, 肺发育较慢, 胸廓发育较快, 胸廓容积大于肺。由于胸膜壁层和脏层的紧贴不分, 即使在呼气之末也是如此, 因而肺始终处于被动牵拉状态。肺本身是有弹性的组织, 肺泡又有表面张力, 这两种因素使肺具有了回缩力。所以胸膜腔内的压力应是肺的回缩力与反方向作用于胸膜腔的肺内压(或大气压)之和, 即:

$$\text{胸内压} = \text{肺内压(或大气压)} - \text{肺回缩力}$$

胸膜腔为负压的主要作用有: ①能够牵拉肺呈扩张状态, 有利于肺泡进行气体交换; ②能够对位于胸膜腔内的心脏(心包膜也是胸膜的延续)和大静脉的机能产生良好的影



响。尤其吸气时胸内负压的增加对心房、腔静脉和胸导管扩张作用更加显著,从而使其容积增大,压力减小,更有利于静脉血和淋巴液的回流。另外,吸气时膈肌的下降、腹内压的升高也进一步迫使腹腔静脉血的回流。因此,运动时采用深呼吸,能够有效地促进肺泡气的交换和有效地促进静脉血的回心。

二、肺通气机能

肺通气的量取决于呼吸的深度,随着人体活动状态不同,通气的气量发生相应的变化。

(一) 肺容量及其变化

肺所容纳的气量称为肺容量。在呼吸运动中,肺容量发生周期性变化,变化的大小取决于呼吸的深度。吸入和呼出的气体容积可用肺量计测得,如图4-4所示。肺容量由以下几个部分组成:

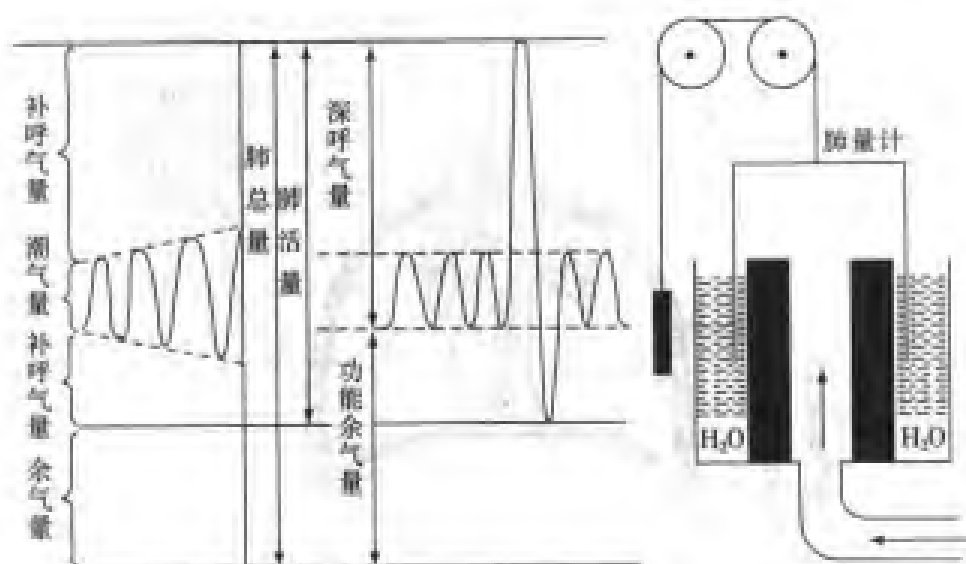


图4-4 肺容量示意图

1. 潮气量

每一呼吸周期中,吸入或呼出的气量称潮气量(tidal volume, TV)。吸气和呼气,好似潮汐有升有降,故得潮气之名,亦即呼吸深度。平静呼吸时的潮气量约为400~600ml。潮气量与年龄、性别、体表面积及情绪等因素有关,运动时潮气量增大。

2. 补吸气量和深吸气量

平静吸气之后,再做最大吸气时,增补吸入的气量,称为补吸气量(inspiratory reserve volume, IRV),正常成人约为1500~2000ml。补吸气量与潮气量之和称为深吸气量(inspiratory capacity, IC)。深吸气量是衡量最大通气潜力的一个重要指标,胸廓的形

态和吸气肌的发达程度是影响深吸气量的重要因素。

3. 补呼气量

平静呼气之后,再做最大呼气时,增补呼出的气量,称为补呼气量(expiratory reserve volume, ERV)。正常成人约为 900~1200ml。补呼气量的大小反映了呼气的贮备能力。

4. 肺活量

最大深吸气后,再做最大呼气时所呼出的气量,称为肺活量(vital capacity, VC)。肺活量为潮气量、补吸气量和补呼气量之和,或为深吸气量与补吸气量之和。正常成人肺活量的平均值,男性约为 3500ml,女性约为 2500ml,运动锻炼既能使人的肺活量水平提高,也能延缓肺活量的衰减,高水平的运动员肺活量可达 7000ml 之多。

肺活量的大小与性别、年龄、体表面积、胸廓大小、呼吸肌发达程度以及肺和胸壁的弹性等因素有关,而且有较大的个体差异。肺活量的绝对值尚不能全面地反映人的通气功能,有时用肺活量的相对值,即肺活量除以体重(ml/kg)或身高(ml/cm),来评价肺通气功能水平和做横向的比较研究。

5. 余气量和功能余气量

尽最大力呼气之后,仍贮留于肺内的气量,称为余气量(residual volume, RV)。正常成年余气量男性为 1500ml,女性为 1000ml。余气量随年龄和健康状况而异,老年人大于青壮年,男性高于女性。平静呼气之后,存留于肺中的气量,称为功能余气量(functional residual capacity, FRC)。安静时正常成年男性约为 2500ml,女性约为 2000ml。从图 4-4 中可以看出,呼吸的深浅,决定着平静呼气水平线的高低,决定着功能余气量的多少。功能余气有平衡肺泡气分压,缓冲呼与吸时出现 PO_2 (氧分压)和 PCO_2 (二氧化碳分压)过高过低的急骤变化,避免静脉血液在动脉化过程中时断时续的作用,以利进行气体交换。因此,功能余气的过多或过少,都会影响到气体的交换。运动时若呼气阻力越大、呼吸深度越浅,功能余气量将会越多。

6. 肺总容量

肺所能容纳的最大气量为肺总容量(total lung capacity, TLC),肺总容量是肺活量和余气量之和。成年男性平均为 5000ml,女性平均为 3500ml。其值因性别、年龄、体表面积、锻炼程度和体位而异。

(二) 肺通气量

单位时间内吸入(或呼出)的气量称为肺通气量(ventilation volume, V_E)。一般以每分钟为单位计量,故也称每分通气量。若呼吸深度一致,则每分通气量为:

$$\text{每分通气量} = \text{呼吸深度(潮气量)} \times \text{呼吸频率(每分钟呼吸次数)}$$

安静时成年人的每分通气量为 6~8L。安静时呼吸的频率是随年龄而异,5 岁时平均



为 26 次, 15~20 岁时平均为 20 次, 成年后平均降为 16 次。呼吸深度和呼吸频率随人体新陈代谢水平而变化, 代谢水平高时, 两者俱增。如剧烈运动时, 呼吸频率可增至 40~60 次/分, 每分通气量可增至 80~150L 或更多(180~200L)。

(三) 肺泡通气量

肺泡通气量(VA)是指每分钟吸入肺泡的实际能与血液进行气体交换的有效通气量。在肺通气过程中, 每次吸入的新鲜气体, 有一小部分将留在鼻、咽、喉、气管和支气管等管腔内, 由于这部分管腔因其解剖特征没有气体交换的功能, 其管腔内的气体就气体交换来说是无效的, 故这部分管腔称为解剖无效腔(anatomical dead space)。成年人的解剖无效腔容量约为 150ml。每次呼出气时, 首先会呼出留在解剖无效腔内的气体, 随后才逐渐呼出肺泡中的气体, 到呼气末时解剖无效腔内停留的是陈旧的肺泡气, 待下次吸气时这部分气将会首先被吸入肺泡。另外, 进入肺泡的气体, 也可因血流在肺内分布不均而未能全部与血液进行气体交换。未能发生气体交换的这一部分肺泡容量称为肺泡无效腔。解剖无效腔与肺泡无效腔之和称为生理无效腔(physiological dead space)。因此, 真正能够进入肺泡的有效气量, 应是每次吸入的新鲜气量除去生理无效腔气后的那部分气量。健康人平卧时生理无效腔等于或接近解剖无效腔。但在运动时肺泡无效腔对肺泡通气量的影响将加大。体育锻炼和运动训练可以改善肺泡的血液循环, 减小肺泡无效腔, 提高肺泡通气量。

若呼吸深度一致, 则每分肺泡气量计算为:

$$\text{每分肺泡通气量} = (\text{呼吸深度} - \text{生理无效腔}) \times \text{呼吸频率}$$

肺泡通气量总是少于肺通气量, 浅而快的呼吸和深而慢的呼吸, 肺通气量可能是一致的, 但肺泡通气量由于无效腔的存在, 结果是不一样的, 如表 4-1。

表 4-1 不同呼吸频率和潮气量时的肺通气量和的比较

呼吸频率(次/分)	潮气量(ml)	肺通气量(ml/min)	肺泡通气量(ml/min)
8	1000	8000	6800
16	500	8000	5600
32	250	8000	3200

从表中可以看出, 深而慢的呼吸对肺泡气的更新比浅而快的呼吸要多。安静时, 呼吸采用适当的深度与频率次数, 既节省用于呼吸肌工作的能量消耗, 又保持了一定的肺泡通气量, 有利于气体交换。运动时, 呼吸不仅要深而且也要适当加快, 这对进一步提高肺泡通气量是有帮助的, 但由于用于呼吸肌工作的能量消耗增多, 所以只有在进行剧烈运动、对氧需求大的情况下才采用这种方式的呼吸。

三、肺通气机能的指标

(一) 肺活量

肺活量反映了肺一次通气的最大能力, 也是测定肺通气功能简单易行的指标,

应用较普遍，常用于评定运动员的训练水平和开展国民体质测定。通过训练，呼吸肌的力量提高，吸气、呼气能力加强，肺活量将会增大。有研究认为，随着人的年龄增长，肺活量每 10 年下降在 9% 以内为正常生理过程，超过此百分数则预示着衰老的加剧。

（二）连续肺活量

连续地测五次肺活量，根据五次所测数值的变化趋势，判断呼吸肌的机能能力。若肺活量后一次的比前一次的大，或与前一次的一致，则认为后一次所做的肺活量都把前一次呼吸肌的收缩当做准备活动，表示了呼吸肌的机能能力强，可看做是身体机能状况的良好表现；如果肺活量越测越下降，则认为呼吸肌处于疲劳状态，表示身体机能状况恢复不佳，或表示身体的疲劳现象未能及时的消除。所以，用测定五次肺活量的结果，可以简单、快速地判断呼吸肌的疲劳及身体的机能状况。

（三）时间肺活量

在最大吸气之后，以最快速度进行最大呼气，记录在一定时间内所能呼出的气量，称时间肺活量(timed vital capacity)。正常成人最大呼气时，第 1 秒、第 2 秒和第 3 秒钟呼出的气量分别占总肺活总量的 83%、96% 和 99%，在 3 秒钟内人体基本上可呼出全部肺活量的气量，其中第 1 秒的时间肺活量的百分率最有意义。时间肺活量是一个评价肺通气功能较好的动态指标，它不仅反映肺活量的大小，而且还能反映肺的弹性是否降低、气道是否狭窄、呼吸阻力是否增加等情况。

（四）最大通气量

以适宜的呼吸频率和呼吸深度进行呼吸时所测得的每分通气量，称最大通气量($V_{E\max}$)或最大随意通气量(maximal voluntary ventilation, M_v)。一般只做 15 秒钟通气量的测定，并将所测得的值乘以 4，即为每分最大通气量。最大通气量是衡量通气功能的重要指标，可以用来评价受试者的通气储备能力。为进一步了解肺通气功能的贮备能力，还可用通气贮量的百分比来表示：

$$\text{通气贮量的百分比} = \frac{\text{最大通气量} - \text{安静时通气量}}{\text{最大通气量}} \times 100\%$$

正常通气贮量的百分比值应大于或等于 93%。

第二节 气体交换和运输

肺泡与肺泡毛细血管血液之间的气体交换称为肺换气；体内毛细血管血液与组织细胞之间的气体交换称为组织换气。气体的交换过程必须遵循着一定的物理化学规律，即 O_2 和 CO_2 都要通过理化扩散的方式才能完成气体交换。



一、气体交换

(一) 气体交换原理

1. 分压和分压差的概念

在一定容积中的一定量的气体, 由于气体分子的运动表现出一定的压力。混合气体的总压力等于其中各种气体所具有的压力之和, 或者说, 在混合气体的总压力中, 某种气体所占有的压力就是该气体的分压(用 P 表示)。计算某种气体的分压, 可以用混合气体的总压力乘以该气体在混合气体中所占的容积百分比来求得。例如, 空气是混合气体, 总压力(大气压)为 760mmHg , 空气中 O_2 与 CO_2 的容积百分比分别占 20.94% 和 0.04% , 那么 O_2 与 CO_2 在空气中的分压就是:

$$P_{\text{O}_2} = 760 \times 20.94\% \approx 159\text{mmHg}$$

$$P_{\text{CO}_2} = 760 \times 0.04\% \approx 0.3\text{mmHg}$$

当气体与液体表面接触时, 由于气体分子的运动而溶解于液体中, 液体中气体分子也能从液体逸出, 这种溶于液体内的气体分子逸出的力称为该气体的张力, 该气体的张力就是气体在液体中的分压, 存在于液体中 O_2 和 CO_2 的张力也以 P_{O_2} 和 P_{CO_2} 来表示。气体分子或溶解于液体, 或由液体中逸出, 其运动方向和量取决于分压与张力之间的压差。若分压高于张力, 气体分子溶入液体, 若张力高于分压, 则气体分子从液体逸出, 直至分压与张力达到平衡。若是两部分气体的分压不同, 有压差, 当它们接触时, 气体分子也将由分压高气体的一侧流向分压低的一侧, 直至两边达到分压平衡。气体的这种从高分压向低分压流动的现象, 叫做气体的扩散或弥散。某一气体高分压与低分压之差, 叫做该气体的分压差。分压差越大, 预示气体扩散越多。气体扩散的最终结果是压力平衡, 分压差消失。

人体肺换气和组织换气的多少, 除取决于膜的通透性和各种气体的理化特性之外, 膜两侧气体的分压差是最关键的条件。分压差是实现气体交换的动力, 分压差的大小决定着气体的扩散方向和扩散速率。

2. 人体不同部位氧和二氧化碳的分压

大气压因海拔高度而改变, 由于各种气体的容积百分比不变, 但各种气体的分压会随大气压的变化而产生相应的改变。在高原, 大气压的降低引起各种气体分压相应降低。在深水下, 大气压的提高引起各种气体分压相应的提高。这种条件对登山和潜水运动员有很大的影响。所谓“高原训练”, 就是利用高原 P_{O_2} 低、缺氧环境对机体的刺激作用, 达到机体在多方面产生功能性的生物学适应, 从而使人体各项机能水平提高, 为创造良好成绩打下基础。人在正常状态下, 不同部位各种气体之分压较为恒定, 人体不同部位的 P_{O_2} 、 P_{CO_2} 如表 4-2 所示。

表 4-2 海平面空气、肺泡气、血液和组织细胞内的 PO_2 、 PCO_2 (mmHg)

气体分压	空气	肺泡气	动脉血	静脉血	组织细胞
PO_2	159	104	100	40	0~30
PCO_2	0.3	40	40	46	50~80

3. 气体扩散的速率

单位时间内气体扩散的容积称为气体扩散速率, 它与气体的分压差、气体的温度、扩散面积以及气体在液体中的溶解度成正比, 与气体分子量的平方根和扩散距离成反比, 其关系式为:

$$\text{气体扩散速度} \propto \frac{\text{分压} \times \text{温度} \times \text{扩散面积} \times \text{溶解度}}{\sqrt{\text{气体分子量}} \times \text{扩散距离}}$$

4. 气体的肺扩散容量

在 1mmHg 分压差作用下, 每分钟通过呼吸膜扩散气体的量, 称为气体的肺扩散容量。肺扩散容量是评定呼吸气体通过呼吸膜功能的一项重要指标, 往往以测氧的扩散容量(简称氧扩散容量)来评定气体的肺扩散容量。人在安静状态下, 氧扩散容量约为 20~33ml/min·mmHg。氧扩散容量与体表面积成正比, 受年龄、性别及体位的影响, 儿童和老年人的氧扩散容量要小于成年人, 女性的氧扩散容量小于男性, 直立位的氧扩散容量小于仰卧位。在同一个体中, 运动或体力劳动时, 氧扩散容量增加, 这是因为此时参与气体交换的呼吸膜面积和肺毛细血管血流量的增加、气体交换能力的加强所致。

(二) 肺换气和组织换气

气体交换要通过极薄的生物膜, 通过肺换气的生物膜叫做呼吸膜, 通过组织换气的生物膜是由毛细血管壁、基膜和组织细胞膜组成。这些均由脂质构成的生物膜, 对 O_2 和 CO_2 等亲脂性气体分子通透性较高。

1. 肺换气

在肺循环中, 当来自肺动脉的静脉血液流经肺泡毛细血管时, 由于肺泡气中的 PO_2 (102mmHg) 高于静脉血中的 PO_2 (40mmHg), 而肺泡气中 PCO_2 (40mmHg) 低于静脉血中的 PCO_2 (46mmHg), O_2 由肺泡扩散入血液, CO_2 则由血液向肺泡扩散, 由此形成了肺换气, 从而使含 O_2 较少、含 CO_2 较多的静脉血转变含 O_2 较多、含 CO_2 较少的动脉血。由于肺通气不断在进行, 每次的通气只使 1/7 的肺泡气更新, 故肺泡气的成分相对恒定, 使得肺泡气 PO_2 总是比静脉血高, 而 PCO_2 总是比静脉血低。 O_2 和 CO_2 在肺部的换气过程如图 4-5 中箭头方向所示。

O_2 和 CO_2 通过正常呼吸膜的扩散速度极快, 当静脉血流经肺毛细血管全长的 1/3 时, 气体交换即已基本完成, 达到平衡, 需时仅 0.3 秒。由此可见, 肺换气有很大的时间贮备, 即使在运动时血流速度加倍的情况下, 也能完成气体交换。



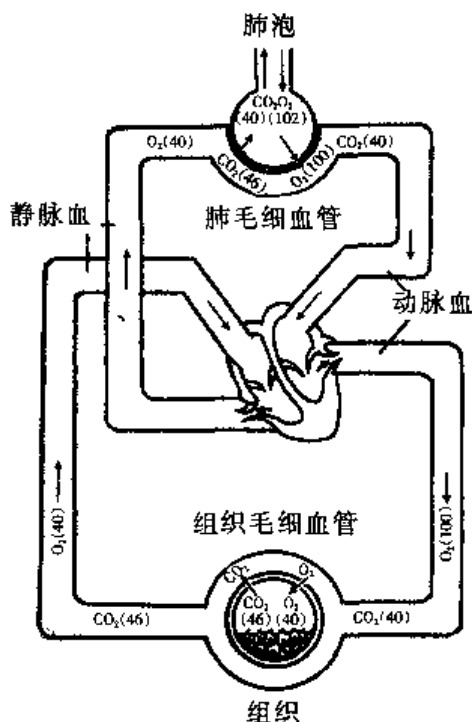


图 4-5 气体交换示意图

2. 组织换气

在组织中，当体循环的动脉血流经组织毛细血管时，由于动脉血的 PO_2 (100mmHg) 高于组织中的 PO_2 (0~40mmHg)， PCO_2 (40 mmHg) 低于组织中的 PCO_2 (46~80mmHg)， O_2 从血液中向组织细胞扩散， CO_2 则从组织细胞向血液扩散，由此形成了组织换气，组织换气的结果是使流经组织的动脉血转变为静脉血。由于细胞新陈代谢不断地消耗 O_2 ，不断地产生 CO_2 ，故组织细胞内的 PO_2 总是低于动脉血，而 PCO_2 总是高于动脉血。 O_2 和 CO_2 在组织的换气过程见图 4-5 中箭头方向所示。

组织中 PO_2 和 PCO_2 的波动是受组织代谢程度的影响，运动是人体组织新陈代谢剧烈的过程，过多的氧耗和产生过多的 CO_2 ，使得组织细胞中 PO_2 下降（甚至降到零）， PCO_2 升高，导致分压差加大。所以人体在运动时，组织换气过程加快，换气量加大。

(三) 影响换气的因素

除分压差的大小是影响换气的重要因素外，换气还受其他因素的影响。具体如下：

1. 气体的分子量和溶解度

气体扩散速度越快，气体交换也越快。气体扩散速度与分子量的平方根成反比，与溶解度成正比。 CO_2 在血浆中的溶解度约为 O_2 的 24 倍，但 CO_2 的分子量 (44) 大于 O_2 的分子量 (32)，因此在同样的分压下， CO_2 的扩散速度约为 O_2 的 21 倍。若再观察气体扩散的动力分压差的大小，则呼吸膜两侧的 PO_2 差为 PCO_2 差的 10 倍。综合考虑气体的分子量、溶解度以及分压差， CO_2 实际的扩散速度约为 O_2 的 2 倍。所以正常情况下很少

发生 CO_2 的扩散障碍，往往是机体缺氧显著，而 CO_2 滞留不明显。

从运动角度分析，因 O_2 、 CO_2 的分子量和溶解度不会改变，那么气体扩散速度和交换能力与分压差的关系最为密切。

2. 呼吸膜

肺换气时， O_2 和 CO_2 的扩散必须通过呼吸膜，所以呼吸膜的厚度、面积及通透性都会影响肺换气的效率。呼吸膜的平均厚度不到 $1\mu\text{m}$ ，气体通透性极大。正常成年人肺有 6~7 亿个肺泡，呼吸膜总扩散面积约有 70~100 平方米。安静状态下，呼吸膜扩散面积约需 40 平方米，故呼吸膜有相当大的贮备面积。运动或劳动时因肺部毛细血管开放数量和开放程度的增加，扩散面积也将大大增大。

此外，肺毛细血管的直径平均不足 $8\mu\text{m}$ ，与红细胞直径相差无几，因此，红细胞膜通常能接触到毛细血管壁， O_2 和 CO_2 不必经过大量的血浆层即可到达红细胞或进入肺泡，缩短了扩散距离，加快了气体扩散速度。运动过程中由于血流的加速，使气体在肺部的交换时间减少，这时呼吸膜的厚度和扩散距离的长短对换气来说更为重要。

3. 通气/血流比值

通气/血流比值是指每分钟肺泡通气量(V_A)和每分钟肺毛细血管血流量(Q_C)之间的比值，简写为 V_A/Q_C 。不难理解，要实现肺内适宜的气体交换，除有足够的肺泡通气量和肺血流量，还要求这两者间有恰当的比值。健康成年人安静时每分钟 4200ml 的肺泡通气量恰好使 5000ml 静脉血(即安静时心输出量)全部动脉化， V_A/Q_C 比值(4200/5000)为 0.84，此时通气量与血流量匹配最合适，肺换气效率最高。

V_A/Q_C 值小于 0.84，意味着通气不足，血流过剩，部分静脉血流经通气不良的肺泡，使得气体未得到充分的更新，未能变成动脉血就流回了心脏，造成功能性“动-静脉短路”； V_A/Q_C 值大于 0.84，意味着通气过剩，血流不足，使得静脉血被充分动脉化后仍有部分肺泡气未能与血液交换，形成肺泡无效腔。肺泡无效腔与前述的解剖无效腔一起合称为生理无效腔，生理无效腔中的气体均未参与气体交换。正常情况下肺泡无效腔容积不大，故生理无效腔与解剖无效腔几乎相等。

运动时通气量加大，心输出量增加，肺血流量也加大，这对 V_A/Q_C 值的变化影响不大，但气体的交换得到加强，机体对氧的摄取量提高。

4. 局部器官血流量

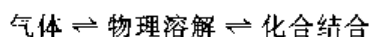
这是对组织换气而言，组织器官血流量大，有利于组织进行气体交换。如肌肉活动加强时，需氧量增加，组织细胞需从血液中吸收更多的 O_2 。由于血液氧容量不能增加，故要满足组织细胞的氧消耗，提高局部器官血流量的意义就更重大。

二、气体运输

肺换气和组织换气之间是借助于血液运输 O_2 和 CO_2 。血液运输气体有两种方式，



小部分气体是以物理溶解的方式进行运输，大部分气体以化合结合的方式进行运输，这两种方式是相辅相成的。物理溶解的量虽很少，但很重要，进入血液的气体要先溶解才能发生化学结合，结合的气体也要先溶解才能从血液中逸出。物理溶解与化合结合两者之间处于动态平衡，即：

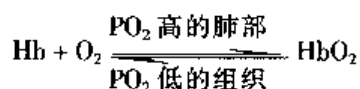


(一) 氧运输

进入血液的 O_2 只有约 1.5% 溶于血浆，98.5% 进入红细胞与 Hb（血红蛋白）结合。1 克 Hb 可结合 1.34~1.36ml 的 O_2 ，每 100ml 血液中 Hb 与 O_2 结合的最大量（约 19~20ml），称为 Hb 的氧容量。每 100ml 血液中 Hb 实际与 O_2 结合的量，称为 Hb 的氧含量。Hb 的氧含量所占 Hb 的氧容量的百分比称为 Hb 的氧饱和度。若忽略不计血液物理所溶解极少的 O_2 ，测得 Hb 的氧含量、Hb 的氧容量及 Hb 的氧饱和度，可以代表血液的氧含量、血液的氧容量和血液的氧饱和度。当动脉血的 PO_2 为 96~100mmHg 时，其氧含量为 19ml，氧容量为 20ml，则氧饱和度为 95% 或接近 100%；当静脉血的 PO_2 为 40mmHg 时，其氧含量为 15ml，若氧容量不变，则氧饱和度约为 75%。动脉血的氧饱和度高于静脉血的氧饱和度。

1. Hb 与 O_2 结合

在肺内， PO_2 高，Hb 迅速与 O_2 结合，形成 HbO_2 （氧合血红蛋白），这一过程称做氧结合作用。在 PO_2 低的组织内，Hb 迅速释放出 O_2 ，分离解为 Hb 和 O_2 ，这一过程称做氧解离作用。Hb 结合 O_2 与解离 O_2 的反应是迅速的、可逆的，不需酶的催化，是受 PO_2 高低的影响。即：



2. 氧离曲线

氧离曲线或称 HbO_2 解离曲线是表示 PO_2 与 Hb 结合 O_2 量关系或 PO_2 与氧饱和度关系的曲线。氧离曲线反映了 Hb 与 O_2 的结合量是随 PO_2 的高低而变化，这条曲线呈“S”，而不是直线相关，如图 4-6 所示。

氧离曲线的这种特点原因在于 1 分子 Hb 含有 4 个 Fe^{2+} ，4 个 Fe^{2+} 在与 O_2 的结合过程中并非同时结合 O_2 ，而

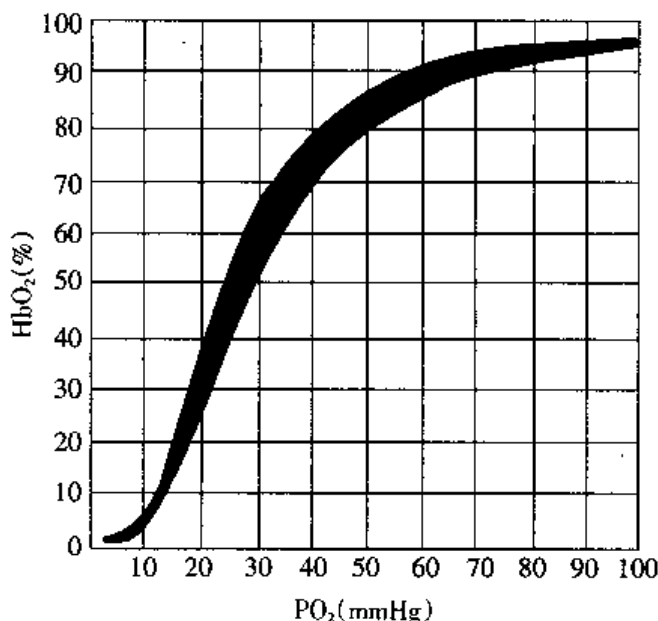


图 4-6 氧离曲线示意图

是逐一按四步进行，且相互间有协同效应，即 1 个 Fe^{2+} 与 O_2 结合后，由于 Hb 变构效应，其他 Fe^{2+} 更易与 O_2 结合。反之，若 HbO_2 中的 1 个 O_2 释放出来，其他几个 O_2 也更易放出。当 Hb 的氧饱和度为 75% 时，每分子 Hb 中已有 3 个 Fe^{2+} 结合了 O_2 ，这时所剩下的 1 个 Fe^{2+} 与 O_2 的亲合力增加了 125 倍，故氧结合作用越加明显；若饱和度在 75% 以下，说明氧结合的 Fe^{2+} 不足 3 个，亲合力无明显提高，相反氧解离作用越加明显。因此，氧离曲线呈现特殊的“S”形。

“S”形氧离曲线的上段显示为当 PO_2 在 60~100mmHg 时，曲线坡度不大，形式平坦，即使 PO_2 从 100mmHg 降至 80mmHg 时，血氧饱和度仅从 98% 降至 96%。这种特点对高原适应或有轻度呼吸机能不全的人均有好处。只要能保持动脉血中 PO_2 在 60mmHg 以上，血氧饱和度仍有 90%，不致造成因供氧不足而产生的严重后果。因此，氧离曲线的上段，对人体的肺换气有利。

曲线下段显示出 PO_2 在 60mmHg 以下时，曲线逐渐变陡，意味着 PO_2 下降，使血氧饱和度明显下降。 PO_2 为 40~10mmHg 时，曲线更陡，此时 PO_2 稍有下降，血氧饱和度就大幅度下降。释放出大量的 O_2 ，保证组织换气。这种特点对保证向代谢旺盛的组织提供更多的 O_2 是十分有利的。因此，氧离曲线的下段，对人体的组织换气大为有利。

Hb 与 O_2 的结合和解离在多种因素的影响下，会使氧离曲线的位置发生偏移。具体影响氧离曲线的因素是：血液中 PCO_2 升高、pH 值降低、体温升高以及红细胞中糖酵解产物 2,3-DPG (2,3-二磷酸甘油酸) 的增多，都使 Hb 对 O_2 的亲合力下降，氧离曲线右移，从而使血液释放出更多的 O_2 ；反之，血液中 PCO_2 下降、pH 值升高、体温降低和 2,3-DPG 的减少，使 Hb 对 O_2 的亲合力提高，氧离曲线左移，从而使血液结合更多的 O_2 (图 4-7)。

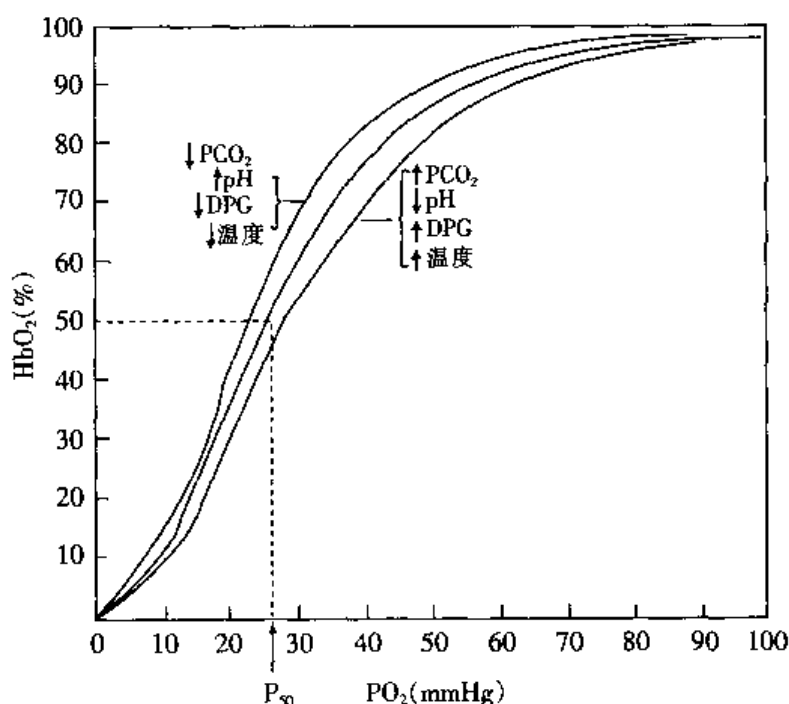


图 4-7 影响氧离曲线的主要因素



运动过程中, 由于肌肉代谢加强, H^+ 和 CO_2 的产生增多, 使得体温上升, PCO_2 升高, pH 值降低, 2,3-DPG 也显著增多 (从平原进入海拔较高的高山时, 红细胞中 2,3-DPG 也会增加), 这些原因都会导致氧离曲线向右移动。氧离曲线的右移, 说明在相同的 PO_2 下, 血液中 HbO_2 能解离出更多的 O_2 , 能为机体提供更多的 O_2 。另外, CO (煤气的主要成分) 与 Hb 的亲和力比 O_2 与 Hb 的大 200 倍, 可以和 O_2 竞争与 Hb 的结合, 减少血液对氧的运输, 从而使向组织扩散的氧量下降, 造成组织的呼吸窒息。

3. 氧储备

在正常情况下, O_2 除维持体内的代谢消耗外, 还储存在体内一小部分待用。储存在血液和肺中的 O_2 约有 1300~2300ml, 储存在肌红蛋白中的 O_2 约有 240~500ml。肌红蛋白存在于骨骼肌、心肌和肝脏中, 其化学结构与 Hb 相似, 肌红蛋白与 O_2 的亲和力比 Hb 强, 在无氧代谢肌细胞 PO_2 极度下降时, 氧合肌红蛋白才发挥作用, 它能释出结合 O_2 的 90% 供肌肉代谢。红肌纤维含有的肌红蛋白多于白肌纤维。

4. 氧利用率

每 100ml 动脉血流经组织时所释放的 O_2 占动脉血氧含量的百分数, 称氧利用率。计算方法如下:

$$\text{氧利用率} = \frac{\text{动脉血氧含量} - \text{静脉血氧含量}}{\text{动脉血氧含量}} \times 100\%$$

安静时, 动脉血 PO_2 为 100mmHg 时的血氧饱和度约为 98%。正常人每 100ml 血液的氧含量较恒定 (约 20ml)。静脉血 PO_2 为 40mmHg 时的血氧饱和度约为 75%, 则每 100ml 静脉血的氧含量应为 $(75/100) \times 20$ 或 $20 \times 75\% = 15\text{ml}$ 。因此, 氧利用率为 $[(20 - 15)/20] \times 100\% = 25\%$ 。剧烈活动时肌肉的 PO_2 可降到 20mmHg, 甚至到 “0”。若以 PO_2 在 20mmHg 为例, 氧饱和度约为 35%, 而静脉血的氧含量应为 $(35/100) \times 20 = 7\text{ml}$ (放出 13ml 的 O_2), 这时氧利用率则为 $(13/20) \times 100\% = 65\%$, 比安静时高 2.6 倍。在剧烈运动中, 局部血流量增加 3 倍以上, 氧利用率也提高 3 倍以上。因此, 毛细血管血液向肌细胞供应的 O_2 比安静时高出 9 倍或更多, 氧利用率接近 100%。氧利用率可以作为评定训练程度的指标之一。

5. 氧脉搏

心脏每次搏动输出的血量所摄取的氧量, 称为氧脉搏, 可以用每分摄氧量除以每分心率计算。氧脉搏越高, 说明心肺功能好、效率高。据研究, 氧脉搏在心率为 130~140 次/分时, 最高值为 11~17ml, 心率过快时则有下降趋势。但目前也有运动员在从事剧烈活动时, 氧脉搏值可高达 23ml。氧脉搏可作为判定心肺功能的综合指标。

(二) 二氧化碳运输

CO_2 从组织进入血液后, 物理溶解的量较少, 占总运输量的 6%。 CO_2 的化学结合形式有两种: 一种是形成碳酸氢盐的形式 ($NaHCO_3$, $KHCO_3$), 占总运输量的 87%; 另一

种是形成氨基甲酸血红蛋白的形式(HbNHCOOH)，占总运输量的7%。

1. 碳酸氢盐形式的运输

组织细胞代谢所产生的 CO_2 进入血液，主要是以 HCO_3^- 的形式运输。 HCO_3^- 在血浆中形成 NaHCO_3 ，在红细胞中形成 KHCO_3 ，随血液循环运送至肺部。

由于 CO_2 和 H_2O 生成 H_2CO_3 的反应需要碳酸酐酶(CA)的催化，而 CA 在血浆中极少，在红细胞中含量丰富，所以该反应是在红细胞中进行。 CO_2 在 CA 的催化下，与 H_2O 结合，形成 H_2CO_3 后解离为 H^+ 与 HCO_3^- ，即 $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2\text{CO}_3 \rightarrow \text{H}^+ + \text{HCO}_3^-$ 。随着红细胞中 HCO_3^- 浓度逐渐升高，大部分 HCO_3^- 可顺浓度差向血浆扩散，并与血浆中的 Na^+ 结合成 NaHCO_3 ，少部分在红细胞内与 K^+ 结合成 KHCO_3 。由于红细胞对正离子的通透性很小，正离子不能伴随 HCO_3^- 透出红细胞，势必造成红细胞膜内外的电位差。因此， HCO_3^- 在透出红细胞的同时，血浆中的 Cl^- 向红细胞内转移，以保持两侧离子电荷的平衡，这一现象称做“氯离子转移”。 H_2CO_3 解离出来的 H^+ 也必须及时移去，才有利于反应继续进行。 Hb 能够有效地接受 H^+ ，形成还原血红蛋白 (HHb)。因此，在组织毛细血管中， HbO_2 放出 O_2 与 H^+ 结合，这不仅能促进更多的 CO_2 转变为 HCO_3^- ，有利于 CO_2 的运输，而且还能促使更多 O_2 的释放，有利于向组织供 O_2 (图 4-8)。

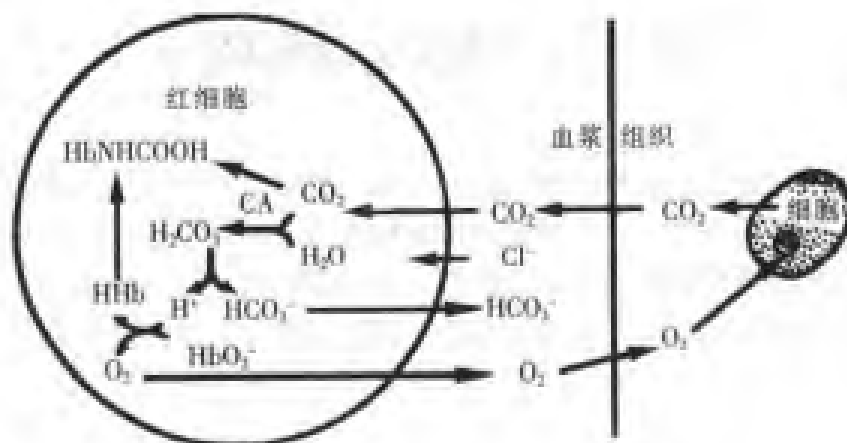


图 4-8 体循环毛细血管中的气体交换

当血液流经肺部时，上述反应向图 4-8 箭头的反方向进行。 HHb 从肺泡中摄取 O_2 形成 HbO_2 和 H^+ ，在红细胞中 H^+ 与 HCO_3^- 合成的 H_2CO_3 ，经 CA 催化为 CO_2 和 H_2O ， CO_2 由肺泡呼出。由于 CO_2 的不断呼出，血浆中的 HCO_3^- 不断进入红细胞，为保持离子的平衡， Cl^- 又透出血浆，完成 Cl^- 的又一次转移。

2. 氨基甲酸血红蛋白形式的运输

CO_2 进入红细胞后，可直接与 Hb 分子上的自由氨基($-\text{NH}_2$)结合，形成氨基甲酸血红蛋白(HbNHCOOH)。即：



上述反应特点是迅速、可逆、无需酶催化，运输效率高等。这种反应除受 PCO_2 的



影响外, 还受 Hb 与 O_2 结合作用的影响。在组织内 PO_2 低, HbO_2 释放 O_2 而结合 CO_2 形成 $HbNHCOOH$; 在肺内 PO_2 高, $HbNHCOOH$ 释放 CO_2 而结合 O_2 形成 HbO_2 。用这种方式运输 CO_2 的量, 虽只占 CO_2 总运输量的 7%, 但在肺部排出 CO_2 的总量中, 由 $HbNHCOOH$ 解离出来的 CO_2 , 却占 20%~30%。

(三) 呼吸与酸碱平衡

血液在运输 CO_2 过程中, 形成了 H_2CO_3 与 $NaHCO_3$, 二者是血液中的重要缓冲物质, 通常 $H_2CO_3/NaHCO_3$ 的比值为 1/20。当代谢产物中有大量酸性物质时, 它们与 HCO_3^- 作用, 生成 H_2CO_3 , 后者分解为 CO_2 和 H_2O , 使血中 PCO_2 上升, 导致呼吸运动加强, CO_2 排出量增加, 因而血浆中 pH 值的变化不大; 当体内碱性物质增多时, 与 H_2CO_3 作用使血中 $NaHCO_3$ 等盐浓度的增高, 于是 H_2CO_3 浓度和 PCO_2 降低, 导致呼吸减弱, 呼吸的减弱又使 H_2CO_3 浓度逐渐回升, 维持了其于 $NaHCO_3$ 的正常比值, 因此对血浆 pH 值的影响也较小。

由此可见, 如果血液酸碱度发生变化时, 呼吸机能可以及时发生代偿反应。此外, 肾脏在维持酸碱平衡中也起着重要作用。总之, 人体的酸碱平衡是依靠血液的缓冲作用以及呼吸和肾脏的作用共同进行调节的。

第三节 呼吸运动的调节

正常的呼吸运动总是自动有节律地进行。随着机体活动及代谢水平的改变, 呼吸的频度和深度会发生相应的改变, 这种适应机体代谢需要的呼吸运动是一种非意识性节律活动。但产生呼吸运动的呼吸肌属于骨骼肌, 在清醒状态下, 呼吸运动在一定程度上受大脑皮质有意识的控制。因此, 呼吸运动除了具有这种自主性的基本特征外, 还有一定的随意性。

一、调节呼吸运动的神经系统

(一) 呼吸运动的神经支配

支配膈肌的神经是膈神经, 其运动神经元位于颈髓 3、4 段的灰质。肋间肌受肋间神经支配, 其运动神经元在脊髓胸段的灰质前角。若在动物的中脑上下丘之间横切, 基本保留了脑干, 则动物的呼吸能保持正常活动; 若在延髓下作横切, 仅保留脊髓, 动物的呼吸即停止。可见, 节律性呼吸是由延髓和脑桥通过膈神经和肋间神经进行调节的。

(二) 呼吸中枢

在中枢神经系统内, 有许多调节呼吸运动的神经细胞群, 称为呼吸中枢。上自大脑皮质、下丘脑及脑干, 下至脊髓均有控制呼吸运动的神经细胞群。

动物实验证明,调节呼吸运动的主要中枢在延髓和脑桥。在脑桥上部为呼吸调整中枢,有抑制吸气、调整呼吸节律的作用。脑桥下部为长吸中枢,可加强吸气。延髓既有吸气中枢,也有呼气中枢,能自动产生节律性的呼吸,所以称延髓为呼吸基本中枢。

呼吸还受脑桥以上部位如大脑皮质、边缘系统及下丘脑等的影响,特别是大脑皮质对呼吸运动可以在一定范围内进行随意调节。如讲话、唱歌、吹奏乐器以及运动过程中根据技术动作要求进行的憋气和重新调整呼吸节奏等,都是靠大脑皮质对呼吸肌的随意调节。正常人的呼吸运动是可以通过大脑皮质建立条件反射的。

二、呼吸运动的反射性调节

呼吸运动直接受呼吸中枢的控制,但呼吸中枢的活动也受来自呼吸器官本身的各种感受器传入冲动的反馈影响。

(一) 肺牵张反射

由肺扩张或缩小引起吸气抑制或兴奋的反射,称为肺牵张反射。肺牵张反射的感受器主要分布在支气管及细支气管的平滑肌内。吸气时,肺扩张牵拉感受器引起兴奋,冲动经迷走神经纤维传入延髓吸气中枢,从而使吸气中枢产生抑制作用,终止吸气转为呼气。呼气时,肺缩小,牵拉感受器的刺激减弱,传入冲动减少,解除了对吸气中枢的抑制,吸气中枢再次兴奋,产生吸气,从而又开始一个新的呼吸周期。

动物试验中,向吸气的兔肺中充气,使其肺充分扩张,发现兔吸气受到了抑制,呼气曲线加大并延长,这是兔肺牵张反射作用的结果。这种反射是典型的负反馈调节,其生理意义在于维持呼吸的节律性,使吸气不致过长过深。延髓的吸气中枢与脑桥呼吸调整中枢共同调节呼吸的频率和深度。

运动时发生的肺牵张反射,对呼吸频率和深度的调节更具有重要意义。

(二) 呼吸肌的自体感受性反射

呼吸肌自体感受性反射指的是呼吸肌自体感受器传入冲动所引起的反射性呼吸变化。呼吸肌内存在着自体感受器肌梭,接受肌肉的机械牵拉刺激。当呼吸肌被动拉长或呼吸肌气道阻力加大时,肌梭受到牵拉产生兴奋,冲动通过脊神经达到脊髓,反射性地使肌梭所在部位的呼吸肌收缩加强,切断相应的脊神经传入背根,这种反射活动即减弱或消失。

除呼吸肌外,身体躯干、四肢的肌肉和关节,都存在着自体感受器肌梭。人在运动或劳动时,躯干及四肢的自体感受器受到牵拉刺激,亦可反射性地引起呼吸的加强。所以,无论身体何部位的肌肉,只要其自体感受器肌梭受到牵拉刺激,都会使呼吸加强,这种反射属于正反馈的调节。

(三) 防御性呼吸反射

在整个呼吸道都存在着感受器,它们是分布在呼吸黏膜上皮的迷走传入神经末梢,



受到机械或化学刺激时，引起防御性呼吸反射，以清除激惹物，避免其进入肺泡。如咳嗽反射、喷嚏反射等。

(四) 呼吸节律的形成

关于呼吸节律形成的机制，迄今比较公认的是“局部神经元回路反馈控制”假说。假说认为延髓内有一个“吸气活动发生器”，引发吸气神经元呈平稳逐渐增强性放电，产生吸气；延髓内还有一个“吸气切断机制”，使吸气切断而产生呼气。吸气活动发生器产生的兴奋可分别传至：①脊髓吸气肌运动神经元，引起吸气肌收缩，产生吸气；②脑桥呼吸调整中枢，加强其活动；③吸气切断机制，使其兴奋，进而返回吸气活动发生器产生抑制作用。

吸气切断机制接受来自延髓吸气神经元、脑桥呼吸调整中枢和肺牵张感受器的冲动。随着吸气过程的进行，来自这几个方面的冲动逐渐增多，当达到吸气切断机制的兴奋阈值时，吸气切断机制兴奋，发出的冲动传到吸气活动发生器或吸气神经元，以负反馈形式终止其兴奋，发生抑制，从而使吸气停止，转为呼气。如此周而复始即形成自动呼吸节律，如图 4-9 所示。至于吸气是如何发生，呼气后如何转为吸气，呼吸加强时呼气又是如何成为主动的，目前了解较少，还有待进一步研究和探索。

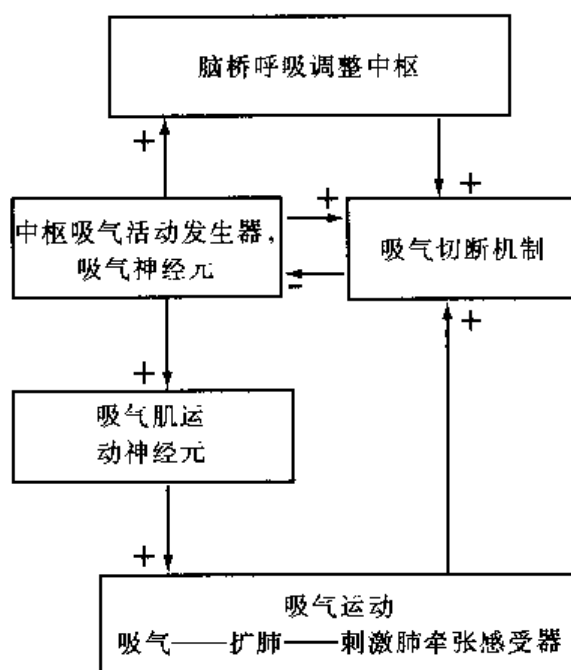


图 4-9 呼吸节律形成机制简化模式图

+: 表示兴奋 -: 表示抑制

三、化学因素对呼吸的调节

化学因素对呼吸的调节也是呼吸反射性调节的一类。化学因素是指动脉血液中的 O_2 、 CO_2 和 H^+ 。机体通过呼吸调节血液 O_2 、 CO_2 和 H^+ 的水平，血液中 O_2 、 CO_2 和 H^+ 水

平的变化又通过化学感受器调节着呼吸，如此形成的控制环维持着内环境 PO_2 、 PCO_2 及 pH 值的相对稳定。血液中这些因素发生改变，可从肺通气量的变化反映出来。

（一）化学感受器

化学感受器是指其能接受化学物质刺激的感受器。参与呼吸调节的化学感受器因其所在的部位不同，分为外周化学感受器和中枢化学感受器。

1. 外周化学感受器

外周化学感受器位于颈内外动脉分叉处的颈动脉体和主动脉弓血管壁外的主动脉体。其中绝大多数化学感受器存在于颈动脉体，所以颈动脉体对呼吸中枢的影响远大于主动脉体。当血液 PO_2 降低、 PCO_2 升高及 pH 值降低时，外周的化学感受器兴奋，其发放的冲动，颈动脉体的由窦神经传入呼吸中枢，主动脉体的由主动脉神经传入呼吸中枢。

2. 中枢化学感受器

中枢化学感受器位于延髓腹外侧的浅表部位。中枢化学感受器主要接受其周围脑脊液中 CO_2 、 H^+ 的刺激，但最直接的感受是由 CO_2 而产生的 H^+ 的刺激。这是因为血脑屏障使脑脊液与血液分开，血脑屏障限制了血液中 H^+ 的通过，但 CO_2 可以自由通过。通过血脑屏障的 CO_2 与 H_2O 在 CA 的催化下，形成 H_2CO_3 并解离为 H^+ 和 HCO_3^- ，由此产生的 H^+ 直接刺激中枢化学感受器，中枢化学感受器的冲动通过一定的神经联系，兴奋了延髓呼吸中枢。由于延髓脑脊液中 CA 的含量很少， CO_2 与 H_2O 的反应较慢，所以中枢化学感受器对 CO_2 的反应有一定的时间延迟，潜伏期长，落后于外周化学感受器对 CO_2 的反应。

此外，由于血液中 H^+ 不易通过血脑屏障，故血液 pH 值的变化对中枢化学感受器直接作用不大。中枢化学感受器也不感受 O_2 变化的刺激。

（二） CO_2 、 H^+ 和 O_2 对呼吸的影响

1. CO_2 对呼吸的调节

CO_2 对呼吸有很强的刺激作用，它是维持正常呼吸的最重要生理性刺激。人在过度通气后可发生呼吸暂停，就是由于过度通气排出了较多的 CO_2 ，使血液 PCO_2 下降，以致对呼吸中枢的刺激减弱所引起。反之，吸入气中 CO_2 浓度适当增加，可使呼吸运动加深加快。例如，吸入气的 CO_2 增加到 1% 时，肺通气量即已增加；吸入气的 CO_2 增加到 4% 时，肺通气量将超过正常时的一倍以上。一般情况下，吸入气中的 CO_2 不超过 7%，都是通过增大肺通气量，呼出更多的 CO_2 ，而使肺泡气的 PCO_2 保持在一定的范围内。但吸入气中 CO_2 进一步增多，超过 10% 以上，肺通气量不能再作相应的增加，致使肺泡气和动脉血 PCO_2 明显增高，体内 CO_2 堆积，抑制了中枢神经系统的活动，包括抑制呼吸中枢，产生呼吸困难、不安、头痛、头昏、甚至昏迷。

对呼吸的刺激作用是通过两条途径实现的：一条是刺激外周化学感受器，冲动传入延髓呼吸中枢，使其兴奋，反射性加深加快呼吸；另一条是通过刺激中枢化学感受器，再经



神经联系兴奋延髓呼吸中枢,使呼吸加深加快。这两条途径中后一条是起主要作用的。

2. H^+ 对呼吸的调节

动脉血 $[H^+]$ (氢离子浓度)增加,呼吸加深加快; $[H^+]$ 降低,呼吸受到抑制,肺通气量减少,如图4-10所示。 H^+ 对呼吸的调节也是通过刺激外周及中枢化学感受器而实现的。但由于 H^+ 不易通过血脑屏障,限制了血液 $[H^+]$ 升高对中枢化学感受器的作用。所以,血液 $[H^+]$ 增加时,是以刺激外周化学感受器为主。

3. 低氧对呼吸的调节

吸入气中 PO_2 降低,肺泡气、动脉血 PO_2 也随之降低,导致呼吸加深加快,肺通气量增加(图4-10),这是通过刺激外周化学感受器实现的。低氧对中枢化学感受器不起反射性调节呼吸的作用。但低氧对呼吸中枢有直接的抑制作用,即低氧使呼吸中枢的神经元得不到充裕的、供代谢所需的氧,从而降低了呼吸中枢的机能反应,使呼吸运动产生了抑制效应。这种抑制效应随着缺氧程度的加深而加强。轻微缺氧时,来自外周化学感受器的传入冲动引起的呼吸中枢兴奋,能对抗轻度缺氧对呼吸中枢的直接抑制作用,反射性地加强了呼吸;严重缺氧时,来自外周化学感受器的传入冲动引起的呼吸中枢兴奋,对抗不了深度缺氧对呼吸中枢的直接抑制作用,使呼吸减弱,甚至停止。

4. PCO_2 、 H^+ 和 PO_2 三个因素在调节呼吸中的相互作用

图4-10所示的是保持其他两个因素不变而只改变其中一个因素时的单因素通气效应。可以看出 PO_2 下降对呼吸的影响较慢、较弱。而 PCO_2 和 H^+ 与低氧不同,只要略有升高,通气就明显增大, PCO_2 的作用尤为突出。

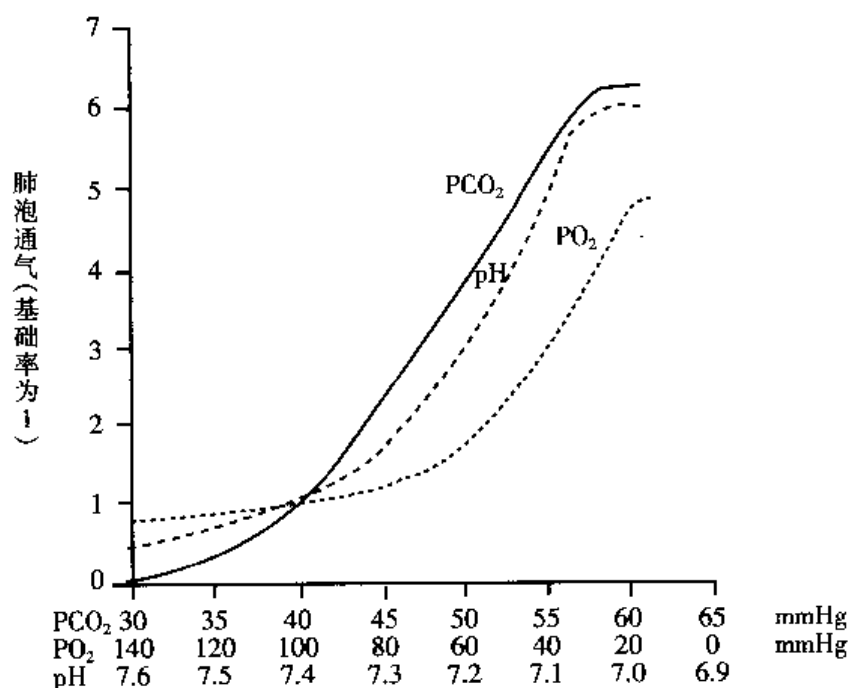


图4-10 动脉血液 PCO_2 、 PO_2 、pH值改变对肺泡通气的影响
仅改变一种体液因素而保持另两种于正常水平时的情况

但实际情况不可能只是单因素改变而其他因素不变。通常一种因素的改变会引起其他因素相继改变或几种因素的同时改变，三者间相互影响相互作用，既可因相互总和而加大，也可因相互抵消而减弱。图 4-11 为一种因素改变，另两种因素不加控制时的情况。可以看出： PCO_2 升高时， $[\text{H}^+]$ 也随之升高，两者的作用总和起来，使肺通气较单独 PCO_2 升高时为大； $[\text{H}^+]$ 增加时，因肺通气增大排出更多 CO_2 ， PCO_2 下降，抵消了一部分 H^+ 的刺激作用。另外 CO_2 含量的下降，也使 $[\text{H}^+]$ 有所降低。这两者均使肺通气的增加较单独 $[\text{H}^+]$ 升高时为大； PO_2 下降时，也因肺通气量增加，呼出较多的 CO_2 ，使 PCO_2 和 $[\text{H}^+]$ 下降，而减弱了低氧的刺激作用。

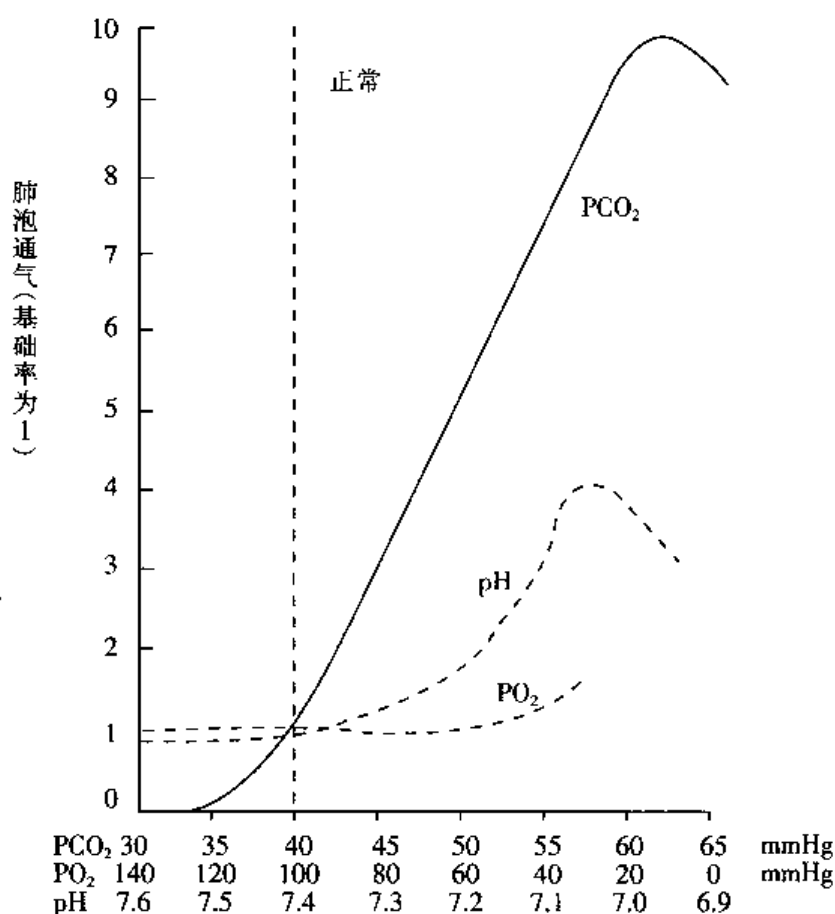


图 4-11 动脉血液 PCO_2 升高、 PO_2 降低、 pH 值降低的综合改变对肺泡通气的影响

第四节 运动对呼吸机能的影响

运动时机体代谢加强，呼吸系统也将发生一系列变化，以适应机体代谢的需求和保证技术动作的顺利完成。

一、运动时通气机能的变化

运动时随着强度的增大, 机体为适应代谢的需求, 需要消耗更多的 O_2 和排出更多的 CO_2 。为此, 通气机能将发生相应的变化。

具体表现为呼吸加深加快, 肺通气量增加。潮气量可从安静时的 500ml 上升到 2000ml 以上, 呼吸频率随运动强度而增加, 可由每分钟 12~18 次增加到每分钟 40~60 次。结合潮气量与呼吸频率的变化, 运动时的每分通气量可从安静时的每分钟 6~8L 增加到 80~150L, 较安静时可增大 10~12 倍(图 4-12)。

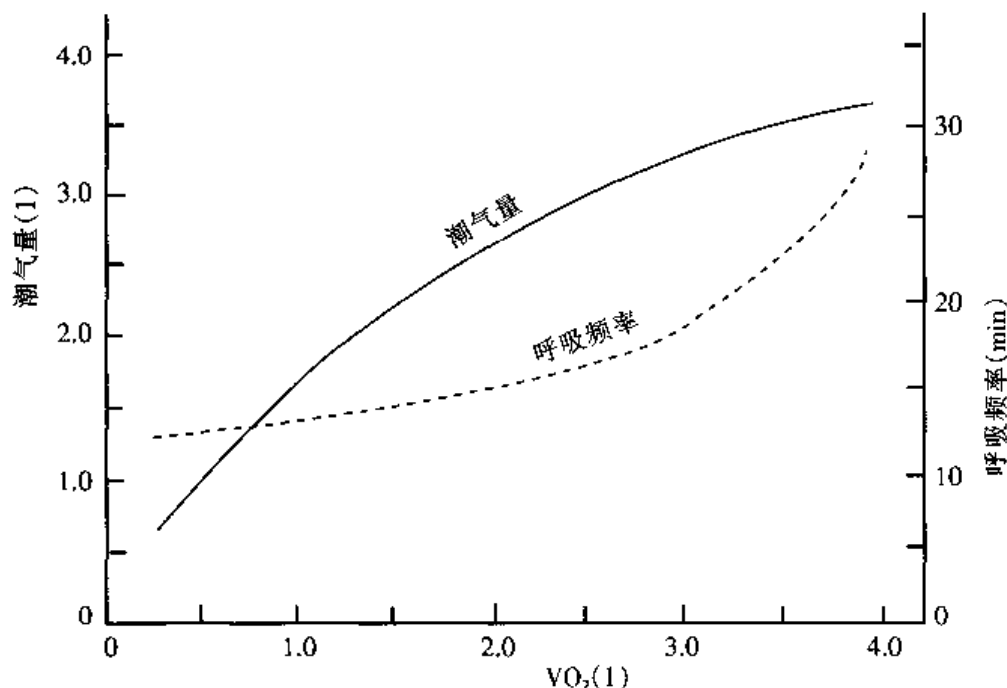


图 4-12 不同强度运动时, 潮气量和呼吸频率的变化

运动过程中肺通气量的时相性变化: 运动开始后, 通气量立即快速上升, 随后在前一时相升高的基础上, 出现持续的缓慢的上升; 运动结束时, 肺通气量同样是先出现快速下降, 随后缓慢地恢复到安静时的水平(图 4-13)。通气量迅速升、降的时相, 称为快时相; 缓慢升、降的时相称为慢时相。在中等强度运动中, 肺通气量的增加主要是靠呼吸深度的增加。而在进行剧烈运动时, 肺通气量的增加则主要是靠呼吸频率的增多来实现的。呼吸深度和呼吸频率的增加, 意味着呼吸运动的加剧, 因此用于通气的氧耗也将增加。据研究人体在安静时, 用于通气的耗氧量只占总耗氧量的 1%~2%, 剧烈运动时则可增加到 8%~10%。

通气的目的是为了 O_2 的摄入和 CO_2 的排出, 尤以 O_2 的摄入更为重要。一定 O_2 的摄入需要一定的通气量作保证。呼吸当量是指每分钟的通气量(V_E)与摄氧量(VO_2)的比值, 安静时的呼吸当量为 20~28 (每分通气量约为 $500 \times 12 = 6000$ ml, 每分摄氧量约为 250ml, 所以呼吸当量为 $6000/250 = 24$), 这也就是说, 机体必须从 24L 左右的通气量中

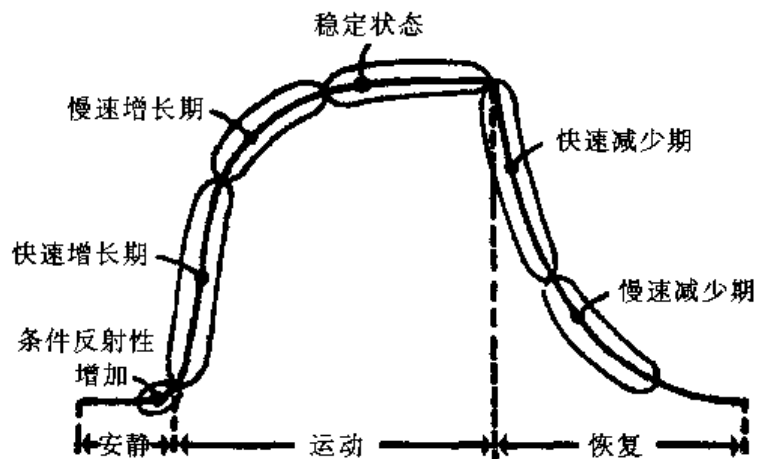


图 4-13 亚极量运动通气量的变化

才能摄取到 1L 的 O_2 。研究表明，人体在从事不超过 $50\%VO_{2max}$ 的运动时，呼吸当量保持恒定不变；若从事超过 $50\%VO_{2max}$ 的运动，每分通气量的增加将明显大于每分摄氧量的增加，即呼吸当量增加到 30~35，这时，机体要从 30~35L 的通气中才能摄取 1L 的 O_2 。显然，运动强度增加到 $50\%VO_{2max}$ 以上时的摄氧效率降低。呼吸当量越小，氧的摄取效率越高。运动生理学上把呼吸当量最小的一点称为最佳呼吸效率点（POE）。已有材料表明， $50\%VO_{2max}$ 的运动负荷时呼吸当量最小，有训练的耐力性运动员甚至可以低于 20。当呼吸当量增大至 30~35 时，标志着氧的摄取效率已十分低下，无训练者已坚持不了较长时间的运动，但有高度训练水平的运动员，呼吸当量达 40~60 时仍能奋力运动。在运动负荷相同时，优秀的耐力项目运动员的呼吸当量较非耐力项目运动员为小。

肺的通气功能与肺容量紧密相关，横向研究表明，有训练者的肺容量的各个成分（主要是深吸气、补呼气）都比无训练者的大，这是呼吸功能良好适应运动训练的结果。

二、运动时换气机能的变化

运动时换气机能的变化主要是通过 O_2 的扩散和交换来体现。

肺换气的具体变化为：①人体各器官组织代谢的加强，使流向肺部的静脉血中 PO_2 比安静时低，从而使呼吸膜两侧的 PO_2 差增大， O_2 在肺部的扩散速率增大；②血液中儿茶酚胺含量增多，导致呼吸细支气管扩张，使通气肺泡的数量增多；③肺泡毛细血管前括约肌扩张，开放的肺毛细血管增多，从而使呼吸膜的表面积增大；④右心室泵血量的增加也使肺血量增多，使得通气血流比值仍维持在 0.84 左右。但剧烈运动也会造成过度的通气，使通气血流比值大于 0.84。这些因素的变化，使得耗氧量为每分 4L 的运动时，肺的氧扩散容量达到 $60\text{ml}/\text{min}\cdot\text{mmHg}$ ，当运动使耗氧量为每分 6L 时，氧扩散容量可增加到 $80\text{ml}/\text{min}\cdot\text{mmHg}$ 。不参加体育锻炼的人，20 岁以后，肺换气功能将日趋降低，而经常参加体育锻炼的人，肺换气功能降低的自然趋势将推迟。

组织换气的具体变化为：①由于活动的肌肉组织需利用较多的 O_2 来氧化能量物质以重新合成 ATP，所以活动的肌肉组织耗氧量增加，组织的 PO_2 下降迅速，使组织和血



液间的 PO_2 差增大, O_2 在肌肉组织部位的扩散速率增大; ②活动组织毛细血管开放数量增多, 增大了组织血流量, 增大了气体交换的面积; ③组织中由于 CO_2 积累 PCO_2 的升高和局部温度的升高使氧离曲线发生右移, 促使 HbO_2 解离进一步加强。运动时组织的这些变化, 促使肌肉的氧利用率的提高, 肌肉的代谢率可较安静时增高达 100 倍。

三、运动时呼吸的调节

运动时呼吸(肺通气量)的调节是属于多因素的调节, 包括神经机制和体液机制两个方面的因素, 其中神经调节机制起着主导作用(图 4-14)。

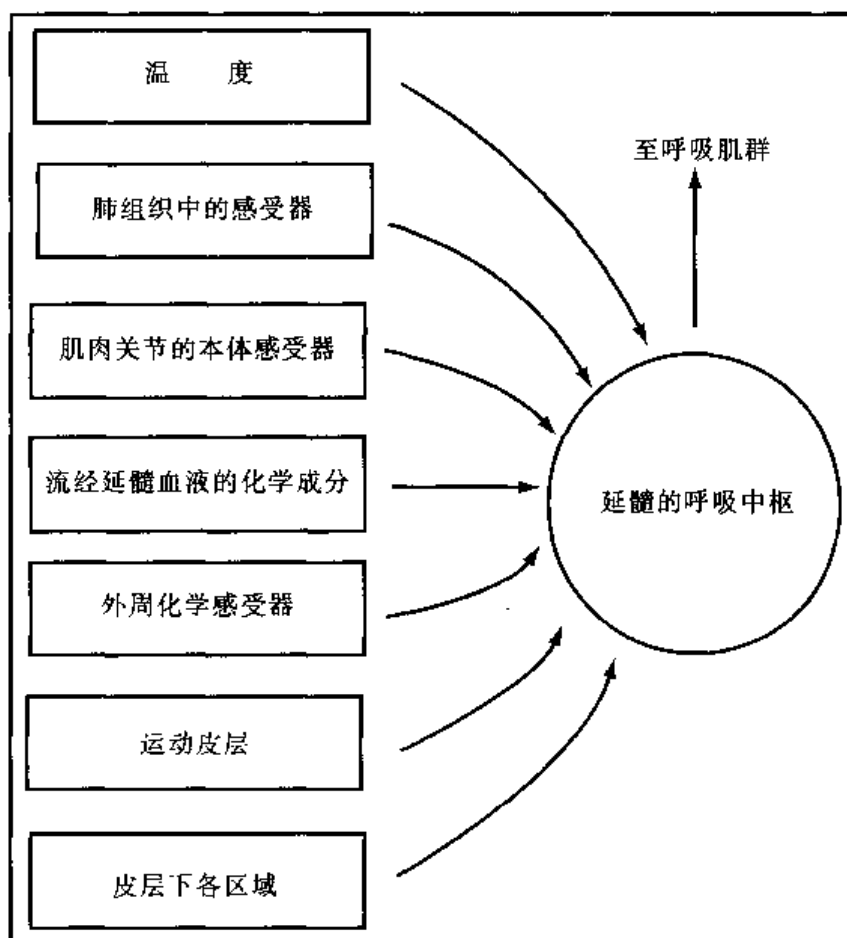


图 4-14 运动时肺通气的多因素调节

(一) 神经调节

1. 条件反射的影响

很多实验证明, 在准备运动时呼吸功能即已加强, 这种现象是在经常运动过程中所形成的条件反射。进行运动时, 与运动有关的语言信号和周围环境中的各种因素经常同肌肉活动时呼吸的变化相联系, 多次重复即可形成条件。以后当有相应的刺激出现时, 即可引起呼吸功能的相应变化。比赛开始前出现呼吸加深加快的赛前反应, 就是大脑皮

质对环境条件变化作出的反应，从而为即将开始的运动提前作好准备。

2. 大脑皮质运动中枢的影响

运动时肺通气量的增强是由大脑皮质运动区的神经冲动刺激呼吸中枢所引起的，即大脑皮质在发出神经冲动使肌肉收缩的同时，也发出冲动到达脑干呼吸中枢，使之发生兴奋，从而增强呼吸。

3. 本体感受性反射的影响

动物实验发现，为排除肌肉主动收缩带来的其他调节因素的影响，给予动物肢体被动运动也可使肺通气量立即增大。但切断肢体的传入神经或背根，则这一反应消失。以上现象说明这是一种反射活动，即当肢体在做活动时，位于肌肉和关节的本体感受器受到牵拉刺激，产生的冲动传到呼吸中枢，从而可引起肺通气的增加。

(二) 体液调节

体液调节机制是指由血液中一些化学成分的改变刺激周围或中枢化学感受器，从而引起的呼吸增强。但大量实验说明，这种 CO_2 、 $[\text{H}^+]$ 增加和 O_2 减少的刺激，对加强运动时通气的作用较神经调节的要小。

1. CO_2 增加对呼吸的影响

当健康人在不断增加工作负荷时，通气量可以 5 倍、10 倍或 15 倍地增加，而动脉血 PCO_2 却无任何改变。这说明如果动脉血 PCO_2 没有相当数量的改变，那么 CO_2 就不可能是引起运动时呼吸增加的主要刺激因素。

2. 缺氧对呼吸的影响

关于缺氧对呼吸的刺激作用问题也有很多实验研究。通过测量在运动期间平均动脉血的 PO_2 ，发现仅有很小的变化，而颈动脉体和主动脉体中 O_2 的化学感受器对这些很小的变化是不敏感的。所以认为运动时的呼吸增强不会是由低氧刺激所引起的。但也有实验发现，在轻度运动期间，呼吸增强和 O_2 的消耗之间具有显著的相关；在稳定运动期间，以吸入纯 O_2 代替吸入空气时，通气量减少 10%~15%。这些现象是否与 O_2 的变化刺激了化学感受器而引起呼吸的改变有关联，还待进一步证实。

3. $[\text{H}^+]$ 增加对呼吸的影响

当进行轻度或中等强度运动时，机体由有氧代谢供给能量，此时通气量的增加可以满足 O_2 需要的增加，代谢终产物为 CO_2 和 H_2O ，pH 值保持正常稳定，这时 $[\text{H}^+]$ 很低，对化学感受器的刺激可忽略不计；当进行强度大的运动时，通气量的增加不能满足机体对 O_2 的需求，有一部分能量需靠糖的酵解来供给，这就造成酸性终产物(乳酸)的积累。但血液中的碱性缓冲物质可在一定的范围内将乳酸中和缓冲。只有在进行剧烈运动过程中，即贮备的碱性缓冲物质过多的消耗后， $[\text{H}^+]$ 上升，血液的 pH 值才有所下降。因此，



动脉血 $[H^+]$ 增加只能看做是较剧烈运动时呼吸增强的因素之一。

此外,运动时体液温度的升高,通过体温调节机制,在促使肺通气量的增加中可能也有较重要的作用。运动时静脉血回流量的增加、腔静脉和右心房的传入冲动对呼吸也有一定刺激作用。

综上所述,运动时呼吸的变化,可能是多种因素共同调节的结果,其中神经调节机制起主要作用,而体液机制和其他因素则起辅助和调整作用。例如,图4-13是运动时通气量的变化,通气量迅速升、降的快时相可能是由神经机制引起的,而在升与降快时相基础上的通气量慢时相,则可能是体液中化学因素的作用所致。由于这些因素共同协调作用,使肺通气量能随着运动的类型、运动强度、持续时间和环境因素等的变化而改变,从而达到精确的适应。

四、运动时合理呼吸

运动时进行合理的呼吸,有利于保持内环境的基本恒定,有利于提高训练效果和充分发挥人体的机能能力,以创造优异的运动成绩。可见合理的呼吸方法应成为该项运动技能的有机组成部分。教师应像传授动作技术一样,培养学生掌握适于该项运动特点的呼吸技巧。以下是几种改善呼吸方法的原则。

(一) 减小呼吸道阻力

正常人安静时由呼吸道实现通气。通过呼吸道的呼吸,达到空气净化、湿润、温暖或冷却(当气温高于体温时)的作用。但在剧烈运动时,为减少呼吸道阻力,人们常采用以口代鼻,或口鼻并用的呼吸。其利有三:①减少肺通气阻力,增加通气;②减少呼吸肌为克服阻力而增加的额外能量消耗,推迟疲劳出现;③暴露满布血管的口腔潮湿面,增加散热途径。据研究,运动时增加口的通气,肺通气量可由仅用鼻呼吸的80L/min,增至173L/min。但应注意,在严寒季节里进行运动,启口不宜过大,尽可能使吸入空气经由口腔加温后再通过咽喉和气管入肺。

(二) 提高肺泡通气效率

提高肺通气量的方法,有增加呼吸频率和增加呼吸深度两种方式。据研究,呼吸频率是随着运动强度的增加而增加,并经2~4分钟达到稳定状态。而呼吸深度和肺通气量则须经3~5分钟才达到稳定状态。剧烈运动时,呼吸频率和肺通气量迅速上升,而呼吸深度反而变浅。运动时(尤其是耐力运动),期望在吸气时肺泡腔中有更多的含氧新鲜空气,呼气时能呼出更多的含二氧化碳的代谢气体,因此,提高肺泡通气量比提高肺通气意义更大。表浅的呼吸只能使肺泡通气量下降,新鲜空气吸入减少,这是由于解剖无效腔存在的缘故。而深呼吸能吸入肺泡腔中更多的新鲜空气,使肺泡气中的空气新鲜率提高, PO_2 也随之提高,最终导致 O_2 的扩散量增加。但过深过慢的呼吸也会限制肺通气量进一步提高,并可导致肺换气功能受阻。上述两种情况均能增加呼吸肌的额外负担,加大其 O_2 的消耗,容易导致疲劳。



有意识地采取适宜的呼吸频率和较大的呼吸深度是很重要的。一般来讲,径赛运动员的呼吸频率以每分钟不超过 30 次为宜。爬泳运动员即使有特殊需要,也不宜超过每分钟 60 次。那么强调运动时的深呼吸,是以偏重深吸气为好还是以偏重深呼气为好?当吸入气一定时,肺泡气的新鲜率的大小取决于呼气末或吸气前存在于肺泡腔中的功能余气量。功能余气量越少,吸入新鲜空气越多,肺泡气中的 PO_2 就会越高。运动中有效减少肺泡腔内功能余气的方法是尽可能地做深呼气动作(有时也叫做深吐气),从而保证机体有更多 O_2 的摄入。

因此,运动时(特别是在感到呼吸困难、缺氧严重的情况下),采用节制呼吸频率、在适当加大呼吸深度的同时注重深呼气的呼吸方法,更有助于提高机体的肺泡通气量。例如:人在跑步或游泳时因体内过多的负氧而出现“极点”现象,为有效克服或缓解“极点”、提高 O_2 的摄入量,应有意识地保持有节奏的深呼吸与深呼气。游蛙泳时的正确呼吸应该是在水中做深呼气,将气吐尽,然后再抬头出水面吸气。

(三) 与技术动作相适应

呼吸的形式、时相和节奏等,必须适应技术动作的变换,必须随运动技术动作而进行自如地调整,这不仅为提高动作的质量、为配合完成高难度技术提供了保障,同时也能推迟疲劳的发生。这对于从事投掷、体操、技巧、武术、跳水及花样滑冰等项目的运动员来说,尤显重要。

1. 呼吸形式与技术动作的配合

呼吸的主要形式有胸式呼吸和腹式呼吸。运动时采用何种形式的呼吸,应根据有利于技术动作的运用而又不妨碍正常呼吸为原则,灵活转换。

通常有些技术动作需要胸肩带部的固定,才能保证造型,那么这时的呼吸形式应转成为腹式呼吸。如体操中的手倒立、肩手倒立、头手倒立、吊环十字悬垂和下“桥”动作等这些需胸肩带部固定的技术动作,采用腹式呼吸就会消除身体重心不稳定的影响;而另一些技术动作需要腹部的固定,则要转为胸式呼吸,如上固定或下固定时的屈体静止造型动作、“两头起”的静止造型动作等,采用胸式呼吸有助于腹部动作的保持和完成。

2. 呼吸时相与技术动作的配合

通常非周期性的运动要特别注意呼吸的时相,应以人体关节运动的解剖学特征与技术动作的结构特点为转移。

一般在完成两臂前屈、外展、外旋、扩胸、提肩、展体或反弓动作时,采用吸气比较有利;在完成两臂后伸、内收、内旋、收胸、塌肩、屈体或团身等动作,采用呼气比较顺当。如:“卧躺推杠铃”练习,杠铃放下过程(臂外展、扩胸)应采用吸气,杠铃推起过程(臂内收、收胸)应采用呼气;“仰卧起坐”练习,仰卧过程(展体)采用吸气,起坐过程(屈体)采用呼气;“俯卧撑”练习,俯卧过程(两臂外展、胸扩展)采用吸气,撑起过程(两臂内收、胸内收)采用呼气。但也有例外,如杠铃负重蹲起时的展体,改为呼



气较好，这时应首先以考虑发力和完成技术动作为主，然后再考虑吸气与呼气的时相协调。

3.呼吸节奏与技术动作的配合

通常，周期性的运动采用富有节奏的、混合型的呼吸将会使运动更加轻松和协调，更有利于创造出好的运动成绩。如周期性的跑步运动，长跑宜采用2~4个单步一吸气、2~4个单步一呼气的方法进行练习；短跑常采用“憋气”与断续性急促呼吸相结合，即每“憋气”2~12个单步(或更多)后，做一次1秒以内完成的急骤深呼吸。周期性游泳运动的呼吸节奏，蛙泳可采用一次划手、一次蹬腿、一次头出水面呼吸的组合；爬泳可采用两侧呼吸，即三次划臂(打腿多少次数以个人特点定)，完成一次侧换气的组合。

(四) 合理运用憋气

或深或浅的吸气后，紧闭声门，做尽力地呼气动作，称为憋气。通常在完成最大静止用力的动作，需要憋气来配合。如大负荷的力量练习、举重运动、角力、拔河、“掰手腕”等。憋气对运动良好的作用有：①憋气时可反射性地引起肌肉张力的增加，如人的臂力和握力在憋气时最大，呼气时次之，吸气时较小；②可为有关的运动环节创造最有效的收缩条件，如短跑时憋气一方面可控制胸廓起伏，使快速摆臂动作获得相对稳定的支撑点，另一方面又避免腹肌松弛，为提高步频及步幅提供更强劲的牵引力。

人们能意识到憋气对运动有利的一面，但往往忽视憋气还会对人体产生负面的作用。憋气的不良影响主要有：①长时憋气压迫胸腔，使胸内压上升，造成静脉血回心受阻，进而心脏充盈不充分，输出量锐减，血压大幅下降，导致心肌、脑细胞及视网膜供血不全，产生头晕、恶心、耳鸣和眼黑等感觉，影响和干扰了运动的正常进行。②憋气结束，出现反射性的深呼吸，造成胸内压骤减，原先滞留于静脉的血液迅速回心，冲击心肌并使心肌过度伸展，心输出量大增，血压也骤升。这对心力储备差者十分不利。特别是儿童的心脏因承受能力低而易使心肌过度伸展导致松弛，对老年人因血管弹性差、脆性大而容易使心、脑、眼等部位的血管破损，带来严重不良的后果。

由此看来，憋气对运动有利有弊。有些时候需要通过奋力和憋气才能取得最后的胜利，那么这样的憋气是有必要的，是不可避免的。正确合理的憋气方法应该是：①憋气前的吸气不要太深；②结束憋气时，为避免胸内压的骤减，使胸内压有一个缓冲、逐渐变小的过程，呼出气应逐步少许地、有节制地从声门中挤出，即采用微启声门、喉咙发出“嗨”声的呼气；③憋气应用于决胜的关键时刻，不必每一个动作、每一个过程都做憋气。如跑近终点的最后冲刺、杠铃举起及摔跤制服对手的一刹那，可运用憋气。对运动员和健康人来说，一般的憋气也属于生理现象，如排便动作。有时还可以把采用适当的憋气作为提高心肺功能的手段之一，只是要遵守循序渐进的规律而已。

【小结】

1.呼吸的全过程由外呼吸、内呼吸以及连接内、外呼吸的气体的血液运输三个环节组成。

2.肺通气的动力是呼吸运动,吸气肌、呼气肌的收缩、舒张活动完成吸气、呼气过程。肺通气的容量中肺通气量(V_E)、肺泡通气量(V_A)和肺活量(VC)是运动中常用的指标。

3.气体的交换与扩散依赖于气体间的分压差; O_2 的运输主要是与血液中Hb的结合而进行, CO_2 的运输主要是在血液中以 HCO_3^- 和 $HbNHCOOH$ 的形式进行。运动过程中各种因素的影响能使“氧离曲线”右移,氧饱和度下降,从而使更多的 O_2 解离参与代谢。

4.支配呼吸运动的神经中枢部位有大脑皮质、边缘系统、下丘脑、脑桥、延髓和脊髓,其中延髓是使呼吸产生基本节律的中枢。神经和化学因素对呼吸的反射性调节,是所在部位感受机械刺激(如牵拉)的神经末梢以及感受化学因素刺激(如 O_2 、 CO_2 、 H^+)的中枢和外周化学感受器的兴奋,通过传入神经到达相应的呼吸中枢,进而引起呼吸的改变。运动时神经和化学反射性的调节使得呼吸加深、加快,肺通气量增加。

5.运动时常采用深呼吸、与运动技术相适应的呼吸以及合理地进行憋气等呼吸形式。

【思考题】

- 1.呼吸是由哪三个环节组成?各个环节的主要作用是什么?
- 2.呼吸形式有几种?运动过程中如何随技术动作的变化而改变呼吸形式?
- 3.胸内压是如何形成的?有何生理意义?
- 4.为什么在一定范围内深慢的呼吸(尤其注重深呼气)比浅快的呼吸效果要好?
- 5.试述肺通气的机能指标测定意义和评定方法。
- 6.试述影响换气的因素。
- 7.试述 O_2 和 CO_2 在血液中的运输过程。
- 8.氧离曲线的生理意义是什么?哪些因素影响氧离曲线的变化?
- 9.试述神经和化学因素对呼吸运动的反射性调节。
- 10.试述运动时肺通气的变化及调节机制。
- 11.运动时应如何进行与技术动作相适应的呼吸?如何合理地运用憋气?

【主要参考文献】

- 1.体育学院通用教材:《运动生理学》,北京,人民体育出版社,1990。
- 2.张镜如主编:《生理学》,北京,人民卫生出版社,1995。
- 3.倪江主编:《生理学》,北京,人民卫生出版社,2000。
- 4.施雪筠主编:《生理学》,上海,上海科学技术出版社,1994。
- 5.运动生理学编写组:《运动生理学》,北京,高等教育出版社,1986。
- 6.人体生理学编写组:《人体生理学》,北京,高等教育出版社,1994。
- 7.邓树勋等主编:《运动生理学》,北京,高等教育出版社,1999。
- 8.杨锡让主编:《实用运动生理学》,北京,北京体育大学出版社,1994。

(南京体育学院 孙颀)



第五章

物质与能量代谢

【提要】物质和能量代谢是维持人体各种生理机能的基本保证，亦是维持人体运动能力的重要前提。本章主要介绍人体主要营养物质的生理功用、消化与吸收特点；代谢方式；不同状态下的能量代谢；运动中的能量供应；以及体温的产生、动态平衡的维持等生理过程。

为了维持正常生命活动，机体必须不断地从外界环境中吸收各种营养物质，以构筑机体的组成成分或更新衰老的组织。同时机体必须不断地将这些营养物质在体内的分解代谢产物排出体外。人体与其周围环境之间不断进行的物质交换过程称为物质代谢(material metabolism)。在物质的分解过程中，营养物质所蕴藏的化学能释放出来，经过转化，成为机体各种生命活动及运动的能量来源。可见，物质代谢与能量代谢是紧密相连的。机体内物质代谢过程中所伴随的能量释放、转移和利用，称为能量代谢(energy metabolism)。

第一节 物质代谢

一、人体主要营养物质的消化与吸收

人体所需要的主要营养物质包括糖类、脂肪、蛋白质、水、无机盐和维生素。这些物质主要来源于食物，经过消化器官的消化和吸收，为机体正常生命活动及运动和训练提供必不可少的物质能量来源。

(一) 主要营养物质的主理功用

1. 三大能源物质的生理功用

糖类、脂肪、蛋白质三种营养物质在分解代谢过程中，所蕴藏的化学能被释放出来，成为机体各种生命活动及运动的能源。因此，糖类、脂肪、蛋白质又被称为三大能源物质。

糖类是人体最主要的供能物质，每天从糖类获得的能量约占总能量消耗的70%，平均每克糖释放能量为4.1Kcal(千卡，1千卡=4.186千焦耳)。糖在氧化时所需要的氧少于

脂肪和蛋白质,因而成为人体最经济的能源。如人体各器官、肌肉及大脑的活动都需要消耗大量能量,这些能量首先要由糖供应。人类合理膳食的总热量约有 20%~30% 由脂肪供给。每氧化一克脂肪平均释放出能量 9.3Kcal。蛋白质也可作为机体的供能物质,每克蛋白质在体内氧化分解产生约 4.3Kcal 的能量。但是,正常生理情况下,蛋白质的主要生理功用在于维持机体的生长发育和组织的更新修补。例如,人体的肠黏膜上皮细胞约每 36 小时就脱落更新,红细胞约每 100 天更新一次,更新时需要合成大量蛋白质。糖类可与脂类构成糖脂,与蛋白质结合成糖蛋白,这些复合物是构成生物膜、神经组织、结缔组织、血浆球蛋白(抗体)、许多酶及激素等生物活性物质的重要成分。此外,脂肪还具有防止散热及保护脏器的作用。

2. 水及无机盐的生理功用

体液是细胞进行代谢的内部环境,其主要成分是水及各种无机盐。人体各种营养物质的消化吸收、运输及代谢废物的排泄,均通过水溶液进行,因此,水具有维持物质代谢的作用。水的蒸发热大,比热大,可以调节体温,使人体不致因代谢产热而发生体温的明显变化。水在体内还具有润滑作用,如泪液、关节腔滑液、胸膜腹膜浆液等均有此作用。

无机盐的生理功用包括:维持细胞内外液的容量、渗透压及电中性;维持神经、肌肉的膜电位,与维持神经肌肉细胞正常兴奋性和肌肉收缩有关,使机体具有接受环境刺激和做出反应的能力;参与血液缓冲对的构成,与维持人体的酸碱平衡有关;此外,无机盐参与人体体质构成,通过生物酶的强化或抑制,影响物质代谢过程等。

3. 维生素的生理功用

水溶性维生素(特别是 B 族维生素)参与某些辅酶的组成、某些重要化学基团的转运及体内的氧化还原反应等,在物质代谢中起重要作用。脂溶性维生素具有维持上皮细胞健全和机体正常生长发育、调节钙磷代谢、促进多种凝血因子的合成、作为抗氧化剂等重要功能。

(二) 主要营养物质的消化与吸收

食物在消化道内被分解为小分子的过程称为消化(digestion)。经过消化的食物,透过消化道黏膜,进入血液和淋巴循环的过程,称为吸收(absorption)。

1. 消化

消化的方式有两种:一种是通过消化道肌肉的舒缩活动,将食物磨碎,并使之与消化液充分混合,并将食物不断地向消化道远端推送,此种方式称机械性消化或物理性消化。另一种消化方式是通过消化腺分泌的消化液来完成,消化液中所含的各种消化酶能分别将糖类、脂肪及蛋白质等物质分解成小分子颗粒,此种消化方式称化学性消化。在正常生理情况下,这两种消化方式同时进行,互相配合。

(1) 消化道平滑肌的一般特性

在整个消化道中,除口、咽、食道上端及肛门括约肌是骨骼肌外,其余部分均由平



滑肌组成。通过这些肌肉的舒缩活动，完成对食物推送和机械性消化，同时促进食物的化学性消化和吸收。

消化道平滑肌具有肌组织的共同特性，如兴奋性、自律性、传导性和收缩性，但又表现有自己的特点。这些特点包括：①消化道平滑肌的兴奋性比骨骼肌低；②消化道平滑肌在体外适宜环境内，仍能保持良好的节律性运动；③消化道平滑肌经常保持一定的紧张性收缩，以维持消化道的形状和位置，并使消化道管腔保持一定的基础压力，产生平滑肌的收缩活动；④消化道平滑肌具有较大的伸展性，从而使消化道能够容纳几倍于自己原初体积的食物；⑤消化道平滑肌对电刺激不敏感，而对牵张、温度和化学刺激特别敏感。

(2) 消化液的作用

人体每天由各种消化腺分泌的消化液总量达 6~8L(表 5-1)。消化液主要由各种消化酶、离子和水组成。消化液的主要功能为：①稀释食物，使之与血浆的渗透压相等，以利于吸收；②改变消化道内的 pH，使之适应于消化酶活性的需要；③水解复杂的食物

表 5-1 消化液的成分及其作用

消化液	分泌量(L/d)	pH	主要成分	酶的底物	酶的水解产物
唾液	1.0~1.5	6.6~7.1	黏液		
			α -淀粉酶	淀粉	麦芽糖
胃液	1.5~2.5	0.9~1.5	黏液、盐酸		
			胃蛋白酶(原)	蛋白质	肽、胨、多肽
			内因子		
胰液	1.0~2.0	7.8~8.4	HCO_3^-		
			胰蛋白酶(原)	蛋白质	氨基酸、寡糖
			糜蛋白酶(原)	蛋白质	
			羧基肽酶(原)	肽	氨基酸
			核糖核酸酶	RNA	单核苷酸
			脱氧核糖核酸酶	DNA	
			α -淀粉酶	淀粉	麦芽糖、寡糖
			胰脂肪酶	甘油三酯	脂肪酸、甘油、甘油一酯
			胆固醇酯酶	胆固醇酯	脂肪酸、胆固醇
胆汁	0.8~1.0	6.8~7.4	胆盐		
			胆固醇		
			胆色素		
小肠液	1.0~3.0	7.6	黏液		
			肠激酶	胰蛋白酶原	胰蛋白酶
大肠液	0.5	8.3	黏液		
			HCO_3^-		

(依张镜如等, 1997)

成分,使之便于吸收;④通过分泌黏液、抗体和大量液体,保护消化道黏膜。例如,胃的黏液具有较高的黏滞性和形成凝胶的特性。在正常情况下,黏液覆盖在胃黏膜表面,形成凝胶层,可以减少粗糙的食物对胃黏膜的机械性损伤。同时,与胃黏膜细胞分泌的 HCO_3^- 共同构成黏液-碳酸氢盐屏障,能有效阻挡 H^+ 的逆向弥散,保护胃黏膜免受 H^+ 及胃蛋白酶的破坏。小肠上皮细胞分泌的免疫球蛋白及小肠腺分泌的大量小肠液均具有保护肠黏膜的作用。

(3) 营养物质在消化道各部位消化简述

消化过程是从口腔开始的,但由于营养物质在消化道各部位停留的时间不同、各部位产生的消化液成分与量以及各部位机械运动程度不同,使得营养物质在消化道各部位的消化程度有很大差异。

口腔内消化 食物在口腔内经过咀嚼被磨碎,由唾液湿润,形成食团,便于吞咽。从吞咽开始至食团入胃所需的时间,与食物的性状及人体体位有关。液体食物约需3~4秒,糊状食物约5秒,固体食物约需6~8秒,一般不超过15秒。由于食物在口腔内停留时间很短,仅有少量淀粉在唾液淀粉酶作用下分解为麦芽糖。

胃内消化 食物入胃后,受到胃液的化学性消化和胃壁肌肉运动的机械性消化的共同作用。正常成人胃液分泌量为1.5~2.5升/天。胃液的pH为0.9~1.5,具有较强的酸性,不仅可以激活胃蛋白酶(其最适pH为2),而且在进入小肠后能引起促胰液素的分泌,从而促进胰液、胆汁和小肠液的分泌。因此,胃液中完成化学性消化的主要成分是盐酸和胃蛋白酶。胃蛋白酶能将蛋白质降解为蛋白胨、蛋白胨和多肽。胃液分泌的自然刺激是进食。

食物入胃后约5分钟,胃即开始蠕动,以利于食物与胃液混合,协助化学性消化过程。食物由胃进入十二指肠的过程称为胃排空。食物的排空速度与食物的物理性状及化学组成有关。通常稀薄、流体食物比黏稠、固体食物排空快,颗粒小的食物比大块食物排空快。三种主要营养中,糖类排空速度最快,蛋白质次之,脂肪类最慢。混合食物完全排空通常需要4~6小时。

小肠内消化 小肠内消化是整个消化过程中最重要的阶段,食物消化的主要部位在小肠。食糜受到小肠的机械性消化及胰液、胆汁和小肠液的化学性消化的作用。食物经过小肠后消化过程基本完成。

胰液是由胰腺分泌的具有很强消化能力的消化液,pH为7.8~8.4,呈碱性。正常人分泌量为1~2升/天。胰液中含有浓度较高的碳酸氢盐,可以中和进入十二指肠的胃酸,并提供各种消化酶的最适宜pH环境。消化酶主要有胰淀粉酶、胰脂肪酶、胰蛋白酶、糜蛋白酶、核苷酸酶及脱氧核糖核苷酸酶等,可以水解三大能源物质,因而是所有消化液中最重要的一种。胆汁由肝细胞分泌,其成分复杂,包括胆盐、胆色素等。胆盐是由肝细胞分泌的胆汁酸与甘氨酸或牛磺酸结合而成的钠盐或钾盐,是胆汁参与消化与吸收的主要成分。胆盐能乳化脂肪,因而增加脂肪酶的作用面积,加速脂肪的分解。小肠液为一种弱碱性液体,pH约为7.6,渗透压与血浆相等。正常成人日分泌量为1~3升/天。大量的小肠液可以稀释消化产物,降低其渗透压,有利于吸收过程。真正由小肠分泌的酶主要是肠致活酶,具有激活胰蛋白酶原,促进蛋白质消化的作用。



小肠的机械性消化是指小肠的紧张性收缩能加速内容物的混合及转运；以环形肌为主的节律性收缩和舒张，即分节运动，促使食糜与消化液充分混合，并挤压肠壁促进血液及淋巴液的回流；小肠的蠕动有助于将其内容物向大肠推送。

大肠内消化 人类的大肠内没有重要的消化活动。大肠的主要功能在于为消化后的食物残渣提供暂时贮存场所。大肠液中的黏液蛋白对肠黏膜具有保护作用，并具有润滑粪便的作用。食物残渣进入大肠后，通过大肠的机械运动被向肛门方向推送，最终通过排便反射将粪便排出体外。

2. 吸收

食物的成分或其消化后的产物通过上皮细胞进入血液和淋巴的过程称为吸收。

(1) 吸收的部位

消化道的不同部位对物质的吸收能力和吸收速度明显不同，这主要取决于消化道各部位的组织结构，以及食物在各部位被消化的程度和停留的时间。食物在口腔及食道内不被吸收。胃所吸收的食物也很少，只吸收酒精和少量水分。小肠是吸收的主要部位，一般认为，糖类、脂肪和蛋白质的消化产物大部分在十二指肠和空肠吸收，回肠能够吸收胆盐和维生素 B₁₂。大肠主要吸收水分和盐类，结肠可吸收其肠腔内 80% 的水和 90% 的 Na⁺ 及 Cl⁻。

(2) 小肠吸收的特点

小肠长约 4 米，黏膜具有环形皱襞，并拥有大量的绒毛，使得小肠的吸收面积比同样长短的简单圆筒的面积增加约 600 倍，达到 200 平方米。绒毛是小肠黏膜的微小突出构造，其长度约为 0.5~1.5 毫米，每条绒毛的外面是一层柱状上皮细胞。电子显微镜下可见，柱状上皮细胞顶端细胞膜有突起，被称为微绒毛。因此，环形皱襞、绒毛及微绒毛共同作用使得小肠具有巨大的吸收面积(图 5-1)。此外，食物在小肠停留的时间较长(3~8 小时)，以及食物在小肠内已被消化为利于吸收的小分子物质，这些有利条件均有助于小肠的吸收作用。

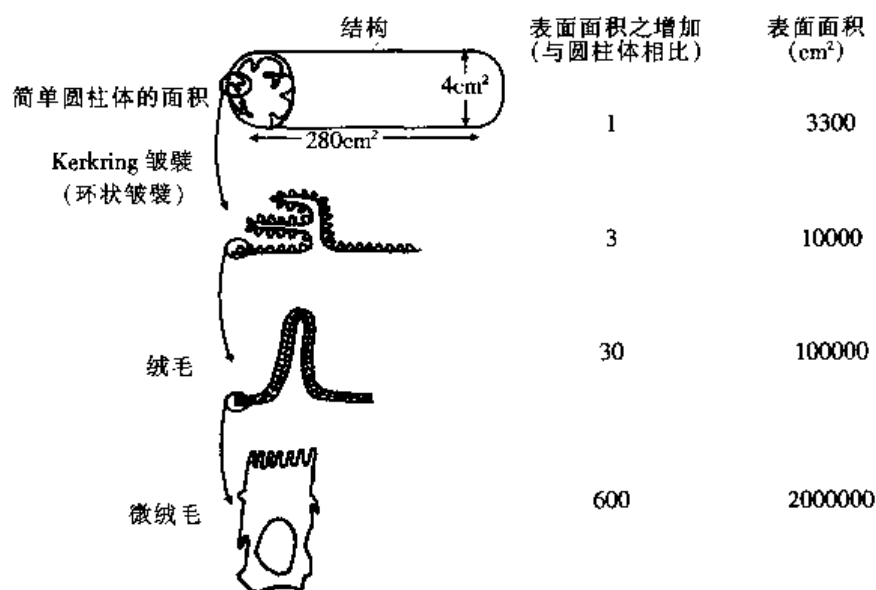


图 5-1 增加小肠表面面积的三种机制

(3) 小肠内主要营养物质的吸收

水、无机盐、维生素可不经消化被小肠直接吸收入血。人体每日吸收回体内的水分总量可达 8 升。值得注意的是铁的吸收，食物中的铁绝大部分是三价的高铁形式，但有机铁和高铁都不易被吸收，须还原为亚铁后才能被吸收。亚铁的吸收速度比相同量的高铁要快 2~5 倍。维生素 C 能将高铁还原为亚铁而促进铁的吸收。因此，运动员在大运动量训练期间，补充铁的同时一定要注意补充维生素 C。糖类只有分解为单糖时才能被小肠上皮细胞吸收。蛋白质经消化分解为氨基酸后，几乎全部被小肠吸收。脂肪的消化产物(脂肪酸、甘油一酯及胆固醇等)与胆盐结合形成水溶性复合物，才能被吸收入毛细淋巴管(长链脂肪酸)或是直接进入门静脉(中、短链脂肪酸)。此外，有些未经消化的天然蛋白质或蛋白质分解的中间产物，也可被小肠黏膜吸收，但其量极小(图 5-2)。

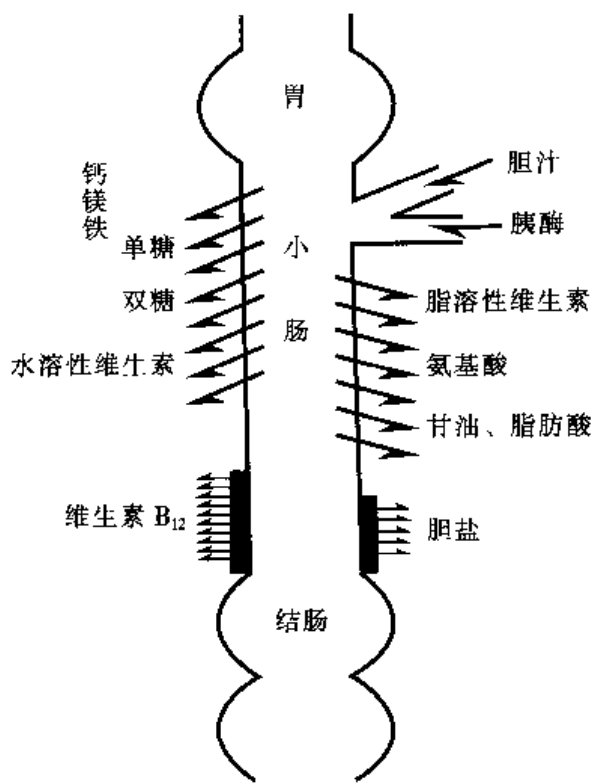


图 5-2 各种营养物质在小肠的吸收部位
(引自：张镜如等，1997)

(三) 肌肉运动对消化和吸收机能的影响

肌肉运动可以产生骨骼肌血管扩张、血流量增加，内脏血管收缩、血流量减少的效应，导致胃肠道血流量明显减少(约较安静时减少 2/3 左右)，消化腺分泌消化液量下降；运动应激亦可致胃肠道机械运动减弱，使消化能力受到抑制。为了解决运动与消化机能的矛盾，一定要注意运动与进餐之间的间隔时间。饱餐后，胃肠道需要血液量较多，此时立即运动，将会影响消化，甚至可能因食物滞留造成胃膨胀，出现腹痛、恶心及呕吐等运动性胃肠道综合征。剧烈运动结束后，亦应经过适当休息，待胃肠道供血量



基本恢复后再进餐，以免影响消化吸收机能。

二、主要营养物质在体内的代谢

(一) 糖代谢

1. 人体的糖贮备及其供能形式

人体内主要的糖类是糖原(glycogen)及葡萄糖(glucose)，通过食物获得。食物中的糖大多是多糖或双糖，经消化道分解成单糖才能被吸收。单糖被吸收进入血液后，一部分合成肝糖原；一部分随血液运输到肌肉合成肌糖原贮存起来；一部分被组织直接氧化利用；另一部分维持血液中葡萄糖的浓度。因而，人体的糖以血糖、肝糖原和肌糖原的形式存在，并以血糖为中心，使之处于一种动态平衡。葡萄糖是人体内糖类的运输形式，而糖原是糖类的贮存形式(图 5-3)。

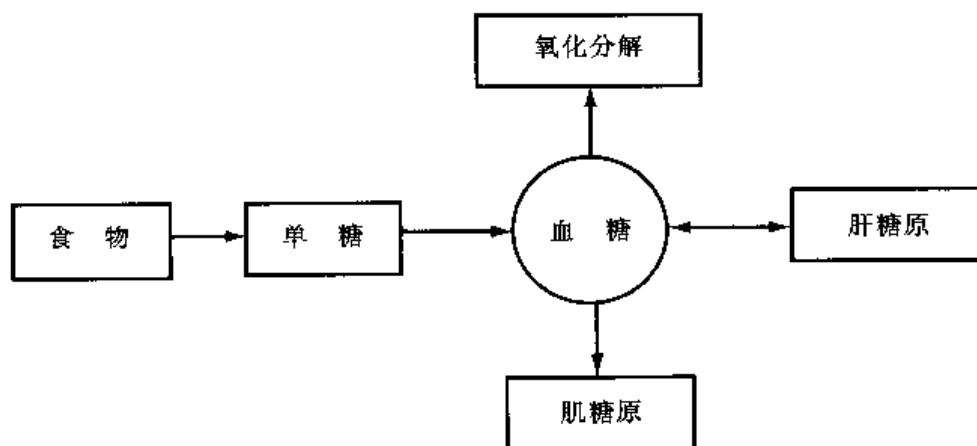


图 5-3 糖的动态平衡示意图

(1) 糖原

人体各种组织中大多含有糖原，但其含量的差异很大。例如，脑组织中糖原含量甚少，而肝脏和肌肉中以糖原方式贮存的糖类约有 350~400 克，运动员糖原储量可达 400~550 克。肝糖原(liver glycogen)含量约为 5%，肌糖原(muscle glycogen)约为 1%~2%。运动员肌肉发达，可达体重的 40%。因此，一名 70 公斤体重的运动员，肌糖原储量约为 420 克，肝糖原储量约为 100 克。丰富的肝糖原和肌糖原贮备，是维持人体工作能力的重要条件之一。肌糖原既是高强度无氧运动时机体的重要能源，又是大强度有氧运动时的主要能源。许多研究表明，糖原贮量(特别是肌糖原)的增多，有助于耐力性运动成绩的提高。

(2) 血糖

血液中的葡萄糖又称血糖，正常人空腹浓度为 80~120mg%。血糖是包括大脑在内的中枢神经系统的主要能源。运动员安静状态下的血糖浓度与常人无异。血糖浓度是人体糖的分解及合成代谢保持动态平衡的标志。饥饿及长时间运动时，血糖水平下降，运

动员会出现工作能力下降及疲劳的征象。肝糖原可以迅速分解入血以补充血糖，维持血糖的动态平衡。

2. 糖在体内的分解代谢

人体各组织细胞都能有效地进行糖的分解代谢。糖在人体的主要分解途径有两条：在不需氧的情况下进行无氧酵解(glycolysis)和在耗氧情况下进行有氧氧化(aerobic oxidation)。

(1) 糖酵解

是指糖在人体组织中，不需耗氧而分解成乳酸(lactic acid)；或是在人体缺氧或供氧不足的情况下，糖仍能经过一定的化学变化，分解成乳酸，并释放出一部分能量的过程。该过程因与酵母菌生醇发酵的过程基本相似，故称为糖酵解(图 5-4)。

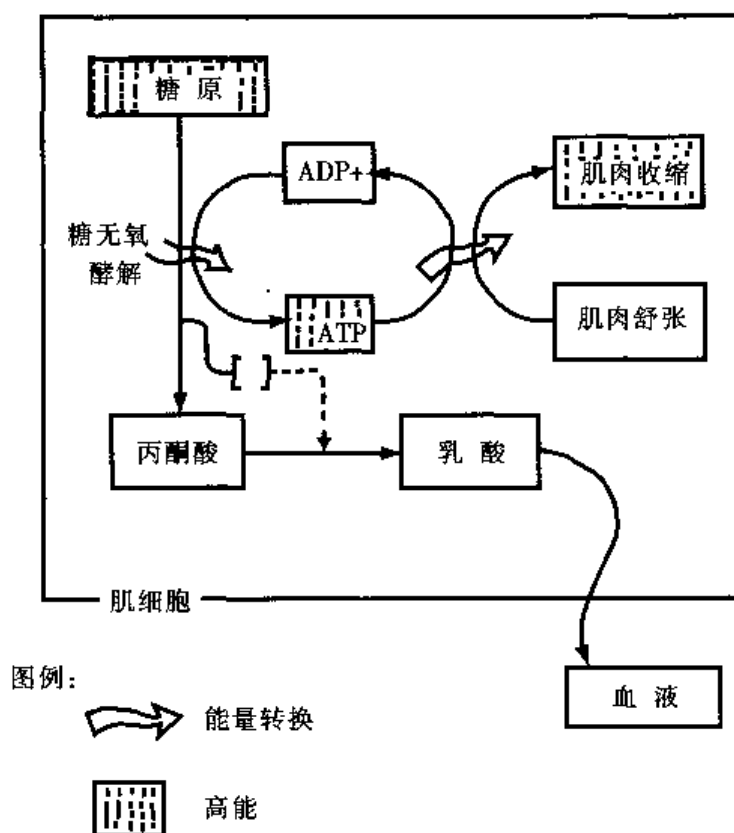


图 5-4 糖酵解与乳酸生成
(引自: A.W.S.Watson, 1995)

糖酵解是一系列酶促反应的过程。剧烈运动时，体内供氧不足，糖进行无氧分解，经过一系列反应生成乳酸，即糖原或葡萄糖 \rightarrow 丙酮酸 \rightarrow 乳酸。在该过程中，每分子葡萄糖生成 2 分子乳酸，并释放能量。这些能量由二磷酸腺苷(ADP)接受并生成三磷酸腺苷(ATP)。糖酵解也是人体某些组织和细胞(如红细胞)在正常生理情况下的主要供能途径。糖酵解过程 ATP 的生成量仅仅为有氧氧化的 5%。但酵解酶浓度高，反应速度快，在剧烈运动中可以快速提供肌肉收缩的能量。

经糖酵解产生的乳酸，一部分在供氧充分时继续氧化分解，通常发生在心脏、静息

的骨骼肌或恢复时的骨骼肌；另一部分扩散入血，在肝脏重新转变成糖原或葡萄糖，循环利用，该过程需要氧和能量的供给(图 5-5)。

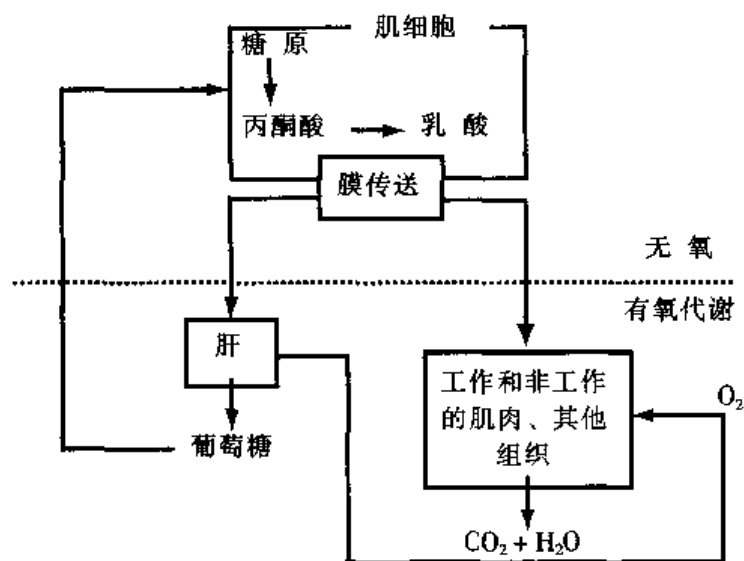


图 5-5 乳酸的清除 (引自: A.W.S.Watson, 1995)

(2) 有氧氧化

糖原或葡萄糖在耗氧条件下彻底氧化，产生二氧化碳和水的过程，称为有氧氧化。

糖的有氧氧化过程可分为三个阶段：第一阶段，由糖原或葡萄糖分解为丙酮酸，该过程与糖酵解相同；第二阶段，由丙酮酸氧化生成乙酰辅酶 A；第三阶段，乙酰辅酶 A 经三羧酸循环(tricarboxylic acid cycle)生成二氧化碳和水。每个阶段均有脱氢反应，脱下的氢原子与氧化合生成水的过程中，产生大量能量，用以合成 ATP(图 5-6)。

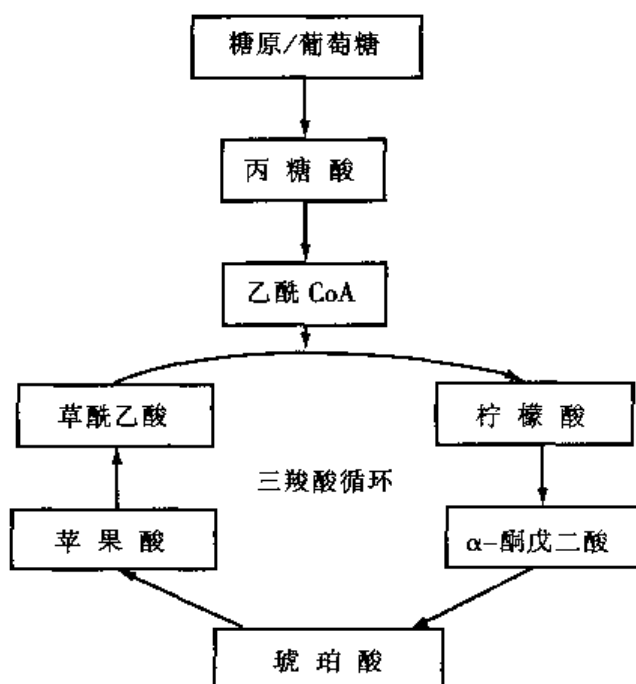


图 5-6 糖的有氧氧化途径

乙酰辅酶 A 不仅是糖氧化分解的产物, 同样也可来自脂肪和蛋白质的分解代谢。因此, 三羧酸循环实际上是糖、脂肪和蛋白质三大营养物质在体内氧化分解的共同途径。

糖的有氧氧化产生能量较多, 每分子葡萄糖完全氧化时, 产生 38 个 ATP, 为糖酵解产能的 19 倍。糖的有氧氧化是机体正常生理条件下及长时间运动中供能的主要方式。

3. 运动与补糖

运动员在运动训练及比赛中, 能量消耗较多, 因此, 应注意糖的补充, 以保持运动能力, 提高训练效果及比赛成绩。大多数学者认为, 只有长时间耐力项目有必要进行糖的补充。

(1) 补糖时间与补糖量

研究发现, 运动前或比赛前及比赛中补糖, 将有助于长时间运动中保持足够的血糖和肌糖原水平, 预防低血糖的发生, 延长肌肉利用糖作为能源的时间。目前一般认为, 运动前 3~4 小时补糖可以增加运动开始时肌糖原的贮量。运动前 5 分钟内或运动开始时补糖效果较理想。一方面, 糖从胃排空→小肠吸收→血液转运→刺激胰岛素分泌释放, 需要一定的时间; 另一方面, 可引起某些激素如肾上腺素的迅速释放, 从而抑制胰岛素的释放, 使血糖水平升高; 同时还可以减少运动时肌糖原的消耗。应当注意的是, 在比赛前一小时左右不要补糖, 以免因胰岛素效应反而使血糖降低。进行一次性长时间耐力运动时, 以补充高糖类食物作为促力手段, 需在运动前 3 天或更早些时间临时食用。

在长时间运动中, 如马拉松比赛, 可以通过设立途中饮料站适量补糖。运动后补糖将有利于糖原的恢复。耐力运动员在激烈比赛或大负荷量训练期, 膳食中糖类总量应占其每日能量消耗的 70%, 有利于糖原的恢复。

运动前或赛前补糖可采用稍高浓度的溶液(35%~40%), 服用量 40~50 克糖。运动中或赛中补糖应采用浓度较低的糖溶液(5%~10%), 有规律地间歇补充, 每 20 分钟给 15~20 克糖。

(2) 补糖种类

低聚糖是一种人工合成糖(目前多使用由 2~10 个葡萄糖单位聚合成的低聚糖), 渗透压低, 分子量大于葡萄糖。研究表明, 浓度为 25% 的低聚糖的渗透压相当于 5% 葡萄糖的渗透压, 故可提供低渗透压高热量的液体, 效果较理想。对糖原恢复的研究发现, 淀粉、蔗糖合成肌糖原的速率大于果糖, 但果糖合成肝糖原的效果则比蔗糖或葡萄糖为佳。因此, 补糖时应注意合理选择搭配糖的种类, 同时, 运动员膳食中应注意保持足够量的淀粉。

(二) 脂肪代谢

1. 人体的脂肪贮备

人体脂肪的贮存量很大, 约占体重的 10%~20%。一般认为, 最适宜的体脂含量为: 男性为体重的 6%~14%, 女性为 10%~14%。充沛的脂肪贮备为机体提供了丰富的能源。但若男性体脂>20%、女性>30%则属肥胖。肥胖增加机体负担, 并易发高血压、冠心病



等疾病。脂肪主要通过食物获得，糖和蛋白质在体内达到一定量后均可转变为脂肪而被储存。因此，体脂含量可以通过调整食物摄入量及增加机体活动程度加以控制。但体内脂肪积聚的趋势具有一定的遗传特性。

2.脂肪在体内的分解代谢

脂肪在脂肪酶的作用下，分解为甘油及脂肪酸，然后再分别氧化成二氧化碳和水，同时，释放出大量能量，用以合成 ATP。在氧供应充足时进行运动，脂肪可被大量消耗利用。例如，在持续时间超过 3 小时的运动中，肌糖原含量显著降低，脂肪氧化分解供能的比例加大。此外，在安静时，脂肪也是心肌和骨骼肌的主要能源。

3.脂肪代谢与运动减肥

体脂的积聚是由于摄入食量高于人体所需的能量，过多的能量在体内转化成脂肪，而且机体储存脂肪的能力几乎没有限度。所以，只有设法保持摄入量与消耗量两者间的平衡，才能保持人体的正常体重。运动减肥通过增加人体肌肉的能量消耗，促进脂肪的分解氧化，降低运动后脂肪酸进入脂肪组织的速度，抑制脂肪的合成从而达到减肥的目的。因此，减肥的方式一是参加运动，二是控制食物摄入量。

近年的研究认为，采取单纯运动或单纯节食的方式减肥效果均不如采取运动与节食相结合的方式，因为，运动加节食在减少体脂重量的同时，亦增加了瘦体重。应根据肥胖程度和个体体质，选择较适宜的运动方式，提倡采用动力型、大肌肉群参与的有氧运动，如步行、跑步、游泳、骑自行车、“迪斯科”舞蹈等运动，均可以有效地降低体脂水平。由于水中运动可以减轻关节的负担(水有浮力)，体热容易散发，水的静水压力可使中心血容量增加，通过水中运动减肥为近年来提倡的减肥方式。水中运动已发展到在水中行走、跑步、跳跃、踢水、水中球类游戏等多种运动。研究表明，水中运动时入的中心血容量可增高 700ml，中心静脉压增加 12~18mmHg，心输出量及每搏量增加 25% 或更多，并可改善左心室功能，改善有氧运动能力。总之，运动不仅可以增加机体的能量消耗，达到减肥的目的，还有助于增强心血管系统及呼吸系统的机能能力，提高肌肉的代谢能力，增强体质，促进健康。

4.减肥运动量的设定

减肥的运动量，通常根据要减轻体重的数量及减重速度决定。许多学者提出，每周减轻体重 0.45 公斤 (1 磅) 较适宜，每周减轻体重 0.9 公斤 (2 磅) 为可以接受的上限，但不宜超过此限度，约相当于每日亏空能量 500~1000Kcal，每周累计的热能短缺量为 3500~7000Kcal。具体措施为：每周运动 3~5 次，每次持续 30~60 分钟，运动强度为刺激体脂消耗的“阈值”，即 50%~85% $\dot{V}O_{2max}$ 或 60%~70% 最大心率。使每周运动的热能消耗量至少达到 900Kcal。

目前有学者提出，在有条件的情况下，可进行“理想”体重的测定。确定理想体重应首先测定体脂百分比及瘦体重，再以下式计算。“理想”体重 = $100 \times \text{瘦体重(公斤)} / (100 - \text{“理想”的体脂百分比})$ 。



例如, 90 公斤体重的人, 经测定其瘦体重为 72 公斤, 其“理想”体脂为 13%, 但实际测定的体脂含量为 20%, 代入上式为 $100 \times 72 \div (100 - 13) = 82.8$ 公斤, 82.8 公斤为其“理想”体重。现体重为 90 公斤, 应减轻体重 7.2 公斤即可达到“理想”体重, 据此制定减体重计划。

(三) 蛋白质代谢

1. 蛋白质在体内的代谢

蛋白质是生命的物质基础, 是细胞的主要构成成分。在体内的代谢过程中, 每日的摄取量与消耗量基本相等。根据每日食物中摄取蛋白质的含氮量与排泄物中的含氮量, 可以了解蛋白质代谢的情况。一般正常成人氮的收支保持平衡状态称为氮平衡 (nitrogen balance)。儿童少年、孕妇、病后恢复阶段及运动训练过程中, 蛋白质摄入多于排出, 称为氮的正平衡。饥饿、营养不良、患消耗性疾病、衰老和大运动量训练期间, 机体蛋白质消耗大于摄入, 称为氮的负平衡。蛋白质在体内缺乏 30% 以上, 将会影响正常生命活动。蛋白质的摄入量至少必须与生理需要量平衡。

蛋白质作为能源物质氧化分解时, 首先分解为氨基酸。氨基酸进而分解为相应的 α -酮酸及氨。酮酸经过三羧酸循环彻底氧化分解为二氧化碳和水, 释放出一定量的能量; 氨则在肝脏转变为尿素, 最终经肾脏随尿排出。

实际上, 无论人体处于安静或运动状态, 蛋白质均不是能量的主要来源。例如, 当食物中糖类供应不足或是糖被大量消耗后, 蛋白质供能也仅占机体总能耗的 15%~18%。蛋白质的分解代谢是生命活动中蛋白质合成和分解的动态平衡过程, 在长时间运动中蛋白质分解代谢增加, 促进了运动后合成代谢的加强, 使得肌肉质量提高, 肌肉粗壮有力。因此, 运动员增加食物蛋白质的摄入量, 目的是增加肌肉蛋白质的数量和质量, 而并非作为能源贮备。

2. 关于蛋白质的补充问题

由于蛋白质对人体具有特殊的作用, 故在运动训练过程中, 运动员, 特别是力量、耐力性项目运动员的蛋白质补充非常重要。一般认为, 成人蛋白质最低生理需要量约为 30~45 克/天或 0.8 克/公斤体重。生长发育期的青少年由于组织增长及再建的需要, 蛋白质的需要量为 2.5~3 克/公斤体重。运动员的蛋白质供给量比普通入高, 目前认为我国运动员为 1.2~2 克/公斤体重, 优秀举重运动员蛋白质补充量每日 1.3~1.6 克/公斤体重, 耐力性运动中, 即使糖类足以供应机体运动中所需能量, 膳食中蛋白质的补充量也应达到 1.5~1.8 克/公斤体重, 而且应该在整个耐力训练阶段中持续补充, 以促进肌肉蛋白质的合成, 预防运动性贫血的发生。

3. 三大物质代谢的关系

糖类、脂肪、蛋白质三大营养物质在神经、激素的调控下, 发挥其各自的生理功用。糖类、脂肪均是人体的重要能源物质; 蛋白质在特殊情况下, 亦可作为能源, 氧化分解提供能量, 而其氧化分解途径均需经过三羧酸循环完成。同时, 三大物质在一定条



件下,以三羧酸循环为枢纽可以发生互相转化,如丙酮酸、乙酰辅酶 A 等均是糖、脂肪、蛋白质相互转化的交叉点。

(四) 水代谢

1. 人体的水贮备及分布

水是人体重要的组成成分,是维持生命活动必需的营养物质。成人体内含水约占体重的 60%,其中,细胞内液约占 40%,细胞外液约占 20%(血浆占 5%,组织间液占 15%)。水分布于各种组织器官和体液中。血液等体液含水量最多,可高达 90%;肌肉、心、肝、脑、肾等含水量约 70%~80%;皮肤含水约 60%~70%;骨骼及脂肪组织含水量最少,约 12%~15%。人体的含水量受饮水及排汗量的影响较大,还因年龄、性别而异,新生儿含水量约为体重的 75%~80%,随着年龄的增长,体内水分减少。

水在体内有两种存在形式:一是游离水,游离水可以自由流动,如血液、淋巴液、组织液;二是结合水,结合水与无机盐离子及蛋白质、糖原等亲水胶体颗粒结合,参与构成器官组织,如心肌所含有的 79%的水分即为结合水。游离水仅占体内水的小部分,约 3~4 升。人体绝大部分水均以结合水的形式存在。

2. 人体的水平衡

水在人体内保持一种动态平衡状态,这是因为其来源与去路保持恒定。人体内的水有三个主要来源:(1)饮水,每日约 1.2 升。(2)食物摄取,每日约 1 升。(3)代谢内生水,体内物质氧化所产生,每日约 0.3 升,运动时主要来自糖和脂肪的氧化分解。水在体内的排出途径包括:(1)经消化道随粪便排出,每日约 0.1~0.15 升。(2)呼吸蒸发,每日约 0.35 升,运动中呼吸加深加快,水分排出增多,如根据测定,马拉松跑由呼吸道排出的水分可比安静状态加大 10 倍。(3)皮肤排汗,每日排出非显性汗约 0.5 升,运动中或高温条件下排汗量增加。一次马拉松比赛,运动员由汗液丢失的水分达 5 升左右。(4)通过肾脏以尿液的形式排出,每日约 1.5 升(表 5-2)。

表 5-2 普通成人每日水的摄入与排出量一览

摄入量 (L)		排出量 (L)	
饮用水	1.2	经肾排出(尿液)	1.5
食物水	1.0	皮肤排出	0.5
代谢水	0.3	经肺呼出	0.35
		粪便排出	0.15
合 计	2.5		2.5

人体各种途径进出体内的水分,均须经过血液这一共同途径。饮用及食物水经消化道进入血液,这些水分可以从血液进入组织间液暂时储存,也可由细胞外液进入细胞。当细胞内水分过多时,水可由细胞渗入组织间液,再经血液由肺、肾和皮肤等器官排出体外。可见,血液是调节体内水含量的关键环节。长时间运动中丢失的水分主要来自于细胞外液,大量水分的丢失必将造成血液的浓缩。

3. 运动员脱水及其复水

脱水是指体液丢失达体重 1% 以上。运动员在运动训练过程中, 由于气温、运动强度及运动持续时间等因素的影响, 可能产生程度不同的水分丢失, 称为被动脱水。而为了达到降低体重的目的, 赛前采用人工手段, 如使用利尿剂等, 人为地造成机体脱水则称为主动脱水。有研究报道, 长时间运动失水量达体重的 2.5% 时, 进行标准运动试验, 运动能力可降低至对照水平的 56%, 可见脱水将严重影响运动能力。机体轻度脱水时(失水量为体重的 2% 左右), 以丢失细胞外液为主, 血容量减少, 出现口渴、尿少、尿钾丢失; 中度脱水时(失水量达体重的 4% 左右), 细胞内外液的丢失程度相当, 出现心率加快、体温升高、严重口渴、疲劳、血压下降; 重度脱水时(失水量达体重的 6%~10%), 主要丢失细胞内液, 可出现呼吸加快、肌肉抽搐、甚至昏迷, 严重威胁机体健康及生命安全。失水量对运动能力的影响与训练水平有关。一般训练水平的运动员, 在机体轻度脱水时, 即可影响体温调节能力、循环机能及运动能力; 而训练水平高的运动员失水量在 3%~4% 以内, 基本不影响运动能力。

为改善和缓解脱水状况所采用的补水方法称为复水。运动员的复水, 应以补足丢失的水分、保持机体水平衡为原则。已经证明, 赛前和赛中复水有明显的益处。复水所采用的液体成分中应含有一定比例的糖类、无机盐类, 但浓度均较低, 以低渗液体为佳, 并注意少量多次。一般认为, 补液中糖的浓度不能超过 25g/L, 无机盐浓度不应超过 20g/L, 每 10~15 分钟饮用 150~250ml、6~12℃ 的低渗液体。有人建议, 进行长时间耐力运动赛前 10~15 分钟应一次性饮用 400~500ml 液体, 因为在产生口渴之前进行强制性饮水, 可以减少脱水的产生。

(五) 无机盐代谢

1. 人体无机盐的种类

人体内电解质主要指无机盐类。自然界存在的 92 种元素中, 目前在人体已检出 81 种。依其在体内的含量不同, 可分为宏量元素和微量元素两大类。前者除作为机体主要构成成分的氧、碳、氢、氮(共占人体质量的 96.6%) 外, 包括主要电解质钾、钠、钙、镁、氯、磷等, 一般以离子的形式存在。它们的重要生理意义在于维持机体内的渗透平衡、酸碱平衡及电解质平衡, 并成为维持神经肌肉兴奋性的主要因素。

微量元素是指在组织中存在而表现功能、少于人体质量 0.01% 的元素。浓度可用 $\mu\text{g/g}$ (微克/克) 或 $\mu\text{g/L}$ (微克/升) 来表示; 这类元素的总和仅占人体质量的 0.05% 左右。世界卫生组织确认的人体必需微量元素有 14 种, 包括锌、铜、铁、碘、硒、铬、钴、锰、钼、钒、氟、镍、锶和锡。其生理意义多与维生素、激素、酶等的生物学活性有关。

2. 微量元素的抗衰老作用

大量研究证实, 中国长寿地区及百岁老人的锶、锰、锌等微量元素含量高于其他地区及人群。例如, 长寿老人的发锰含量均值可达 $22.47 \pm 13.13 \mu\text{g/g}$, 比普通人群高约



10 倍。微量元素的抗衰老作用已越来越多地引起世界各国学者的关注。目前认为微量元素抗衰老的作用机制包括：①影响核酸和有机遗传物质的代谢。例如，锌缺乏时使 DNA 聚合酶活性降低，并导致 DNA 转录和 RNA 转译失常。②调节氧自由基代谢、防止过氧化损伤。各种组织细胞在需氧代谢过程中，不断生成的氧自由基对细胞有毒性作用。生物体内的氧自由基水平随年龄增长不断积累，造成机体组织的老化。机体依赖消除氧自由基的酶，如超氧化物歧化酶(Mn-SOD)、过氧化氢酶等来调节自由基代谢的平衡。微量元素通过与这些酶的结合而发挥作用。③调节免疫机能。锌、锰、铜、硒等元素含量异常，均可严重影响免疫功能。④微量元素有促进细胞浆发育、调节物质代谢和延缓衰老的作用。

3.运动中无机盐代谢的特点

人体血浆、组织间液、细胞内液阴阳离子浓度基本相等，这种离子浓度的平衡，使各部分维持电中性(表 5-3)。在激烈运动中， Na^+ 向细胞内转移， K^+ 则向细胞外转移，转移后的离子浓度差异，导致膜电位改变，进而影响神经肌肉传导，这通常是长时间运动中运动性疲劳产生的原因之一。另外，长时间耐力运动中运动员由于大量出汗，导致水分大量丧失的同时，亦可致无机盐的大量丢失。长时间运动时，机体主要丢失细胞外液的无机盐。例如，出汗 4.1 升，体重减轻 5.8%，体内无机盐的丢失量为： Na^+ 5%、 Cl^- 7%、 K^+ 和 Mg^{2+} 1.2%。汗液中主要的无机盐为 Na^+ 和 Cl^- ，与细胞外液相似，但汗中无机盐的浓度远低于血浆(约为血浆浓度的 1/3)，汗液为低张溶液，汗液的丢失会使血浆渗透压升高，并影响机体的排热过程(表 5-4)。

表 5-3 人体各部分体液中电解质含量

		血 浆		组织液	细胞内液
		mEq/L (血浆)	mEq/L (水)	mEq/L (水)	mEq/L (水)
阳 离 子	Na^+	142.0	153.0	147.0	10
	K^+	5.0	5.4	4.0	140
	Ca^{2+}	5.0	5.4	2.5	5
	Mg^{2+}	3.0	3.2	2.0	27
	总计	155.0	167.0	155.5	182
阴 离 子	HCO_3^-	27.0	29.0	30.0	10
	Cl^-	103.0	111.0	114.0	25
	$\text{HPO}_4^{=}$	2.0	2.2	2.0	80
	$\text{SO}_4^{=}$	1.0	1.1	1.0	20
	有机酸	6.0	6.5	7.5	—
	蛋白质	16.0	17.2	1.0	47
	总 计	155.0	167.0	155.5	182

表 5-4 与运动有关的几种无机盐及其可能参与的作用

无机盐	作用
钙	肌肉收缩, 肌糖原分解
磷	合成 ATP 和 CP
镁	肌肉收缩
铁	红细胞氧运输, 肌细胞内氧利用
锌	参与肌细胞内的能量生成
铜	与铁一起参与氧的运输和利用
钠	神经冲动传导, 肌肉收缩, 水平衡
钾	神经冲动传导, 肌肉收缩, 糖原贮存

(依 Williams, 1990)

4. 关于运动员补盐问题

一般认为, 平衡膳食足以提供运动员所必需的无机盐。多数研究指出, 即使是长跑运动员在热环境下每日跑 27.35 公里, 由于大量出汗而丢失一定量的 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Fe^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Zn^{2+} 和其他微量元素, 但只要摄入平衡膳食, 并补充丢失的水分, 仍能保持无机盐的平衡。而且, 由于汗液中无机盐的浓度低于体液中的浓度, 运动中没有必要补充无机盐。但是, 在一些超长距离项目中, 如超长马拉松跑、铁人三项比赛等, 有必要适当补充无机盐。因为在这类比赛中, 单纯摄入水分, 可能稀释体液中的 Na^+ , 引起低钠血症即水中毒。此外, 对那些为比赛而控制饮食, 以及不能从膳食中获得充足营养供给者, 可以适当补充一些无机盐。无机盐的补充一般均与补水同步进行。

(六) 维生素

1. 维生素的来源及分类

维生素(vitamin)是维持细胞正常生理功能所必需, 但需要量极小的低分子有机化合物。这类物质由于体内不能合成或者合成不足, 必须由食物供给。

维生素可以分为脂溶性和水溶性两类。脂溶性维生素包括 A、D、E、K, 它们是油样物质, 难溶于水。水溶性维生素包括硫胺素(B_1)、核黄素(B_2)、尼克酸及尼克酰胺、吡哆素(B_6)、遍多酸、生物素、叶酸、钴胺素(B_{12})、抗坏血酸(C)。

2. 维生素与运动能力

大多数维生素, 特别是 B 族维生素, 能够激活能量生成过程。运动中机体对能量的需求量增大, B 族维生素的作用也就更加重要。维生素 A、C 和 E 是作用很强的抗氧化剂, 能防止细胞膜的脂质过氧化, 防止红细胞膜受损, 维持运动中细胞的正常功能。维生素 D 是钙代谢的调节剂, 钙在肌肉的兴奋—收缩耦联中具有重要的中介作用, 因而与运动中肌肉收缩做功密切相关。此外, 维生素还能协助调节神经系统的功能, 保持能量供给系统的适宜状态(表 5-5)。



表 5-5

运动中维生素可能参与的重要作用

维生素	可能参与的作用
A	抗氧化剂,防止红细胞膜损伤
D	参与肌肉内钙的转运
E	抗氧化剂、防止红细胞膜损伤,提高氧化能系统水平
B ₁	(1)参与糖的分解过程
	(2)参与血红蛋白的形成
	(3)保持适度的神经系统功能
B ₂	参与糖和脂肪的分解产能过程
PP(烟酸)	(1)作用于糖的有氧氧化及酵解两个产能过程
	(2)阻断脂肪组织释放游离脂肪酸
B ₆	(1)作用于糖的产能过程
	(2)参与血红蛋白和氧化酶的生成
	(3)保持神经系统的正常功能
B ₁₂	参与红细胞生成过程
叶酸	(1)参与红细胞生成过程
	(2)作用于糖和脂肪的分解产能过程
生物素	糖和脂肪的合成
C	(1)抗氧化剂
	(2)促进铁的吸收
	(3)参与肾上腺素的合成
	(4)促进氧化能系统能量的生成
	(5)参与结缔组织形成

(依 Williams, 1990)

第二节 能量代谢

各种能源物质分解代谢过程中所伴随的能量释放、转移和利用即为能量代谢。单位时间内所消耗的能量称为能量代谢率。

一、基础代谢

(一) 基础代谢的概念

基础代谢(basal metabolism)指基础状态下的能量代谢。所谓基础状态是指人体处在

清醒、安静、空腹、室温在 20~25℃ 条件下。基础代谢率(basal metabolic rate, BMR)是指单位时间内的基础代谢,即在基础状态下,单位时间内的能量代谢,这种能量代谢是维持最基本生命活动所需要的最低限度的能量。基础代谢率以每小时每平方米体表面积的热量为单位,通常以 $\text{KJ}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$ (千焦耳/平方米·小时)来表示。正常成年男子的基础代谢率约为 $170\text{KJ}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$,女子约为 $155\text{KJ}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$ (表 5-6)。国人的体表面积可根据下式计算:体表面积(m^2) = $0.0061 \times \text{身高}(\text{cm}) + 0.0128 \times \text{体重}(\text{kg}) - 0.1529$ 。基础代谢率受年龄、性别等因素影响而产生生理波动,一般男性高于女性,幼年高于成人,老年低于成人。20 岁以后,平均每增加 10 岁,基础代谢率降低 3%。另外,基础代谢受人体体温的影响,体温每升高 1℃,基础代谢率升高 13%。基础代谢率的测定值与正常值相差 $\pm 10\% \sim 15\%$ 之内,均属正常。相差超过 20% 属病理情况。过度训练状态下,运动员基础代谢率升高。

表 5-6 我国正常基础代谢率平均值($\text{KJ}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$)

年 龄(岁)	11~15	16~17	18~19	20~30	31~40	41~50	>50
男 性	195.5	193.4	166.2	157.8	158.7	154.1	149.1
女 性	172.5	181.7	154.1	146.5	146.4	142.4	138.6

(二) 能量代谢的测定原理

根据热力学第一定律,能量在转化过程中,既不增加也不减少,总能量守恒。机体的能量代谢也遵循这一规律,即在整个能量转化过程中,蕴藏在食物中的化学能(供给机体利用)与所转化成的热能及所完成的外功,按其能量来折算是完全相等的。因此,测定在一定时间内机体所消耗的食物,或测定机体所产生的热量与所做的外功,均可测算出整个机体单位时间内所消耗的能量。

能量代谢的测定有直接和间接测定两种方式,而以间接测定应用较多。间接测定的基本原理是,按照一般化学反应中,反应物的量与产物的量之间呈一定的比例关系,即定比定律。维持机体各种生理机能所需的能量来源于营养物质的氧化分解,而机体在氧化分解不同营养物质时所消耗的氧量与产生的二氧化碳量及释放出的热量之间呈一定的比例关系。因此,只要测定人体在一定时间内的耗氧量和二氧化碳的产生量,即可推算出整个机体的能量代谢率。因此,间接测定法的关键是收集安静和运动时的呼出气体,分析呼出气中氧和二氧化碳的量,并换算成热量。有关测定方法的详细内容将在实验部分阐述。

(三) 与能量代谢有关的几个概念

1. 食物热价及氧热价

一定量的糖、脂肪、蛋白质在体外燃烧时所释放的热量,与三大能源物质在体内彻底氧化分解生成二氧化碳和水时所产生的热量相比,糖和脂肪在体外燃烧与体内氧化分解所产生的热量完全相同,而蛋白质则略有差异。1 克食物完全氧化分解所释放出的热量称为食物热价(thermal equivalent)。食物的热价分为物理热价和生物



热价。糖和脂肪的物理热价与生物热价相等，而蛋白质的生物热价小于其物理热价。这是由于蛋白质在体内分解时产生含有部分能量的尿素被排出体外的缘故。糖的热价为 17.17KJ，脂肪为 38.94KJ，蛋白质的生物热价为 17.99KJ，而物理热价为 23.43KJ。

各种能源物质在体内氧化分解时，每消耗 1 升氧所产生的热量称为该物质的氧热价 (thermal equivalent of oxygen)。例如，糖的氧热价为 21KJ，脂肪的氧热价为 19.7KJ，蛋白质的氧热价为 18.8KJ。体内氧化过程中，氧化的糖越多则氧热价越高，氧化的脂肪较多则氧热价较低(表 5-7)。

表 5-7 三种能源物质氧化时的几种数据

能源物质	物理热价 (KJ/g)	生物热价 (KJ/g)	耗氧量 (L/g)	二氧化碳产量 (L/g)	氧热价 (KJ/L)	呼吸商 (RQ)
糖	17.17	17.17	0.83	0.83	21	1.00
蛋白质	23.43	17.99	0.95	0.75	18.8	0.80
脂 肪	38.94	38.94	2.03	1.43	19.7	0.71

注:1 千卡(Kcal)=4.186 千焦耳(KJ)

2.呼吸商

各种物质在体内氧化时所产生的二氧化碳与所消耗的氧的容积之比称为呼吸商 (respiratory quotient, RQ)。糖、脂肪、蛋白质氧化时，其二氧化碳产量与耗氧量各不相同，呼吸商也不一样。

三大能源物质氧化时，其耗氧量和二氧化碳产量均取决于各物质的化学组成。因此，任何一种能源物质的呼吸商均可以根据其氧化成最终产物 (CO_2 和 H_2O) 的化学反应式计算出来。糖在氧化时消耗的氧与产生的二氧化碳分子数相等，故呼吸商为 1。例如，葡萄糖氧化时， $\text{RQ} = 6\text{mmolCO}_2 / 6\text{mmolO}_2 = 1$ 。脂肪氧化时需要消耗更多的氧，其呼吸商小于 1，约为 0.71。由于蛋白质在体内不能完全被氧化，且其氧化分解途径的细节尚未完全搞清，只能间接推算其呼吸商，约为 0.80。一般情况下，人类摄取的食物为混合食物，其呼吸商约为 0.85 左右(表 5-8)。

3.代谢当量

运动时的耗氧量与安静时耗氧量的比值称为代谢当量(MET)。1MET 约相当于安静时的能量消耗(耗氧量)，即约相当于 250ml/min 或 3.5ml/Kg/min。2MET 相当于 2 倍安静时的耗氧量，即 500ml/min。由于该指标是以安静时机体的能量消耗(耗氧量)为基础的，可以使不同运动方式的运动强度得以互相比较，因此，可以用于评价机体运动时的相对能量代谢水平，在运动处方的制定中具有实际应用价值。

表 5-8

非蛋白质呼吸商和氧热价

非蛋白质呼吸商	氧化的百分比(%)		氧 热 价	
	糖	脂肪	KJ/L	KCAL
0.70	0.00	100.0	19.620	4.686
0.71	1.10	98.9	19.637	4.690
0.72	4.75	95.2	19.687	4.702
0.73	8.40	91.6	19.738	4.714
0.74	12.0	88.0	19.792	4.727
0.75	15.6	84.4	19.842	4.739
0.76	19.2	80.8	19.892	4.751
0.77	22.8	77.2	19.947	4.764
0.78	26.3	73.7	19.997	4.776
0.79	29.9	70.1	20.047	4.788
0.80	33.4	66.6	20.102	4.801
0.81	36.9	63.1	20.152	4.813
0.82	40.3	59.7	20.202	4.825
0.83	43.8	56.2	20.257	4.838
0.84	47.2	52.8	20.307	4.850
0.85	50.7	49.3	20.357	4.862
0.86	54.1	45.9	20.412	4.875
0.87	57.5	42.5	20.462	4.887
0.88	60.8	39.2	20.512	4.899
0.89	64.2	35.8	20.562	4.911
0.90	67.5	32.5	20.617	4.924
0.91	70.8	29.2	20.667	4.936
0.92	74.1	25.9	20.717	4.948
0.93	77.4	22.6	20.772	4.961
0.94	80.7	19.3	20.822	4.973
0.95	84.0	16.0	20.872	4.985
0.96	87.2	12.8	20.927	4.998
0.97	90.4	9.58	20.997	5.010
0.98	93.6	6.37	21.027	5.022
0.99	96.8	3.18	21.082	5.035
1.00	100.0	0.0	21.132	5.047

(Lusk 修订)

(三) 影响能量代谢的因量

1. 肌肉活动

肌肉活动对能量代谢的影响最为显著。任何轻微的活动均可提高代谢率。运动中机



体耗氧量增加,消耗能量增多,产热量增加,因而能量代谢率增高。

2.情绪影响

人在平静地思考问题时,能量代谢所受的影响并不大,产热量略有增加,一般不超过4%。但在精神紧张如烦恼、恐惧或情绪激动时,产热量显著增加。这是由于伴随情绪变化出现了无意识的肌紧张及刺激代谢的激素释放增多等原因所致。

3.食物的特殊动力作用

安静状态下摄入食物后,人体释放的热量比食物本身氧化后所产生的热量要多。例如,摄入能产生100KJ热量的蛋白质后,人体实际产热量为130KJ,额外多产生了30KJ热量。说明机体额外增加了30%的产热量。食物能使机体产生“额外”热量的现象称为食物的特殊动力作用(special dynamic action)。糖类或脂肪的食物特殊动力作用为其产热量的4%~6%,而混合食物可使产热量增加10%。额外增加的热量不能用于做功,只能用于维持体温。

4.环境温度

人体安静时的能量代谢在20~30℃环境中最稳定。实验证明,当环境温度低于20℃时,代谢率开始增加;低于10℃时,代谢率显著增加。这主要是由于寒冷刺激反射地引起寒战及肌肉紧张增强所致。当环境温度达30~45℃时,由于体内化学反应加速、呼吸循环功能增强等因素的作用,使得代谢率增加。

二、人体运动时的能量供应与消耗

人体运动时能量消耗明显增加,能耗的增加受制于运动强度、运动持续时间等因素。

(一) 骨骼肌收缩的直接能源——ATP

肌肉活动的直接能量来源是三磷酸腺苷,即ATP。事实上,人体各种生理活动所需要的能量,基本由ATP供给。例如,神经冲动传导时离子的转运、腺体分泌时分泌物透过细胞、消化道内食物的吸收及肌肉收缩过程等均需要ATP供能。人体ATP最终来源于糖、脂肪、蛋白质的氧化分解。

1.ATP的贮备及输出功率

细胞内ATP的浓度很低,通过肌肉活检测定,安静肌肉ATP含量约为6mmol/kg(毫摩尔/公斤)湿肌。ATP的最大输出功率达11.2mmolATP/kg/s(每千克肌肉每秒动用ATP的毫摩尔数),启动极为迅速。但由于ATP贮量有限,运动中ATP消耗后的补充速度成为影响运动能力的重要因素。

2. ATP 的分解供能及补充

ATP 在酶的催化下, 迅速分解为二磷酸腺苷和无机磷酸, 并释放出能量。ATP+H₂O→ADP+Pi, 每克分子 ATP 可释放 29.26~50.16KJ (7~12Kcal) 的能量。ATP 一旦被分解, 便迅速补充。这一直接补充过程由肌肉中的另一高能磷酸化合物 CP (磷酸肌酸) 完成。CP 释出能量用以将 ADP 再合成为 ATP。CP+ADP→C+ATP。肌肉中 CP 的再合成则要靠三大能源物质的分解。

(二) 三个能源系统的特征

人体在各种运动中所需要的能量分别由三种不同的能源系统供给, 即磷酸原系统(phosphagen system)、酵解能系统(glycolytic system)和氧化能系统(aerobic system), 如表 5-9 所示。

表 5-9 人体三个能源系统的特征

能源系统名称	底物	贮量 (mmol/Kg)	可合成 ATP 量 (mmol/Kg)	可供运动时间	供给 ATP 恢复的物质和代谢产物
磷酸原系统	ATP	4~6		6~8 秒	CP
	CP	15~17	100	(<10sec)	CP+ADP→ATP+C
酵解能系统	肌糖原	365	250	2~3 分钟	肌糖原→乳酸
氧化能系统	肌糖原	365	13000	>3~5 分钟	糖→CO ₂ +H ₂ O
	脂 肪	49	不受限制	1~2 小时	脂肪→CO ₂ +H ₂ O
					蛋白质→CO ₂ +H ₂ O+尿素

1. 磷酸原系统

又称 ATP—CP 系统。该系统主要是由结构中带有磷酸基团的 ATP(包括 ADP)、CP 构成, 由于在供能代谢中均发生磷酸基团的转移, 故称之为磷酸原。肌肉在运动中 ATP 直接分解供能, 为维持 ATP 水平, 保持能量的连续性供应, CP 在肌酸激酶作用下, 再合成 ATP。

CP 在肌肉中贮存量很少, 约 15~17mmol/Kg 湿肌。实际上, 磷酸原在运动中的可用量只占 1% 左右。磷酸原系统作为极量运动的能源, 虽然维持运动的时间仅仅 6~8 秒, 但却是不可替代的快速能源。运动训练中及恢复期, 既应设法提高肌肉内磷酸原的贮备量, 又要重视提高 ATP 再合成的速率。

2. 酵解能系统

又称乳酸能系统, 是运动中骨骼肌糖原或葡萄糖在无氧条件下酵解, 生成乳酸并释放能量供肌肉利用的能源系统。如前所述, 该系统尽管生成能量数量不多, 但在极量运动的能量供应中具有特殊的重要性。一般认为, 在极量强度运动的开始阶段, 该系统即可参与供能, 在运动 30 秒左右供能速率达最大, 其输出功率可达 5.2mmolATP/Kg/s, 维持运动时间 2~3 分钟。

酵解能系统与磷酸原系统共同为短时间高强度无氧运动提供能量。中距离跑等运动持续时间在 2 分钟左右的项目，主要由酵解能系统供能；而篮球、足球等非周期性项目在运动中加速、冲刺时的能量亦由磷酸原及酵解能系统提供。

3. 氧化能系统

氧化能系统又称有氧能系统。糖类、脂肪和蛋白质在氧供充分时，可以氧化分解提供大量能量。该能源系统以糖和脂肪为主，尽管其供能的最大输出功率仅达酵解能系统的二分之一，但其贮备量丰富，维持运动的时间较长(糖类可达 1~2 小时，脂肪可达更长时间)。成为长时间运动的主要能源。

(三) 能源系统与运动能力

如上所述，人体运动中能量输出的基本过程为无氧和有氧代谢两个过程，不同运动项目需要不同代谢过程作为其能量供应的基本保证，但一切运动过程的能量供应，都是由三个能源系统按不同比例提供，比例的大小则取决于运动的性质和特点。因此，人体不同能源系统的供能能力决定了运动能力的强弱。

1. 不同运动项目的能量供应

不同运动项目运动中能量供应的比例如表 5-10 所示。由表中可以看出，尽管不同运动项目的能量供应具有各自的特征，但运动中不存在绝对的某一个单一能源系统的供能。例如，100 米跑是典型的速度性项目，要求快速高输出功率的能供，磷酸原系统为首选能源，但酵解能系统在运动中仍占有一定比例。马拉松跑的持续时间长，运动中机体的能量供应以氧化能系统为主，但酵解能系统供能亦占有一定比例。而且，随着训练水平的提高，马拉松运动员运动中酵解能系统供能所占比例将进一步增加，有利于满足途中加速和终点冲刺时的能量需求(图 5-7)。

表 5-10 各种运动项目的主要能量供应系统

运动项目	各能量系统所占比例(%)		
	ATP-CP 和酵解能系统	酵解能和氧化能系统	氧化能系统
棒 球	80	20	—
篮 球	85	15	—
击 剑	90	10	—
草地曲棍球	60	20	20
足 球	90	10	—
高尔夫球	95	5	—
体 操	90	10	—
冰球	1. 前锋、后卫	80	20
	2. 守门员	95	5

曲棍球	1. 守门员、后卫、进攻手	80	20	—
	2. 中锋	60	20	20
娱乐性运动		—	5	95
划 船		20	30	50
滑雪	1. 障碍滑雪、跳、下坡	80	20	—
	2. 越野滑雪	—	5	95
英式足球	1. 守门员、边锋、前锋	80	20	—
	2. 前卫、巡边员	60	20	20
垒 球		80	20	—
游泳 潜水	1. 50 米自由泳、潜水	98	2	—
	2. 100 米(各种姿势)	80	15	5
	3. 200 米(各种姿势)	30	65	5
	4. 400 米自由泳	20	55	25
	5. 1500 米	10	20	70
网 球		70	20	10
田径	1. 100 米、200 米	98	2	—
	2. 田赛项目	90	10	—
	3. 400 米	80	15	5
	4. 800 米	30	65	5
	5. 1500 米	20	55	25
	6. 5000 米	10	20	70
	7. 10000 米	5	15	80
	8. 马拉松	—	5	95
排 球		90	10	—
摔 跤		90	10	—
自行车	1. 100 公里公路	—	5	95
	2. 100 公里团体计时	—	15	85
	3. 25 英里团体	5	15	80
	4. 10 英里场地	10	20	70
	5. 400 米个人追逐	20	55	25
	6. 1000 米	80	15	5
	7. 冲刺	98	2	—

(依 FOX, 1979, Burke, 1986)



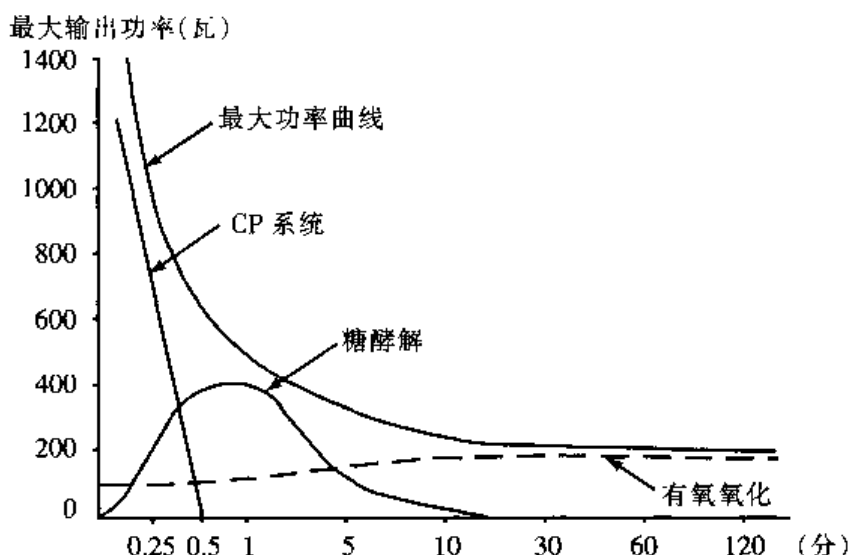


图 5-7 运动时间与最大输出功率及能源系统
(引自·Billeter 等, 1992)

2. 运动中能源物质的动员

就人体糖、脂肪和蛋白质三大能源物质在运动中的利用速率来比较，糖的利用速率最快，是一种非常经济的能源。一般运动开始时机体首先分解肌糖原，如 100 米跑在运动开始约 3~5 秒，肌肉便通过糖酵解方式参与供能；持续运动 5~10 分钟后，血糖开始参与供能，当运动强度达到最大摄氧量强度时，可达安静时供能速率的 50 倍；运动时间继续延长，由于骨骼肌、大脑等组织大量氧化分解利用血糖，而致血糖水平降低时，肝糖原分解补充血糖，其分解速率较安静时增加 5 倍。脂肪在安静时即为主要供能物质，在运动达 30 分钟左右时，其输出功率达最大。脂肪的分解利用对氧的供应有严格的要求，因而通常在长时间运动中，当肌糖原大量消耗或接近耗竭且氧供充足时才大量动用。蛋白质在运动中作为能源供能时，通常发生在持续 30 分钟以上的耐力项目。随着运动员耐力水平的提高，可以产生肌糖原及蛋白质的节省化现象。

3. 健身运动的能量供应

健身运动的形式多种多样，运动强度均比较低，运动持续时间比较长，因而动用的能源物质亦与运动的特点相适应。研究表明，运动强度低于 $50\% \dot{V}O_{2\max}$ 时，脂肪氧化分解成为主要能源，血浆中游离脂肪酸的浓度每两分钟就更新 50%，说明脂肪代谢非常活跃。当运动强度超过 $50\% \dot{V}O_{2\max}$ 时，糖的分解供能显著加强。健身运动的强度基本处于 $50\% \sim 70\% \dot{V}O_{2\max}$ 范围内，而且较理想的运动时间应在 30 分钟~1 小时，由于运动时可大量分解利用脂肪作为能源，因此，这也是为何健身运动在增强体质的同时亦能产生减肥效果的原因所在。

(四) 运动能量消耗的计算

运动时的能量消耗在运动生理学中特指因某项运动而引起的净能量消耗，即总能量

消耗减去同一时间内安静状态下的能量消耗。在实际测量和计算中,必须考虑到不同强度运动产生的能量消耗。具体步骤包括:①测定安静、运动、恢复期消耗的氧和产生的二氧化碳;②求出各阶段的呼吸商;③根据呼吸商,查氧热价对照表;④以该氧热价乘以所计算时间段内机体的总耗氧量,再减去同一时间安静状态时的能量消耗,即为该运动阶段的净能量消耗。

例如:试计算某受试者完成5分钟功率自行车定量负荷运动的净总能量消耗,其测试数据见下表。

时 间	内 容	耗氧量(L)	CO ₂ 产量(L)
5 分钟	安静(坐在车上)	1.5	1.275
5 分钟	蹬车(定量负荷)	16.5	14.851
30 分钟	恢复(坐在车上)	14.0	12.320

(查氧热价对照表: 0.83_{RQ}→4.838, 0.84_{RQ}→4.850, 0.85_{RQ}→4.862, 0.87_{RQ}→4.887, 0.9_{RQ}→4.924)

$$\begin{aligned}
 \text{5 分钟安静时的呼吸商} &= \text{CO}_2 \text{ 呼出量} \div \text{O}_2 \text{ 耗量} \\
 &= 1.275 \div 1.5 \\
 &= 0.85
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{5 分钟安静时的能量消耗} &= \text{O}_2 \text{ 耗量} \times \text{氧热价} \\
 &= 1.5 \times 4.862 \\
 &= 7.293(\text{Kcal})
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{5 分钟运动时的呼吸商} &= \text{CO}_2 \text{ 呼出量} \div \text{O}_2 \text{ 耗量} \\
 &= 14.851 \div 16.5 \\
 &= 0.9
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{5 分钟运动时的净能量消耗} &= \text{运动时总能量消耗} - \text{相同时间安静状态下的能量消耗} \\
 &= (16.5 \times 4.924) - (1.5 \times 4.862) \\
 &= 81.246 - 7.293 \\
 &= 73.953(\text{Kcal})
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{30 分钟恢复期内的呼吸商} &= \text{CO}_2 \text{ 呼出量} \div \text{O}_2 \text{ 耗量} \\
 &= 12.32 \div 14.0 \\
 &= 0.88
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{30 分钟安静状态的能量消耗} &= \text{每分钟安静状态的能量消耗} \times 30 \\
 &= 7.293 \div 5 \times 30 \\
 &= 43.758(\text{Kcal})
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{30 分钟恢复期的净能量消耗} &= \text{恢复期的总能量消耗} - \text{相同时间安静的能量消耗} \\
 &= (14.0 \times 4.899) - (7.293 \div 5 \times 30) \\
 &= 68.586 - 43.758 \\
 &= 24.828(\text{Kcal})
 \end{aligned}$$



$$\begin{aligned}
 \text{运动总净能量消耗} &= \text{运动时净能量消耗} + \text{恢复期的净能量消耗} \\
 &= 73.953 + 24.828 \\
 &= 98.781 (\text{Kcal})
 \end{aligned}$$

因此, 该运动中机体的净总能量消耗为 98.781(Kcal)。

第三节 体 温

一、正常人体温度

人体在物质代谢中所释放的能量仅有约 30% 用于完成各种形式的机械功, 另外 70% 则转化为热能, 成为体温的来源。体温 (body temperature) 特指机体深部 (心、肺、脑和腹腔脏器等部位) 的平均温度。机体深部的温度通常比较稳定, 由于体内各器官的代谢水平不同, 温度略有差异, 但不超过 1℃。安静状态下, 肝脏代谢最活跃, 温度最高; 运动时, 骨骼肌的代谢最活跃, 因而温度最高。循环血液是将体内热量传递到体表的重要途径, 由于血液不断循环, 机体深部各器官的温度会经常趋于一致。因此, 血液的温度可以代表重要器官温度的平均值。

(一) 体温的测定

体温测定的常用部位包括口腔、直肠和腋窝。直肠温度的正常值为 36.9~37.9℃, 口腔温度 (舌下部) 平均比直肠低 0.3℃, 腋窝温度又比口腔温度低约 0.4℃。习惯上, 常采用方便的测定部位即口腔及腋窝。

(二) 影响体温的因素

1. 昼夜节律

一昼夜中, 人体的体温呈周期性波动, 表现为清晨 2~6 时体温最低, 午后 4~7 时体温最高, 波动幅度不超过 1℃。

2. 性别差异

女子的基础体温随月经周期发生周期性变动。排卵日体温最低, 排卵后体温升高, 并持续至下一个月经周期。排卵后体温的升高与体内孕激素水平的变化相吻合。

3. 年龄差异

由于儿童的基础代谢率较高, 体温也略高于成人, 老年人则略低于成人。

4. 肌肉活动

肌肉活动时代谢增强, 产热量增加, 剧烈运动中产生的热量超过当时机体所散发的

热量，体温将超出正常水平。

此外，情绪激动、紧张、进食、环境温度等因素均可能对体温产生影响。

二、体温调节

人体的体温在体温调节机制的调控下，保持相对恒定，这种平衡有赖于产热和散热过程的动态平衡。

（一）产热过程

1. 产热量

人体安静状态下的产热量一般高于基础代谢 25%，而运动时的产热量最多可比安静时增加 10~20 倍。

2. 产热部位

人体处在安静状态时，肝、肠和肾等内脏器官的产热量占机体总产热量的 50% 左右，呼吸、循环及脑的产热量占 30%，骨骼肌的产热量只占 20% 左右。处在运动状态时，各器官的产热比例有很大变化，骨骼肌的产热量增加，成为主要的产热器官。而剧烈运动时，骨骼肌的产热量可占总产热量的 90% 以上。

寒冷环境中，骨骼肌通过不随意的节律性收缩——寒战来增加产热量。根据测定，代谢率可增加 4~5 倍。

（二）散热过程

1. 散热途径

人体的热量通过四个途径不断向体外散发：由皮肤散发大多数热量；经呼吸道蒸发散发小部分热量；随尿、粪排泄散发及通过加温冷空气、冷食物而散发少量热量。皮肤散热是人体最主要的散热途径。

2. 皮肤散热方式

机体深部产生的热量经血液循环运送到体表，皮肤通过辐射、传导、对流和蒸发散热的方式，将体内热能散发。

（1）辐射散热(radiation)

机体不断辐射出热射线——红外线，通过空气层被周围较冷物体吸收，这是机体在安静状态下散热的主要方式(约占总散热量的 60% 左右)。环境温度越低，机体有效辐射面积越大，辐射散热量越多。环境湿度很大时，辐射散热的效率略有降低。

（2）传导散热(conduction)

机体的热量直接传给同它相接触的较冷物体的一种散热方式。机体深部的热量经过血液以传导的方式传到体表，然后传给与其相接触的物体，如床或衣服等。人的表皮和皮下脂肪是热的不良导体，因此，空气中传导散发的热量极少。水是热的良导体，当身



体浸在水中时,大量的热量得以传导给水。游泳运动员由于长期处于水环境中,机体的热量以传导方式大量散失。

(3) 对流散热(convection)

指通过空气或液体来交换热量的一种散热方式。人体的热量传给围绕机体周围的一薄层空气,空气不断流动(对流),从而将体热发散到空间。对流是传导散热的一种特殊形式。对流散热量的多少受风速影响极大。风速越大,对流散热量也越多;风速越小,对流散热量也越少。衣着覆盖的皮肤表层,不易实现对流,有利于保温。

(4) 蒸发散热(evaporation)

人体的蒸发散热有两种形式,不感蒸发(insensible perspiration)和发汗(sweating)。前者是指人体没有汗液分泌时,皮肤和呼吸道不断有水分渗出,在未形成明显的水滴之前即被蒸发掉。其中,皮肤的水分蒸发又称不显汗,与汗腺的活动无关。室温 30℃以下时,不感蒸发的水分相当恒定,约 12~15g/h·m² (克/小时·每平方米)水分被蒸发掉,人体 24 小时的不感蒸发量为 400~600 毫升。

发汗指汗腺的分泌活动,又称可感蒸发(sensible perspiration)。人体在安静状态下,当环境温度达 30℃左右时便开始发汗。若空气湿度大,衣着较多时,气温 25℃即可引起发汗。运动中,气温 20℃以下时,亦可出现发汗,而且汗量往往较多。

蒸发散热与环境温度、皮肤血流量及血流速度有密切关系。当环境温度等于或高于皮肤温度时,蒸发成为机体的惟一散热方式,运动中人体以此种散热方式散发热量。因此,运动员排出大量体热的同时,将会丢失大量汗液。在寒冷环境中,皮肤受到冷刺激时,血管收缩,血流减慢,由血液循环带到体表的机体深部热量减少,散热相对减少;而在炎热环境中,皮肤血流加速,促进热量散发;运动中因机体产热增多,产热散热暂时处于不平衡状态,为增加散热量,皮肤血管舒张,血流量加大,血流速度加快,亦有利于肌肉代谢中产生的大量热能运输到体表,促进散热过程。

汗液的主要成分是水分,约占 98%~99%,固体成分仅占 1%~2%。固体成分中,大部分为氯化钠,约为 150~500mg%,波动较大,少量的为氯化钾、尿素、乳酸、氨等。汗液是由汗腺细胞主动分泌产生,初分泌的汗液与血浆等渗,但在流经汗腺管腔时,由于氯和钠被重吸收,最后排出的汗液是低渗的。因此,人体运动中机体因大量发汗造成脱水时,可导致高渗性脱水。

汗腺的活动受到从脊髓到大脑皮层各级中枢的控制,下丘脑的发汗中枢是最主要的部位。引起汗腺活动的适宜刺激是热,温热环境下引起全身各部位小汗腺分泌汗液称为温热性发汗。导致温热性发汗的主要因素包括:皮肤中的温热觉感受器受刺激产生兴奋,冲动传至发汗中枢,反射性引起发汗;温热环境加温皮肤血液,被加温的血液流至下丘脑发汗中枢,刺激其热敏神经元兴奋,引起发汗。发汗的速度受环境温度、湿度、风速、工作强度等因素的影响。温度越高,风速越大,工作强度越高,发汗速度越快;湿度越大,汗液不易蒸发,体热不易散发。

因精神紧张、情绪激动导致的发汗称为精神性发汗。主要见于掌心、脚底和腋窝发汗,其在体温调节中的作用不大。

(三) 体温调节机理

正常人体的体温保持相对恒定，有赖于中枢神经系统对产热和散热过程不断进行的精细调节。这是一个复杂的调节过程，体温调节中枢既接受内外温度感受器传入的温度信息，又接受血液温度变化的直接刺激，整合后，经过神经调节机制调节皮肤血流量、立毛肌、汗腺及骨骼肌的活动；通过神经—体液调节途径调节内分泌系统的活动，改变机体的代谢率，从而维持机体的产热和散热平衡。

1. 体温调节机制

体温调节系统是一个生物自动控制系统。下丘脑体温调节中枢，包括调定点神经元(视前区—下丘脑前部的热敏神经元)在内，属于控制系统。调定点(set point)，即规定数值，正常一般为 37°C 左右，为热敏神经元对温热感受的阈值，调定点的高低决定着体温的水平。控制系统的传出信息控制着产热器官(如肝、骨骼肌)及散热器官(皮肤血管、汗腺)等受控系统的活动，使受控对象——机体深部温度维持在调定点规定的数值水平。输出变量体温总会受到内、外环境因素(如机体运动、气温、湿度及风速等)的影响，通过位于皮肤及机体深部温度感受器检测，并将干扰信息反馈于调定点，经过体温调节中枢的整合，再对受控系统进行调整，建立起新的体热平衡，达到稳定体温的目的(图 5-8)。

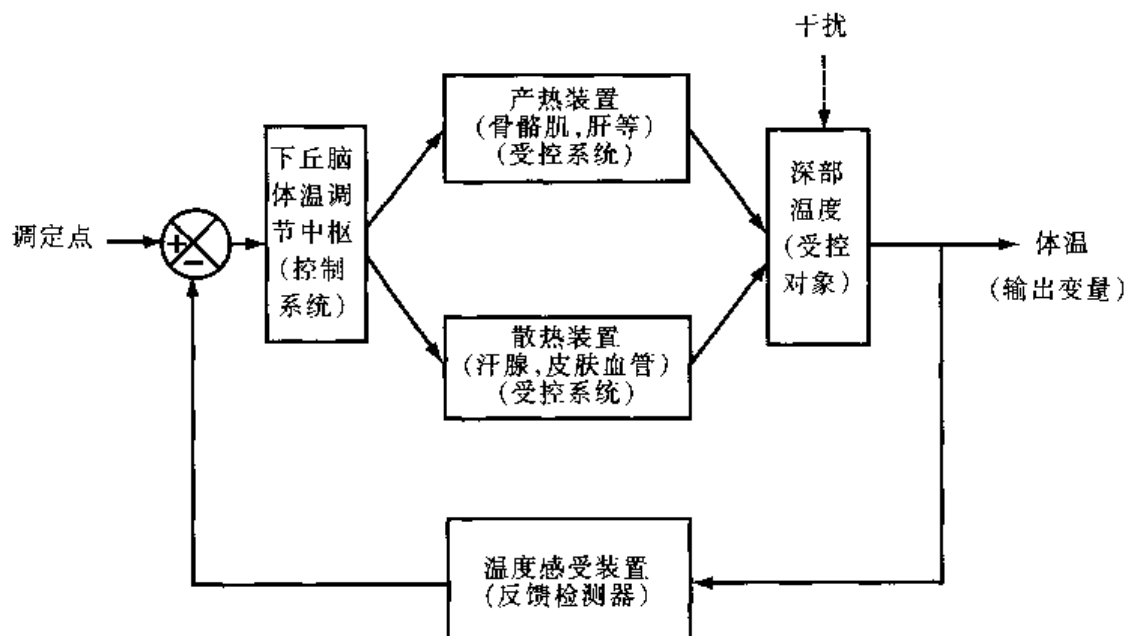


图 5-8 体温调节自动控制示意图

当体温超过 37°C 时，体温调节中枢的热敏神经元发放冲动增多，通过相应的神经联系，一方面促进汗腺分泌，另一方面控制交感神经的活动，使交感神经紧张性减弱，皮肤血管扩张，散热增加，体温回降。当体温低于 37°C 时，机体通过抑制汗腺分泌和使全身血管收缩来减少散热；同时，通过寒战、交感神经兴奋和促进甲状腺素分泌来增加产



热, 结果使体温升高。

2. 运动中体温的变化及调节

运动中由于代谢水平提高, 人体产热增加, 尽管经机体调节加强了散热过程, 但仍不能保证体热平衡而使体温升高。运动中体温的适度升高可以提高神经系统的兴奋性; 降低肌肉的黏滞性, 加快收缩速度; 加快肌肉血流速度和加大血流量; 促进氧合血红蛋白的解离及二氧化碳的交换, 有利于提高人体的运动能力。

研究证明, 人体肌肉活动的最适温度为 38℃。运动前的准备活动大致即为这个水平。运动中体温的升高与运动强度、持续时间、环境温度、湿度、风速及运动员训练水平等因素有关。运动强度越大, 持续时间越长, 体温升高幅度越大。例如, 中距离跑后运动员腋下温度可达 37.5~38℃; 长跑后升至 38.5℃; 超长跑后可升至 39.75℃, 甚至超过 40℃。剧烈运动中发汗成为维持体温恒定的主要途径。一次大强度、大运动量训练, 运动员的失汗量高达 2~7 升, 同时可散发大量体热。运动员训练水平的提高, 使得其机体产热和散热过程日臻完善, 冬夏两季的大运动量训练有利于运动员提高机体对温度的适应能力及调节能力。

3. 服习

人体对高温或低温环境所产生的由不适应到适应的生理过程, 称为对气候的服习。运动员在长期的运动训练中, 其体温调节可以在较大范围内实现对冷及热环境的服习, 这样才能保证在特殊气温环境下仍具有良好的运动能力。对冷的服习是通过神经系统的调节, 使皮肤血管产生收缩, 减少皮肤血流量及血流速度, 并使肌肉收缩, 产生寒战, 从而减少散热, 增加产热; 对热的服习是通过增加皮肤血流量, 皮肤血管扩张及血流速度加快, 并促使汗腺大量发汗, 增加机体的散热量。

【小结】

1. 糖、脂肪、蛋白质、水、无机盐和维生素六大类营养物质均来源于食物。三大能源物质经过消化分解为小分子物质, 进而吸收进入人体。

2. 糖和脂肪是人体运动中的主要供能物质; 蛋白质为生命的基础, 主要参与机体的生长发育、组织的更新修补, 而并非作为能源贮备; 水、无机盐和维生素亦与人体正常生命活动及运动能力有密切关系。

3. 人体的各种状态——维持最基本生命活动、安静状态、从事不同形式或不同项目运动均需消耗能量。能量的直接利用形式为 ATP。

4. ATP 的补充依靠人体的三个能源系统, 即磷酸原系统、酵解能系统和氧化能系统。各能源系统不同的功率输出, 决定了各运动项目能量供应的特征。

5. 人体体温的产生与能量代谢密不可分, 体温恒定依赖于产热和散热过程的动态平衡。

6. 运动中人体体温调节机制的完善和“适应”能力的提高, 有助于提高机体运动能力。

【思考题】

1. 进食混合性食物后，机体如何获取利用其中蕴含的各种能量？
2. 试从物质和能量代谢的角度，分析马拉松运动员在运动中机体机能状态的变化及其可能机制。
3. 为什么说各种项目运动中机体不存在绝对单一的某个能源系统的供能？
4. 结合运动实例说明运动中机体的三个能源系统是如何供能的。
5. 在长时间耐力运动中人体体温有何变化？如何调节？
6. 游泳运动员在 28℃ 水温环境下训练时，机体的体温有何变化？

【主要参考文献】

1. A.W.S. Watson, Physical Fitness and Athletic Performance, Addison Wesley Longman Limited, London, 1995
2. 冯炜权编著：《运动训练生物化学》，北京，北京体育大学出版社，1998。
3. 陈中伟主编：《运动医学》，上海，上海科技教育出版社，1996。
4. 张镜如主编：《生理学》，第四版，北京，人民卫生出版社，1997。
5. 傅永怀主编：《微量元素与临床》，北京，中国医药科技出版社，1997。

(山东体育学院 郑陆)



第六章

肾脏机能

【提要】本章主要介绍肾脏在排泄过程中所发挥的作用，重点阐述了肾小球的滤过作用、肾小管与集合管的重吸收作用和肾脏在保持水及酸碱平衡中的作用。在此基础上，介绍了运动对肾脏机能的影响，以及运动性蛋白尿和运动性血尿现象。

人体在新陈代谢过程中产生的代谢产物、多余的水分和进入机体的各种异物，主要通过四个途径向体外排放，这四个排放途径分别是：

①从呼吸器官排出。主要是 CO_2 、 H_2O 和挥发性药物，以气体形式随呼气排出。

②从消化道排出。主要是经肝脏代谢产生的胆色素，通过胆汁排入肠管(在肠管中转化为尿胆素和粪胆素)，以及经肠黏膜排出的一些无机盐，如钙、镁、铁、磷等，排出物混合于粪便中随粪便排出。

③从皮肤排出。主要是以汗腺泌汗的形式排出一部分 H_2O 及少量的尿素和盐。

④从肾脏排出。以尿液的形式排出各种代谢的产物，如尿素、尿酸、肌酐、 H_2O 和盐类等，肾脏排出的物质种类最多，数量最大。

生理学中，只把上述物质经过血液循环运送到排泄器官排出体外的过程称为排泄(excretion)。食物消化后的残渣，由于未参与机体细胞的代谢，又未经过血液循环向体外排出，故不包括在排泄之内。

如果排泄功能紊乱或丧失，体内的代谢产物不能正常地、及时地排出体外，就会在血液中积存，这不仅可以破坏内环境的稳定性，而且还会造成机体中毒，严重者甚至危及生命。

肾脏不仅有排泄代谢终产物的作用，还有调节体液、维持体内渗透压和酸碱度的作用，从而对保持人体内环境相对稳定起重要作用。本章重点讲授肾脏的排泄功能。

第一节 肾脏的基本结构

肾脏分皮质和髓质。肾脏基本的机能和结构单位，称为肾单位(nephron)。人类两侧肾脏共有 170~240 万个肾单位。



一、肾单位的基本结构

每个肾单位包括肾小体和肾小管两部分(图 6-1), 主要分布在肾皮质、肾小体包括肾小球(即毛细血管球)和包在它外面的肾小球囊(即肾小囊)。主要分布于肾皮质。肾小球是入球小动脉所分出的一团毛细血管网, 另一端汇集成出球小动脉。肾小囊由两层上皮细胞组成, 中间为囊腔, 顶端为盲端, 内层借助于基膜紧贴着肾小球毛细血管内皮细胞, 外层与肾小管相连接。因此, 将血浆滤过的结构, 即肾小球囊内层上皮细胞、基膜和肾小球毛细血管内皮细胞三者合称为滤过膜。肾小管分为近曲小管、髓袢和远曲小管三段, 主要分布于肾髓质。在肾小管末端形成的尿汇合到集合管, 集合管虽不属于肾单位, 但在机能上它和远曲小管有密切联系。集合管又汇入乳头管, 开口于肾盂, 最后形成的尿液经肾盏, 肾盂和输尿管注入膀胱。

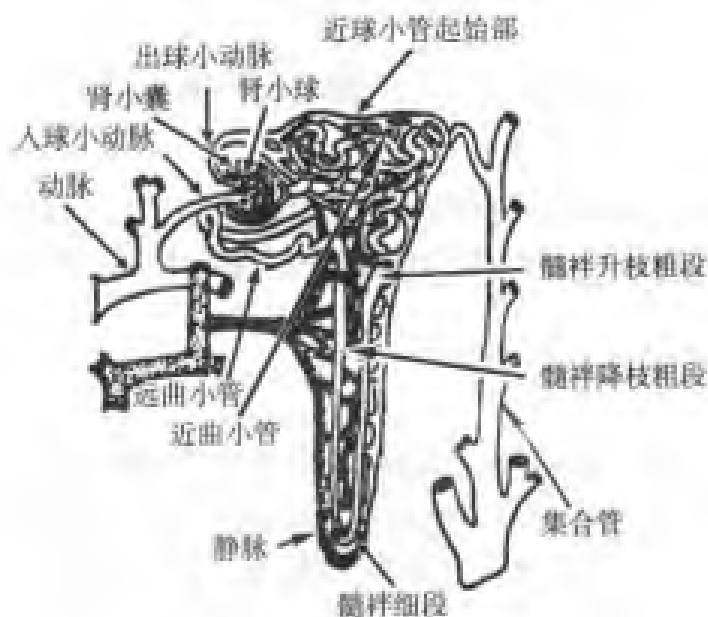
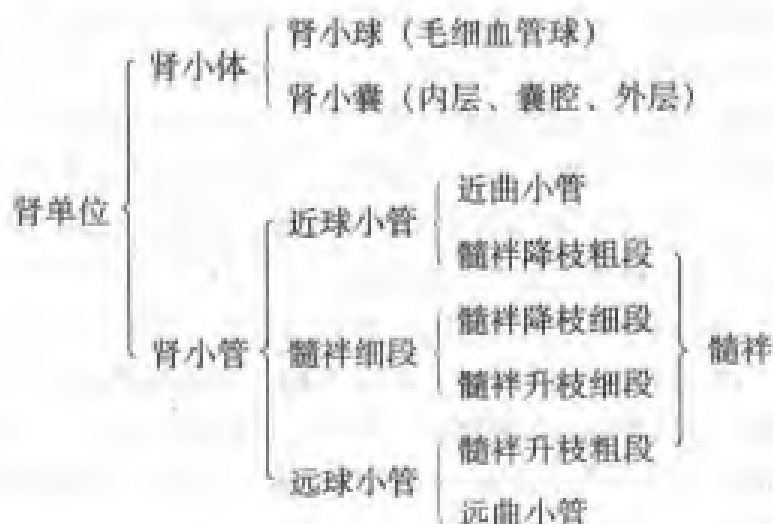


图 6-1 肾单位示意图



肾脏的排泄途径是：肾小球→肾小囊→近球小管→髓袢→远球小管→集合管→肾盏→肾盂→输尿管→膀胱→尿道。

肾脏除有排泄功能外，肾单位周围的一些组织细胞还具有内分泌功能，可产生多种生物活性物质，如肾素、促红细胞生成素(EPO)、前列腺素、维生素 D₃ 等，从而参与调节血压、调节水盐平衡、促进骨髓生成红细胞、促进肠道对 Ca²⁺ 的吸收以及舒张血管等生理过程。

二、肾脏的血液循环

两个肾脏的重量约 300 克，与心脏的重量相似，约占体重的 0.4%。流入心脏组织的血流量只有心输出量的 5%，而肾脏血流量则占心输出量的 20%~30%，正常人安静时每分钟约有 1.2 升的血液流过两侧肾脏。肾脏血液供应如此之多，显然不只是肾组织本身营养的需要，而是肾排泄功能的需要，从而为及时清除血中代谢物及异物等提供了重要条件。肾脏的血液直接来自腹主动脉的分支——肾动脉。其中，94%左右的血液分布在皮质，其余供应髓质。通常所说的肾血流量，主要指肾皮质的血流量。

肾脏的血液循环由肾动脉开始，经逐级分枝后，进入肾小体成为入球动脉，再分枝成肾小球毛细血管网，然后汇合成出球小动脉。入球小动脉粗而短，出球小动脉细而长，入球小动脉的口径是出球小动脉口径的两倍，这种结构造成了肾小球毛细血管血压较高。一般体循环的毛细血管压约 20mmHg，而肾小球毛细血管压可达 60mmHg。出球小动脉离开肾小体，再次分枝形成第二次毛细血管网，缠绕在肾小管和集合管的周围，吸收来自肾小管和集合管滤液中的各种物质，最后汇合成肾静脉出肾。由此可知，肾脏的血液循环特点是血液经过两次小动脉（入球和出球小动脉）和形成两套毛细血管网（肾小球和肾小管处的毛细血管网），见图 6-1。

第二节 尿的生成过程

尿生成是在肾单位和集合管中进行的，包括三个环节：①肾小球的滤过作用；②肾小管与集合管的重吸收；③肾小管与集合管的分泌作用。下面分别介绍这三个环节。

一、肾小球的滤过作用

血液流过肾小球毛细血管时，血浆中一部分水、电解质和小分子有机物（包括少量分子量较小的血浆蛋白）都可通过滤过膜进入肾小囊内，这种液体称为滤液或称原尿。血细胞和血浆中大分子物质（如蛋白质等）不能滤过，仍保留在血液中。影响肾小球滤过的主要因素是：滤过膜的通透性和滤过面积、有效滤过压和肾血浆流量。

1. 滤过膜的通透性和滤过面积

滤过膜上有许多裂隙，形成大小不等的小孔，滤过膜的通透性就是以物质分子量大小是否能够通过小孔来决定的(图 6-2)。由于血浆中小分子的葡萄糖、尿素、尿酸、肌酐和各种离子等物质都可以滤过，因此，滤液中这些物质的浓度都与血浆内的浓度近似。大分子物质如白蛋白(分子量为 6.9 万)极少滤过。分子量超过 7 万的物质如球蛋白、纤维蛋白等则不能滤过。一般以分子量 7 万为滤过膜通透性的界限。Hb(血红蛋白)的分子量虽 6.4 万，但它和血浆中的结合珠蛋白相结合，成为分子量较大的复合物，所以也不能滤过。只有当 Hb 大量被破坏，产生溶血，Hb 浓度超过结合珠蛋白所能结合的量时，未结合的 Hb 才能进到滤液中，从尿中排出，这种尿液称为血红蛋白尿。在一般情况下，肾小球滤过膜的通透性是比较稳定的。

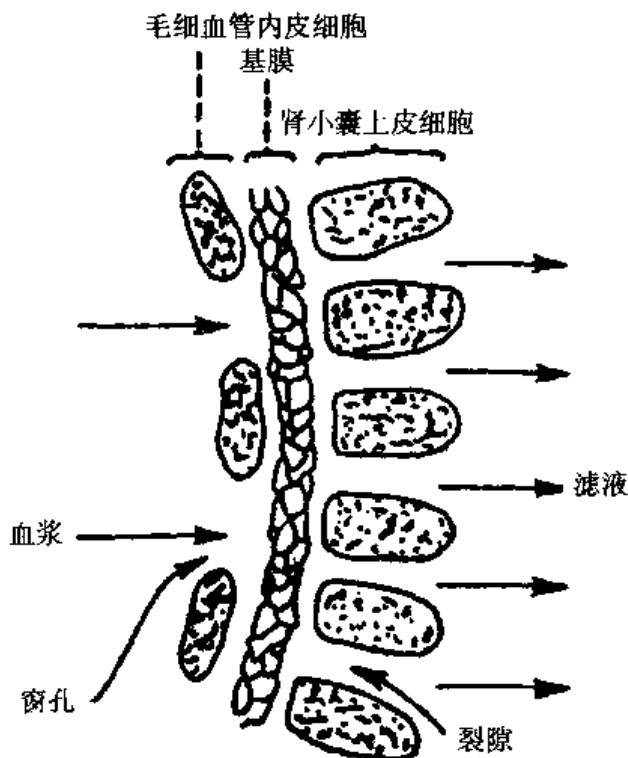


图 6-2 肾小球滤过膜的结构示意图

近年来的研究发现，滤过膜上还存在一种带负电荷的酸性糖蛋白，根据静电相斥的作用，它能阻止带负电荷的较大分子通过，称为“静电屏障作用”。但小分子带负电荷的物质如 Cl^- 和 HCO_3^- 等，仍能顺利通过。可见，滤过膜裂隙小孔的“机械屏障作用”与滤过膜带负电的“静电屏障作用”相比较，前者更为重要。

滤过面积是指肾小球毛细血管的总面积。正常人 200 多万个肾单位都经常处于活动状态，因此滤过面积较恒定，总有效滤过面积达 1.5 平方米以上。这样大的滤过面积有利于尿的生成(即血浆的滤过)。



2.有效滤过压

滤过作用的动力是有效滤过压，它主要是三部分力量即肾小球毛细血管压、血浆胶体渗透压和肾小囊内压之和，如图 6-3 所示。

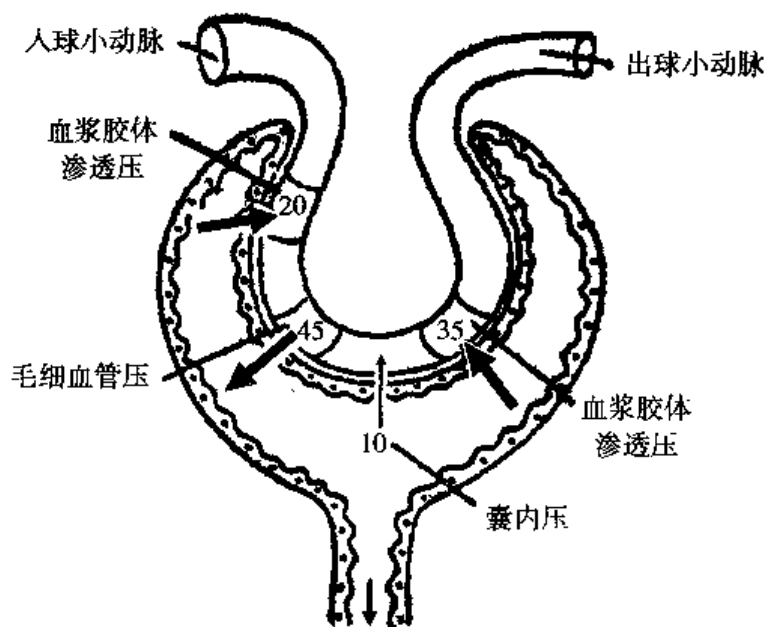


图 6-3 肾小球滤过作用的几种力量

①肾小球毛细血管压是推动血浆通过滤过膜的主要力量，用微穿刺法直接测得鼠的肾小球毛细血管压平均为 45mmHg。

②肾小囊内压是阻止血浆滤过的力量，平均为 10mmHg。

③肾小球毛细血管内血浆胶体渗透压是阻止血浆滤过的主要力量，在入球端约为 20mmHg，随着水分滤出，胶体渗透压不断上升，在出球端约为 35mmHg(见图 6-3)。

肾小球有效滤过压的计算方法如下：

有效滤过压 = 肾小球毛细血管压 - (血浆胶体渗透压 + 肾小囊内压)

入球动脉端有效滤过压：45 - (20 + 10) = 15(mmHg)

出球动脉端有效滤过压：45 - (35 + 10) = 0(mmHg)

可见肾小球有效滤过压在入球端较高，以后逐渐降低，在出球端降低为 0。虽然有有效滤过压有时不高，但因滤过膜的通透性很高，滤过仍然进行得很迅速。

3.肾血流量

肾脏在血压变动于 80~180mmHg 范围内时，依靠其自身调节可使血流量保持稳定。正常人安静时两侧肾脏血流量每分钟为 1.2 升，每昼夜从肾小球滤过的血浆总量可达 170~180 升，约为体重的 3 倍。

肾血流量调节与全身血液循环调节是互相配合、协调进行的。激烈运动时，由于肾交感神经活动加强和体液性因素的影响和作用，体内血液重新分配使肾血流量大为减

少。在紧急情况下(如严重缺氧、二氧化碳增多、失血和中毒性休克等),也会使肾血流量显著减少。

二、肾小管与集合管的重吸收作用

重吸收作用是指滤液(原尿)流经肾小管与集合管内时,其中水和某些溶质全部或部分地透过肾小管与集合管上皮细胞,重新回到肾小管与集合管周围毛细血管血液中去的过程。一个肾单位的肾小管和集合管全长 50~60 毫米,其中近曲小管上皮细胞的管腔游离面因有密集的微绒毛,形成“刷状缘”,从而大大增加了重吸收的面积。所以,近曲小管是重吸收量最大、重吸收物质种类最多的部位,髓袢、远曲小管和集合管只吸收少部分 H_2O 和 $NaCl$ 等。经过肾小管和集合管重吸收后的滤液称为终尿。重吸收方式有两种:被动重吸收和主动重吸收。

①被动重吸收 滤液中的溶质通过肾小管上皮细胞时,顺着浓度差和电位差(二者结合起来称为电化学差,即电化学梯度)引起被动扩散(或弥散),将溶质扩散到小管外的血液中,这种现象称为被动重吸收。

②主动重吸收 肾小管上皮细胞能逆着浓度差,将滤液中的溶质转运到血液内。转运是依靠管膜的载体和酶组成的“泵”来进行的。在转运过程中需消耗一定的能量。这种重吸收过程称为主动重吸收。肾小管的吸收大部分为主动重吸收。机体所需要物质的吸收,如葡萄糖、氨基酸、 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 等都是主动重吸收。

滤液与尿比较,从量上着,正常成人两个肾每天由肾小球滤出的滤液量(即原尿)约为 180 升,而每天由膀胱经尿道排出的尿量(即终尿)约 1.5 升,只占滤液的 1%。从成分上看,滤液的成分与去蛋白质的血浆相似,而尿成分与血浆有很大差别。如滤液中有葡萄糖而尿中没有;尿素、肌酐及氨在尿中的浓度却比滤液中的浓度增加许多倍。滤液中的 H_2O 有 99% 被重吸收,葡萄糖全部、 Na^+ 和 Cl^- 大部分及尿素部分被重吸收,肌酐完全不被重吸收。以上现象表明肾小管的重吸收作用是有“选择性”的,所以又叫选择性重吸收作用(表 6-1)。

表 6-1 肾脏对正常血浆成分的滤过量、重吸收量与排泄量

物 质	滤过量(g/24h)	重吸收量(g/24h)	排泄量(g/24h)
Na^+	540	537	3.3
Cl^-	630	625	5.3
HCO_3^-	300	300	0.3
K^+	28	24	3.9
葡萄糖	140	140	0
尿素	53	28	2.5
肌酐	1.4	0	>1.4

肾小管的重吸收能力也有一定限度。正常血糖浓度为 80~120mg% (每百毫升血所含血糖毫克数) 时,滤出的全部葡萄糖由近曲小管主动重吸收回来,因此,在正常情况下尿中不出现糖。当血糖浓度高于 160~180mg% 时,肾小管便不能将葡萄糖全部重吸收回血液,出现糖尿。我们把尿中不出现葡萄糖的最高血糖浓度称为肾糖阈 (renal



glucose threshold)。正常肾糖阈为 160~180mg%。尿中的其他物质也各有其“肾阈”，只是阈值不同而已。

三、肾小管与集合管的分泌作用

肾小管与集合管上皮细胞将自身新陈代谢的产物(如 H^+ 、 NH_3 等)分泌到小管液中的过程，称分泌作用。分泌的方向与重吸收方向相反。远曲小管分泌 H^+ 、 K^+ 、 NH_3 ，可调节体液的离子浓度和酸碱平衡。最终经肾小球滤过被肾小管重吸收后剩下的残留物质、多余的水和无机盐以及肾小管分泌的物质，形成了终尿，其成分如表 6-2。

表 6-2 血浆、原尿、终尿的成分表

成分	血浆(g%)	原尿(g%)	终尿(g%)	浓缩倍数
水	90~93	97	95	1
蛋白质	7~9	微量	—	—
葡萄糖	0.1	0.1	—	—
尿素	0.03	0.03	2	60
肌酐	0.001	0.001	0.075	75
尿酸	0.004	0.004	0.05	12
Na^+	0.32	0.32	0.35	1
K^+	0.02	0.02	0.15	7
Ca^{2+}	0.008	0.008	0.015	2
Mg^{2+}	0.0025	0.0025	0.006	2
Cl^-	0.37	0.37	0.6	2
PO_4^{3-}	0.009	0.009	0.15	16
SO_4^{2-}	0.002	0.002	0.18	60

四、尿的成分、理化性质及尿量

1. 尿的成分

尿的成分中， H_2O 占 95%~97%。固体物又可分为有机物和无机盐两大类，有机物中主要是尿素，其余有肌酐、马尿酸、尿酸等；无机盐中主要是 $NaCl$ ，其余有硫酸盐、磷酸盐、钾盐和氨盐等。

2. 尿的颜色

尿是淡黄色透明液体。其原因是尿中含有淡黄色的尿胆素。尿量减少变浓缩，颜色就会加深。新排出的尿颜色较浅，放置一段时间后，尿胆素元氧化成尿胆素，颜色就会加深。

3. 尿的比重

尿的比重介于 1.010~1.025 之间，随尿量而异。饮水多时，尿量增加，比重减低；饮水少或出汗多时，尿量减少，比重增高。

4.尿的酸碱度

尿的 pH 值一般介于 5.0~7.0 之间,随饮食成分而改变。荤素杂食的人尿呈酸性,pH 值约为 6.0,素食的人因酸性产物较少,碱基排出较多,故尿呈碱性。剧烈运动后,尿中的酸性物质排泄加强(如尿乳酸等),尿呈明显的酸性。

5.尿量

正常人每昼夜排出的尿量约为 1~2 升,一般约为 1.5 升。尿量多少主要取决于每日的摄水量和排水量。如摄水量多尿量就多。当环境气温升高,长时间进行剧烈运动或劳动时,由于出汗多,尿量减少。总之,摄水量如不变,排水量增多时尿量减少,相反则尿量增多。尿量过多可以引起脱水,尿量过少,代谢产物聚积体内,这些都会影响体内的水平衡,影响渗透压和酸碱度的恒定。所以,肾脏的泌尿机能对保持人体内环境理化因素的相对恒定,保证生命活动的正常进行,都具有极为重要的意义。

第三节 肾脏在保持水和酸碱平衡中的作用

肾脏在泌尿过程中起到两方面作用:一方面是通过肾小球的滤过和肾小管的分泌作用把体内各种代谢终末产物,以及对机体无用和有害的物质清除体外,如尿素、尿酸、氨及 H^+ 等。另一方面把滤液中有用物质吸收入血液,如 H_2O 和各种物质,包括离子(电解质)、葡萄糖和氨基酸等主动地或被动地转运回血,从而调节体内 H_2O 、电解质和酸碱的平衡。这两方面的作用对于保持人体内环境理化因素的稳定,具有十分重要的作用。

一、肾脏在保持水平衡中的作用

水是人体内的重要组成成分。正常人体内含水量约占体重 60%~70%。人体内水分大部分是从食物和饮料中摄取的,小部分由体内物质氧化过程中产生。

水的排出主要是通过肾脏泌尿排出,其次是通过皮肤、肺以及粪便排出。正常人体内水的含量相当恒定,摄水量与排出量经常保持动态的平衡(见表 5-2)。

维持体内水平衡主要有两条途径:一条是通过血浆晶体渗透压的改变;另一条是通过循环血量的改变,进而反射性地影响远曲小管和集合管对水的重吸收。

①血浆晶体渗透压的改变:当体内缺水时,血浆渗透压升高,于是丘脑部视上核及视上核周围区域的渗透压感受器受到刺激,引起垂体后叶分泌抗利尿激素,其结果使远曲小管和集合管对水的重吸收加强,尿量减少,从而保留了体内的水分。同时也产生口渴感觉和饮水要求。相反,大量饮水,血浆渗透压降低,抗利尿激素分泌减少,其结果尿量增加,排出多余的水,这种现象称为水利尿。

②循环血量的改变:当血量过多(扩张)时,刺激了心房和胸腔内大静脉处的容量感受器,冲动沿迷走神经传入中枢,反射性地抑制抗利尿激素的分泌。于是尿量增加。如



果肾小管重吸收率减少 1%，尿量就增加一倍；当体内缺水循环血量减少时，则发生相反的变化，即促进了抗利尿激素的生成和分泌，使远曲小管和集合管加强对水的重吸收，于是尿量减少。肾脏的这种调节作用维持着内外环境水的平衡。

二、肾脏在保持酸碱平衡中的作用

肾脏调节体内酸碱平衡是通过肾小管机能实现的。概括地说，是通过“排氢促钠”（亦称“排酸保碱”），使血浆和尿 pH 值保持在一定范围内。主要过程是肾小管上皮细胞分泌的 H^+ 与小管液中的 Na^+ 进行交换。这种交换的结果保持了血浆中 $\text{NaHCO}_3/\text{H}_2\text{CO}_3$ 的正常比值 20:1，从而使 pH 值稳定在一定范围内。由于 H^+-Na^+ 在肾小管处交换是逆着浓度梯度进行的，故需要借助“泵”的力量才能完成。肾脏这种排酸保碱作用对体液酸碱平衡的调节起着重要作用。 H^+-Na^+ 交换方式有三种表现（图 6-4）。

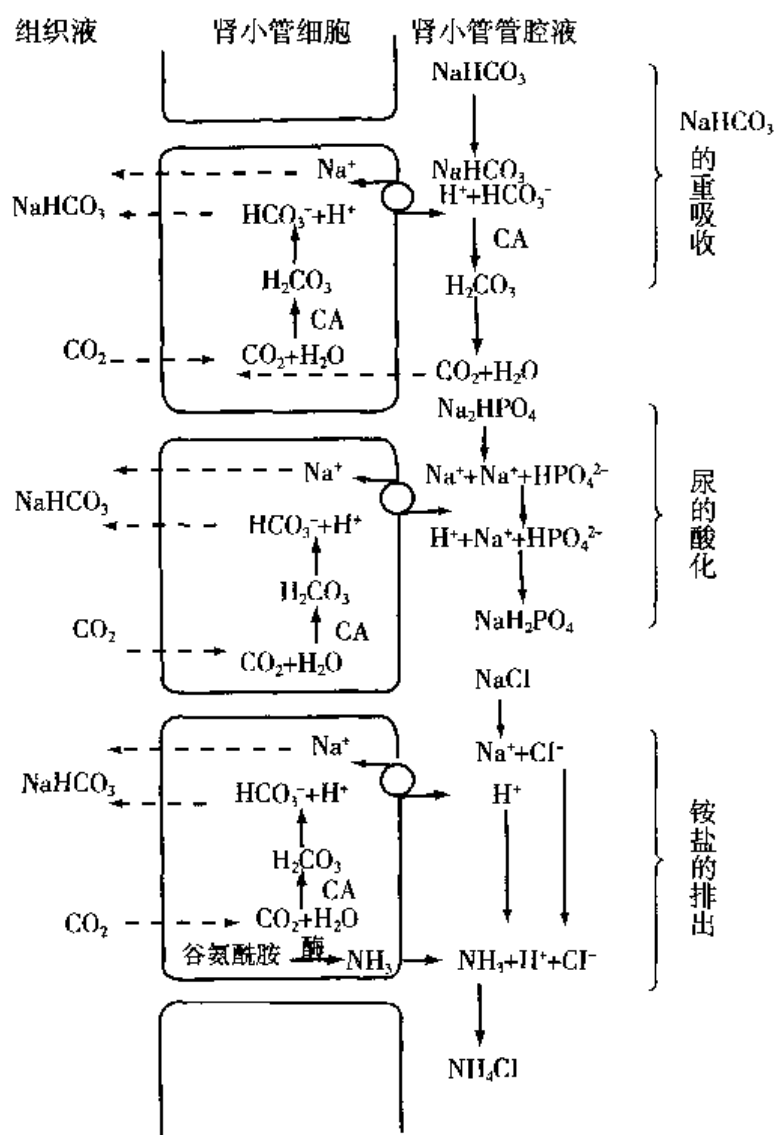


图 6-4 肾小管 H^+-Na^+ 的交换示意图

1. 肾小球滤液中 NaHCO_3 的重吸收

当 NaHCO_3 通过肾小球滤过膜入小管腔时, 可以解离为 Na^+ 和 HCO_3^- 存在于小管液中。 Na^+ 与肾小管细胞分泌的 H^+ 进行交换, Na^+ 全部重吸收。滤液中的 HCO_3^- 则在小管腔内与 H^+ 结合为 H_2CO_3 , 然后再分解为 CO_2 和 H_2O , CO_2 弥散入小管细胞内合成新的 HCO_3^- , 与 Na^+ 一起吸收回血浆, H_2O 随尿排出。正常情况下, 肾小管细胞分泌的 H^+ 很多, 足以和滤液中的 Na^+ 进行交换而被全部重吸收, 故尿中一般不含有 NaHCO_3 。肾脏吸收碳酸氢盐可保持血浆中碱储备量恒定。

2. 尿的酸化

碱性磷酸盐(主要是 Na_2HPO_4)和酸性磷酸盐(主要是 NaH_2PO_4)也是血浆中一对较重要的缓冲物质, 正常比值为 4:1。这一对缓冲盐从肾小球滤出后, 开始时仍保持原来的比值, 当肾小管所分泌的 H^+ 增加时, 一部分 H^+ 同 Na_2HPO_4 所解离的 Na^+ 进行交换, 使一部分 Na_2HPO_4 转变为 NaH_2PO_4 , 从而使尿酸化并随尿排出。而 Na^+ 则与 HCO_3^- 一起吸收至血浆结合成 NaHCO_3 。

3. 铵盐的形成

氨 (NH_3) 是肾小管上皮细胞的代谢产物, 主要是由谷氨酰胺脱氨生成的, 其次是来自其他氨基酸。 NH_3 属于脂溶性物质, 可通过细胞膜进入肾小管液中, 与肾小管细胞分泌的 H^+ 结合生成 NH_4^+ , 并进一步与强酸盐(NaCl 、 Na_2SO_4 等)的负离子(Cl^- 、 SO_4^{2-} 等)结合而成酸性的铵盐, 如 NH_4Cl 、 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 等, 随尿排出。强酸盐解离后所释放的 Na^+ 即同 H^+ 交换进入肾小管细胞内, Na^+ 最终也和肾小管细胞内的 HCO_3^- 一起转运至血浆合成 NaHCO_3 。

由此可见, 在肾小管细胞分泌 H^+ 活动中, 不仅重吸收了 Na^+ , 而且将细胞内生成的 HCO_3^- 也转运入血, 这一系列的生理活动对维持体内的酸碱平衡有着重要意义。

第四节 运动对肾脏机能的影响

运动可引起肾脏机能改变, 这些改变可以通过尿量和尿成分变化表现出来, 从而为客观评定运动时肾脏机能和人的身体机能状况提供了依据。

一、尿量

运动后尿量主要受气温、运动强度、运动持续时间、泌汗和饮水量等因素影响。如果在夏季进行强度较大、持续时间较长的运动, 或强度虽不大但时间长的运动时, 由于大量泌汗, 故尿量减少。马拉松比赛时, 一般每隔 5 公里设置一个饮水站, 以保证运动员水的供给。短时间运动后, 尿量不会发生明显变化。此外, 运动时由于血液重新分



配,肾脏血流量减少,故运动后一段时间内尿量减少。

高强度、大运动量比赛后,因尿量减少而影响“尿检”的取样,对此,通常在有监督的情况下,让运动员饮用一定的水或常规的等渗液,以增加尿量。

激烈运动后尿量减少,使尿成为“浓缩”的尿液。故在观察运动对尿中某一成分的影响,用收集总尿量并计算该成分总含量的方法,比仅分析浓度的变化更能反映其规律。

二、运动性蛋白尿

正常人在运动后出现的一过性蛋白尿称为运动性蛋白尿。正常人安静时尿中只有极微量的蛋白质,为2mg%左右,用一般检查尿蛋白的方法不易测出,为阴性。如果尿中蛋白质含量升高时,可通过常规的检测方法测出蛋白质的含量。运动可使运动员尿中的蛋白质含量升高。检测运动性蛋白尿可以用作:①评定负荷量和运动强度;②观察机体对负荷量的适应能力;③评价运动员训练水平。

关于运动性蛋白尿的产生原因,一般公认是由于运动负荷使肾小球滤过膜的通透性改变而引起的。但对滤过膜通透性改变原因的解释却不一致。其一,有些学者通过动物实验证明,由于运动时乳酸增多引起血浆蛋白质浓缩,肾小管上皮细胞肿胀,蛋白质被滤过到尿中。其二,也有研究证明是胶性物增多导致正电荷增多,促使带正电的蛋白质易透过肾小球带负电的滤过膜进入滤液中。其三,还有人认为是由于激烈运动,使肾脏受到机械性损伤引起的。其四,有人提出,出现尿蛋白是由于激烈运动时肾血管缩小,引起血流停滞,肾小球毛细血管压升高,从而促使蛋白质滤过。我国的研究人员认为,运动性蛋白尿是由于肾小球毛细血管扩张及被动充血、肾小管上皮细胞变性,造成肾脏血循环障碍,引起缺血、缺氧,毛细血管通透性增加,致使尿中出现尿蛋白。

运动后出现的运动性蛋白尿经过一定时间休息,不需要治疗即可自行消失,故认为这种变化是生理性的。影响运动性蛋白尿有如下几个主要因素:

1. 运动项目

国内外不少学者报道,在进行长距离跑、游泳、自行车、足球和赛艇等运动后,运动员出现蛋白尿的阳性率高,排泄量也较大;而体操、举重和射箭等项目在运动后,运动员出现蛋白尿的阳性率低,排泄量也少。这种现象可能与不同运动项目对机体产生的不同影响有关。

2. 负荷量和运动强度

在同一运动项目中,随着负荷量的增加,尿蛋白出现的阳性率和排出量也随之增加。在大负荷训练过程中,运动员开始承担大负荷量时,由于机体对负荷量的不适应,尿蛋白排泄量较多;坚持一段时间后,完成相同的负荷量时,尿蛋白排泄量减少。这是机体逐渐适应负荷量的表现。

3. 个体差异

运动性蛋白尿的个体差异较大,在同样的负荷内容及负荷量后,有的人不出现蛋白尿,而有的人则出现蛋白尿,而且排泄量的个体差异范围较大。所以,利用尿蛋白作为评定指标时,难以在不同个体之间比较其负荷量。而同一人在进行相同的负荷量和运动强度后,其尿蛋白排泄量是比较恒定的,尿蛋白指标是较客观和有效的。

4. 机能状况

人的机能状况和对负荷的适应与尿蛋白排出量有关。进行定量负荷运动,当机能状况和适应性良好时,尿蛋白排量减少,尿蛋白恢复期缩短;反之,机能状况欠佳,适应性差时,则尿蛋白排量增加,尿蛋白恢复期延长。一般情况下,激烈运动时,尿蛋白排泄量在运动后15~30分钟达到峰值,4小时内尿蛋白基本消失。超过4小时甚至更长,尿中仍有蛋白存在,这是人体机能下降的表现。当然,有关尿蛋白恢复时间也因人而异。

5. 年龄与环境

尿蛋白出现的比例随年龄的增加而降低。运动时外界的温度、海拔高度等因素,对尿蛋白的出现有显著影响。与在正常水温游泳相比,冬泳后尿蛋白的阳性率高;高原条件下运动性尿蛋白的阳性率和排量高于平原,这与寒冷或低压对机体和肾脏的刺激有关。环境因素引起尿蛋白排量增加,会随着适应性提高而改善。

三、运动性血尿

正常人在运动后出现的一过性显微镜下或肉眼可见的血尿称为运动性血尿。肉眼观察到的血尿呈褐色或浓红茶色,显微镜下血尿为正常尿色,但可见红细胞。

出现运动性血尿,可能是由于运动时肾上腺素和去甲肾上腺素的分泌增加,造成肾血管收缩,肾血量减少,出现暂时性肾脏缺血、缺氧和血管壁的营养障碍,从而使肾的通透性提高,使原来不能通过滤过膜的红细胞也发生了外溢,形成运动性血尿。另外,运动时肾脏受到挤压、打击,肾脏下垂,造成肾静脉压力增高,也能导致红细胞渗出,产生血尿。也有研究表明,运动引起的自由基含量增加也可以造成运动性血尿。因此,运动性血尿可能是综合因素作用的结果。

运动性血尿多出现在激烈运动后,人并无其值症状和不适。血尿持续时间一般不超过3天,最长不超过7天。出现血尿时,可适当调整运动量,服用一些止血药或中药,通常预后情况均良好。

运动性血尿受运动项目、负荷量和运动强度、身体适应能力和环境等因素的影响。跑步、跳跃、球类和拳击运动后,血尿的发生率较多;负荷量和运动强度加大过快时,如冬训及比赛开始阶段,血尿也多;身体适应能力下降,如过度训练,也会有大量的血尿产生;在严寒条件(冬泳)和高原条件下的训练,也容易造成运动性血尿。



【小结】

1.人体共有四个排泄途径,其中肾脏是最主要的排泄途径。肾脏的排泄(排尿)是借助于肾小体、肾小管以及肾的血液循环而完成的。

2.影响肾小球滤过的主要因素是:滤过膜的通透性和滤过面积、有效滤过压、肾血浆流量。

3.肾小管重吸收的方式分为被动重吸收和主动重吸收。肾小管的重吸收作用是有“选择性”的,滤液中的水99%被重吸收,葡萄糖全部被重吸收, Na^+ 和 Cl^- 大部分被重吸收,尿素部分被重吸收,肌酐完全不被重吸收。

4.保持体内水平衡,主要是通过血浆晶体渗透压和循环血量的改变而引起的反射活动来实现对水代谢的调节。肾脏调节体内酸碱平衡是通过“排氢保钠”(“排酸保碱”),使血浆和尿pH值保持在一定范围内。 $\text{H}^+ - \text{Na}^+$ 交换的方式有三种表现,即:肾小球滤液中 NaHCO_3 的重吸收、尿的酸化和铵盐的形成。

5.运动性蛋白尿主要和运动项目、负荷量和运动强度、个体差异、机能状况、年龄与环境等因素密切相关。运动性血尿受运动项目、负荷量和运动强度、身体适应能力和环境等因素的影响。

【思考题】

- 1.体内代谢产物和各种异物是通过哪四个途径向体外排放的?
- 2.试述肾脏血液循环的特点。
- 3.试述影响肾小球滤过的主要因素。
- 4.试述肾脏保持酸碱平衡的机制。
- 5.试述影响运动性尿蛋白的因素。
- 6.运动性血尿产生的主要原因是什么?

【主要参考文献】

- 1.体育学院通用教材:《运动生理学》,北京,人民体育出版社,1990。
- 2.张镜如主编:《生理学》,北京,人民卫生出版社,1995。
- 3.曲绵域等主编:《实用运动医学》,北京,北京科学技术出版社,1996。
- 4.倪江主编:《生理学》,北京,人民卫生出版社,2000。
- 5.施雪筠主编:《生理学》,上海,上海科学技术出版社,1994。
- 6.人体生理学编写组:《人体生理学》,北京,高等教育出版社,1994。
- 7.邓树勋等主编:《运动生理学》,北京,高等教育出版社,1999。
- 8.冯炜权主编:《运动生物化学原理》,北京,北京体育大学出版社,1995。

(南京体育学院 孙飏)



第七章

内分泌机能

【提要】 本章主要介绍内分泌、内分泌腺与激素的概念，讨论激素作用的一般特征、激素作用的机制和负反馈调节。在此基础上，介绍兴奋剂的概念及分类，以及某些兴奋剂的作用机制和对人体健康的危害。

机体对自稳态的维持，需要完成大量的、精确的调控过程。这个调控过程主要借助于神经系统和内分泌系统完成。神经系统主要是从大的方面进行宏观调控，而对于这些反应进行精确的“微调”使其反应幅度恰如其分，则需借助于内分泌系统。内分泌系统通过激素协助神经系统精确地调控着身体机能的每一个变化，确保各种身体机能安全、有序地运行。

第一节 内分泌概论

一、内分泌与内分泌腺

内分泌系统是由内分泌腺和分散存在于某些组织器官中的内分泌细胞组成的一个体内信息传递系统，它与神经系统密切联系，相互配合，共同调节机体的各种功能活动，维持内环境的相对稳定。

内分泌与外分泌相比，分泌与作用过程显著不同。外分泌腺的分泌物，一般会通过一条专用导管直接输送到作用部位。内分泌腺所生成的激素并不能通过导管直接输送到作用部位，而是直接分泌到血液或淋巴液中，而后由血液运至全身。由于这种方式并未借助导管的输送作用，故将其称为内分泌（endocrine，或 internal secretion）。鉴于内分泌的调节作用需要通过体液（血液、淋巴液和组织液等）的传递才能完成，因此，一般也将内分泌调节称做体液调节。

机体发动体液调节的作用过程非常复杂，需要经过多个信息传递过程才能完成，因此，时常将处于这条信息传递链起始端的激素称做“第一信使”。“第一信使”完成使命后，由“第二信使”继续介导信息，依次类推，组成一条非常完整的信息链，完成一个连锁反应。这个生理反应过程时常由微量的激素开始发动，经过信息的多级传递，最终产生一个非常明显的生理反应。因此将这个多级作用过程称做生物放大系统，并将由



微量激素发动而最终形成的明显生理反应称做生物放大效应或生物放大作用。

随着内分泌研究的进展,关于激素传递方式的认知亦逐步深入并逐渐摆脱了传统的概念。业已发现,内分泌作用的方式与过程多种多样。大多数激素经血液运输至远距离的靶组织发挥作用,这种方式称为远距分泌(即传统意义上的内分泌)。但某些激素可不经血液运输,仅由组织液扩散而作用于邻近细胞,这种方式称为旁分泌。如果内分泌细胞所分泌的激素在局部扩散又反作用于该内分泌细胞而发挥反馈作用,这种方式称为自分泌。另外,体内一些神经细胞既能产生和传导神经冲动,又能合成和释放某些激素,故将其称做神经内分泌细胞,它们产生的激素称为神经激素。神经激素可沿神经细胞轴突借轴浆流动运送至末梢而释放,这种方式称为神经分泌。

内分泌系统包括体内能够分泌激素的所有腺体、组织和细胞。内分泌腺由上皮细胞组成,这种上皮细胞可以生产并储存激素。体内主要的内分泌腺有垂体、甲状腺、甲状旁腺、肾上腺、胰岛、性腺、松果体和胸腺等。许多内分泌细胞还散在于组织器官,如消化道黏膜、心、肾、肺、皮肤、胎盘等部位均存在各种各样的内分泌细胞。此外,在中枢神经系统内,特别是下丘脑也存在着兼有内分泌功能的神经细胞。

二、激素

由内分泌腺或散在的内分泌细胞分泌的、经体液运输到某器官或组织而发挥其特定调节作用的高效能生物活性物质称为激素(hormone)。

激素由内分泌腺分泌入血后,便随着血液循环流动,到达机体每一个器官、组织或细胞。虽然激素能到达每一个部位,但并非必然与所有的器官、组织和细胞发生反应,而只能有选择性地与其中的某些器官、组织或细胞发生特异性反应。鉴于激素的这个作用特征,将能够与某种激素发生特异性反应的器官、组织或细胞分别称做该激素的靶器官(target organ)、靶组织(target tissue)或靶细胞(target cell)。

激素对靶器官的活动所产生的特有效应,主要是通过加速或抑制细胞原有的活动过程来实现的,而并非发动一个新的过程。这些生理效应主要包括:①激活酶系统;②改变细胞膜的通透性;③引起肌肉收缩或放松;④刺激蛋白质的合成;⑤引起细胞分泌。

(一) 激素的分类

激素的种类繁多,来源复杂。按其化学性质大体可分为两大类:非类固醇激素与类固醇激素。

1. 非类固醇激素

非类固醇激素亦称为含氮激素,它可再分为两类:蛋白质激素(或肽类激素)和氨基酸激素。

(1) 蛋白质(肽类)激素:主要有下丘脑调节肽、神经垂体激素、腺垂体激素、胰岛素、甲状旁腺激素、降钙素以及胃肠激素等。

(2) 氨基酸(胺类)激素:包括肾上腺素、去甲肾上腺素和甲状腺激素。

2. 类固醇激素

类固醇激素的化学结构类似于胆固醇，实际上大多数激素的确也是由胆固醇所衍生。鉴于胆固醇属于类脂，故类固醇激素可以穿过细胞膜(脂质膜)发挥作用。分泌这类激素的内分泌腺包括：

肾上腺皮质分泌的激素包括糖皮质激素(可的松)与盐皮质激素(醛固酮)等。

卵巢分泌的激素包括雌激素与孕激素。

睾丸分泌的激素有睾酮。

胎盘分泌的激素包括雌激素与孕激素。

(二) 激素作用的一般特征

激素虽种类繁多，作用复杂，但在对靶组织发挥调节作用的过程中，具有某些共同的作用特征。

1. 生物信息传递

神经信息在神经纤维上传输时，以电信号作为信息的携带者。而内分泌系统的信息是以化学信号的形式，即依靠激素在细胞与细胞之间进行信息传递。无论是哪种激素，最终作用结果也只能通过对靶组织原有的生理生化过程起加强或减弱作用，从而调节其功能活动。例如，生长激素可促进生长发育，甲状腺激素可增强代谢过程，胰岛素可降低血糖等。在这些作用过程中，激素既不能添加成分，也不能提供能量，仅仅起着“信使”的作用，将生物信息传递给靶组织。

2. 相对特异性

激素随血液循环可到达全身各个部位。虽然它们与各处的组织、细胞都有广泛接触，但只能选择性地作用于某些器官、组织和细胞。这种特征称为激素作用的相对特异性。激素作用的特异性之间差别很大，有些激素作用的特异性很强，只作用于某一特定靶腺，如促甲状腺激素只作用于甲状腺，促肾上腺皮质激素只作用于肾上腺皮质，垂体促性腺激素只作用于性腺等。有些激素没有特定的靶腺，其作用比较广泛，如生长激素、甲状腺素等，它们几乎对全身组织细胞的代谢过程都可发挥调节作用。

激素作用的特异性与靶细胞上存在能与该激素发生特异性结合的受体有关。肽类和蛋白质激素的受体存在于靶细胞膜上，而类固醇激素与甲状腺激素的受体则位于细胞浆或细胞核内。激素与受体相互识别并发生特异性结合，经过细胞内复杂的反应，从而激发出一定的生理效应。作用比较广泛的激素也是通过与细胞的相应受体结合而起作用的，只是这种激素受体的分布比较广泛。

3. 高效能生物放大

激素在血液中的浓度都很低，一般在纳摩尔(nmol/L)，甚至在皮摩(pmol/L)数量级。虽然激素的含量甚微，但与受体结合后，在细胞内会发生一系列酶促放大作用，一



个接一个,逐级放大,形成一个效能极高的生物放大系统。故激素作用堪称量小作用大。如1毫克的甲状腺激素可使机体增加产热量约4 200 000J(焦耳)。据估计,一个分子的胰高血糖素将一个分子的腺苷酸环化酶激活后,通过cAMP-蛋白激酶,可激活10 000个分子的磷酸化酶。一个分子的促甲状腺素释放激素,可使腺垂体释放100 000个分子的促甲状腺素。下丘脑分泌的促肾上腺皮质激素释放激素,最终可引起肾上腺皮质释放400倍的糖皮质激素。

4. 颉颃与协同作用

当多种激素共同参与某一生理活动的调节时,激素与激素之间往往存在着协同作用或颉颃作用,这对维持其功能活动的相对稳定起着重要作用。例如,生长激素、肾上腺素、糖皮质激素及胰高血糖素,虽然各自的作用有所侧重,但均能提高血糖,在升糖效应上有协同作用。相反,胰岛素则可降低血糖,与上述激素的升糖效应有颉颃作用。激素之间的协同作用与颉颃作用的机制比较复杂,可以发生在受体水平,也可以发生在受体后的信息传递过程,或者是细胞内酶促反应的某一环节。此外,有些激素本身并不能直接对某些器官、组织或细胞产生生理效应,然而在它存在的条件下,可使另一种激素的作用明显增强,即对另一种激素的调节起支持作用,这种现象称为允许作用。糖皮质激素的允许作用是最明显的,它对心肌和血管平滑肌并无收缩作用,但必须有糖皮质激素的存在,儿茶酚胺才能很好地发挥对心血管的调节作用。关于允许作用的机制目前尚未完全清楚。

三、激素的作用机制

(一) 激素作用的专门性

激素与细胞的受体结合是调控细胞活动的先决条件。激素与受体结合之后形成激素—受体复合物,然后发生生理效应。每一种激素只能与一种受体结合,而每一种受体也只能与一种激素结合,这就决定了两者作用的高度特异性。激素作用的特异性甚至可特异到仅影响到一个器官或某个组织的某一部分,如抗利尿激素(ADH)仅仅影响到肾脏的集合管而不波及邻近部位。

(二) 激素受体及其特性

激素不同,激素受体在细胞的位置也不尽相同,作用机制也完全不同。非类固醇激素不能溶于脂肪,难于穿过细胞膜(双层脂质膜),故其受体一般均处于细胞膜,且作用机制主要由cAMP充当“第二信使”进行介导。而类固醇激素由于可溶于脂肪,故其极易穿过细胞膜进入膜内。因此,这些激素的受体绝大部分处于细胞质,个别的处于细胞核(如甲状腺激素)。

一个典型细胞拥有2 000~10 000个受体不等,而且其受体数目可以根据体内情况发生变化。因此,细胞所发生的生理反应,不仅仅取决于激素水平,而且取决于细胞上该

激素的受体数目和活性状态。

细胞受体数目的变化有重要的生理意义。当某种激素的血浆浓度发生变化时,细胞通过该激素受体数目的变化,将反应控制于适宜的幅度,有利于维持机体的稳态。若血中某种激素水平较长时间处于较高状态,会导致靶细胞上该激素受体数目相应减少。受体数目减少后,该激素便难于像往常那样“敏感”,所结合的激素会减少。这种现象称做“降调节”(down-regulation)。以某些带有高胰岛素水平的肥胖者为例,由于他们身体细胞上的胰岛素受体数目有所减少,要将血糖水平控制于正常水平,则需要相对更高的胰岛素水平,结果,血中胰岛素水平势必上升。而长期较高的胰岛素水平有可能导致细胞的胰岛素受体数目进一步减少,并导致胰岛素水平进一步升高。长此以往,便进入了一个非良性循环。

相反,细胞也会对某种激素的长期低水平作出相应反应,即增加该激素受体数目。这样,细胞对该激素会变得更加敏感,即可结合更多的激素。这种现象称做“升调节”(up-regulation)。

(三) 激素作用机制与过程

非类固醇激素不能穿过细胞膜,故其受体一般位于细胞膜上。而类固醇激素的受体一般位于胞浆甚至胞核中。由于两类激素受体在细胞的分布位点不同,故作用机制也迥然不同。

1. 非类固醇激素的作用机制与过程

非类固醇激素的作用机制与过程如图 7-1 所示。其作用过程大致分为如下五步:第一步,激素到达细胞后,与细胞膜表面的受体结合,形成激素—受体复合物;第二步,激素—受体复合物激活了细胞膜上的腺苷酸环化酶;第三步,在腺苷酸环化酶作用下,ATP 分解为 cAMP (“第二信使”);第四步,cAMP 激活蛋白激酶;第五步,蛋白激酶再诱导出一系列的继发性、特异性生理反应。

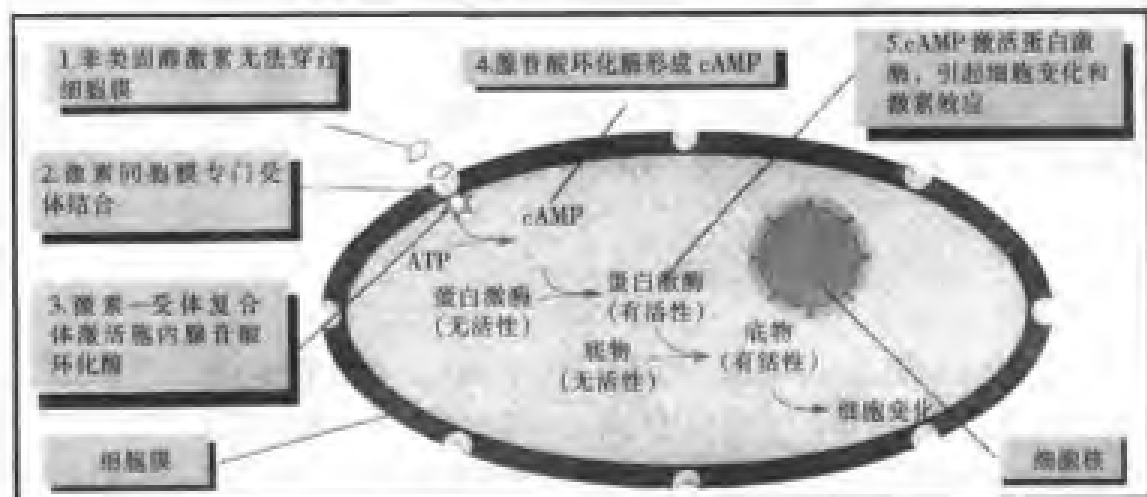


图 7-1 非类固醇激素的作用过程与机制



2. 类固醇激素的作用机制与过程

类固醇激素的作用机制与过程如图 7-2 所示。其作用过程大致分为如下四步：第一步，激素到达细胞后，穿过细胞膜进入细胞内部，在细胞内与受体结合构成激素—受体复合物；第二步，激素—受体复合物进入细胞核，与细胞的 DNA 结合，激活某些基因，此过程称做直接基因激活或直接基因活化；第三步，在这个基因活化过程中，在细胞核内合成 mRNA；第四步，mRNA 进入细胞浆，促进蛋白质类物质的合成，并诱发继发性的生理反应。这些合成物包括：①酶类，对生理过程产生各种影响；②结构蛋白质，广泛地用于组织的建造与修复；③调控蛋白质，改变相关酶的活性，影响生理过程。

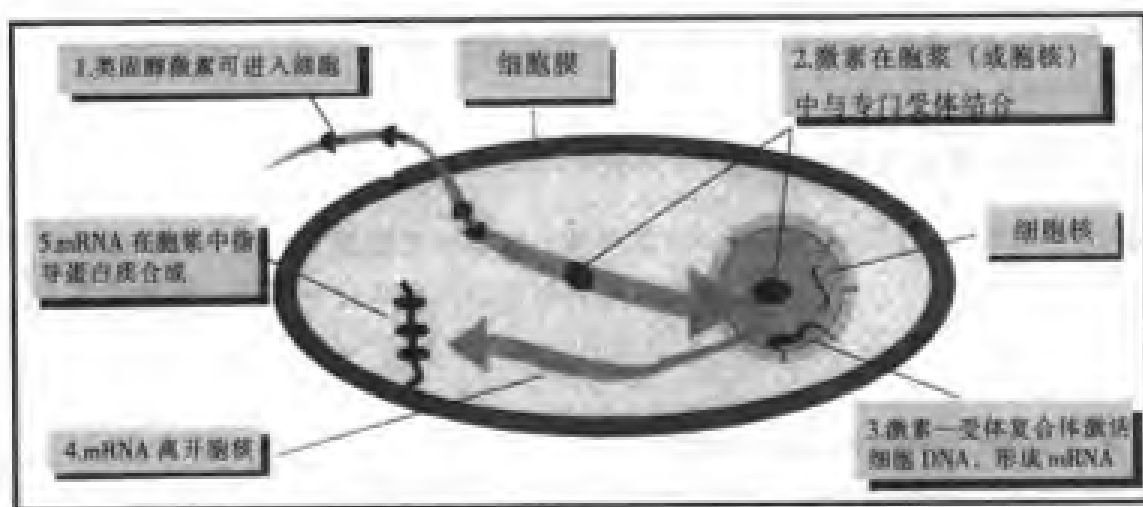


图 7-2 类固醇激素的作用过程与机制

第二节 主要内分泌腺及其作用

人体内主要的内分泌腺包括下丘脑与垂体、甲状腺、肾上腺、胰岛、甲状旁腺和性腺。这些内分泌腺所分泌的激素、激素作用的靶器官和主要生理功能如表 7-1 所示。

一、下丘脑与垂体

下丘脑与垂体位于大脑基底部，两者在结构与功能上有着紧密联系，可看做是一个内分泌功能单位。下丘脑是位于前脑基底部的重要脑区。下丘脑中的许多核团兼有内分泌功能，能分泌多种神经激素。垂体是人体重要的内分泌腺，位于颅底鞍鞍的垂体窝内，约蚕豆大。垂体按其结构与功能可分为腺垂体与神经垂体两部分。腺垂体是腺组织，它包括垂体前叶、中间叶和结节部。神经垂体是神经组织，包括垂体后叶和垂体

表 7-1

内分泌腺、激素、靶器官以及主要生理作用

内分泌腺	激素名称	缩写	靶器官	主要生理功能
下丘脑	促肾上腺皮质激素释放激素	CRH	腺垂体	促进腺垂体分泌促肾上腺皮质激素
	促甲状腺素释放激素	TRH	腺垂体	促进腺垂体分泌促甲状腺激素
	生长激素释放激素	GHRH	腺垂体	促进腺垂体分泌促肾上腺皮质激素
	促性腺激素释放激素	GnRH	腺垂体	促进腺垂体分泌促肾上腺皮质激素
	生长抑素	SS	腺垂体	抑制腺垂体分泌生长激素
腺垂体	生长激素	GH	身体所有细胞	促进身体组织发育成长成熟；增加蛋白质合成；增加脂动员；减少糖的利用
	促甲状腺素	TSH	甲状腺	控制甲状腺生成，释放 T_3 与 T_4
	促肾上腺皮质激素	ACTH	肾上腺皮质	调控肾上腺皮质激素的分泌活动
	生乳素	PRL	乳房	刺激乳房的发育，乳汁分泌
	卵泡刺激素	FSH	卵巢、睾丸	加速卵巢、卵泡的发育；促进卵巢分泌雌激素；促进睾丸、精子的发育
神经垂体	黄体生成素	LH	卵巢、睾丸	促进雌激素和孕激素的分泌；引起卵泡破裂释放卵细胞；引起睾丸分泌睾酮
	抗利尿激素（成血管加压素）	ADH	肾脏	协助肾脏排水的调控；收缩血管，升高血压
甲状腺	宫缩素（催产素）	OXT	乳房、子宫	刺激子宫肌肉收缩及乳汁分泌
	T_3 和 T_4		全身所有细胞	增加组织代谢率；加快心率；加强心肌的收缩性
甲状旁腺	降钙素		骨骼	调控血液中钙离子的浓度
	甲状旁腺素		骨骼、消化道、肾脏	对骨骼、消化道和肾脏产生影响，调控细胞外液中的钙离子浓度
肾上腺皮质	糖皮质激素(可的松)	GC	体内多数细胞	调控糖、脂肪、蛋白质的代谢
	盐皮质激素(醛固酮)		肾脏	通过肾脏排钾、保钠
	性激素		卵巢、乳房、睾丸	协助男女第二性征的发育与维持
髓质	肾上腺素	E	体内多数细胞	加速糖原动员利用；增加骨骼肌血流；增加心率与心肌收缩性；加大氧耗
	去甲肾上腺素	NE	体内多数细胞	收缩动脉和静脉，升高血压
胰腺	胰岛素		体内所有细胞	降低血糖，调控血糖水平；增加葡萄糖的利用与合成脂肪
	高血糖素		体内多数细胞	升高血糖；刺激蛋白质、脂肪分解供能
性腺 睾丸	睾酮		性器官、肌肉	促进男子性器官与性征的发育；促进肌肉生长
卵巢	雌激素和孕激素		性器官、脂肪组织	促进女子性器官与性征的发育；增加脂肪储存；协助调控月经周期
肾脏	肾素		肾上腺皮质	协助调控血压
	促红细胞生成素	EPO	骨髓	促进红细胞生成



柄。这两部分都与下丘脑有密切关联。下丘脑与腺垂体之间没有直接的神经联系，它们主要通过特殊的血管系统—垂体门脉系统发生功能联系。下丘脑与神经垂体有着直接的神经联系。

(一) 腺垂体分泌的激素及其生理作用

腺垂体是人体很重要的内分泌腺，它能合成和分泌 7 种激素，其中 4 种是“促激素”，分别作用于相应的外周靶腺体。

1. 生长素

生长素(growth hormone, GH)的主要生理作用有以下几个方面。

(1) 促进生长

生长素在机体生长过程中起着关键作用。人在幼年时期若缺乏生长素，将患侏儒症(身材矮小，但智力发育正常)；生长素过多，则可使生长发育过度，发生巨人症。成年人若生长素过多，因骨骼已闭合，长骨不再增长，但可刺激肢端部的骨和额面部的骨增长，发生肢端肥大症，内脏器官如肝、肾等也增大。

(2) 对代谢的影响

对代谢的影响主要有：①促进蛋白质合成，减少其分解，这是因为它能促进氨基酸进入细胞，并可加速 DNA 和 RNA 的合成。②生理水平的生长素可刺激胰岛素分泌，加强糖的利用。③对脂肪代谢有允许作用，从而加速了脂肪的分解利用，使组织的脂肪量减少。

2. 催乳素

催乳素(prolactin, PRL)也是一种蛋白质激素。催乳素的重要生理作用是促进妊娠期乳腺发育，使乳腺开始并维持泌乳。

3. 促甲状腺素

促甲状腺素(thyroid-stimulating hormone, TSH)是一种糖蛋白。其主要生理作用是促进甲状腺腺泡细胞的增生和甲状腺激素的合成。

4. 促肾上腺皮质激素

促肾上腺皮质激素(adrenocorticotrophic hormone, ACTH)为含 39 个氨基酸的多肽。ACTH 的主要生理作用是促进肾上腺皮质增生和糖皮质激素的合成与释放。

5. 促性腺激素

促性腺激素(gonadotropic hormone, GTH)包括促卵泡激素(follicle stimulating hormone, FSH)和黄体生成素(luteinizing hormone, LH)。前者能刺激卵泡的发育和卵子的成熟。后者能促进卵泡的最后成熟。

6. 促黑(素细胞)激素

促黑激素(melanocyte-stimulating hormone, MSH)的主要作用是促进黑素细胞中的酪氨酸酶的合成和激活,从而促进酪氨酸转变为黑色素,使皮肤与毛发等的颜色加深。

(二) 腺垂体分泌的调节

腺垂体的功能直接受下丘脑控制,同时也受外周靶腺体激素的反馈调节。

1. 下丘脑对腺垂体的调节

如前所述,下丘脑神经元能分泌多种活性肽,通过垂体门脉系统,作用于腺垂体细胞,调节其分泌功能。

2. 外周靶腺激素的反馈调节

腺垂体的三种促激素(TSH、ACTH、GTH)都有各自的靶腺(甲状腺、肾上腺皮质、性腺),外周靶腺的激素(甲状腺激素、糖皮质激素、性激素)既可对直接调节它的腺垂体起反馈作用(短反馈),也可绕过腺垂体对下丘脑起反馈作用(长反馈)。因此,下丘脑、腺垂体与外周靶腺之间联成三个功能轴:下丘脑—腺垂体—甲状腺轴;下丘脑—腺垂体—肾上腺(皮质)轴;下丘脑—腺垂体—性腺轴。各轴本身各环节存在依次调节及反馈调节关系,从而使血液中的有关激素浓度相对稳定在一定水平上。

3. 反射性调节

体内外环境变化,可反射性地通过高级中枢影响下丘脑的活动,从而影响腺垂体的分泌功能。例如,应激刺激(创伤、环境变化和剧烈运动等)可引起促肾上腺皮质激素分泌增加;低血糖可使生长素释放激素和生长素分泌增加等。

(三) 神经垂体分泌的激素及其生理作用

神经垂体属神经组织,由神经纤维、神经胶质和由神经胶质分化而来的垂体细胞组成。神经垂体本身不能合成激素,它只是下丘脑神经元所合成的加压素和催产素贮存和释放的部位。这两种激素都由下丘脑的视上核和旁室核合成,但前者以产生加压素为主,后者以产生催产素为主。合成的激素沿下丘脑—垂体束通过轴浆转运输送到神经垂体,在一定刺激下,以出胞方式使分泌颗粒释放出激素进入毛细血管。

1. 加压素

加压素(vasopressin, VP)又称抗利尿激素(ADH),为含9个氨基酸的多肽,其作用是使全身微动脉和毛细血管前括约肌收缩,升高血压。

2. 催产素

催产素(oxytocin, OXT)也是一种含9个氨基酸的多肽,它有促进子宫收缩和排乳



两种作用，但以排乳为主，在分娩及哺乳时才发挥生理效应。

二、甲状腺

甲状腺位于气管上端甲状软骨两侧，左右各一，呈椭圆形，重约 20~40 克。甲状腺分泌的激素为甲状腺素(thyroid hormone)。目前知道有两种：一是甲状腺素，又称四碘甲腺原氨酸(T_4)；一是三碘甲腺原氨酸(T_3)。在腺体或血液中， T_4 含量占绝大多数，但 T_3 的生物活性比 T_4 强约 5 倍。它们都是酪氨酸的碘化物，因此，甲状腺的活动与碘代谢有密切关系。

(一) 甲状腺激素的生理作用

1. 对代谢的影响

甲状腺激素促进体内糖和脂肪的分解。大剂量的甲状腺激素对糖在小肠内的吸收和肝糖原的分解有促进作用。不超过生理剂量时甲状腺素对蛋白质合成有促进作用，大剂量则促进蛋白质分解。甲状腺素分泌不足时，蛋白质合成减少。甲状腺素分泌过多时，蛋白质分解明显高于正常，可出现负氮平衡，肌肉蛋白分解的增加可引起肌无力。

甲状腺素能提高能量代谢水平，增加组织的耗氧量和产热量。1 毫克甲状腺激素可使人体产热量增加 1000kcal。甲状腺激素分泌过多(甲亢)的病人。因产热增加而怕热喜凉、多汗，基础代谢率常超过正常值的 50%~100%。甲状腺功能低下的病人则产热量减少，喜热畏寒，基础代谢率可低于正常值的 30%~45%。

2. 对生长发育的影响

甲状腺素主要影响脑和长骨的生长发育。甲状腺素除本身对长骨的生长发育有促进作用外，还促进腺垂体分泌生长素，间接地促进长骨生长发育。一个先天性甲状腺功能不全的婴儿，出生时身长与发育基本正常。如在 4 个月内得不到甲状腺素的补充，则将于脑与长骨生长的发育障碍而出现智力低下、身材矮小等现象，称为呆小病。

3. 对神经系统的影响

甲状腺素能提高中枢神经系统的兴奋性。因此，甲亢病人有烦躁不安、多言多动、喜怒无常、失眠多梦等症状；而甲状腺功能低下的病人则有言行迟钝、记忆减退、淡漠无情、少动思睡等表现。

4. 对心血管系统的影响

甲状腺素可使心搏加快、加强，心输出量增大，外周血管扩张。甲亢病人可因心脏做功量增加而出现心肌肥大，最后可导致充血性心力衰竭。

(二) 甲状腺功能的调节

甲状腺功能主要受腺垂体促甲状腺激素(TSH)的调节。TSH 对甲状腺激素合成和释

放的每个环节均有促进作用,同时还能使腺细胞增生,腺体增大。TSH 的分泌又受下丘脑促甲状腺素释放激素(TRH)的调节和甲状腺素的负反馈性调节。下丘脑分泌的促甲状腺素释放激素(TRH)有促进 TSH 合成和释放的作用。甲状腺激素能与腺垂体促甲状腺激素细胞核的特异受体结合产生抑制性蛋白,它能抑制 TSH 的合成与分泌。因此,血液中甲状腺素浓度升高时,TSH 的合成与分泌即减少,甲状腺素的释放也随之减少;反之则增多。这样在下丘脑、腺垂体与甲状腺之间就构成一个完整的自动控制回路,称为下丘脑—腺垂体—甲状腺轴。此外,甲状腺还可进行一定程度的自身调节。

三、肾上腺

肾上腺包括肾上腺皮质(adrenal cortex)和肾上腺髓质(adrenal medulla),二者的形态、结构、胚胎发生、生理作用以及功能的调节都完全不同,是两个独立的内分泌腺。

(一) 肾上腺皮质

肾上腺皮质起源于中胚层。它由三层不同的细胞组成,从外向内分别称为球状带、束状带和网状带。球状带分泌的激素主要参与体内水盐代谢的调节,故称盐皮质激素(mineralocorticoid),主要是醛固酮;束状带分泌的激素称糖皮质激素(glucocorticoid)。人体束状带分泌的糖皮质激素以皮质醇(又名氢化可的松)为主;网状带亦可分泌皮质醇,并可分泌少量的雄性激素和微量的雌二醇。人体各种皮质激素都是以胆固醇为原料经腺细胞生物合成的类固醇激素(steroid hormone),都是含 18~21 个碳原子的环戊烷多氢菲化合物。它们之间生理作用与活性的差异在于不同位置碳上的基团和侧链的不同。

1. 糖皮质激素的生理作用

(1) 对物质代谢的作用

① 皮质醇能促使肝糖原异生,增加糖原的贮存,同时有抗胰岛素作用,使外周组织对糖的摄取和利用减少,因而使血糖浓度升高。糖皮质激素分泌不足时,出现肝糖原降低和低血糖;分泌过多则血糖升高,甚至能引起类固醇性糖尿。

② 皮质醇有促进蛋白质分解、抑制其合成的作用,使蛋白质分解生成的氨基酸在血中的含量增加,并成为糖异生的原材料。

③ 皮质醇可促进脂肪组织中的脂肪分解,使血中游离脂肪酸增加。由于它抑制外周组织对葡萄糖的利用,所以又能间接地促进脂肪的氧化。皮质醇对脂肪代谢的另一重要作用是使体内脂肪的分布发生变化;四肢脂肪减少,面部和躯干脂肪增加,出现所谓的“向中性肥胖”(或“向心性肥胖”)。

(2) 在“应激反应”中的作用

当机体突然受到创伤、手术、冷冻、饥饿、疼痛、感染、惊恐和剧烈运动等不同的刺激时,均可出现血中 ACTH 浓度的急剧增高和糖皮质激素的大量分泌,这一现象称为“应激(stress)反应”。因此,糖皮质激素对机体抵抗有害刺激、维持生存是必需的。

当机体受到有害刺激时,交感—肾上腺髓质系统的活动也大大增强,称为“应急反



应”。此时神经系统的兴奋性、心脏的活动、血流的速度和糖原的分解等均明显提高，有利于动员机体潜在的力量以应付环境的剧变。引起“应激反应”和“应急反应”的刺激是相同的，但反应的途径是不同的，前者是下丘脑—垂体—肾上腺皮质系统活动的增强，后者是交感肾上腺髓质系统活动的增强。二者相辅相成，共同提高机体的应答和适应能力。

(3) 对其他组织器官的作用

皮质醇能增强骨髓造血功能，使血液中红细胞和血小板数量增多，中性粒细胞增多，淋巴细胞数量减少，嗜酸粒细胞数量减少。皮质醇可使肾上腺素和去甲肾上腺素的灭活减慢、减少，这对血管保持正常的紧张性有重要意义。皮质醇有提高中枢神经系统兴奋性的作用。

2. 糖皮质激素分泌的调节

糖皮质激素的分泌主要受腺垂体促肾上腺皮质激素(ACTH)的调节。而肾上腺皮质激素的分泌又受下丘脑促肾上腺皮质激素释放激素(CRH)的调节。与此同时，上述三者之间又存在一定的反馈关系。这样就构成下丘脑—垂体—肾上腺皮质轴。

下丘脑促肾上腺皮质激素释放激素能促进肾上腺皮质激素的合成和释放。在“应激反应”中，下丘脑分泌 CRH 的神经元活动加强，通过 CRH 使肾上腺皮质激素分泌增多，进而促使皮质醇大量分泌。

在正常情况下，糖皮质激素对肾上腺皮质激素和 CRH 分泌有负反馈作用。但在“应激”状态下，这些负反馈作用可暂时失效，肾上腺皮质激素和糖皮质激素的分泌大大增加。此时，可能由于下丘脑和腺垂体对反馈作用的敏感性明显降低，或是强烈刺激绕过正常途径引起 CRH 和肾上腺皮质激素分泌的缘故。

肾上腺皮质对生命的维持十分必要。摘除动物的肾上腺皮质后，动物很快死亡。原因是由于缺乏盐皮质激素和水盐大量丢失而导致循环衰竭，以及由于缺乏糖皮质激素而导致物质代谢紊乱，抵抗力极度降低。

(二) 肾上腺髓质

肾上腺髓质起源于外胚层，能分泌和贮存肾上腺素和去甲肾上腺素，二者都是儿茶酚的单胺类化合物，故统称儿茶酚胺。髓质中肾上腺素与去甲肾上腺素的比例约为 4:1。肾上腺素和去甲肾上腺素的主要生理作用如表 7-2 所示。

表 7-2 肾上腺素与去甲肾上腺素的主要生理作用

	肾上腺素	去甲肾上腺素
心脏	心率加快，收缩力明显增强，心输出量增加	心率减慢
血管	皮肤、胃肠、肾血管收缩；冠状动脉、骨骼肌血管舒张	冠状动脉舒张，其他血管均收缩
血压	上升	明显上升
支气管平滑肌	舒张	稍舒张
代谢	增强	稍增强

肾上腺髓质接受交感神经节前纤维支配。当交感神经节兴奋时,释放乙酰胆碱,后者促进肾上腺髓质激素的合成与释放。肾上腺素和去甲肾上腺素的生理作用与交感神经节后纤维的作用基本上一致。因此,可以把肾上腺髓质视作交感神经的神经节或其延伸部分,一般亦将肾上腺髓质分泌的激素称作拟交感物质。不过它是以激素分泌的方式发挥作用的,具有体液调节的各种特征。除交感神经节前纤维外,ACTH和糖皮质激素对肾上腺髓质的分泌也有促进作用。此外,肾上腺素和去甲肾上腺素对髓质的分泌具有负反馈调节作用。

四、胰岛

胰岛是散在于胰腺外分泌细胞之间的许多内分泌细胞群的总称。人类胰岛细胞中主要有A细胞、B细胞和D细胞。A细胞约占胰岛细胞的20%,分泌胰高血糖素(glucagon);B细胞占50%以上,分泌胰岛素(insulin);D细胞仅占1%~8%,分泌生长抑制素。

(一)胰岛素

胰岛素是由51个氨基酸组成的小分子蛋白质。B细胞首先合成大分子的前胰岛素原,然后加工成胰岛素原(有86个氨基酸),再进一步加工成胰岛素。

1.胰岛素的生理作用

(1)对糖代谢

胰岛素一方面促进全身组织对葡萄糖的利用,并使葡萄糖合成糖原和转变为脂肪,另一方面抑制糖原分解和糖的异生,因而能使血糖降低。胰岛素分泌不足最明显表现为血糖升高,超出肾糖阈,糖随尿排出,称为糖尿病。糖尿病患者使用适量胰岛素,可使血糖维持正常浓度。

(2)对脂肪代谢

胰岛素能促进脂肪的合成与贮存,使血中游离脂肪酸减少,同时抑制脂肪的分解氧化。胰岛素缺乏可造成脂肪代谢紊乱,脂肪的贮存减少,分解加强,血脂升高,引起动脉硬化,进而导致心血管和脑血管系统的严重疾患。与此同时,由于脂肪酸分解增多,生成大量酮体,导致酸中毒,甚至昏迷。

(3)对蛋白质代谢

胰岛素一方面能促进细胞对氨基酸的摄取和蛋白质合成,另一方面抑制蛋白质的分解,因而有利于生长。同时,腺垂体生长激素的促蛋白质合成的作用,必须在有胰岛素存在的情况下才能表现出来。因此,对机体的生长来说,胰岛素也是不可缺少的激素之一。

2.胰岛素分泌的调节

血糖浓度可通过负反馈途径对胰岛素分泌起调节作用。血糖升高可直接刺激B细胞,使胰岛素分泌增多,同时也作用于下丘脑,通过迷走神经引起胰岛素的分泌;低血



糖则可抑制胰岛素的分泌。

胰高血糖素在胰岛内可通过旁分泌作用直接刺激 B 细胞的分泌,入血后又可通过提高血糖浓度而间接促进胰岛素的分泌。此外,甲状腺激素、生长素、皮质醇、孕酮、雌激素等对胰岛的分泌也有促进作用,肾上腺素对胰岛素的分泌则有抑制作用。

(二) 胰高血糖素

胰高血糖素为 29 个氨基酸组成的多肽,也是由一个大的蛋白质前身物质分裂而来。

1. 胰高血糖素的生理作用

胰高血糖素的作用与胰岛素相反,是一种促进分解代谢的激素。它具有很强的促进糖原的分解以及糖异生的作用,因而使血糖升高的效应非常明显。它还能促进贮存脂肪的分解和脂肪酸的氧化,使血液酮体增多,并能使氨基酸迅速进入肝细胞,脱去氨基,异生为糖。对蛋白质也有促进分解和抑制合成的作用。

2. 胰高血糖素分泌的调节

胰高血糖素的分泌与胰岛素相同,也主要受血糖浓度的影响。血糖降低时胰高血糖素分泌增加,反之则减少。此外,还受到胰岛素水平的影响。胰岛素对 A 细胞的直接作用是抑制其分泌,但它可通过降低血糖浓度而间接地促进胰高血糖素的分泌。

五、甲状旁腺

甲状旁腺素(parathyroid hormone, PTH)是由甲状旁腺主细胞所合成的含有 84 个氨基酸的直链多肽。

(一) 甲状旁腺素的生理作用

甲状旁腺素具有升高血钙、降低血磷的作用。其主要靶器官为骨、肾和小肠。体内 99% 以上的钙主要以磷酸盐的形式贮存在骨组织内。骨组织中贮存的钙和血浆中游离的钙处于动态平衡之中。甲状旁腺素可动员骨钙入血,故能提高血钙浓度。血钙保持一定浓度对维持神经和肌肉正常的兴奋性十分重要。

甲状旁腺素对肾的作用是促进远曲小管对钙的重吸收,抑制近曲小管对磷酸盐的重吸收,使尿钙减少,尿磷增加。另一重要作用是激活近曲小管上皮细胞内 1,25-羟化酶,促进维生素 D₃ 转化成它的活性形式 1,25-二羟维生素 D₃。而后者对钙在肠内的吸收具有促进作用。

在对钙的调节过程中,降钙素和维生素 D₃ 也发挥重要作用。降钙素是甲状腺腺泡旁细胞(又名“C”细胞)所分泌的,其生理作用主要是抑制原始骨细胞向破骨细胞转化,并促进破骨细胞转化为骨细胞,同时抑制破骨细胞的活动,故降钙素能使血钙浓度降低。降钙素还能抑制肾小管对钙、磷、钠、氯的重吸收。降钙素的分泌主要受血钙浓度的反馈性调节。血钙浓度升高时其分泌增多,反之则分泌减少。人体内维生素 D₃ 除来



自食物外,相当一部分是皮肤中的7-脱氢胆固醇经日光照射转化而成的。来自食物和皮肤内生成的维生素D₃活性很低,必须在肝内变成25-羟-维生素D₃,再在肾内进一步变成1,25-二羟维生素D₃,才具有活性。它的主要作用是促进小肠上皮对钙的吸收,使血钙升高;同时它在骨钙动员和骨盐沉着两方面均有作用,是骨更新重建的重要因素。缺乏维生素D₃,可引起儿童佝偻病和成人骨软化症。PTH可促进1,25-二羟维生素D₃的生成,降钙素对其生成有抑制作用。它本身对自己的生成也有负反馈性调节作用。

(二) 甲状旁腺素分泌的调节

甲状旁腺素的分泌主要受血钙浓度的调节,血钙浓度降低时,其分泌增加,反之则减少。

六、性腺

男性的性腺器官是睾丸。它具有双重功能,既是男性生殖器官,又是分泌雄性激素的内分泌腺。睾丸分泌的主要激素是睾酮(testosterone),女性的性腺器官是卵巢。卵巢也具有双重功能,它可产生卵子,并分泌多种激素,其中主要是雌激素(estrogen)和孕激素(progestogen),还有少量雄激素。

(一) 睾酮的生理作用

1. 促进男性附性器官的发育和副性征的出现

睾酮能刺激前列腺、阴茎、阴囊和尿道等的发育和生长,并促进青春期后男性副性征或第二性征出现,主要表现有生胡须、嗓音低沉、喉头突出、毛发呈男性型分布、骨骼粗壮、肌肉发达等,这些都是在睾酮刺激下发生并维持的。

2. 促进体内蛋白质合成

睾酮能促进体内的蛋白质的合成代谢,特别是肌肉、骨骼肌等器官内的蛋白质合成,出现正氮平衡。

(二) 雌激素的生理作用

1. 促进女性附性器官的发育和副性征的出现

雌激素可促进女性的附性器官如子宫、输卵管、阴道和外生殖器的发育,可促进乳房发育、刺激乳腺导管系统增生、产生乳晕并使脂肪和毛发分布、音调、体形等表现出一系列女性副性征,并使之维持于成熟状态。

2. 对代谢的影响

雌激素可影响钙磷代谢,刺激成骨细胞的活动,有利于水和钠在体内保留,促进肌肉蛋白质的合成,故对青春期发育与成长起重要的促进作用。



（三）孕激素的生理作用

孕激素的主要作用是为受精卵在子宫内着床和保证妊娠作准备，它通常要在雌激素作用的基础上才能发挥作用。

1. 孕激素使子宫内膜进一步增生变厚，且有腺体分泌，以利于受精卵着床。与此同时，它能抑制子宫平滑肌的活动，保证胚胎有一个比较安静的环境。
2. 促进乳腺腺泡和导管的发育，为分娩后泌乳准备条件。

第三节 激素分泌的调控

一、激素分泌的负反馈调控

激素的释放并非是一个连续过程，而是呈间歇性释放，因而使血浆中激素的水平会呈现各自特有的节律性变化，如睾酮的近似昼夜节律变化，雌激素近似月节律变化等。

由于激素对细胞有非常精确的效应，其分泌活动也必然会受到精确的调控，否则必然导致机能失调。激素分泌主要的调控方式是“负反馈”(negative feedback)机制。在这种调控机制中，导致某种激素分泌减少或终止的原因，正是归因于自身水平的变化。其调控过程是：某种激素分泌增多会引起体内发生某些变化，而这些变化最终反过来会抑制该激素的分泌活动，即某种激素的分泌活动往往是由它所诱发的特异性生理反应所“打开”或“关闭”的。

图 7-3 所示为血中胰岛素水平负反馈调控示意图。如图所示，血糖浓度升高会刺激胰岛增加胰岛素的分泌，而胰岛素会加速细胞对葡萄糖的消耗，从而使得血糖降低。血糖降低的信息“反馈”给胰腺，便会对胰岛素的分泌产生一个“负”的即“分泌减少”的效应，因此称其为“负反馈”。换言之，胰岛素作用的结果（即血糖降低）最终导致了自身分泌活动减少或终止。负反馈调控机制是内分泌系统活动保持稳态的主要机制。

神经系统也会涉入激素分泌活动的调控过程。例如，肾上腺髓质分泌肾上腺素和去甲肾上腺素的活动就受控

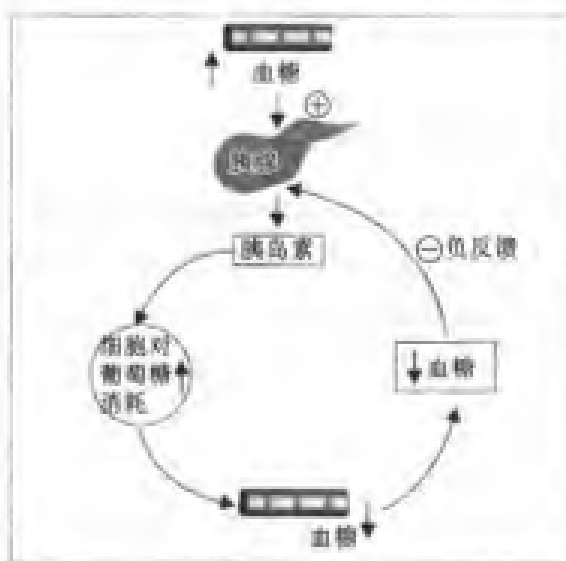


图 7-3 胰岛素分泌活动负反馈调控示意图

于交感神经系统；而神经垂体释放抗利尿激素(ADH)的活动则受控于大脑。况且内分泌活动的最高位调控中枢——下丘脑，其自身就属于神经系统。

二、激素分泌的调控功能轴

(一) 内分泌功能轴的概念

人体的内分泌腺很多，但它们在功能上并非处于同一个层次。有的属于上位内分泌腺，有的属于中位内分泌腺，有的则属于下位内分泌腺。上位内分泌腺所分泌的激素(这些激素称为释放激素或释放抑制激素)一般并不直接作用于身体器官，而是以某个特定的内分泌腺(如中位内分泌腺)作为靶腺体(target gland)，即利用自身所分泌的激素调控另一个内分泌腺(中位内分泌腺)的功能活动。中位内分泌腺的分泌活动受控于上位内分泌腺，它自身所分泌的激素(促激素)，也不直接支配身体器官，也是以别的内分泌腺作为靶器官。最后，在上位内分泌腺和中位内分泌腺共同调控作用下，下位内分泌腺所分泌的激素才真正调控着靶器官、靶组织和靶细胞的功能活动。

如上所述，内分泌腺通常并非单独起调节作用，而是以“一条线”发挥作用，即下位内分泌腺分泌激素支配靶器官；中位内分泌腺分泌“促激素”支配下位内分泌腺，同时又受控于上位内分泌腺所分泌的“释放激素或释放抑制激素”；最后，上位内分泌腺受控于大脑皮质。内分泌这种以“一条线”发挥作用的方式，被称做“内分泌功能轴”。

人体的上位内分泌腺是下丘脑，它受控于大脑皮质。下丘脑主要分泌各种“释放激素或释放抑制激素”，如促肾上腺皮质激素释放激素(CRH)、促甲状腺素释放激素(TRH)、促性腺激素释放激素(GnRH)、生长激素释放激素(GHRH)、生长激素释放抑制激素(GHRIH)等。下丘脑所释放的“释放激素或释放抑制激素”所作用的主要中位内分泌腺是腺垂体或称脑垂体腺部。腺垂体在内分泌的调控过程中担当着非常重要的角色。一方面它要“承上”，即接受“释放激素或释放抑制激素”对自身活动的调控；另一方面又要“启下”，即通过分泌“促激素”调控下位内分泌腺的功能活动。下位内分泌腺接到中位内分泌腺分泌的“促激素”，会加强自身的分泌活动。最后，下位内分泌腺所分泌的激素入血并作用于相应的靶器官、靶组织或靶细胞。

(二) 人体三大内分泌功能轴

1. 下丘脑—垂体—肾上腺轴(HPA轴，亦称应激轴)

鉴于这条内分泌轴的动员与机体抵抗内外刺激的应答性反应有关，故亦称之为应激轴，这是与身体运动关系最为密切的内分泌功能轴。下面以运动为例简述这条功能轴的作用过程。身体运动会刺激大脑皮质；在大脑皮质作用下，下丘脑会加强对促肾上腺素释放激素的分泌活动，并作用于腺垂体，加强腺垂体释放促肾上腺皮质激素；腺垂体所释放的促肾上腺皮质激素作用于肾上腺皮质，会加强肾上腺皮质释放肾上腺皮质激素；最后，肾上腺皮质激素作用于有关靶器官、靶组织或靶细胞，通过增强能量代谢等反应，对运动产生应激。



2. 下丘脑—垂体—甲状腺轴(HPT 轴)

这条功能轴的作用过程为:在大脑皮质作用下,下丘脑分泌促甲状腺素释放激素作用于腺垂体,加强了腺垂体释放促甲状腺素;腺垂体所释放的促甲状腺素作用于甲状腺,会加强甲状腺释放甲状腺素;最后,甲状腺素作用于靶器官、靶组织或靶细胞,增强其代谢活动等。

3. 下丘脑—垂体—性腺轴(HPGn 轴)

这条功能轴的作用过程大体为:在大脑皮质作用下,下丘脑分泌促性腺激素释放激素作用于腺垂体,加强了腺垂体释放促性腺激素;腺垂体所释放的促性腺激素作用于性腺,会加强性激素的分泌活动;最后,性激素作用于不同的靶器官和靶组织,引起不同的生理效应。

(三) 内分泌功能轴间的相互作用

如上所述,人体的内分泌功能常常是以功能轴(或功能系统)形式发挥作用的,每一个功能轴都发挥着不同的生理功能。如机体通过下丘脑—垂体—肾上腺轴对强烈刺激进行抵抗和应答;通过下丘脑—垂体—性腺轴调节生殖功能与性功能;通过下丘脑—垂体—甲状腺轴调节代谢过程与生长发育等。但这些功能也常有互相矛盾之处。如剧烈运动时,机体会动员出几乎全部潜能来满足运动需求,这势必影响到其他功能轴的正常的生理活动。而其他生理功能也欲在运动过程中尽量保持自身的稳定。所以各个功能轴的功能活动之间必定存在着互相影响的关系。整个内分泌系统,包括内分泌腺、内分泌组织与内分泌细胞,之所以能够相互影响、相互协调又相互拮抗,归因于内分泌细胞膜上存在不同的激素受体,因而可同时接受不同激素的调控。

由此,人体在对体内外某种变化发生应答性反应时,内分泌系统的变化必然是极其复杂和精细的。运动时,在大脑皮质控制下,骨骼肌进行随意运动,会消耗大量的能量,并产生大量的代谢产物,因而机体对氧气和能量底物等的需求就会急剧增加。为了满足这种需求,能量代谢系统以及心血管、呼吸系统均会高度动员,以便应付机体急需。这一方面靠交感神经兴奋(同时对副交感神经的活动进行抑制),另一方面则通过刺激下丘脑加速分泌 CRH 激活下丘脑—垂体—肾上腺轴,加速肾上腺皮质激素的分泌活动;并通过 CRH-LC/交感肾上腺系统加速肾上腺髓质对肾上腺素与去甲肾上腺素的分泌活动。肾上腺皮质激素与髓质激素联合作用,会通过加快能量代谢,加强心血管系统与呼吸系统的活动,实施运动时全身血流的重新分配等,满足运动时运动器官的高度需求。与此同时,下丘脑还会通过加速分泌生长素释放抑制激素抑制下丘脑—垂体—甲状腺轴与下丘脑—垂体—生长激素等内分泌轴的功能活动。此外,应激轴上的上位、中位和下位激素,也会通过抑制其他内分泌轴的上位、中位和下位内分泌腺,影响它们的功能活动。

当然,即使在运动应激的情况下,受抑制的其他内分泌功能轴和功能活动(包括免疫功能)也会通过自身分泌的激素等物质反作用于神经系统和应激轴,尽力维持自稳态,

防止机体反应过度，保证机体安全。运动性疲劳以及运动性免疫抑制现象之所以属于机体的保护性抑制，其作用机理可能与这种反作用有密切关系。

内分泌对运动的反应与适应（参考内容）

运动训练对机体是个非常强烈的刺激，能够引起绝大多数激素发生程度不等的变化。这种变化通常可直接反映出激素分泌速率和清除率之间的平衡关系。

一、儿茶酚胺

儿茶酚胺是肾上腺素与去甲肾上腺素的统称。儿茶酚胺由肾上腺髓质所分泌，属于应激激素，在机体对内外环境变化发生的应答性反应中起着非常重要的作用。由于肾上腺髓质受交感神经支配，故同交感神经系统的功能状态密切相关。在运动应激状态下，交感神经系统被激活，所以在运动期间儿茶酚胺必然升高，且升高的程度与运动强度密切相关，即运动强度越大，升高的幅度也相应越大。

研究表明，男女受试者在进行次最大运动期间儿茶酚胺的增加相似。男子完成简单的反复性最大运动（如尽全力数秒钟冲刺跑）会引起血中肾上腺素水平明显升高，可达安静水平 18 倍，去甲肾上腺素也表现出类似变化。但运动强度过小则不会引起血中儿茶酚胺水平发生明显变化。这似乎表明，引起儿茶酚胺增加有一个最小的强度阈值。

儿茶酚胺的分泌对长期运动训练有适应性。这种适应性表现为随运动训练水平提高，对同一负荷方式，儿茶酚胺分泌的增高幅度越来越小（图 7-4）。请注意图中儿茶酚胺的量值随训练经历所发生的大幅度下跌现象（去甲肾上腺素跌幅达 50%，肾上腺素跌幅达 75%），以及儿茶

酚胺对多次运动训练刺激发生适应性变化的快速性。受试者仅经过一周训练，肾上腺素水平幅度下降了 40%，去甲肾上腺素水平幅度也下降了 25%。在完成一次力竭性运动后，训练水平高的运动员血浆儿茶酚胺水平高于他们尚未介入运动训练前的水平，即有训练者在力竭时儿茶酚胺水平反而更高。

运动时儿茶酚胺水平升高显然对运动能力有重大促进作用。

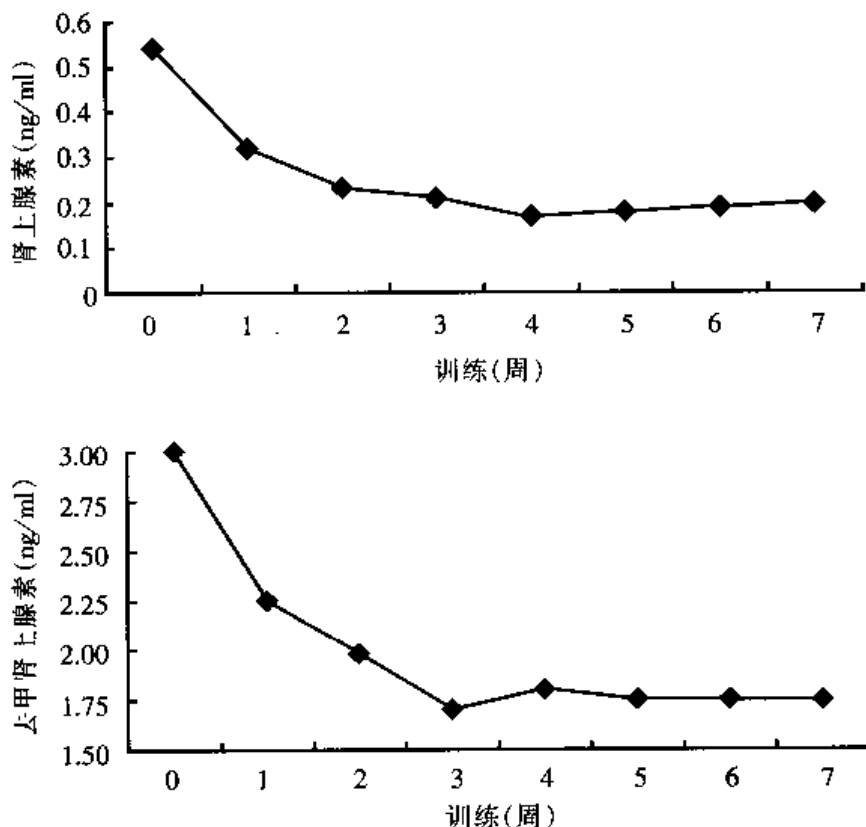


图 7-4 运动过程中肾上腺素和去甲肾上腺素的变化



肾上腺素与去甲肾上腺素对心血管系统和代谢系统的功能均有加强作用。经过一段时间运动训练后,完成同等运动负荷时儿茶酚胺的反应降低(升幅变小),表明运动能力改善,机体对同样负荷刺激的“总的”刺激变小,从而不需要发生如同过去那样强烈的应答性变化。

二、糖皮质激素与促肾上腺皮质激素

糖皮质激素(GC,可的松)与促肾上腺皮质激素(ACTH)也属于应激激素。糖皮质激素由肾上腺皮质所分泌,而促肾上腺皮质激素(ACTH)由腺垂体所分泌,属于糖皮质激素的上位促激素。

可的松的分泌活动受控于 ACTH,所以它在运动过程中的变化,可能与腺垂体所分泌 ACTH 水平升高有关。据报道,令受试者以 $80\% \dot{V}O_{2\max}$ 跑步 20 分钟后,或者完成渐增负荷运动直至力竭,静脉血浆中 ACTH 水平分别超出安静水平 2~5 倍。

可的松分泌增多是机体对刺激发生应答性变化的一般反应。因此,它的分泌活动与刺激的强度成正相关。在完成小强度负荷时,由于该运动负荷对机体的刺激作用非常小,因而血中可的松水平不会发生明显的改变。而在完成力竭性运动期间,由于刺激几乎达到最大,可的松水平也就会相应升高。可的松升高对于运动的重要贡献之一,在于它能促进肝脏的糖异生活活动,即促进体内的非糖物质(如蛋白质)加速生成葡萄糖,使得运动时可供机体利用的能量底物增多。

三、生长激素

生长激素(GH)由垂体分泌。运动时血液中生长激素的浓度升高,并且随运动强度加大其升高幅度越大(图 7-5)。令受试者在功率自行车上以不同强度运动 20 分钟,其结果是:以小负荷($300\text{kgm}\cdot\text{min}^{-1}$)运动时,血中生长激素水平几乎没有变化;然而当工作负荷达到 $900\text{kgm}\cdot\text{min}^{-1}$ 时,血中生长激素水平增加到安静水平的 35 倍之多。

运动时生长激素的升高同运动员的训练水平有关。在完成相同强度负荷时,训练水平较低者血液中的生长激素水平高于训练水平高者。力竭性运动后,训练水平较高者血中生长激素的下降速度快于训练水平较低者。

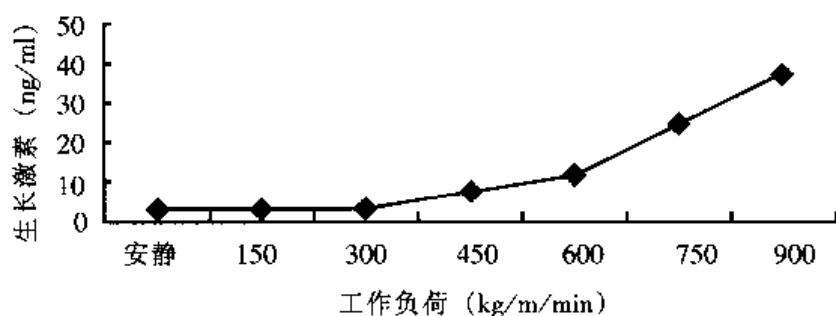


图 7-5 递增负荷运动过程中生长激素的变化

四、抗利尿激素和盐皮质激素

抗利尿激素(ADH)由神经垂体所分泌,而盐皮质激素(醛固酮)则由肾上腺皮质所释放。这两种激素均参与体内电解质平衡、水代谢以及维持体液容量的调控过程。运动期间,人体会丢失大量的 H_2O 和 Na^+ ,尤其是在热环境下从事长时间运动,这时,机

体便会动员激素调控机制维持血浆容量。其调控过程为：①运动会引起神经垂体释放ADH，以及促进肾脏的特定细胞释放肾素（一种可分解蛋白质的酶）。②ADH通过作用于肾脏集合管，加强对水的重吸收。③肾素作用于称之为血管紧张素Ⅰ的血浆蛋白使之变为血管紧张素Ⅱ；血管紧张素Ⅱ可刺激肾上腺皮质释放醛固酮。醛固酮促进肾脏远曲小管加强对钠的重吸收作用，而随着钠的重吸收会加强对水的被动重吸收。至此，通过一系列调控过程，最终使得体内的钠和水得到保留，即起到保水作用。

运动时醛固酮、肾素、血管紧张素Ⅱ以及ADH升高。但有研究发现，从事同样强度的活动跑台运动，训练水平高者与训练水平低者血中ADH升高的水平相似，表明这种激素也许并没有训练效应。

五、胰岛素和高血糖素

胰岛素分泌增多会引起细胞消耗的葡萄糖增多，从而导致血糖水平降低。此外，还可抑制肝脏释放葡萄糖，以及抑制脂肪组织释放脂肪酸。胰高血糖素正好导致相反的效应，即它可加速肝脏糖异生过程中的脂动员，以及促进脂肪组织释放脂肪酸。运动时，葡萄糖和脂肪酸均需作为代谢燃料，故高血糖素升高而胰岛素降低。

运动训练前后胰岛素与高血糖素的变化过程如图7-6所示。该实验测试负荷为60分钟的自行车次最大运动，测试负荷强度为 $60\% \dot{V}O_{2\max}$ 。运动训练计划为期10周，每日40分钟的跑步与自行车运动，每周训练4次。尽管10周运动训练前后两种激素在测试负荷过程期间的总的变化趋势未发生明显改变，但运动训练后两种激素的变化幅度却较运动训练前小得多。

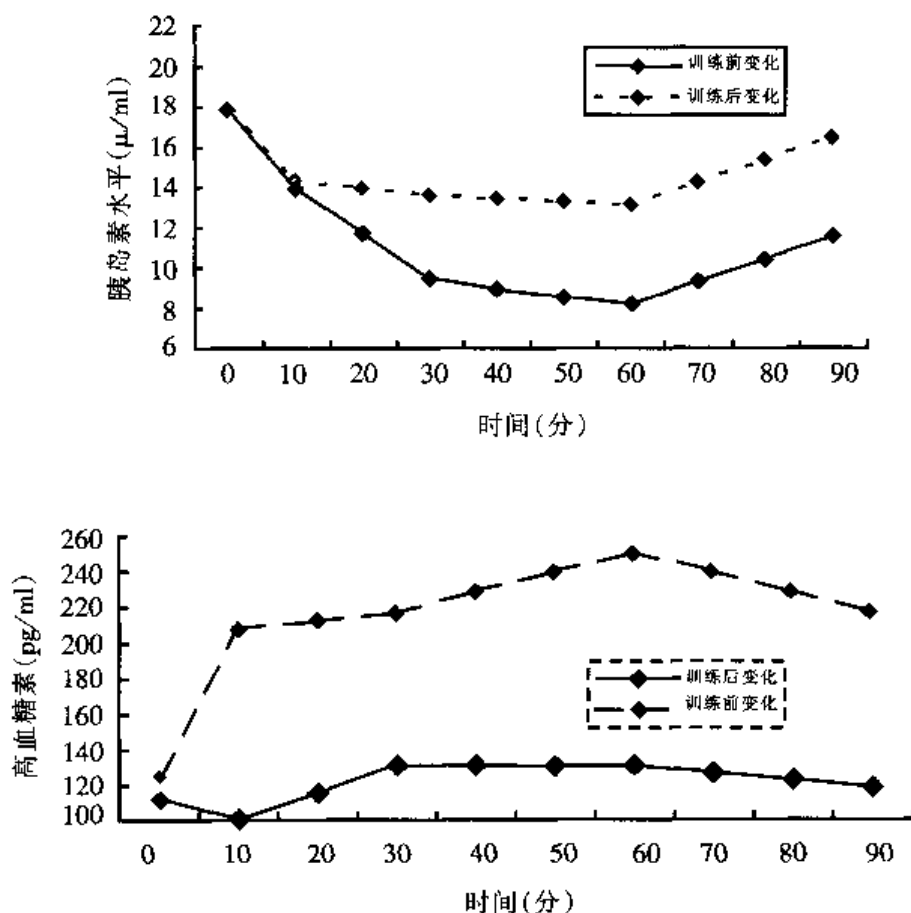


图7-6 运动训练前后胰岛素与高血糖素的变化



必须注意运动期间血糖水平与循环血中胰岛素、胰高血糖素水平之间的微妙关系。运动期间胰岛素水平降低,并非意味着肌细胞利用的葡萄糖有所减少,实际上反而有所增多。这可能与胰岛素的“敏感性”增加有关,即较少的胰岛素可以完成同样多的任务。这种“高敏感性”状态在1小时适量运动后,至少会维持48小时。

兴奋剂(参考内容)

一、兴奋剂概念

兴奋剂(Doping)是指国际体育组织规定的禁用药物和方法的统称。国际奥林匹克委员会(International Olympic Committee, IOC)医学委员会规定:“竞赛运动员使用任何形式的药物或以非正常量、或通过不正常途径摄入生理物质,企图以人为的不正当的方式提高他们的竞争能力即为使用兴奋剂。”国际奥委会又进一步对使用兴奋剂作了更加明确的规定:使用兴奋剂违反体育和医学科学的伦理道德;使用兴奋剂包括使用属于禁用药物类的有关物质和使用各种不同的禁用方法。

根据1998年公布的《国际奥委会医务条例·禁用物质种类与禁用方法》,兴奋剂分为三大类,即禁用药物、禁用方法和限制使用药物。禁用药物包括刺激剂、麻醉剂、利尿剂、蛋白同化制剂以及肽类激素。禁用方法包括血液兴奋剂(即血液回输)和尿样篡改法。目前,被明确举例的禁用、限用药物有100多种,“相关化合物”有上千种。

二、兴奋剂分类与作用特点

(一)禁用药物

1.刺激剂

包含能够增加刺激性、暂时驱减疲劳以及可能增加竞争性、攻击性等生理作用的各种物质,如以苯丙胺(安他非明)为代表的中枢神经刺激剂药物;以麻黄素为代表的末梢交感神经刺激剂。刺激剂是兴奋剂类别中使用历史最长的一类违禁药物,目前最常见有苯丙胺、安米奈丁、咖啡因、可卡因、麻黄素类、戊四唑、舒喘宁、沙美特罗等40余种。

刺激剂作用于中枢或外周神经系统,可使运动员的行为和能力得到较快地调整。有的运动员认为:刺激剂将提高肌肉的工作效率,减缓或加速消除疲劳,使他们能够承受持续时间长、运动强度大的训练。也有运动员认为:刺激剂可以使他们更有攻击性和进取精神。然而,由于刺激剂的使用造成了机体的机能和代谢活动出现极度亢奋状态,导致身体的机能和物质储备过度消耗,容易出现严重的机能衰竭症状。

2.麻醉剂

麻醉剂包括鸦片、吗啡、杜冷丁等麻醉止痛药剂及其在化学药理学方面的同类药物。运动员使用麻醉剂药物主要出于缓解伤痛、放松精神、延长运动时间等目的。麻醉剂的一些主要生理作用与刺激剂相反,前者主要强化中枢神经系统的抑制过程。

3.利尿剂

利尿剂是用来促进体液或体液中某种物质从组织中快速排除的主要药物。一方面,违规使用这类药物的运动员,多见于举重、拳击和摔跤等需按体重大小划分级别的重竞技项目,这些人企图通过迅速减轻体重以参加较小级别的比赛;另一方面,也有些人将

使用利尿剂作为一种掩蔽手段,通过快速、大量排尿,降低尿中含有禁用药物的浓度,以达到逃避药检呈阳性。目前,禁止使用的利尿剂有乙酰唑胺、利尿酸、速尿、双氢克尿塞、甘露醇等13种。

4. 蛋白同化制剂

蛋白同化制剂也称同化激素,因属于合成代谢类药物(如合成代谢雄性激素类固醇和 β_2 受体激动剂),故又被俗称为合成类固醇。在竞技体育比赛和训练过程中,违禁使用蛋白同化制剂的案例时有发生,尤其是在力量、速度性比赛项目中,运动员常出于增加肌肉爆发力和耐力、改变身体成分、增长瘦体重等目的而使用这类药物。

目前,在兴奋剂检测中,检出常使用的合成类固醇包括去氢表雄酮、甲基异睾酮、康力龙、睾酮、沙美特罗等三十多种。

5. 肽类激素

肽类激素包括绒毛膜促性腺激素(CG)、促肾上腺皮质激素(ACTH)和生长素(GH),以及这些药物的上级调节释放因子。促红细胞生成素(EPO)也属此类被禁药物。

男性使用绒毛膜促性腺激素及其他有关活性的化合物,能促进其雄性激素水平升高。因此,将使用此物质与睾酮同等看待。鉴于目前精确检测和准确判定非内源性GH和EPO浓度有一定的难度,GH和EPO被有的运动员分别作为合成类固醇的替代产品或提升红细胞、血红蛋白水平而使用。但随着血检工作的广泛展开和检测技术的不断创新,各种难题将得到根本解决。

(二) 禁用方法

1. 血液兴奋剂

血液兴奋剂(blood doping)又称血液回输,是一种使用兴奋剂手段,它通过将血液回输到人体达到增加血液中红细胞浓度的目的。使用血液兴奋剂有两种方法,一是自体血液回输,即在比赛前一段时间,将自身血液抽出,经过处理后储备起来(如间隔6~8周),待比赛前一定时机,再回输入到本人体内。二是异体输血。血液兴奋剂主要是直接提高运动员体内氧运输能力,对于提高耐力性项目成绩能起一定的作用。

2. 尿样篡改法

尿样篡改法是指在兴奋剂检查中,被检者使用特殊物质和方法,有意改变或企图改变尿样的完整性和确实性。另外,使用导尿、替换尿样、使用药物抑制肾脏分泌或使用某种药物来改变尿样中违禁药物成分的测量值,也属违禁之列。布罗曼坦、表酮、丙磺舒等具有掩盖功能(尿样篡改作用)的药物,将被视为兴奋剂而被列为禁用。

(三) 限制使用药物

限制使用药物包括肾上腺皮质激素类、局部麻醉剂、大麻、乙醇和 β -阻断剂。其中,国际奥委会规定:除局部使用(直肠使用例外)、吸入、关节内或局部注射用以外,禁止其他途径和方式使用肾上腺皮质激素类物质(如可的松、强的松等);若队医在比赛期间为治疗伤病而需给运动者使用,必须在赛前向有关医务当局递交书面报告。 β -阻断剂因具有降低血压、减慢心率和阻断刺激性反应的作用,有可能被某些需要稳定情绪的比赛项目(如射击)运动员使用。



三、作用机制

本部分主要介绍蛋白同化制剂、肽类激素和血液兴奋剂的作用机制。

(一)合成类固醇的作用机制

促进男性性器官的生长与发育,维持第二性征;促进蛋白质和骨质的合成,使蛋白质的分解降低;儿童期服用,能够加速身材的增长,但骨成熟相对提前;能够促进红细胞刺激因子生成而使红细胞和血红蛋白增加,并刺激骨髓造血功能。运动员服用该类药物主要是利用它能促进蛋白质的合成,使蛋白质的分解降低,从而增加肌肉的体积,使力量和耐力增加,提高运动成绩(参见类固醇激素作用机理)。

(二)肽类激素的作用机制

生长激素是一种同化激素,能促进蛋白质的合成和脂肪分解,并影响糖代谢,其作用与蛋白同化制剂相一致。绒毛膜促性腺激素(hCG)是由胎盘滋养层所分泌,为一种糖蛋白,可分解为 α 、 β 两个亚基,每个亚基均含有若干个糖分子构成的侧链。由于hCG与LH的 α 亚基相同,且 β 亚基亦很相似,故生物活性亦类似。LH可促进睾丸间质细胞分泌睾酮,使用hCG实际上是为了达到与使用合成类固醇同样的效果。

(三)血液兴奋剂的作用机制

在竞技体育中,运动员的有氧供能能力对耐力性运动项目成绩有直接的影响。提高人体有氧耐力的一个关键环节,就是要提高血液的输氧能力。当血细胞、血红蛋白数目适当的增多后,机体运送氧的能力明显增强。目前,国内外盛行的高原训练法和模拟高原训练法(低氧训练法),其机理就是利用缺氧环境的刺激作用,通过服习过程使体内的RBC和Hb水平代偿性增加,从而提高循环系统的输氧能力。血液兴奋剂则是通过把自身血液抽出并处理后,储存6~8周,在比赛前再回输本人,直接增加循环血液中的RBC数量和Hb浓度,从而增强了运输氧的能力,为取得好成绩打基础。EPO的作用是通过促进RBC的生成过程,间接提升RBC数量和Hb水平。所以,其作用的显现速度没有血液兴奋剂快。

四、使用兴奋剂的危害

(一)对运动员生理机能的危害

凡是使用兴奋剂的人员都有一个共同特征:为追求运动成绩而不顾身体健康滥用违禁药物,从而导致生理机能的障碍和破坏。

滥用合成类固醇药物可导致男性运动员乳房发育、睾丸萎缩、精子减少甚至丧失生育能力;女性运动员则身体出现浓重的体毛、喉结增大、嗓音变粗、整个体态男性化。长期大量服用会引发肝、肾损害和脑、肝、前列腺癌。

经常使用刺激剂将造成中枢神经系统功能失调,使机体和精神状态长期处于极度亢奋之中,机体不堪重负,出现精神崩溃,机能衰竭,严重时导致内脏出血,甚至死亡。麻醉剂大量的使用将掩盖伤痛及病情,导致受伤肌体组织继续受损甚至残疾。促红细胞生成素(EPO)的大剂量、长时间使用,可能造成血液流变学和血流动力学特征改变,血黏度明显升高,血液流速变慢,阻力增加,引起中风和心脏病。

大量服用外源性的人工合成激素,补充人体生成的激素,将使人体自身的内源性激素分泌功能受到反馈性抑制,导致内分泌腺机能减退症状。一旦停药,机体不能分泌足

够量激素维持生理机能活动,从而危害身体健康,出现一系列内分泌腺机能减退症状。

长期大剂量服用兴奋剂,还将导致内脏器官解剖结构的器质性改变,引发各种严重疾病,甚至死亡。据资料统计,二战后全世界确定和怀疑因长期服用兴奋剂而导致猝死的运动员大约有150人,其中不少人是各种比赛的金牌获得者。

(二)对运动员心理机能的危害

兴奋剂的严重副作用,还包括它对人体心理机能的损害。长期使用神经刺激剂,使人亢奋、疯狂;麻醉剂有致幻成分,当药物引起的快感消退后,人的精神将处于一种焦虑、沮丧、抑郁状态,情绪上不能自制。类固醇和EPO、hGH等药物还能使人产生对他人的敌意和侵犯心理,对他人的攻击性明显增强。据1994年美国的一项调查,大约20%的类固醇服用者承认自己患有情绪综合症。国外还有调研显示,服用兴奋剂的大学预科生与不服药者相比有心理疾病的比值明显偏高。

总之,使用兴奋剂违背了体育道德的基本原则和根本目的,损害了运动员的身心健康,也阻碍和破坏了竞技体育的健康发展及体育文化的繁荣,成为体育界乃至整个世界的一种丑恶行为。

【小结】

1. 身体运动对机体产生了强烈的刺激,使内环境产生剧烈变化,并需要神经系统和内分泌系统对各种身体机能进行精密整合。内分泌调控是通过内分泌腺所分泌的生物活性物质——激素来实现的。

2. 激素分为类固醇激素和非类固醇激素两类,它们具有信息传递作用及高效生物放大效应,且其作用具有相对特异性,这种特异性归因于激素与细胞受体之间“钥匙”与“锁”的关系。鉴于类固醇激素与非类固醇激素在能否穿过细胞膜上的差异,两者作用机制不完全相同:前者可以进入细胞内与胞内受体构成复合物并进入细胞核,激活某些基因;后者与膜受体结合形成复合体,促使第二信使cAMP的形成,并诱发继发性的生理反应。

3. 大多数激素的分泌活动受负反馈机制调控,即某种激素分泌增多所引起的生理变化会反过来导致该激素分泌活动减弱。

4. 内分泌腺之间有着复杂的相互作用关系,既相互对立相互影响、又彼此协作,共同维持机体稳态。内分泌腺并非处于同一层次,而有上位、中位与下位内分泌腺之分。下位内分泌腺的分泌活动接受上位促激素的调控,从而以线状形式发挥作用,这种关系称为功能轴。不同内分泌功能轴之间相互作用对身体机能进行整合。

【思考题】

1. 内分泌、内分泌腺和激素的概念。
2. 激素的分类以及作用的一般特征。
3. 类固醇激素的作用机制。
4. 非类固醇激素的作用机制。
5. 激素分泌活动的负反馈调节。



6.内分泌功能轴的形成与作用过程。

7.内分泌功能轴之间的相互作用。

【主要参考文献】

1. 曹泽毅主编:《激素受体及其临床应用》,北京,北京医科大学中国协和医科大学联合出版社,第1版,1993。

2. 体育学院通用教材:《运动生理学》,北京,人民体育出版社,1989。

3. 杨锡让主编:《实用运动生理学》,北京,北京体育大学出版社,第2版,1998。

4. 张镜如主编:《生理学》,北京,人民卫生出版社,第4版,1996。

5. 杨锡让主编:《运动生理学进展》,北京,北京体育大学出版社,2000。

6. Merle L. Foss, Steven J. Keteyian: Exercise and endocrine system, Physiological basis for exercise and sport, sixth edition, McGraw-Hill, 1998.

7. Foss M. L, Fox's physiological basis for exercise and sport, WCB/McGraw-Hill, c1998.

8. Hyllegard R, Interpreting reseach in sport and exercise science, Mosby, c1996.

9. Williamm E. G (Editor), exercise and sport science, Lippincott Williams & Wilkins, c2000.

10. Sharon A. P, Exercise physiology for health, fitness, and performance, Allyn & Bacon, c1997.

11. Merle L. F, Fox's physiological basis for exercise and sport, McGraw-Hill.

12. DeVeries H. A, Physiology of exercise for physical education, athletics, and exercise science, WCB Brown & Benchmark, c1994.

13. Powers S. K, Exercise Physiology: theory and application to fitness and performance, Brown & benchmark Publishers, c1994.

14. Ploman S. A, Exercise physiology for health, fitness, and performance, Allyn & Bacon, c1997.

15. Robergs R. A, Exercise physiology: exercise, performance, and clinical application, Mosby, c1997.

16. McArdle W. D, Exercise physiology: energy, nutrition, and human performance, Williams & Wilkins, c1996.

(西安体育学院 郝选明)

第八章

感觉与神经机能

【提要】本章概述感觉的形成，重点介绍与体育运动关系密切的位觉、本体感觉、视觉、听觉的功能活动、基本生理现象和机制，阐明各级中枢对躯体运动系统的控制、影响与整合。并简介了人类脑的高级神经活动和睡眠产生机制。

神经系统对躯体运动的调节功能是通过反射来实现的。反射活动是从感觉开始，以肌肉活动而告终。

第一节 感觉器官

人的感觉机能对完成运动动作具有重要意义，是提高运动能力的重要生理基础之一。在长期从事运动训练的过程中，人体的感觉功能也会相应得到提高。

一、概述

感受器(sensory receptor)是指分布在体表或组织内部的一些专门感受机体内、外环境改变的结构或装置。例如，视网膜中的视杆细胞和视锥细胞是光感受细胞；耳蜗中的毛细胞是声波感觉细胞。感受器官(sense organ)是指感受器与其附属装置共同构成的器官。如眼、耳、鼻、舌、皮肤等。感受细胞把机体内、外环境中的各种刺激转变为电位变化，以神经冲动的形式通过感觉神经纤维传向中枢特定部位，最后在大脑皮质上产生各种感觉。

(一) 感受器的一般生理特征

1. 适宜刺激

每种感受器都有它最敏感的刺激，这种刺激就是该感受器的适宜刺激。例如，视网膜上视锥细胞和视杆细胞的适宜刺激是 300~800nm 光波。耳蜗毛细胞的适宜刺激是 16~20 000Hz(赫兹)的声波等。

2. 换能作用

各种感受器可将其所接受的各种形成的刺激能量转换为神经冲动传向中枢，故称为



感受器的换能作用。

3. 编码作用

感受器不仅将外界刺激能量转变成电位变化,同时将刺激的环境信息转移到动作电位的排列组合之中。把这一作用称为编码作用。人的各种主观感觉的产生正是各感觉中枢通过感受器的编码作用,进行分析综合而获得的。但是感受器将刺激能量转换为冲动时,如何在神经电信号传导中进行编码,目前尚未清楚。

4. 适应现象

当一定强度的刺激作用于感受器时,其感觉神经产生的动作电位频率,将随刺激作用时间的延长而逐渐减少,称此现象为适应。感受器不同而适应的速度也不同。例如,皮肤触觉感受器的适应过程发展得快,称为快适应;而肌梭、腱梭及颈动脉窦压力感受器的适应过程发展慢,称为慢适应。

(二) 感觉信息的传导

当机体各种感受器接受内外刺激时,便产生神经冲动并沿一定的传导途径到达中枢,经过多次的更换神经元,最后到达大脑皮质的特定区域形成相应的感觉。

1. 特异性传入系统

各感受器传入的神经冲动都要经脊髓或脑干,上行至丘脑换神经元,并按排列顺序投射到大脑皮质特定区域,引起特异的感觉,故称为特异性传入系统。每种感觉的传导投射系统都是专一的,并具有点对点的投射关系。特异性传入系统的功能除了引起特定的感觉外,还同时激发大脑皮质发出神经冲动。

2. 非特异传入系统

上述特异投射传入系统的神经纤维经脑干时,发出侧枝与脑干网状结构的神经元发生突触联系,通过多次更换神经元之后,上行抵达丘脑内侧部再交换神经元,发出纤维弥散地投射到大脑皮质的广泛区域,此投射途径称为非特异投射传入系统。非特异投射系统不具有点对点的投射关系,并失去了专一的特异传导功能,是不同感觉的共同上传途径。其主要功能是维持和改变大脑皮质的兴奋状态,对保持机体觉醒具有重要作用,但不能产生特定的感觉。

(三) 大脑皮质的感觉分析功能

各种感觉传入冲动在大脑皮质进行分析和综合,产生相应的感觉。大脑皮质的不同区域在功能上具有不同的作用,称为大脑皮质的功能定位(图 8-1)。皮层体表感觉区神经细胞的纵向柱状排列构成大脑皮质的基本功能单位为感觉柱(sensory column)。同一柱状结构内的神经元都具有同一种功能。



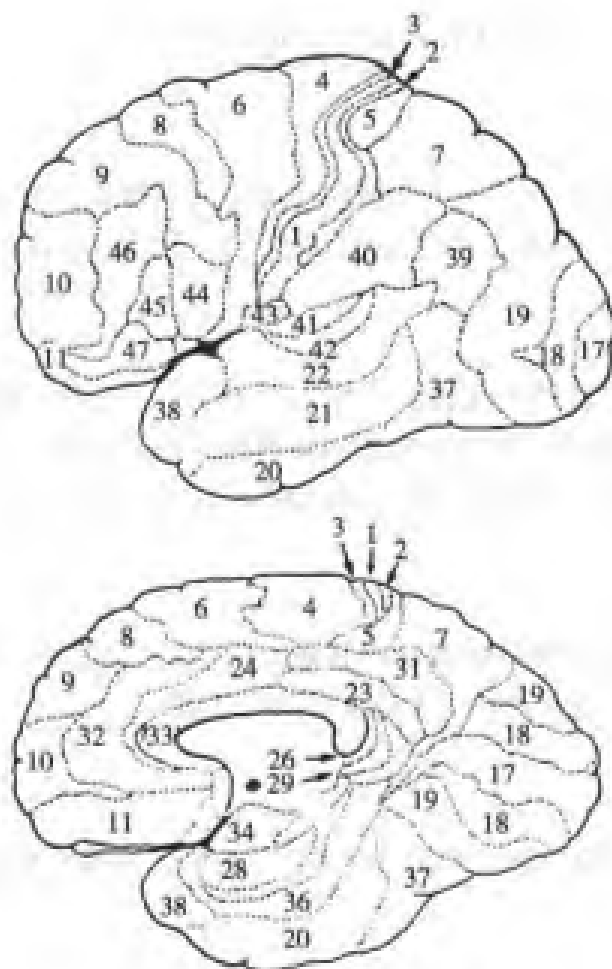


图 8-1 人类大脑皮质分区
上：大脑半球外侧面 下：大脑半球内侧面

1. 体表感觉

全身体表感觉的投射区域主要位于中央后回 (3-1-2 区)，称为第一体表感觉区。其特点是：

(1) 感觉冲动向皮质投射呈左右交叉，但头面部感觉冲动投射到左右双侧皮质。

(2) 投射区域的空间位置是倒置的，即下肢的感觉区在皮质顶部，上肢感觉区在中间，头面部感觉区在底部 (图 8-2)。

(3) 投射区的大小与不同体表部位的感觉灵敏程度有关。如拇指、食指、唇的

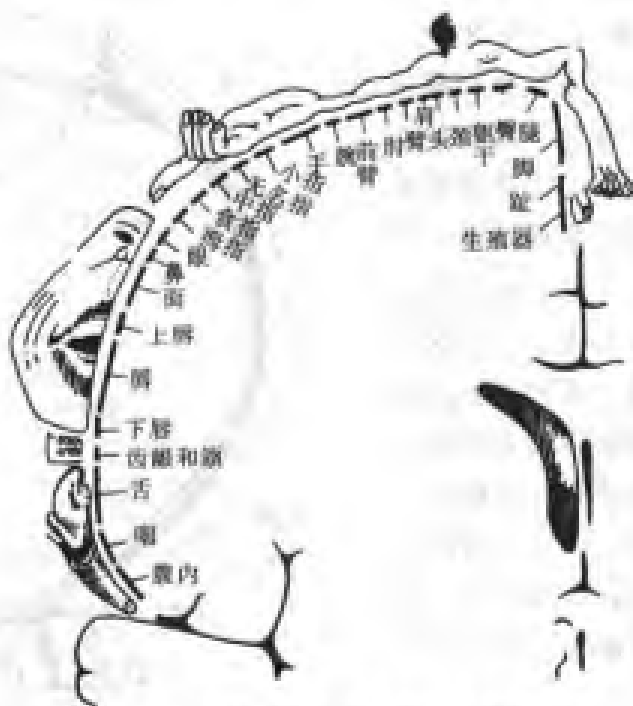


图 8-2 人类大脑皮质感觉区



感觉灵敏，其代表区大；感觉迟钝的背部，则代表区小。

2. 运动感觉区

运动感觉投射代表区位于中央前回(4、6区),该区是运动区,也接受关节和肌肉的感觉投射。刺激人脑中央前回,可引起受试者产生企图发动肢体运动的主观感觉。

3.视觉感觉区

视觉的投射区位于枕叶距状裂上下缘 (17、18 区)。起源于鼻侧视网膜的传入纤维，经视交叉投射到对侧枕叶；而起源于颞侧视网膜的传入纤维，则不交叉投射到同侧枕叶。因此，如一侧枕叶皮质受损，会造成两眼偏盲；双侧枕叶皮质受损，将造成全盲。

4.听觉和前庭觉

听觉的投射区域位于颞叶的颞横回和颞上回(41、42区),听觉皮质代表区是双侧性的。前庭感觉的投射区域可能位于大脑皮质颞叶后部。

5. 内脏感觉

内脏感觉的投射区位于第一和第二感觉区。此外，边缘系统的皮质部位也有其投射区域。

二、视觉器官

视觉器官 (visual sense organ) 是视觉系统活动的基础 (图 8-3), 它可分为折光系统和感光系统两个部分。前者包括角膜、房水、晶状体和玻璃体; 后者指视网膜。平行光线首先通过眼内折光系统发生折射后, 在视网膜上成像。视网膜上的感光细胞将物理的光刺激转变成神经冲动, 经视神经传到丘脑, 再向大脑皮质感觉区投射形成视觉。视觉在人体运动中具有极重要的意义。

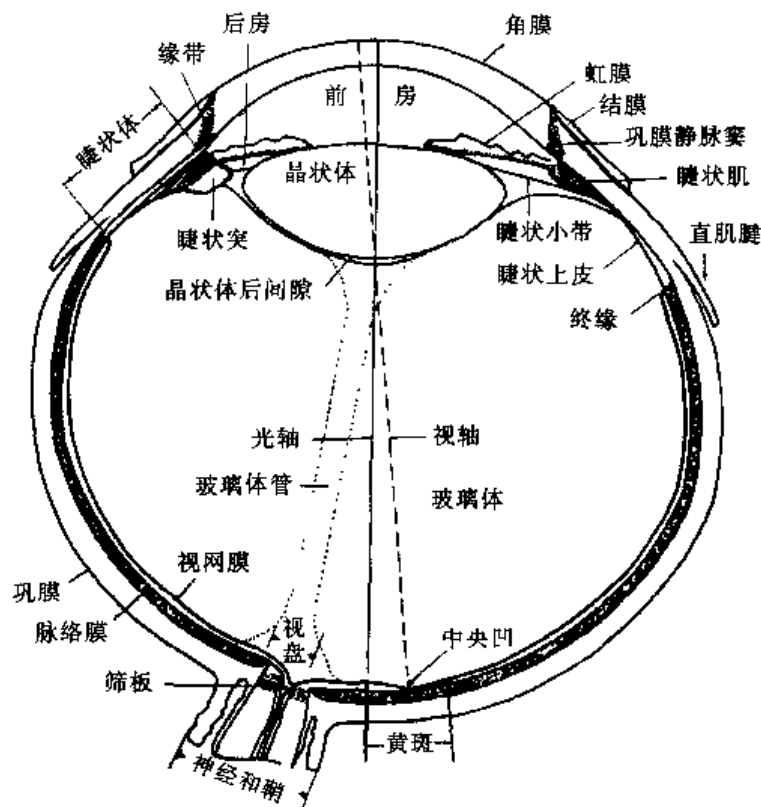


图 8-3 眼球的水平切面 (右眼)

(一) 眼的折光系统及调节

1. 眼折光系统及成像

光线由一种介质进入另一种折射率不同的单球面折光体时,只要不与折光体介面垂直,光线便会产生折射。人眼的折光系统是由多个折光介面组成的复杂光学系统。通常将人眼设计为一个单球面折射系统,其折光原理与实际眼的折光效果基本相同,称为简化眼(reduced eye)。如图8-4所示:简化眼假定眼球的前后径为20毫米,折光指数为1.333,光线入眼时只在角膜前球形界面折射一次,节点在角膜后方5毫米处。此模型和正常安静时的人眼一样,6米以外的物体A、B两点发出的光线,经过节点不折射。这两个光线在节点交叉,在视网膜上形成a、b两点,成为物体为A、B的一个倒立实像。

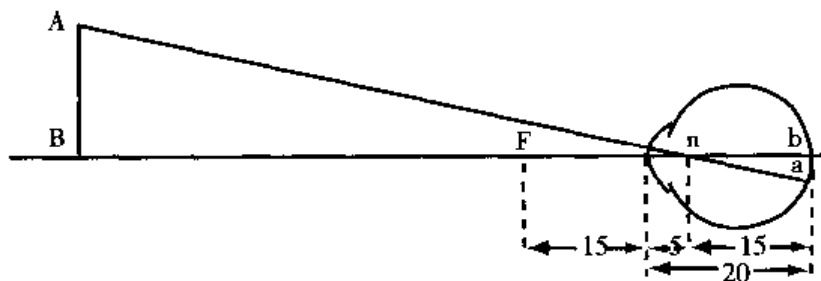


图8-4 简化眼及成像 单位:毫米

2. 视调节

正常眼看无限远时(6米以外),进入眼内的光线近似平行,恰好成像于视网膜上。当物像距离小于6米时,成像将移至视网膜之后,造成视物模糊。正常人的眼球折光系统的折光能力,能够随物体的移近而相应的增强,使物像落在视网膜上而看清物体,这一调节过程称为视调节。

(1) 晶状体的调节

晶状体是一个富有弹性的组织,形似双凸透镜。视调节是一个复杂的神经反射性活动,当看近物时,睫状肌收缩,悬韧带松弛,晶状体向前后凸出,增加曲率,使物像前移到视网膜上;当视远物时,睫状肌松弛,睫状体后移,此时悬韧带被拉紧,晶状体曲率减小,物像后移至视网膜上。

(2) 瞳孔调节

一般入瞳孔直径为1.5~8.0毫米。看近物时,可反射性引起双侧瞳孔缩小,称为瞳孔调节反射。瞳孔的大小随光线强度而改变的现象,称为瞳孔对光反射。当强光刺激视网膜感受细胞后,冲动经视神经传入中枢,到达中脑动眼神经核,再经动眼神经中的副交感神经传出,使瞳孔括约肌收缩,瞳孔缩小,以防止强光对视网膜的刺激。相反,在暗环境中瞳孔会反射性扩大。在运动中,情绪过度紧张可使瞳孔扩大,这是由于交感神经作用的结果,对运动有不良的影响。



人的视调节,除晶状体和瞳孔调节外,还可见到两眼视轴会聚现象,其生理意义是视近物时,使物像落在两眼视网膜的相称点上。

(二) 眼的感光机能

1. 视网膜的感光机能

人的视网膜上存在两种感光细胞(visual cell),即视锥细胞和视杆细胞。视锥细胞主要分布在视网膜的中央凹处,能接受强光刺激,形成明视觉和色觉,并能看清物体表面的细节与轮廓,有很强的空间分辨能力。视杆细胞主要分布在视网膜的周边部分,对光的敏感度高,能接受弱光刺激,形成暗视觉。

2. 视网膜的光化学反应

视锥细胞和视杆细胞含有能吸收光能的光敏物质(感光色素),在光线作用下能发生一系列的化学反应,称为光化学反应。视锥细胞外段中含有感光色素,称视锥色素。视杆细胞内的感光色素是视紫红质,其分子组成是视蛋白与视黄醛。在光的作用下,视紫红质经过一系列化学反应,可迅速分解为全反视黄醛与视蛋白。在这个分解过程中,使视杆细胞去极化,并产生神经冲动,神经冲动沿视神经传到大脑枕叶,产生视觉。反视黄醛在视黄醛酶的作用下,还原成维生素A,经眼内和肝脏有关酶的催化而变成顺视黄醛,一旦顺视黄醛生成就和视蛋白合成视紫红质。视紫红质在分解与合成的过程中,消耗一部分视黄醛,需要体内贮存的维生素A来补充。如果维生素A补充不足,就会影响人在暗处的视力,即引起夜盲症。

3. 色觉

光线本身无颜色,但作用于视网膜的视锥细胞后,就能引起大脑产生色觉。人眼可在光谱上分辨出100多种颜色,但主要是红、橙、黄、绿、青、蓝、紫七种颜色。人眼区别不同颜色的机理,目前仍用Young、Helmholtz提出的三原色学说来解释。三原色学说认为视网膜上有三种视锥细胞,分别含有对红、绿、蓝三种色光敏感的感光色素。不同波长的光线对三种感光物质的刺激程度不同,故可引起不同的颜色。凡不能识别三原色中的某一种颜色者均称色盲。而对某种辨别能力较正常人差者,称为色弱。色盲病人绝大多数是由遗传因素决定的,多因先天缺乏含某种感光色素的视锥细胞所致。色盲和色弱的患者,不适宜从事与颜色有关的职业。

(三) 空间视觉及眼肌平衡与运动

1. 视力

视力(也称为视敏度)是指眼对物体微细结构的分辨能力。通常以分辨两点(或两平衡线)之间的最小距离为标准。视力与中央凹处视锥细胞的大小、眼的折光能力、视觉中枢分析能力及光源、背景等因素有关。在体育运动中,良好的视力是运动员判断人和运动器械的空间位置、速度快慢、距离远近及运动方位的主要条件。

2. 视野

单眼不动注视正前方一点时,该眼所能看到的空间范围称为视野。正常人的视野范围大小受到面部结构和背景颜色等因素的影响。一般来讲,鼻侧视野小于颞侧。不同颜色的视野也不一样,白色>黄色>红色>绿色,不同项目运动员的视野不同,足球运动员绿色视野较大。

3. 立体视觉

双眼视物时,不仅能看到物体的平面,还能看到物体的深度,从而形成立体视觉。立体视觉产生的主要原因,是因为同一物体在两眼视网膜上所形成的像并不完全相同,右眼看到物体的右侧面较多,左眼看到物体的左侧面多,其位置虽略不同,但又在相称点的附近。最后经中枢神经系统的综合而得到一个完整的立体视觉。单眼视物时,根据物体表面的光线反射情况、阴影的有无以及过去的经验等因素也能产生立体视觉。但是,单眼视物所形成的立体视觉比双眼差得多。

立体视觉在各项体育活动中具有重要意义。球类运动员立体视觉不完善会降低时空感,而使击球、传球、投球、接球等技术动作不准确。特别是在场地范围小、球速快的条件下不能准确地判断对方动作及接传方向。

4. 眼肌平衡

眼球的运动是靠运动眼球的六条眼肌,即上、下直肌,内、外直肌和上、下斜肌控制的。眼肌平衡决定于这些肌肉的紧张和松弛是否协调。当眼注视正前方时,若对称眼肌紧张度相等,眼球瞳孔在正中央处,称为正视。如果其中一条肌肉紧张度大,则瞳孔偏向一方,称为斜视。若有的人一条眼肌紧张度虽然稍大,但在平时靠对抗肌紧张度的加强予以补偿,瞳孔仍然保持在正中,称为隐斜视。由于隐斜视患者的眼肌经常处于紧张状态,容易产生疲劳,特别是在运动过程中更容易疲劳,疲劳后眼肌的调节能力下降出现斜视。因此,患有隐斜视的人在从事要求准确度很高的运动项目中,如射击、射箭和球类等项目,运动成绩会受到一定影响。

运动时维持眼肌平衡,对在运动中准确判断器械的空间位置、距离大小、运动员动向以及球运动的速度等都十分重要。特别是对球类项目更为重要。

三、听觉与位觉

耳是听觉器官,也是位觉(平衡)器官。从结构上看,耳分为外耳、中耳和内耳三部分。外耳和中耳是声波的传导器官;内耳又称迷路,包括耳蜗、椭圆囊、球囊和三个半规管,后三部分统称为前庭器官。耳蜗中有接受声波的听觉感受器;前庭器官中有接受头部位置改变和对加减速运动刺激的感受器。内耳是听觉和位觉器官的主要部分。

(一) 听觉

听觉的适宜刺激是声波。外界的声波振动经外耳道、鼓膜和听骨链引起外淋巴和基



底膜振动,刺激毛细胞产生去极化感受器电位。再通过突触传递,在听神经纤维末梢产生总和电位和动作电位,当动作电位沿听神经传向皮层听觉中枢时,则产生听觉。听觉在人类利用语言进行社会交往方面起着重要作用。

1. 听阈与听域

声音必须达到一定响度才能被人感知。人能听到的最低声强称为听阈。当声强增加到一定数值时被检者会出现压迫感,甚至痛感,此强度极限称为最大可听阈。从可听阈到最大可听阈曲线之间包括的面积称为听域。正常人在音频为 1000~3000Hz 时听阈最低,也就是听觉最敏感。随年龄增长可听阈逐渐升高。

2. 外耳与中耳的传音功能

外耳包括耳廓与外耳道,耳廓有集音作用。成人外耳道长约 3.5 厘米,声波可以通过它无衰减地传向鼓膜,使鼓膜发生振动,其振动能量经听骨链增压效应后,作用在内耳卵圆窗上,从而引起内淋巴液振动。

3. 耳蜗的功能

耳蜗是感音器官,在耳蜗内有一条基底膜,位于基底膜上的螺旋器是声音感受器(图 8-5)。基底膜上螺旋器有支持细胞和毛细胞两种,毛细胞的顶部有上百条排列整齐的听纤毛。听纤毛与盖膜直接接触或埋植在盖膜的胶状物质中。基底膜振动时听纤毛弯曲,使毛细胞产生神经冲动,冲动沿听神经传向听中枢产生听觉。

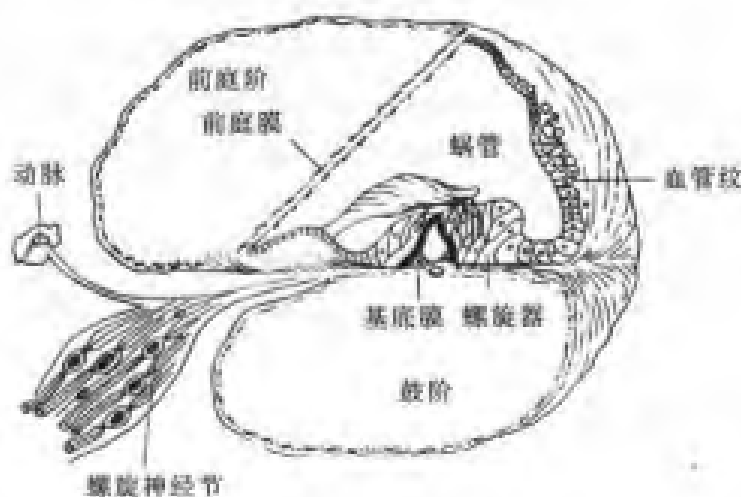


图 8-5 耳蜗管的横面图

人对声音性质的分辨除了耳蜗功能外,还决定于中枢神经各部位的功能。在体育运动中,运动员借助于听觉和视觉分析活动,可控制动作的节律和速度,提高大脑皮质兴奋情绪,减轻大脑神经细胞的疲劳。

(二) 位觉

身体进行各种变速运动(包括直线加速运动和角加速运动)时引起的前庭器官中的位觉感受器兴奋并产生的感觉,称为位觉(或前庭感觉)。其感受器位于颞骨岩部迷路内,由椭圆囊、球囊和三个半规管构成。

1. 前庭器的感受装置与适宜刺激

球囊、椭圆囊和半规管之间以充有内淋巴的细小管道互相联系。椭圆囊和球囊的壁上有囊斑,分别称为椭圆囊斑和球囊斑。囊斑中有感受性毛细胞,其纤毛插入耳石膜内(图 8-6)。耳石膜表面附着的许多小碳酸钙结晶称为耳石。其适宜刺激是耳石的重力及直线正负加减速运动。当头部位置改变,如头前倾、后仰或左、右两侧倾斜时,由于重力对耳石的作用方向改变,耳石膜与毛细胞之间的空间位置发生改变,使毛细胞兴奋,冲动经前庭神经传到前庭神经核,反射性地引起躯干与四肢有关肌肉的肌紧张变化。同时,冲动传入大脑皮质前庭感觉区,产生头部空间位置改变的感觉。当人体做直线运动的开始、停止或突然变速时,耳石膜因直线加速度或减速度的惯性而发生位置偏移,使毛细胞的纤毛弯曲、兴奋,通过反射活动调整有关骨骼肌的张力,以维持身体平衡。同时也有冲动经丘脑传入大脑皮质感觉区,产生身体在空间的位置及变速的感觉。

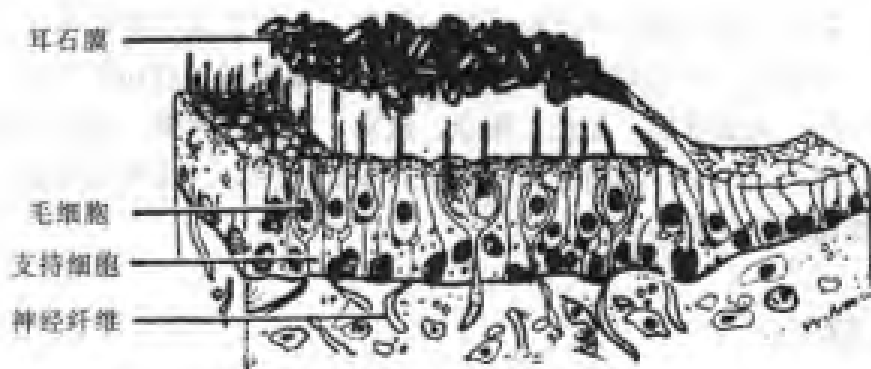


图 8-6 囊斑结构模式图

三个半规管互相垂直,分别称前、后与水平半规管(图 8-7)。每个半规管均有膨大端为壶腹,壶腹壁上有壶腹嵴,壶腹嵴也含有感受性毛细胞。毛细胞的纤毛上覆盖着许多胶状物质,形如帽状,称为终帽。半规管壶腹嵴的适宜刺激是旋转正负加速度。当旋转运动开始、停止或突然变速时,由于内淋巴的惯性作用,使终帽弯曲,刺激毛细胞而兴奋,冲动经前庭神经传入中枢,产生旋转运动感觉。在内耳迷路中,水平半规管主要感受绕垂直轴左右旋转的变速运动,而前、后半规管主要感受绕前后轴和横轴旋转的变速运动。因此,人们可以感受任何平面上不同方向旋转变速运动的刺激,并作出准确的反应。



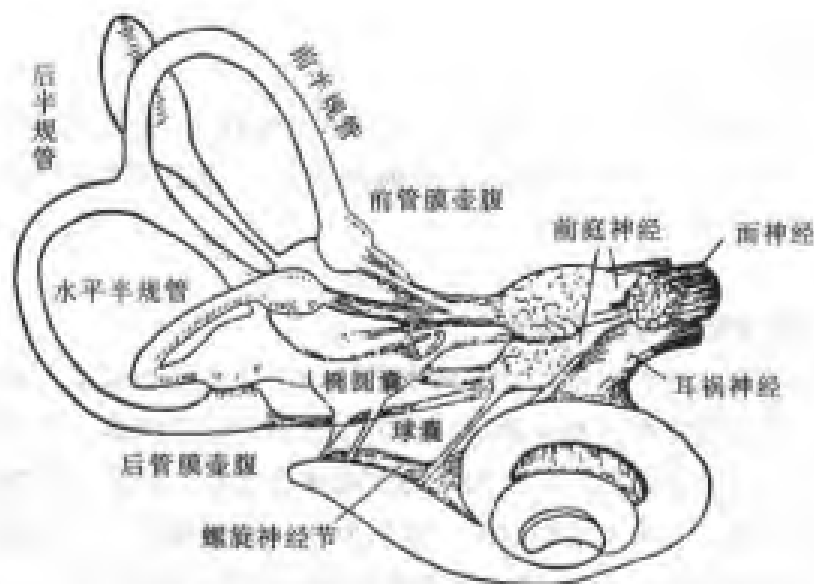


图 8-7 前庭及耳蜗器官模式图 (右侧)

2. 前庭反射与前庭机能稳定性

前庭反射是指前庭器官受到刺激产生兴奋后，除引起一定位置觉改变以外，还引起骨骼肌紧张性改变、眼震颤及植物性功能改变。例如眩晕、恶心、呕吐和各种姿势反射等。

刺激前庭感受器而引起机体各种前庭反应的程度，称为前庭功能稳定性。前庭功能稳定性较好的人，在前庭器官受到刺激时所发生的反应就较弱，有利于提高人体的工作能力。在体育运动中，从事赛艇、划船、跳伞、跳水、滑雪、体操、武术、链球、投掷及各种球类运动项目的运动员，其前庭功能稳定性较高。所以，经常参加这类体育运动的训练，有利于提高前庭功能稳定性。

四、本体感觉

肌肉、肌腱和关节囊中分布有各种各样的本体感受器（肌梭与腱梭），它们能分别感受肌肉被牵拉的程度以及肌肉收缩和关节伸展的程度。这种本体感受器受到刺激所产生的躯体感觉，称为本体感觉。

（一）本体感受器结构与功能

1. 肌梭

肌梭(spindle)呈梭型，位于肌纤维之间并与肌纤维平行排列。肌梭内含 6~12 根肌纤维，称为梭内。肌梭外的肌纤维称为梭外肌(图 8-8)，它们分别接受 γ 神经元和 α 神经元的支配。

肌梭是一种感受长度变化或牵拉刺激的特殊感受器。当肌肉被拉长时肌梭也随之拉长，于是肌梭的感受部分受到刺激而发生兴奋，冲动经感觉神经传入中枢，反射性地引

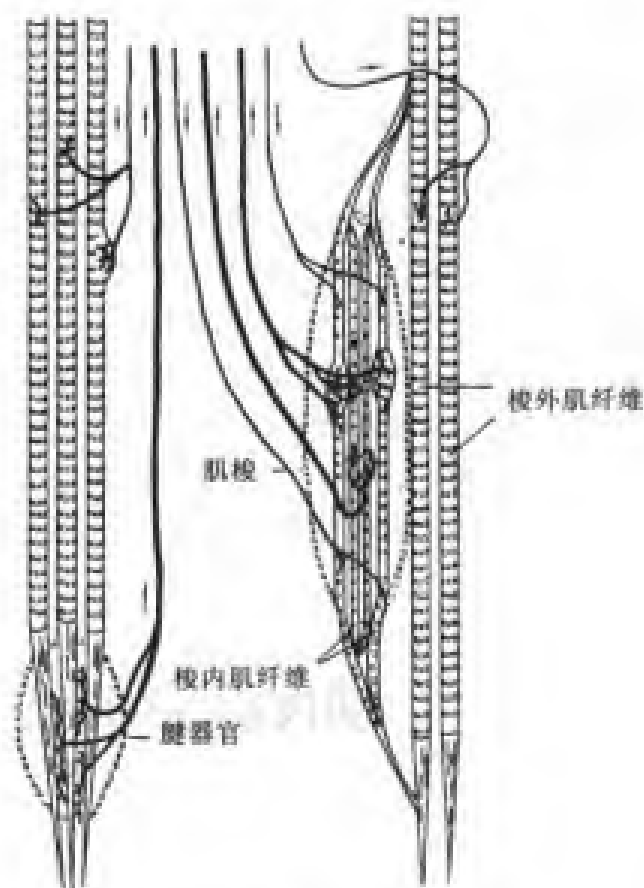


图 8-8 肌梭与腱器官模式图

起被牵拉肌肉收缩。当肌肉收缩时,肌纤维长度缩短,肌梭也随之缩短,于是消除了对肌梭的刺激,使传入冲动停止。

2. 腱梭

腱梭(tendon organs)分布在腱胶原纤维之间,与梭外肌纤维串联(图 8-8),是一种张力感受器。当肌肉收缩张力增加时,腱梭因受到刺激而发生兴奋,冲动沿着感觉神经传入中枢,反射性地引起肌肉舒张。

体育活动时,当肌肉被牵拉或主动收缩与放松时,均会对肌梭和腱梭构成刺激产生兴奋,兴奋冲动传到大脑皮质的运动感觉区,经过分析综合活动,能感知人体的空间位置、姿势以及身体各部位的运动情况。在机体的随意运动和反射活动的控制中,由于来自肌梭和腱梭的传入信息,使运动动作协调一致,密切配合。一般认为,腱梭的传入冲动可反射性地抑制同一肌肉的 α -运动神经元,而肌梭的传入冲动则对同一肌肉的 α -运动神经元起兴奋作用。当肌肉受到被动牵拉时,肌梭和腱梭的传入冲动频率均增加。肌梭和腱梭的冲动可使中枢神经系统分别了解肌肉的长度和受到牵张的力量。当肌肉被牵拉时,首先引起肌梭感受器的兴奋,使 α -运动神经元兴奋而引起牵张反射,也使受牵拉的肌肉收缩以对抗牵拉。当牵拉量继续加强时,可兴奋腱器官,冲动通过抑制性中间神经元,使牵张反射受到抑制,避免被牵拉的肌肉受到损伤。例如,当举起一物体时,肌肉被牵拉,如果负荷很重,牵拉也很重,那么将动员更多的运动单位来举起重物;如果



负荷较轻, 牵拉也较轻, 那么仅有少数运动单位参加活动就能举起物体。

(二) 运动对本体感受器的影响

运动员的一切运动技能是在本体感受的基础上才能形成。借助本体感受器就能感知每一动作中肌肉、肌腱、关节和韧带的缩短、放松和拉紧的不同状况, 为大脑皮质运动行为进行复杂的分析综合创造条件。人体经常参加体育训练, 不仅使本体感受器的机能得到提高, 而且能使肌肉运动的分析能力及动作时间的判断精确力得到发展。例如, 不同训练水平的篮球运动员运球快速进攻时, 训练水平高的运动员其控球能力强, 失球次数少, 而且运动速度快, 表现出本体感受器具有较高的敏感性。

肌肉活动时发生的本体感觉往往被视、听和其他感觉遮蔽, 故本体感觉也称为暗淡的感觉。运动员的本体感觉能力必须经过长时间训练, 才能在意识中比较明显而精确地反映出自己的运动动作。

第二节 肌肉运动的神经调控

一、神经系统概述

机体是由不同的器官和系统组成的, 各器官和系统都有其特殊的功能。这些功能不是孤立的, 而是互相影响、互相制约、互相协调地完成各种功能活动。机体所处的内、外环境是不断变化的, 它必须通过调节系统对环境的变化迅速作出反应, 使机体适应环境, 才能使机体得以生存。神经系统是控制和协调全身各种功能活动的主要调节系统。

(一) 神经系统的基本结构和功能

1. 神经元

神经元(neuron)是神经系统中的基本结构单位。它由胞体和突起两部分组成。胞体是合成各种蛋白质(包括各种酶类)的中心。蛋白质首先在胞体中合成, 然后再经过运输系统运送到突起之中。

突起可分为树突和轴突。树突的分枝较短, 由胞体发出后逐渐变细, 不断分枝。其功能为接受信息, 并将其传向细胞体。轴突是一条较长的突起, 在末梢处形成一些终末侧支(图 8-9)。其主要功能是将细胞体加工、处理过的信息传出, 输向另一个神经元或效应器。轴突因细长如纤维状, 又称神经纤维(nervous fiber)。神经元依其功能可分为三大类: 即接受外来刺激的感觉神经元; 将神经冲动传给效应器的运动神经元; 以及中枢神经内起联络作用的中间神经元。

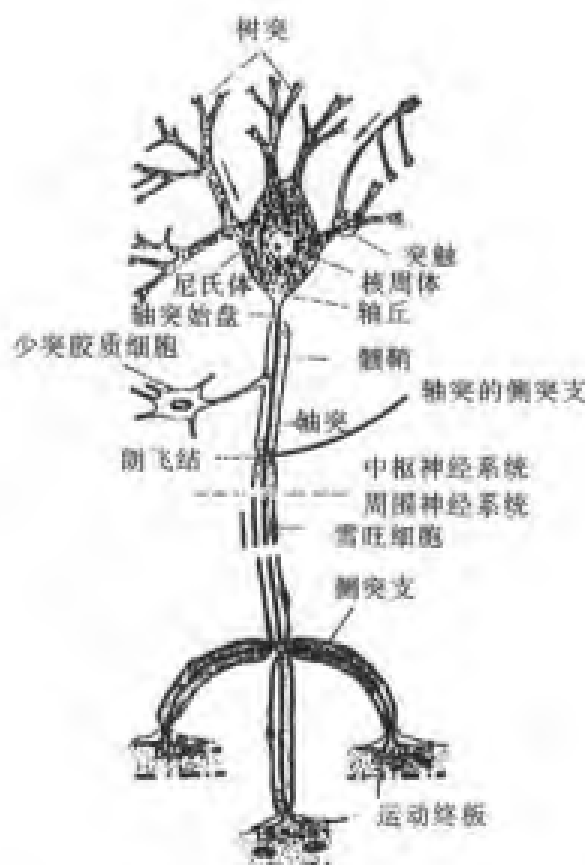


图 8-9 运动神经元形态构造示意图

2. 兴奋在神经纤维上的传导

兴奋在神经纤维上的传导是以局部电流形式传导的，这种传导的方式在神经纤维上具有以下几个特点：

(1) 生理完整性

兴奋的传导必须是在一根完整的纤维上才能进行。如果纤维被折断，局部电流很难向前传导。如果神经纤维因药物麻醉、机械压力、冷冻等引起局部机能改变，破坏了生理功能的完整性时，神经冲动的传导将会发生阻滞。

(2) 绝缘性

一条神经干中有很多条神经纤维，每条神经纤维的动作电位的传导是互不干扰的，这种现象称为神经纤维的绝缘性。这是因为神经纤维上的髓鞘起着绝缘作用造成的。

(3) 双向传导

刺激神经纤维的任何一点，所产生的冲动可同时向两侧方向传导，称为双向传导。这是因兴奋区两侧毗邻的静息膜同时产生局部电流的结果。

(4) 相对不疲劳性

神经冲动的传导实际上是通过局部电流进行的。局部电流是一种物理现象，无需提供能量，所以，神经冲动的传导是相对不易疲劳的。



(二) 神经元间的信息传递

神经冲动不仅只限于在一个神经元内传导,必须要经过两个或两个以上神经元之间的信息传递。神经元之间在结构上并没有原生质相通,而是通过突触结构联系在一起。前一个神经元的轴突末梢分枝与后一个神经元的胞体或突起相互接触的部位,称为突触(synapse)。通过突触,信息从前一个神经细胞传递给后一个神经细胞,这一信息传递过程被称为突触传递。

一个神经元的轴突末梢突触小体,释放某种化学物质(神经递质),作用到下一个神经元,引起下一个神经兴奋或抑制。由于突触前末梢释放的递质对于突触后膜通透性的影响不同,突触可分为兴奋性突触和抑制性突触两大类。兴奋性递质导致后膜去极化效应,称为兴奋性突触后电位(EPSP),它是由于突触后膜对 Na^+ 、 K^+ ,尤其是 Na^+ 通透性升高而去极化所致。抑制性递质导致突触后膜产生超极化,称为抑制性突触后电位(IPSP),其产生的主要机制是后膜对 K^+ 和 Cl^- 的通透性升高所致。

二、肌肉运动的神经调控

人体正常姿势的维持,以及各种各样动作的完成,主要是由于骨骼肌收缩作用于骨骼的结果。而各组肌肉的精确配合都是在神经系统的控制下进行的,都是复杂的反射活动。

(一) 脊髓对躯体运动的调节

1. 运动神经元池

高位运动中枢发出的一切指令,大多数要聚汇在脊髓前角神经元上,并由后者引起其所支配的肌纤维收缩活动。一块肌肉往往受许多运动神经元的支配,支配某一肌肉的一群运动神经元,称为运动神经元池(motoneuron pool)。其中包括 α 和 γ 运动神经元。

α 运动神经元的大小不等,胞体直径从几十到 $150\mu\text{m}$,大 α 运动神经元支配快肌纤维,小 α 运动神经元支配慢肌纤维。 γ 运动神经元的胞体分散在 α 运动神经元之间,其胞体较 α 运动神经元为小。它的轴突离开脊髓后支配骨骼肌肉的梭内肌纤维。

2. 牵张反射

当骨骼肌受到牵拉时会产生反射性收缩,这种反射称为牵张反射(stretch reflex)。牵张反射有两种类型:一种为腱反射,也称位相性牵张反射;另一种为肌紧张,也称紧张性牵张反射。腱反射是指快速牵拉肌腱时发生的牵张反射,肌紧张是指缓慢、持续牵拉肌肉时发生的紧张性收缩。

牵张反射的反射弧特点是感受器和效应器都是在同一块肌肉中。正常人体内的骨骼肌纤维,经常在轮流交替的收缩,致使其处于一定的紧张状态。这是由于 γ 运动神经元在高位脑中枢的兴奋性影响下,常有少量的冲动到达梭内肌纤维,使它发生轻度收缩,牵拉螺旋状感受器,故常有少量冲动传入脊髓,然后通过 α 运动神经元发出少量冲动使



梭外肌纤维发生轻度收缩,使肌肉保持一定张力。因此, γ 运动神经元的功能是调节梭内肌纤维的长度,使感受器经常处于敏感状态。当肌肉收缩时,这种由 γ 运动神经元的活动通过肌梭传入,引起支配同一肌肉 α 运动神经元的活动和肌肉收缩的反射过程,称为 γ -环路。除高位脑中枢可直接控制 α 运动神经元之外,还可以通过 γ -环路间接控制 α 运动神经元来调节肌张力。

牵张反射主要生理意义在于维持身体姿势,增强肌肉力量。例如人直立时,由于重力的作用,头将前倾背呈弓状,同时下肢关节将屈曲,但可反射性地引起骶棘肌、颈部某些肌群及下肢肌群等紧张性增强,从而引起抬头、挺胸、伸腰、直腿的保持直立的姿势。投掷前的引臂和起跳前的膝屈动作,都是利用牵张反射原理牵拉投掷和跳跃的主动肌,使其收缩更有力。

(二) 脑干对肌紧张和姿势反射的调节

1. 脑干网状结构对肌紧张的调节

在脑干广大的区域中,神经细胞和神经纤维交织在一起呈网状,称为网状结构(reticular formation)。刺激动物脑干网状结构的脑干中央区域(图8-10的5区),可使肌紧张加强,这一区域称为易化区。刺激延脑网状结构的腹内侧部分(图8-10的4区)可抑制肌紧张,这一区域称为抑制区。它们分别对脊髓的运动神经元具有易化与抑制作用。

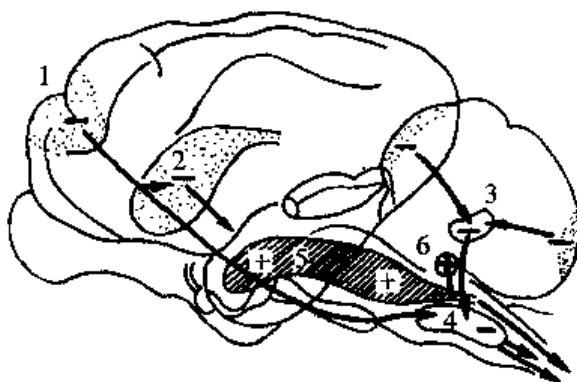


图8-10 猫脑各部位,特别是脑干网状结构下行抑制(-)和易化(+)系统示意图

抑制作用(-)的路径:4为网状结构抑制区,发放下行冲动抑制脊髓牵张反射。这一区接受大脑皮层(1)、尾状核(2)和小脑(3)传来的冲动。易化作用(+)的路径:5为网状结构易化区,发放下行冲动加强脊髓牵张反射。6为延髓的前庭核,有加强脊髓牵张反射的作用

电刺激易化区,可使正在进行中的四肢牵张反射大大加强。而刺激抑制区位时,抑制肌肉的牵张反射。从活动的强度上看,易化区活动比较强,抑制区的活动比较弱。因此,在肌紧张的平衡调节中易化区略占优势。在正常情况下,由于大脑皮质运动区和纹状体等部位对脑干网状结构抑制区有加强作用,故使易化与抑制作用保持着动态平衡。而当上位中枢的下行控制失去之后,这种平衡便会丧失,造成抑制区活动减弱,易化区活动占优势,使伸肌紧张加强,产生僵直现象。例如,在实验室中,如果在动物中脑四



叠体上、下丘之间切断脑干，此时动物全身伸肌的紧张性立即显现亢进，表现为四肢僵直，颈背部肌肉过度紧张，以致头尾呈背弓反张状态。这一现象称为去大脑僵直。

从牵张反射的角度来分析，肌紧张加强的机制可以有两种：一种是由于高位中枢下行时，直接或间接通过脊髓中间神经元提高脊髓 α 运动神经元的活动，从而导致肌紧张加强出现僵直，这种僵直称为 α 僵直。另一种是由于高位中枢下行时，首先提高脊髓 γ 运动神经元的活动，使肌梭的敏感性提高而传入冲动加多，转而使脊髓 α 运动神经元的活动提高，导致肌紧张加强而出现僵直，称为 γ 僵直。

2. 姿势反射

人体姿势的维持是通过全身肌张力的相互协调实现的。在身体活动过程中，中枢不断地调整不同部位骨骼肌的张力，以完成各种动作，保持或变更躯体各部分的位置，这种反射活动总称姿势反射(postural reflex)。姿势反射可分为状态反射、翻正反射、直线和旋转加减速运动反射。

(1) 状态反射

状态反射(attitudinal reflex)是头部空间位置改变时反射性地引起四肢肌张力重新调整的一种反射活动。状态反射包括迷路紧张反射与颈紧张反射两部分。迷路紧张反射是指内耳迷路的椭圆囊和球囊的传入冲动对躯体伸肌紧张性的调节反射。颈紧张反射是指颈部扭曲时，颈椎关节、韧带或肌肉受刺激后，对四肢肌肉紧张性的调节反射。如图 8-11 所示，头部后仰引起上下肢及背部伸肌紧张性加强；头部前倾引起上下肢及背部伸肌紧张性减弱，屈肌及腹肌的紧张性相对加强；头部侧倾或扭转时，引起同侧上下肢伸肌紧张性加强，对侧上下肢伸肌紧张性减弱。

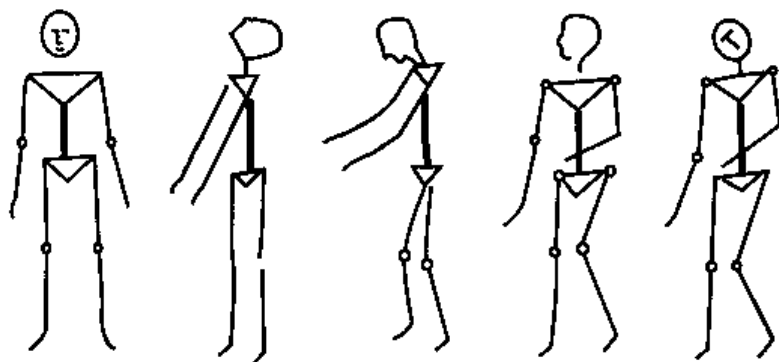


图 8-11 状态反射规律示意图

在正常人体中，由于高位中枢的调节，这类基本反射常被抑制而不易表现出来。

状态反射在完成某些运动技能时起着重要作用。例如，在做体操的后手翻、空翻及跳马等动作时，若头部位置不正，就会使两臂用力不均衡，身体偏向一侧，常常导致动作失误或无法完成。短跑运动员起跑时，为防止身体过早直立，往往采用低头姿势，这些都是运用了状态反射的规律。但是，在运动中也有个别动作需要使身体姿势违反状态反射的规律。例如，有训练的自行车运动员在快速骑车时，做出头后仰而身体前倾的姿

势。

(2) 翻正反射

当人和动物处于不正常体位时,通过一系列动作将体位恢复常态的反射活动称为翻正反射(righting reflex)。如将动物四足朝天从空中抛下,可清楚地观察到动物在下降过程中,首先是头颈扭转,然后前肢、躯干和后肢依次扭转过来,当下降到地面时由四肢着地。翻正反射包括一系列反射活动,最先是由于头部位置不正常,视觉与内耳迷路感受刺激,从而引起头部的位置翻正。头部翻正以后,头与躯干的位置关系不正常,使颈部关节韧带或肌肉受到刺激,从而使躯干的位置也翻正。在体育运动中,很多动作是在翻正反射的基础上形成的。例如,体操运动员的空翻转体,跳水运动中转体及篮球转体过人等动作,都要先转头,再转上半身,然后下半身,使动作优美、协调且迅速。

(3) 旋转运动反射

人体在进行主动或被动旋转运动时,为了恢复正常体位而产生的一种反射活动,称为旋转运动反射。当身体向任何一侧倾倒时,前庭感受器将受刺激兴奋,通过传入神经到达中脑和延髓,反射性地引起全身肌肉张力重新调整,维持身体平衡。例如,在弯道上跑步时,身体向左侧倾斜,将反射性地引起躯干右侧肌张力增加。

(4) 直线运动反射

人体在主动或被动地进行直线加速或减速运动时,即发生肌张力重新调配恢复常态现象,这种反射称为直线运动反射。它包括升降反射和着地反射两种形式。

人体沿垂直方向直线加速或减速运动时,耳石受到刺激,反射性地引起肌张力重新调整的活动称做升降反射。人体从高处跳下时,在着地的一刹那,上肢紧张性加强而下肢两脚分开顺势弯曲,以保持身体重心减少震动,这种反射称为着地反射。例如,人从体操器械掉下来时用手撑地就是一个明显的例子。但这种着地姿势容易引起尺骨鹰嘴骨折,因而在体育运动中应克服这种先天的非条件反射,即当身体从高处落下时做滚翻动作,才能起保护作用而避免出现伤害事故。

(三) 小脑和基底神经节在运动中的调控作用

小脑和基底神经节都是同躯体运动协调有关的脑的较高级部位。由大脑下行控制躯体运动的锥体外系包括两大途径:一是经小脑下行;另一是经基底神经节下行。这两条途径最后都通过脑干某些核团作用于脊髓运动神经元。

1. 小脑对运动的调控作用

小脑是控制和调节运动的重要中枢,其主要机能是调节肌紧张、控制身体平衡、协调感觉运动和参与运动学习。小脑不仅与前庭神经核有往返纤维联系,还与脊髓、视听传入信息及大脑皮质构成突触联系。当小脑损伤时,常见的症状为随意运动障碍,出现运动过度或不足、乏力、方向偏移,失去运动的稳定性,不仅表现出共济失调性震颤,同时还使运动学习的编程受到很大影响。

一般认为,由大脑皮质运动区的运动指令发至脊髓的同时也发至小脑,而躯体在执行运动时也即时地将各种信息,经脊髓小脑束传到小脑。小脑将来自大脑皮质的运动指



令与实际执行的结果进行比较和分析误差,然后通过小脑—大脑皮质联系,传回至皮质以校正运动,使运动逐步协调起来。当精巧运动逐渐熟练完善后,皮层小脑中就贮存了一整套的运动程序,当大脑皮质要发动运动时,首先通过下行通路从皮层小脑中提取贮存的程序,并将程序回输到大脑皮质运动区,通过锥体系发动运动。切除小脑能使大脑皮质运动区发起活动推迟,肌肉活动也随之延迟。

2. 基底神经节在运动中的调控作用

大脑皮质下的基底神经节属于古老的前脑结构。它包括尾状核、壳核、苍白球、丘脑底核、黑质和红核。尾状核、壳核和苍白球统称为纹状体。基底神经节居皮质下中枢的位置,具有控制肌肉运动的功能,与丘脑、下丘脑联合成为本能反射的调节中枢,它与肌紧张的控制、随意活动的稳定和运动程序编制有关。当基底神经节病变时可表现出两类症状:一类是具有运动过多而肌紧张不全的综合症,如舞蹈病与手足徐动症等;另一类是具有运动过少而紧张过强的综合症,如震颤麻痹。

(四) 大脑皮质在运动控制中的作用

大脑皮层的主要运动区位于中央前回的4区和6区。运动区有下列的功能特征:
①除头面部多数肌肉以外,对躯体运动的调节支配具有交叉的性质,即一侧皮层主要支配对侧躯体运动。
②具有精细的机能定位,即一定部位皮层的刺激引起一定肌肉的收缩。功能代表区的大小与运动的精细复杂程度有关,运动愈精细而复杂的肌肉,其代表区愈大,手与五指所占的区域几乎与整个下肢所占的区域大小相等。
③从运动区的上下分布来看,其定位安排呈身体的倒影(图8-12)。

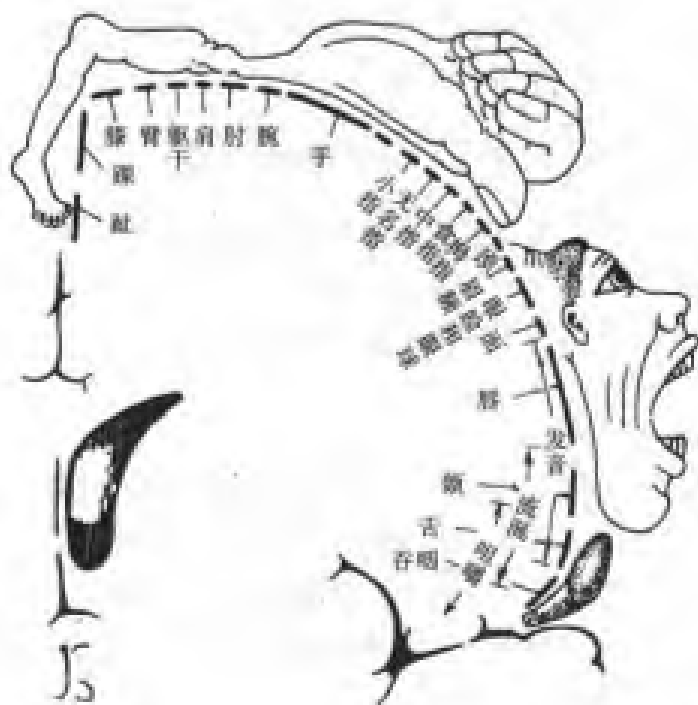


图8-12 人类大脑皮质中央前回躯体运动代表区示意图(依 Penfield)

在大脑皮层运动区的垂直切面上，可以见到该区细胞和前述的皮层感觉区类似，也呈纵向柱状排列，组成大脑皮层的基本功能单位，称为运动柱。一个运动柱可控制同一关节的几块肌肉的活动，而一块肌肉可接受几个运动柱的控制。

1. 锥体系

锥体系一般是指由皮层 4、6 区大锥体细胞发出的神经纤维，经延髓锥体后下达脊髓的传导系。其下行途径有两条：一条在延髓锥体交叉到对侧，然后下行至脊髓形成皮质脊髓束，支配肢体远端肌肉的精细运动；另一条从皮质运动区下行至脑干，形成皮质脑干束，分别支配头面部肌肉的运动。在锥体系中起自第 4 区的纤维约为 31%，起自 6 区的约为 29%，而其余 40% 则发自顶叶。

上下运动神经元之间多数存在中间神经元的接替，仅有 10%~20% 上下运动神经元之间的联系是直接的，即单突触联系。电生理研究发现，这种单突触联系可使 α 运动神经元产生兴奋性突触后电位，并使神经元发出冲动以发动肌肉收缩。锥体束下传冲动也与脊髓前角 γ 运动神经元有联系，并可激活该运动神经元。所以，锥体束可分别控制 α 和 γ 运动神经元的活动，前者在于发动肌肉运动，后者在于调整肌梭的敏感性以配合运动，两者协同控制着肌肉的收缩。

2. 锥体外系

指除锥体系外皮质下行调节躯体运动的另一传导束。由于它们的通路在延髓锥体之外，因此称为锥体外系。锥体外系的皮层起源比较广泛，几乎包括全部大脑皮层，但主要来源是额叶和顶叶的感觉区、运动区和运动辅助区。因此，皮层的锥体系和锥体外系的起源是相互重叠的。皮层锥体外系的细胞一般属于中、小型锥体细胞，它们的轴突较短，离开大脑皮层后终止于皮层下基底神经节、丘脑、脑桥和延髓的网状结构，通过一次以上神经元的接替，最后经网状脊髓束、顶盖脊髓束、红核脊髓束和前庭脊髓束下达脊髓，控制脊髓的运动神经元。锥体外系对脊髓反射的控制常是双侧性的，其功能主要与调节肌紧张和肌群的协调性运动有关。

大脑皮质对躯体运动的控制是十分精细而严密的，这种控制是由锥体系和锥体外系两条途径把信息传至脊髓，再由脊髓中 α 运动神经元这一最后公路引起肌肉运动的。锥体系主要是支配对侧躯体远端肌肉的运动，而锥体外系是支配同侧肢体远端肌肉的精细运动。两者相互配合、相辅相成，共同完成对骨骼肌运动的调节作用。另外，感觉信息的传入在实现运动精细调节中也具有重要作用（图 8-13）。

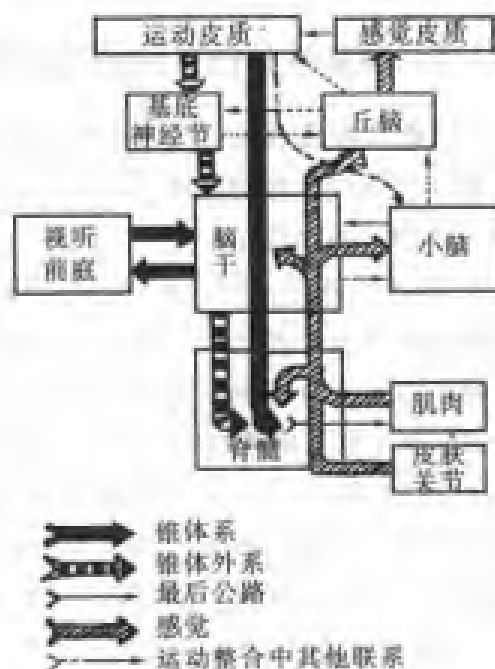


图 8-13 随意运动神经网络示意图



肌梭的传入信号除对形成运动感觉有重要作用外,它还起着一种辅助运动的作用,如肌肉收缩因各种因素比预计的慢时,肌梭放电增加,使肌肉更快地缩短。反之,如肌肉收缩比预定的快时,则通过这种反馈线路会使之减慢,以此保证肌肉收缩得到调整。

三、神经系统的运动整合作用

(一) 运动神经元活动的功能整合

肌肉收缩受神经控制,而控制肌肉活动的神经中枢不仅分布在中央前回的4、6区,而且还分布于与小脑、脑干网状结构、基底神经节及脊髓前角运动神经元等各级中枢内,对肌紧张、随意运动、姿势反射及身体平衡进行调控与整合作用。最先引起肌肉运动的神经过程是大脑皮质。实验表明,在随意运动开始之前0.8秒,大脑皮质的广泛区域中就有一个缓慢上升的负电位,即“预备电位”。当肌肉开始收缩前的30~150毫秒(ms),在大脑皮质运动区与该动作有关的专门区域才出现较高的电位,即动作电位。对抗肌的抑制是在主动肌兴奋前的15~20毫秒出现。当大脑皮质锥体细胞发放神经冲动时,将信息传向小脑和基底神经节。小脑和基底神经节通过丘脑再与皮质运动区广泛联系,小脑神经核“记忆贮存器”中存在着先天特有的以及后天学习获得的动作。小脑在接受大脑指令的同时,又接受源源不断地肌肉长度和张力、关节位置活动变化传入冲动。在不到1秒钟的时间里,小脑必须将对体位和动作进行修正的信息传向大脑,并接受大脑冲动,修正下行锥体束的冲动频率,控制脊髓运动神经元的活动。

神经系统在控制运动时, α 和 γ 运动神经元是相互协调、共同兴奋的,这种特征称 α - γ 藕联。肌梭的传入信号参与运动控制的机制除对形成运动感觉有作用外,还可能起一种辅助运动及误差快速检测器的作用。许多不同类型的感受器,能提供一些外因情况的反馈机制,在有效、熟练地完成动作中起着重要作用。

(二) 植物性神经系统的运动整合

1. 植物性神经系统结构与机能特征

前述各系统生理功能的调节中已经涉及到植物性神经系统的功能,在此仅将其特征作进一步的归纳和总结。

(1)植物性神经支配的效应器是内脏平滑肌、心脏血管和腺体。多数内脏器官接受交感和副交感双重神经支配,而且交感和副交感神经的作用往往是对抗的。一般来说,植物性神经对外周效应器的支配具有持久的紧张性作用。

(2)从中枢发出的植物性神经,在抵达效应器之前必须先进入外周神经节,交换神经元,由交换后神经元发出的纤维(节后纤维)支配效应器,交换前的神经纤维称节前纤维。交感神经节前纤维短而节后纤维长;副交感神经节前纤维长而节后纤维短。一般节前纤维有髓鞘,传导速度快;节后纤维无髓鞘,传导速度慢。

(3)刺激交感神经的节前纤维,反应比较弥散,一根纤维往往和多个节内神经元发生突触联系,而副交感神经则不同,只与节后1~2个神经元突触联系。

(4)交感神经的低级中枢位于整个胸腰段脊髓外侧柱,副交感神经的低级中枢位于脑干的缩瞳核、上下唾液核、迷走背核、疑核和脊髓骶部相当于侧角部位。

(5)植物性神经的作用有时与效应器本身的功能状态有关。例如在妊娠子宫,刺激交感神经纤维可使平滑肌活动加强,而对平时非妊娠子宫则是抑制作用。

(6)交感神经系统的活动常以整个系统参与反应。例如,交感神经系统兴奋时,除心血管功能亢进外,还伴有瞳孔散大、支气管扩张、胃肠活动抑制等反应;副交感神经系统的活动比较局限,其整个活动目的在于保护机体、休整恢复、积蓄能量。

2. 运动时植物性神经系统的作用

人体运动时,由于耗氧量增加,使机体代谢水平提高, CO_2 、 H^+ 及血乳酸堆积。为满足肌肉氧耗及排出代谢产物的需要,在交感神经系统的总动员下,呼吸、循环、代谢及内分泌等组织器官的潜力得到释放,以适应肌组织代谢需要。主要表现在以下几个方面:

(1)循环系统

运动时交感神经兴奋会引起内脏血管收缩,骨骼肌毛细血管大量开放,从而导致血液重新分配:即血液由内脏转入骨骼肌,使循环血量增加,心率加快、血压升高、血流速度加快。其意义在于给肌肉输送氧料,排出代谢产物,使内环境保持相对稳定。

(2)呼吸系统

在交感神经系统的作用下,由于支气管平滑肌舒张、呼吸频率加快、呼吸深度加深,使肺通气量增加,摄氧量增大,以满足肌肉缺氧的需要。当氧供充足时,糖、脂肪可以继续燃烧释放能量,供给肌肉收缩持续运动时能量代谢的需要。

(3)代谢系统

交感神经兴奋时,一方面使肝糖原分解释放葡萄糖入血,通过血液循环,输送至肌肉,供给肌肉收缩时能量代谢需要,另一方面将其产生的乳酸运至肝脏进行糖异生作用。

(4)内分泌腺

交感神经兴奋不仅使肾上腺髓质分泌增多,还使肾上腺皮质素、胰高血糖素、垂体—性腺轴的分泌活动增加,从而导致心肌收缩力量增加,每搏输出血量增大、血压升高,同时使糖分解代谢加强、血糖浓度升高。

运动时在中枢神经系统的控制下,人体相应系统的整合作用可以动员机体内在的潜能,以适应当时机能状态的代谢需要。

四、脑的高级功能

(一)学习和记忆

学习和记忆是两个有联系的神经过程。学习是指人和动物依赖于经验来改变自身行为以适应环境的神经活动过程。记忆则是学习到的信息贮存和“读出”的神经活动过程。这些过程的建立,本质上都是条件反射建立的过程。



1. 学习过程

在动物实验中,给狗吃食物会引起唾液分泌,这是非条件反射。给狗以铃声刺激则不会引起唾液分泌,因为铃声与食物无关,这种情况下铃声称为无关刺激。但是,如果每次给狗吃食物以前先出现一次铃声,然后再给食物,这样多次结合以后,当铃声一出现,动物就会出现唾液分泌。铃声本来是无关刺激,现在由于多次与食物结合应用,铃声具有了引起唾液分泌的作用,即铃声已成为进食的信号,所以这时铃声就成了条件刺激。这样的反射称为条件反射。可见,条件反射是后天生活中形成的。形成条件反射的基本条件就是无关刺激与非条件刺激在时间上的结合,这个过程称为强化。在建立条件反射时,条件刺激要先于非条件刺激出现。任何无关刺激与非条件刺激结合,都可以形成条件反射。

2. 记忆过程

通过感觉器官进入大脑的信息量是很大的,但估计仅有10%的信息能被较长期地贮存记忆,而大部分却被遗忘。能被长期贮存的信息都是对个体具有重要意义的,而且是反复作用的信息。因此,在信息贮存过程中必然包含着对信息的选择和遗忘两个方面。信息的贮存需经过多个步骤,但简略地可把记忆划分为两个阶段,即短时性记忆和长时性记忆。人类的记忆过程可细分成四个阶段,即感觉性记忆、第一级记忆、第二级记忆和第三级记忆,前两个阶段相当于短时性记忆,后两个阶段相当于长时性记忆。短时记忆时间很短,平均约几秒钟;长时性记忆时间较长,一般不容易遗忘,如经常操作的手艺或动作,通过长年累月的运用,是不易遗忘的。

3. 学习和记忆的机制

(1)神经元活动的后作用是记忆的基础。在神经系统中,神经元之间形成许多环路联系,环路的连续活动也是记忆的一种形式。

(2)较长时性的记忆与脑内的物质代谢有关,尤其是与脑内蛋白质的合成有关。在金鱼建立条件反射的过程中,如用嘌呤霉素注入动物脑内以抑制脑内蛋白质的合成,则动物不能建立条件反射,学习记忆能力发生明显障碍。此外,中枢递质与学习记忆活动也有关。动物学习训练后注射拟胆碱药毒扁豆碱可加强记忆活动,而注射抗胆碱药东莨菪碱可使学习记忆减退。

(3)持久性记忆可能与新的突触联系的建立有关。动物实验中观察到,生活在复杂环境中的大鼠,其大脑皮层较厚,而生活在简单环境中的大鼠,其大脑皮层较薄。说明学习记忆活动多的大鼠,其大脑皮层发达,突触的联系多。人类的第三级记忆的机制可能属于这一类。

(二) 条件反射的抑制

条件反射的抑制可分为非条件性抑制和条件性抑制。条件性抑制的本质也是建立条件反射(阴性条件反射)。

1. 非条件性抑制

非条件性抑制是先天性的，是不需要后天学习训练就具有的。可区分为外抑制和超限抑制两种。

(1) 外抑制

在动物进行条件反射的实验时，突然出现一个新异刺激，将会引起实验动物的朝向反射，使原来条件反射活动减弱或消失。由于引起条件反射抑制的刺激是在条件反射中枢以外，故称为外抑制。

(2) 超限抑制

当刺激强度或时间超过某个界限时，条件反射量减小，甚至完全消失。这种由于过强或过长的刺激超过了大脑皮质神经细胞的工作承受能力、为防止皮质细胞受损害而产生的保护性抑制，通常被称为超限抑制。

2. 条件性抑制

条件性抑制是后天获得的，它需要逐渐训练使之形成和巩固。

(1) 消退抑制

在条件反射形成后，如果反复应用条件刺激而不给予非条件刺激强化时，已形成的条件反射就会逐渐减弱，直至消失，这种现象称为消退抑制。运动员纠正错误动作，本质上是消退抑制。

(2) 分化抑制

在条件反射形成初期，一些与条件刺激相似的刺激也或多或少地产生条件反射的效应。例如，用 120 次/分的节拍声音刺激与食物相结合形成的唾液分泌条件反射，若用 110 次/分或 130 次/分节拍音响刺激，也能引起该动物唾液分泌反应，此为条件反射的泛化。如果以后只对 120 次/分节拍的音响刺激强化，而对其他刺激不予强化，最终只对 120 次/分节拍音响产生分泌反应，这称为条件反射的分化。分化的结果是对强化的刺激产生反应，而对未被强化的近似刺激产生抑制，故把这种抑制称为分化抑制。在学习动作开始阶段，由于泛化现象会产生错误或多余的动作，通过对正确动作的强化(肯定)和对错误动作不强化(否定)，可以加速正确动作的掌握。

(3) 延缓抑制

建立条件反射的过程中，给以条件刺激后，再间隔一定时间才给予非条件刺激强化，如此反复多次以后，便形成延缓条件反射。这是在反射中枢产生了一定时间的抑制过程后才发生的反应，这种抑制称为延缓抑制。

在体育运动中，有很多运动技术要求形成延缓抑制。如排球的扣球，过早或过迟起跳都会使扣球失误。因此，建立适合各种扣球技术的延缓抑制过程，才能形成准确的刺激—反应时空判断。

(4) 条件抑制

已建立起的条件反射，用条件刺激与附加刺激同时作用(复合刺激)时不予强化，只对原条件刺激单独作用时给予强化，多次重复后，对单独的条件刺激仍能产生兴奋反



应,而对复合刺激则不产生兴奋反应。这种由于附加刺激不予强化而引起的抑制就称为条件抑制。如在球类运动中,许多限制性规则都具有条件抑制作用。

(三) 两个信号系统的概念

人类不仅对具体的刺激可建立条件反射,还可对抽象的语言和文字建立条件反射。这是人类与一般动物的主要区别之一。

第一信号是指现实的具体的信号,如声、光、味、触等。第二信号是现实的抽象信号,是表达具体信号的信号,如表示某物体的词语等。对第一信号刺激发生反应的皮质系统称为第一信号系统,对第二信号刺激发生反应的皮质系统称为第二信号系统。人类的第二信号系统是在第一信号系统活动的基础上建立起来的。人类通过词语可对一切现实事物和现象进行抽象概括,借助词语来表达思维。由于人类第二信号系统的发生和发展,词语信号就成为人类的主导信号。这就使人类的认识能力与适应能力大大提高,从而能更深刻地认识世界,发现并掌握它们的规律。在体育教学和运动训练中,教师的示范动作可以作为第一信号,语言讲解则被认为是第二信号。正确地运用动作示范和语言讲解,充分发挥第一、第二信号系统的作用,可产生良好的教学效果。

五、睡眠

睡眠是生命活动所必需的一个主动过程。人的一生中有三分之一时间是在睡眠状态中。通过睡眠,可以使人的精力和体力得到恢复,保持良好的机能状态。在睡眠时,人的感知觉能力出现暂时性减退,骨骼肌紧张性下降,并伴有植物性功能改变。如心率、血压、呼吸频率、代谢率及体温均下降,而生长素分泌则增多,糖原和蛋白质合成代谢加强,这些都对机体积蓄能量、体整恢复十分有利。

睡眠具有两种不同的时相,即慢波睡眠(正相睡眠)和快波睡眠(异相睡眠),前者为浅度睡眠状态,后者为深度睡眠状态。在整个睡眠期间,两种睡眠交替发生4~5次。异相睡眠是正常生活中不可缺少的生理过程,它与神经系统的成熟、发展及学习记忆活动关系十分密切,特别是在儿童生长发育过程中尤为重要。

一般认为,年龄、工作性质及个体差异是影响睡眠的主要因素。一般来讲,正常的睡眠时间应为:成年人每天需要7~9小时,新生儿约需18~20小时,儿童约需12~14小时,老年人5~7小时。体力劳动者较脑力劳动者睡眠时间长,运动员大强度运动后需10小时以上睡眠,故运动训练和比赛期间保证足够睡眠是取得良好的训练效果和优异成绩的前提条件。

对睡眠产生的机理有两种看法:一种是根据巴甫洛夫有关条件反射的研究结果而提出来的,认为睡眠是一种主动抑制过程,当抑制过程在大脑皮质内广泛扩散,并扩布到皮质下中枢时就引起睡眠。另外一种认为,在脑干尾端存在着能引起睡眠和脑电波同步化的中枢,这一中枢向上传导可作用于大脑皮层,并与上行激动系统的作用相对抗,从而产生睡眠。

由于中枢神经递质研究的进展,已把睡眠的发生机制与不同的中枢递质系统功能联



系起来,认为慢波睡眠可能与脑干5-羟色胺递质系统有关,异相睡眠可能与脑干内5-羟色胺和去甲肾上腺素递质系统有关。

【小结】

1.机体能对内外环境刺激作出反应,是因为机体内有多种感受器及感觉器官,它在接受刺激后,经过换能作用,可将信息传至大脑,并在此形成特异的感觉。人体重要的感觉器官有视觉、听觉、位觉、本体感觉及皮肤。各种感觉的形成与人体正常生命的维持至关重要,特别是在体育教学与训练中尤为重要。

2.神经系统是一切生物体的控制系统。主要由神经元和神经胶质细胞组成。神经元是神经系统的基本结构和功能单位。神经系统活动的基本方式是反射,其活动的基本过程是兴奋与抑制。突触是神经元与神经元之间联系的方式,一个神经元可以与多个神经元形成突触,突触越多,中枢延搁越长。通常上位中枢对下位中枢及效应器具有控制作用,而下位中枢及效应器可将其活动状况通过环路侧支反馈到上位中枢,使中枢神经系统有效地控制下位神经肌肉的活动。

3.睡眠是生命活动的一个主动过程,异相睡眠对儿童生长发育、脑内蛋白质合成及学习与记忆均有影响。人在睡眠时可使体力和精力得到恢复。

【思考题】

- 1.试述感受器的一般生理特征。
- 2.举例说明位觉产生的机理。
- 3.试述肌梭和腱梭的结构与功能。
- 4.牵张反射有哪些特点?举例说明它在运动中的意义。
- 5.状态反射的规律是什么?举例说明它在完成一些运动技能时所起的重要作用。
- 6.小脑皮质有哪些活动规律?小脑在控制和调节运动方面具有哪些功能?
- 7.大脑皮质对躯体运动的调节是通过哪些途径实现的?其功能如何?
- 8.举例说明条件抑制及延缓抑制在运动实践中的意义。
- 9.试述人体运动时神经系统对躯体运动的调节与整合。

【主要参考文献】

- 1.体育学院通用教材:《运动生理学》,北京,人民体育出版社,1990。
- 2.范少光等:《人体生理学》,北京,北京医科大学、中国协和医科大学联合出版社,1996。
- 3.张镜如主编:《生理学》,北京,人民卫生出版社,1998。
- 4.邓树勋等主编:《运动生理学》,北京,高等教育出版社,1999。
- 5.周绍慈、翁恩琪等:《神经生理学概论》,上海,华东师范大学出版社,1994。
- 6.曾小鲁主编:《神经解剖学基础》,北京,高等教育出版社,1994。

(沈阳体育学院 李秋萍)



运

动

应用篇

生

理

学



第九章

运动技能

【提要】本章将首先介绍运动技能的基本概念、运动技能形成机制和运动技能形成过程。在此基础上，分析影响运动技能形成和发展的主要因素。

第一节 运动技能的基本概念和生理本质

一、运动技能的基本概念

运动技能是指人体在运动中掌握和有效地完成专门动作的能力。这种能力包括大脑皮质主导下的不同肌群间的协调性。换言之，运动技能也就是指在准确的时间和空间内大脑精确支配肌肉收缩的能力，这需要用精确的力量和速度依一定的次序和时间去完成所需要的动作。运动技能的发展和提高，有赖于人们对人体机能客观规律的深刻认识和自觉运用。

体育运动的发展和提高，要求人们有良好的身体素质和运动技术水平。身体素质的发展在于人体机能能力的不断扩大和增强，而运动技术水平的提高则在于运动技能的不断改进和创新。随着运动技能的形成，同时身体素质也得到发展，身体素质提高了，对进一步改善运动技能又打下了良好基础，所以两者是相精相成、相互影响的。

二、运动技能的分类

运动技能可分为闭式和开式两类。

闭式运动技能特点是：①完成动作时，基本上不因外界环境的变化而改变自己的动作；②在运动结构上多属周期性重复动作；③完成动作时，反馈信息只来自本体感受器。多数单人项目运动属于闭式运动技能，如田径、游泳和自行车等项目。

开式运动技能特点是：①完成动作时，往往随外界环境的改变而改变自己的动作；②在运动结构上表现出多样性或非周期性特征；③完成动作时，由多种分析器参与工作，并综合总的反馈信息，其中往往以视觉分析器起主导作用。对抗性项目属于开式运动技能，如球类、击剑和摔跤等项目，一般来说开式运动技能比闭式运动技能的动作复杂。



闭式运动技能与开式运动技能的比较如下表。

闭式运动技能与开式运动技能比较

分类	闭式运动技能	开式运动技能
时序特征	严格的时序性	随外界环境改变而改变
动作结构	周期性	非周期性(多样性)
反馈信息源	本体感受器	多种分析器

三、运动技能的生理本质

(一) 运动条件反射的形成与运动技能

1. 人随意运动的反射本质

谢切诺夫曾提出“一切随意运动，严格地讲，都是反射。脑的活动的一切外部表现，确实都归结为肌肉运动。”其生理机理被认为是：人的随意运动是从感觉开始，以心理活动为中介，以肌肉的效应活动而告终的一种反射。以后巴甫洛夫在《所谓随意运动的生理机制》一文中，从理论上阐明随意运动的生理机理是暂时性神经联系。他用狗建立食物—运动条件反射证明，大脑皮层运动觉细胞可与皮质所有其他中枢建立暂时性神经联系，包括内、外刺激引起皮质细胞兴奋的代表区在内。随意运动的生理机理是以大脑皮质活动为基础的肌肉活动。因此，学习和掌握运动技能，其生理本质就是建立运动条件反射的过程。

2. 人运动条件反射形成的生理机理假说

人形成运动条件反射的过程是通过许多简单的非条件反射活动，如食物反射和防御反射等。随大脑和各器官的发育，在这些非条件反射的基础上，通过视觉、听觉、触觉和本体感觉与条件刺激物多次结合，就形成了简单的运动条件反射。在大脑中，与条件反射相关的中枢之间建立起了暂时的神经联系。

人形成运动技能就是形成复杂的、连锁的和本体感受性的运动条件反射。

运动技能与一般运动条件反射的区别在于：①复杂性 有多个中枢参与形成运动条件反射活动(运动中枢、视觉中枢、听觉中枢、皮肤感觉中枢和内脏活动中枢)；②连锁性 反射活动是一连串的，一个接一个，前一个动作的结束，便是后一动作的开始，具有严格的时序特征；③本体感受性 在反射过程中，肌肉的传入冲动(本体感受性冲动)起到重要作用，没有这种传入冲动，条件刺激得不到强化，这个复杂过程条件反射就不能形成，运动技能就不能掌握。因此，形成运动技能就是建立复杂的、连锁的和本体感受性的运动条件反射。

大脑皮质运动中枢内支配的部分肌肉活动的神经元在机能上进行排列组合，兴奋和抑制在运动中枢内有顺序地、有规律地和有严格时间间隔地交替发生，形成了一个

系统,成为一定的形式和格局,使条件反射系统化。大脑皮质机能的这种系统性就称为运动动力定型。因此,可以更确切地说,运动技能的形成就是建立运动动力定型的结果。

运动动力定型越巩固,就越能轻松自如地完成动作。运动动力定型建立得越多,动力定型的改建就越容易,大脑皮质的机能灵活性也越高。大脑机能的可塑性表现在在一定的条件下,新的运动动力定型可以取代旧的运动动力定型。运动实践证明,基本技术掌握得越多、越熟练,则不仅学习新的运动技能越快,而且运动技术运用自如,在实践中才会有丰富的创造力,形成独特的技术风格。

(二) 运动技能的信息传递与处理

从信息处理过程来看,将人看成是信息处理器,人从接受外界环境的刺激到发生反应,就是信息处理过程。运动技能的学习也可以看成是这样一个过程(图 9-1)。

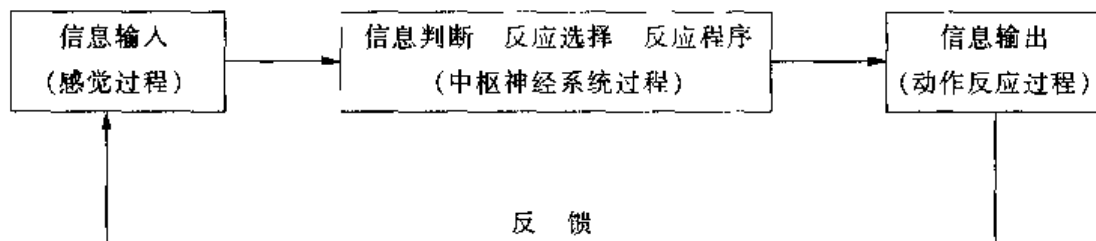


图 9-1 信息的输入至输出过程模式图
(依 Pleasant, 1981)

形成和再现运动技能的信息源(刺激)来自体外和体内两个方面。体外信息源来自教学过程中。教师发出信息(包括信息的形式、强度和数量等)传输给学生(传输手段包括讲解、示范和录像等);学生通过感觉器官,经大脑皮质分析综合形成初步的概念。体内信息来源来自大脑皮质一般解释区。大脑的一般解释区是由躯体感觉、视觉和听觉的联合区组成。一般解释区位置在颞叶后上方,角回的前方。一般解释区是动觉、视觉及听觉的汇合区,具有各种不同的感觉体验和分析能力,信号是由这里转移到脑的运动部位以控制具体的运动。

第二节 形成运动技能的过程及其发展

运动技能的形成是由简单到复杂的过程,并有其建立、形成、巩固和发展的阶段性变化和生理规律。只是每一阶段的长短随动作的复杂程度而不同。一般说来,可划分为相互联系三个阶段或称三个过程。



一、泛化过程

学习任何一个动作的初期,通过教师的讲解和示范以及自己的运动实践,都只能获得一种感性认识,而对运动技能的内在规律并不完全理解。由于人体内外界的刺激,通过感受器(特别是本体感觉)传到大脑皮质,引起大脑皮质细胞强烈兴奋,另外,因为皮质内抑制尚未确立,所以大脑皮质中的兴奋与抑制都呈现扩散状态,使条件反射暂时联系不稳定,出现泛化现象。这个过程表现在肌肉的外表活动往往是动作僵硬,不协调,不该收缩的肌肉收缩,出现多余的动作,而且做动作很费力。这些现象是大脑皮质细胞兴奋扩散的结果。在此过程中,教师应该抓住动作的主要环节和学生掌握动作中存在的主要问题进行教学,不应过多强调动作细节,而应以正确的示范和简练的讲解帮助学生掌握动作。

二、分化过程

在不断的练习过程中,初学者对该运动技能的内在规律有了初步的理解,一些不协调和多余的动作也逐渐消除。此时,大脑皮质运动中枢兴奋和抑制过程逐渐集中,由于抑制过程加强,特别是分化抑制得到发展,大脑皮质的活动由泛化阶段进入了分化阶段。因此,练习过程中的大部分错误动作得到纠正,能比较顺利地连贯地完成完整动作技术。这时初步建立了动力定型。但定型尚不巩固,遇到新异刺激(如有外人参观或比赛等),多余动作和错误动作可能会重新出现。在此过程中,教师应特别注意错误动作的纠正,让学生体会动作的细节,促进分化抑制进一步发展,使动作更趋准确。

三、巩固过程

通过进一步反复练习,运动条件反射系统已经巩固,达到建立了巩固的动力定型阶段,大脑皮质的兴奋和抑制在时间和空间上更加集中和精确。此时,不仅动作准确、优美,而且某些环节的动作还可出现自动化,即不必有意识地去控制而能完成动作。在环境条件变化时,动作技术也不易受破坏。同时,由于内脏器官的活动与动作配合协调,完成练习时也感到省力和轻松自如。

形成运动技能的三个过程是相互联系的,各过程之间并没有明显的界限。训练水平高的运动员在学习掌握新动作时,泛化过程很短,对动作的精细分化能力强,掌握运动技能快。初学者在学习新动作时,泛化过程较长,分化能力较差,掌握动作较慢。动作越复杂,泛化过程就越明显,分化的难度也就越大,形成运动技能所需要的时间就越长。

但是,动力定型发展到了巩固过程,也并不是可以一劳永逸了。一方面,还可在继续练习巩固的情况下精益求精,不断提高动作质量,使动力定型更加完善和巩固;另一方面,如果不再进行练习,巩固了的动力定型还会消退,动作技术越复杂,难度越大,消退得也越快。在此过程中,教师应对学生提出进一步要求,并指导学生进行技术理论学习,更有利于动力定型的巩固和动作质量的提高,促使动作达到自动化程度。

四、动作自动化

随着运动技能的巩固和发展,暂时联系达到非常巩固的程度以后,动作即可出现自动化现象。所谓自动化,就是练习某一技术动作时,可以在无意识的条件下完成。其特征是对整个动作或者是对动作的某些环节,暂时变为无意识的。例如,走路是人类自动化的动作,在走路时可以谈话、看报,而不必有意识地想应如何迈步、如何维持身体平衡等。又如熟练的篮球运动员在比赛时,运球等动作往往也达到自动化程度。

自动化动作的生理机理是以巴甫洛夫所揭示的高级神经活动的基本规律为基础的。人类一切随意运动都必须在大脑皮质参与下方能实现。但是在大脑皮质参与下所实现的机体反应活动并不一定都是有意识的。换言之,在无意识完成自动化动作时,仍然必须在大脑皮质参与下才能实现。在皮质参与下所实现的有机体的反应,有的是有意识的,有的可以是无意识的。

巴甫洛夫在分析有意识和无意识的生理机理时认为,只有在当时条件下具有最适宜兴奋的皮质部位所完成的活动才是有意识的。通过这种部位最容易建立新的暂时联系,也最容易形成新的分化相。当运动技能达到第三过程后,动作各环节的条件反射已逐步达到巩固过程。凡是已巩固的动作可以由皮质被抑制的区域或兴奋较低的区域来完成。按巴甫洛夫的话说,这时在有相应的刺激出现时就刻板式地产生以前所形成的反射活动,是由大脑皮质上兴奋性低落和不适宜的部分实现的。皮质上这些部位的活动,被称为无意识的、自动化的活动。

此外,在运动技能已经巩固的时候,第一和第二信号系统之间的联系,已经成为运动动力定型的统一机能体系。第一信号系统的兴奋可以选择性地扩散到第二信号系统。所以运动员可以精确地意识到自己所完成的动作,并可以用语言将完成动作的情况表达出来。

当动作出现自动化现象时,第一信号系统的活动已经从第二信号系统的影响下相对地“解放出来”。完成自动化动作时,第一信号系统的兴奋不向第二信号系统传递,或者只是不完全地传递,这时的动作是无意识的,或是意识不完全。

自动化动作也并不是永远无意识进行的,当接受外界刺激异常时,大脑皮质的兴奋就会提高,对自动化动作又会产生意识。例如,在悬崖上行走时,步行就成为有意识的了。此外,当运动员想要体会自己动作的某环节或肢体的某部分动作时,对这些动作则产生意识。例如,有训练的游泳运动员在加速前进游时,若注意腿的用力,这时支配腿部肌肉的运动中枢则处于最适宜的兴奋状态,腿的动作就能意识到,而此时两臂的动作则成为无意识的。当快达到池边时,运动员开始注意手的动作,适宜的兴奋性就转移到支配手臂的相应皮质运动中枢,而腿的动作则改为无意识的了。

动作达到自动化后,第二信号系统的活动就可摆脱第一信号系统的束缚,随着外界环境的复杂化,能更灵活地调整全身活动。例如,篮球运动员对基本动作掌握熟练后,根据比赛时的复杂变化,第二信号系统的活动可以专注于战略的变化,此时,运动员常能将各种已熟练的单个技术组成联合的动作,以适应当时比赛条件的要求。



要想提高运动成绩,必须使动作达到自动化程度,但不应认为动作达到自动化后,质量就得到保证。虽然动力定型已经非常巩固,但由于进行自动化动作时,第一信号系统的活动经常不能传递到第二信号系统中去。因此,如果动作发生少许变动,也可能一时未觉察,等到一旦觉察,可能变质的动作已因多次重复而巩固下来。所以,动作达到自动化以后,仍应不断检查动作质量,以达到精益求精。

正如上述,在体育运动实践中,运动技能形成过程并不是截然划分的,而是逐渐过渡的,各过程的出现和持续时间的长短,受许多因素的影响,既与教学方法和训练水平有关,又与学生学习的积极性和目的性有密切关系。

第三节 影响运动技能形成与发展的因素

一、动机在运动技能形成中的作用

(一) 动机

人的一切行动都是有目的的,都是受一定目的支配的。这种支配人的行为的目的,就称为是动机。动机是行为的发端。美国心理学家摩尔根(Morgan)和金(king)1966年把动机和行为的关系归结为一个由三种因素组成的一个循环链(图9-2)。即内环境刺激(生理、心理需要)和外环境刺激→引起动机状态→产生动机行为→达到满意状态→不满意可再激起新动机。动机状态由内环境或外环境的刺激所引起。内环境的刺激包括生理的需要(如学生持续学习时间长了以后,感到头昏脑胀,决定休息一下或到室外去活动活动)和心理的需要(如有的学生想当优秀运动员而积极参加体育锻炼,有的学生希望自己的身体更加健美而积极参加体育锻炼)。外环境的刺激,如天气热,出汗多,因而想喝水或找个阴凉的地方。又如学校规定体育不及格者不能评为“三好”学生,从而激发了学生的锻炼热情等。当然,内外环境的刺激也是可以转化的。例如,有的学生开始并不愿意参加体育活动(未激起动机状态),经过教师的启发诱导(外环境的刺激),提高了对参加体育锻炼的意义的认识(转化),从而引起了自觉参加锻炼的需要(内环境的刺激)。动机的形成是循环的第一阶段。动机形成后导致行为的产生,循环即进入第二阶段。行为结束后,循环进入第三阶段,即满意阶段。此时出现两种情况:一种是行为已达到目的,而结束这一循环;另一种行为未达到或未完全达到目的,即不满意或不满足,因而再次激起动机,产生新的行为而进入第二次循环,直至达到满意为止。在某些条件下,也可能是产生负效应。关键是要努力促成正效应。

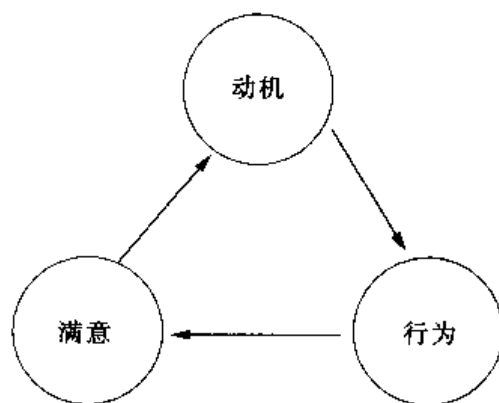


图 9-2 动机行为循环图
(依 Morgan 和 King, 1966)

心理学家把动机分成原发性动机和继发性动机两大类。前者是先天固有的，后者是后天获得的(图 9-3)。

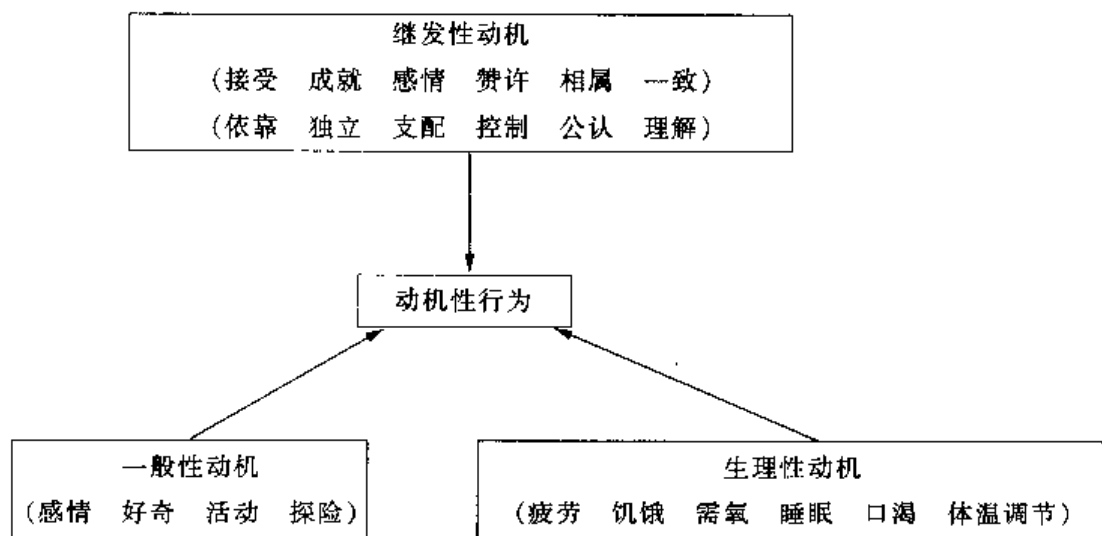


图 9-3 原发性动机与继发性动机相互作用产生动机性行为图
(依 Morgan 和 King, 1966)

原发性动机多来自人体内部生理的需要，与人体器官、系统和激素水平有关。如体内水分减少，会使人有渴的感觉，驱使人去喝水；饥饿能激起人的食欲；疲劳产生体息的驱动力等。这些原发性的动机在教学、训练或比赛中，都会直接影响训练效果。生理动机具有维持人体生存的意义。毫无疑问，它在保持人体内环境的稳定方面，起着相当重要的作用。

继发性动机又称获得性动机或社会性动机，它是个体通过学习和在生活经验中获得的，受社会环境的影响极为明显。如追求荣誉、地位和成就等等。对于此类继发性的动机，少年儿童和成人有着明显的差别。



原发性动机与继发性动机往往是相互作用的,例如饥饿是原发性的动机,而获得金钱是继发性的动机。成年人饥饿时在行为表现上往往与儿童不同,不一定非得去直接获得具体的食物,而常常是通过某种行为来获得金钱,然后再用钱去买所需要的食物,从而满足原始的动机。

(二) 动机与运动技能形成的关系

动机与运动技能的形成和运动成绩的提高及表现的关系是很复杂的,它们之间并不呈线性关系。有人认为动机强烈,运动技能的形成就越快或运动成绩就越好,但实际上并非如此,它们之间呈现出倒U字形的曲线关系(图9-4)。在学习与比赛条件相同的情况下,学生如果处于最佳动机水平,所取得的学习效果与比赛成绩最好;如果动机水平过高或过低,学习和比赛都不可能获得理想的结果。例如,有些学生平时学习成绩不错,但一到测验或比赛时,就由于紧张,想得太多,使得动机太强,而不能表现出自己的原有水平。这种情况在一些优秀运动员身上也经常出现。为此,在教学、训练和比赛中,教师要善于调整学生的动机状态,使之处于最佳水平。

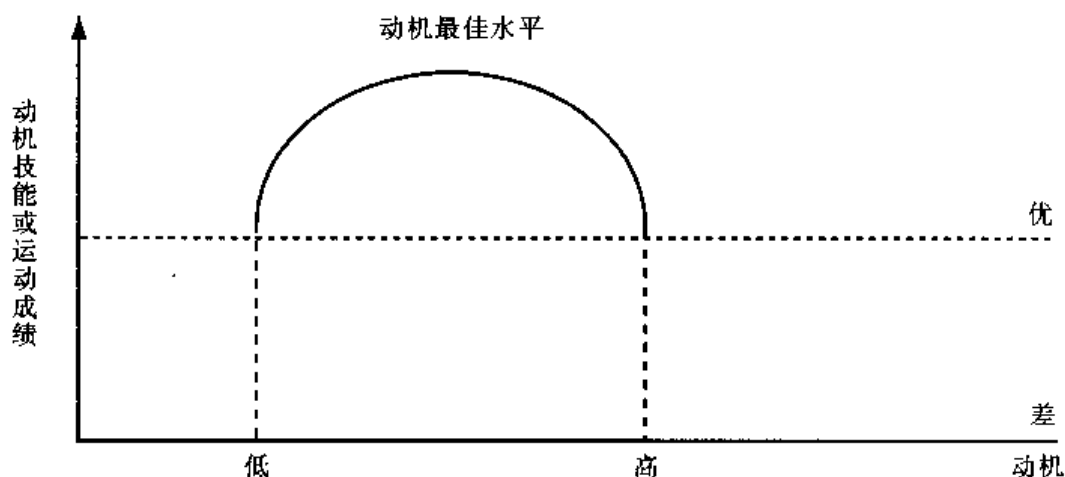


图9-4 动机和运动技能形成的关系图

(依 Morgan, 1966)

此外,还有一个与动机密切相联系的因素——抱负,也是直接影响着运动技能的形成发展。抱负水平(Level of aspiration, LOA)是指一个人在从事某种活动之前,希望自己的活动结果达到什么水平。抱负水平受个人经验与真实水平以及社会环境等条件的制约。因此,在为自己的行为结果预定指标时,必须从主、客观的实际情况出发。抱负、动机和运动技能的形成及运动成绩之间都有密切的联系。如果学生动机处于最佳状态,抱负水平较高,所激发出来的学习欲望和积极性也就越高,运动技能的形成就越快,学习过程所需要的时间就越短。

二、反馈在运动技能形成及教学训练中的作用

(一) 反馈的概念

控制论创始人维纳认为：反馈是输出信息的一部分，而这部分的输出信息，又返回到输入信息中去，通过伺服机构调整，使再次输出的信息更为精确。通俗讲，反馈就是效应器在反应过程中产生信息又传回控制部分，并影响控制部分的功能(图 9-5)。

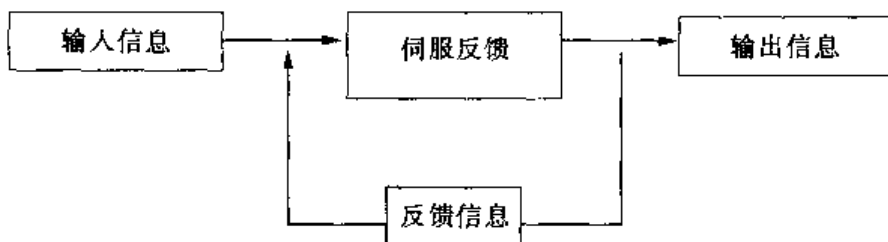


图 9-5 反馈信息图
(依 Pleasant, 1980)

(二) 反馈的种类

生理学根据反馈效果将反馈划分为正反馈和负反馈。正反馈的作用是通过反馈信息加强控制部位的活动。负反馈的作用是通过反馈信息抑制控制部位的活动。在运动技能学中，根据不同信息将反馈划分为固有反馈和非固有反馈(图 9-6)。

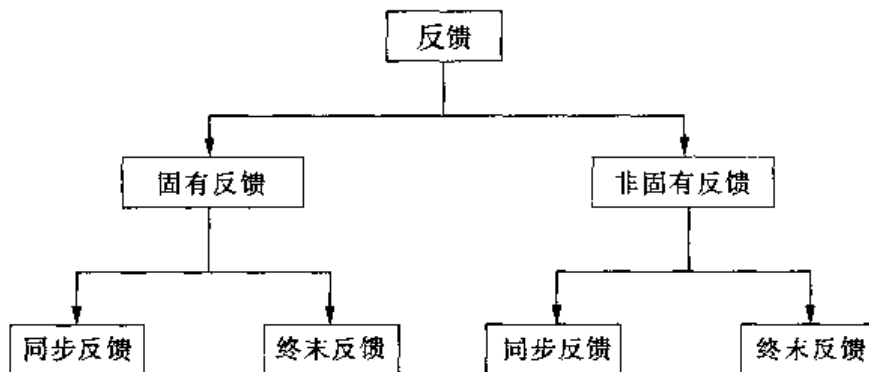


图 9-6 运动技能反馈分类图
(依 Rnsia, 1986)

固有反馈指由所要完成动作练习本身所提供的信息的反馈，如篮圈、箭靶等给练习者提供瞄准信息，这是动作练习本身要求所固有的。

非固有反馈指练习者在进行练习过程中或练习后，为了更准确地完成动作，由外部提供信息的反馈，如教师或教练员用语言、动作或某种机械刺激来提示练习者如何完成



或改进动作。这是动作练习本身非固有的反馈。

固有反馈和非固有反馈可分为同步反馈和终末反馈。同步反馈指练习者在整个练习过程中, 根据各种感受器所提供的反馈信息来决定自己的动作, 如乒乓球练习者根据对方来球的落点、速度、旋转等来决定自己的步伐移动与回击的方向。终末反馈指动作结束后即刻产生的反馈, 如篮球的投篮动作, 只能在完成投篮动作的一刹那, 才能从投中与否中分析出用力方向、用力大小、出手角度与时间等掌握得是否准确等原因。

了解反馈分类的意义在于使体育教师能分清所教的某一技术主要是属于哪一类的反馈信息, 从而采取相应的教法解决不同的教学和训练问题。

(三) 反馈的作用

1. 提供信息

美国心理学家阿塔姆斯(Atamnse, 1971)认为: 反馈的主要作用是提供信息而不是强化。玛契尼克(Matenik, 1976)对利用反馈信息提高动作质量的看法是: 最初是固有的或非固有的反馈, 经过伺服机构调整以后, 产生了一个新的信息, 然后再通过新的信息去纠正错误动作, 从而提高了动作质量, 导致学习者作出正确的应答(图 9-7)。

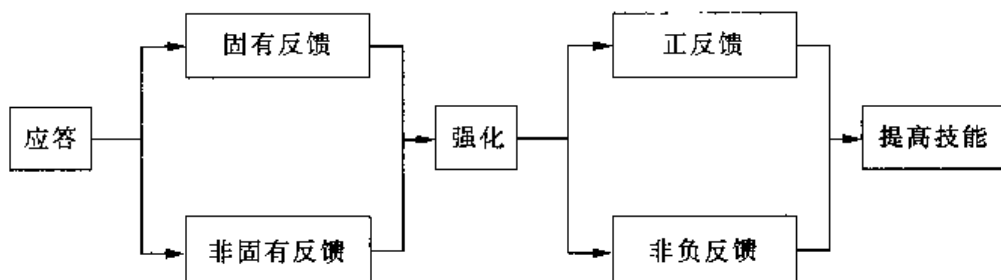


图 9-7 反馈信息对提高动作技能的作用

(依 Rusia, 1972)

2. 强化动机

美国心理学家茹莎和塞德恩塔浦(Rusia、sidertap, 1972)认为: 反馈在学习运动技能时还有强化作用。这种强化作用可以是阳性的, 也可以是阴性的。阳性强化是通过一些鼓励性的语言或措施, 最后达到增强或提高效果的作用; 反之, 阴性强化是通过一些批评性的语言或措施, 达到减弱或降低的作用(图 9-8)。但不管是何种反馈和强化, 都是为达到提高运动技能的目的。

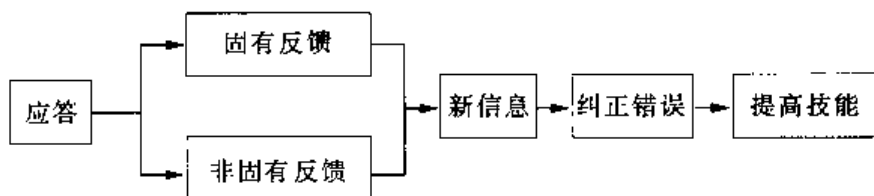


图 9-8 反馈强化对提高动作技能的作用

(依 Rusia, 1972)

3. 激发动机

反馈还可以起到激发动机的作用, 在运动实践中通过反馈可以激发运动员的情绪, 或增强运动员的必胜信心。

(四) 运动技能形成的信息反馈通道

在运动技能形成的反馈通道中, 小脑起着耦合器的作用, 肌肉收缩时本体感受器将肌肉收缩的信息及时传向小脑, 同时人脑皮层的指令信息也到达小脑, 在小脑耦合, 两种信息通过比较, 确定实际完成的动作偏离目标的程度, 然后由小脑红核发出信息, 经丘脑外侧核, 返回到大脑皮层发出指令的代表点, 从而及时发出纠正动作的指令信息(图 9-9)。因此在体育教学训练中, 首先必须使学生建立正确的动作概念, 才有可能准确地自我纠正错误动作。

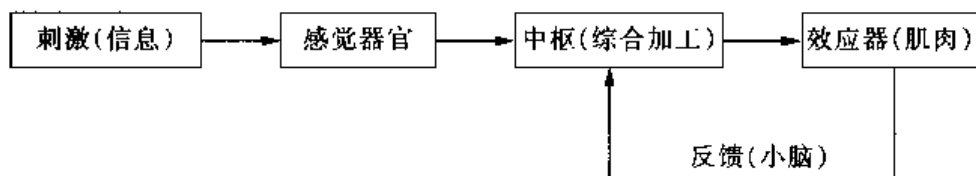


图 9-9 运动技能形成的信息反馈通道

(五) 反馈与体育教学训练

教师应根据不同情况, 科学地运用反馈原理来提高教学训练水平。例如, 用非固有反馈改善学生的技术, 用语言反馈给学生以必要的暗示, 用同步反馈在练习时给以不断的强化。在闭式运动技能中使学生善于体会本体感受的反馈信息, 在开式运动技能中善于利用综合的反馈信息。教师应学会在反馈原理指导下, 创造出行之有效的教法。

教师应教会学生在比赛前想象完成比赛动作的过程、注意事项及胜利后的喜悦, 从而产生反馈信息, 强化和激发成功完成比赛动作的动机。

在学习的初级阶段, 由于神经过程处于分化阶段, 内抑制尚未完全建立, 因而控制动作的能力差, 动作不协调、不精确, 有多余动作。在这一阶段的教学训练中, 教师应充分利用视觉的反馈作用, 加强示范与模拟练习, 不断强化视觉与本体感觉之间的沟通, 但应注意不要过多地抓动作细节。

在学习动作的巩固阶段, 肌肉运动的表象更清楚, 动觉动作的控制及语言反馈信息作用加强, 视觉和意识对动作的控制相对逐渐减弱。因此, 在此阶段的教学训练中, 应多运用语言反馈信息, 以及非固有的、积累的反馈信息, 强化动作与思维的沟通。

在纠正动作时, 对初学者应当经常给予阳性的反馈信息(即肯定其对的或正确的一面)。这实际上是在扶持正确动作的同时, 通过正诱导的机制来纠正错误动作。

对于高水平运动员, 因为他们对动作理解深刻, 原来的动作定型巩固, 故可以直接

指出其错误动作，特别是精细动作更是如此。反馈对初学者的作用是直接指导他们完成正确动作。反馈对高级运动员的作用是直接帮助他们改进错误动作。

在每次教学训练课结束之后，要求学生去做回忆、写训练日记，通过反馈和强化，可以加深对教学训练主要内容的理解，有助于提高教学训练效果。利用录像反馈方法，让学生及时分析和对比自己的动作，效果会更好。

三、训练水平在运动技能形成中的作用

在各种运动项目中，运动成绩或技术水平的提高都具有一个共同的规律，即训练初期运动成绩提高得快，而后期则提高得慢。运动成绩的提高与运动技术的熟练程度密切相关。其主要原因是在学习新技术初期，过去已经掌握的与新技术有关的相似动作及动作经验具有迁移作用，有助于新技术的掌握。但到了后期，随着技术水平的提高，对运动条件反射的精确性的要求越来越高，与训练初期形成的运动条件反射差距很大，这就相当于需要重新建立新的运动条件反射。在学习新技术的初期是粗糙的分化，而到了后期则要求进行精细的分化。技术水平越高，对分化的精度要求也越高，因此，这种分化抑制的建立也就越困难。运动技术的掌握和提高是建立在一定的身体素质基础上的。在学习新技术的初期，可以利用原有的素质基础，而到了后期，随着运动技术水平的提高，对身体素质的要求也越来越高，而发展和提高身体素质是需要时间的。

运动成绩的提高是螺旋式上升的，因而运动训练也总是分周期的。运动成绩是身体素质、技术、战术及心理因素的综合表现。每一个训练周期，在不同的训练水平上，都存在一个构成运动成绩的诸因素重新综合的问题。这种综合实质上是要求重新建立更高水平的运动条件反射。

从心理因素上来分析，初学动作时，运动内容和教学训练方法都比较新颖，容易激发起学生的学习兴趣，加之学习效果比较明显，因而容易激发学生的学习积极性，从而加速了掌握技术的进程。而到了改进和提高阶段，练习内容和手段大都是重复的，可直接感知的学习效果减弱，容易使学生产生单调、枯燥以至厌烦的感觉而形成消极心理，影响学习效果。

四、大脑皮质机能状态在运动技能形成中的作用

大脑皮质机能状态在运动技能形成过程中起着重要的作用。大脑皮质兴奋性过高或过低都会影响正常运动技能水平的发挥。本世纪初期美国的耶克斯（Yekes）和多德森（Dougdsen）发现应激水平与运动技能水平之间呈倒U关系。适度的应激水平可使运动技能的发挥达到最高水平（图9-10）。

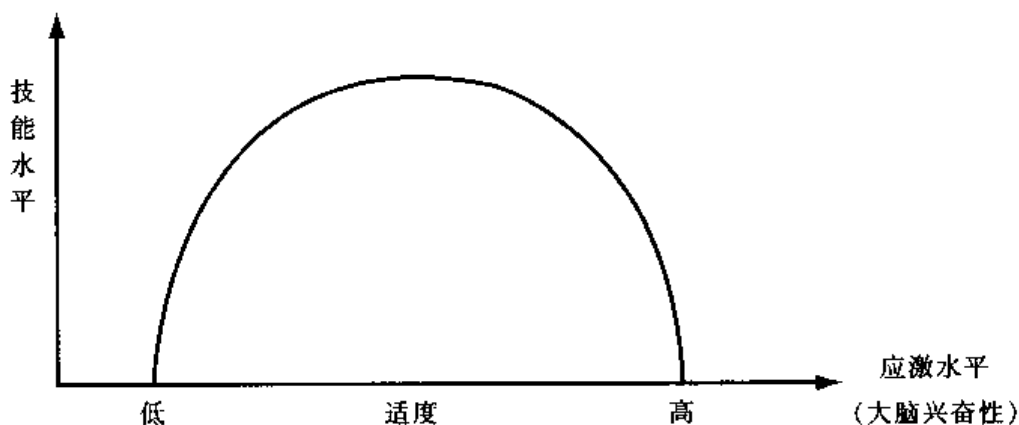


图 9-10 应激水平与技能水平之间的关系
(依运动技能学, 1980)

疲劳可以导致应激水平的降低，赛前紧张可以导致应激水平的升高。通过调整赛前状态和准备活动可以使应激水平达到最佳状态。

五、感觉机能在运动技能形成中的作用

运动技能的形成过程，就是在多种感觉机能参与下同大脑皮质运动细胞建立暂时性神经联系的过程。特别是本体感觉，对形成运动技能尤有特殊意义。人体各种感觉都可帮助肌肉产生正确的肌肉感觉，没有正确的肌肉感觉就不可能形成运动技能。所以，在运动实践中只有勤学苦练、反复实践，才能建立精确的分化，区别正确动作和错误动作的肌肉感觉，才能巩固正确动作，消除错误动作。

视觉在学习某些运动项目的技能中起着主导作用，如球类、射击等运动项目。就是在一些通常被认为视觉不起主要作用的项目中，实际上视觉也在起着主导作用。例如，先让受试者睁眼做单腿站立，可以看到受试者能保持较长的时间，然后让受试者闭眼再做同样的动作，发现只能维持很短的时间。这就说明视觉在影响着肌肉调节平衡的能力。同样，对肌肉的协调活动、以及准确性和韵律感等，视觉也起着不可忽视的作用。视觉的主导作用，要在平时训练时就应视为动力定型的一部分。比如在单杠上做车轮旋转后落地时的刹那，要想站稳，就一定要双眼看到某一固定的位置，借助视觉保持平衡。如果平时不注意这方面的练习，比赛时就很难发挥出高水平。

在体育教学和运动训练中，还应充分发挥听觉与本体感觉间的相互作用，建立正确动作的频率和节奏感。如中长跑运动员在练习中，常常随着有节奏的声响调节跑的频率，建立跑的正确节奏，体操运动员常用音乐伴奏，以增强体操运动员的节奏感和韵律感，加速动作的掌握。

在体育教学和训练中充分发挥位觉与本体感觉间的相互作用，也会加速运动技能的形成。随着运动技术的提高，运动员在空中完成翻腾或旋转动作时，对位觉空间三维（上下、左右、前后）的适应能力要求很高。只有本体感觉和位觉对时间和空间的感知具有精确的分化，才能在空中完成复杂的动作。如体操和跳水运动员为尽快掌握空中动作，



往往先降低高度或用保护带进行反复练习,使运动员体会和建立空间三维感觉,以增强位觉机能敏感性。

在体育教学和训练中也要充分发挥皮肤感觉与本体感觉间的相互作用,以建立正确的动力定型。如初学爬泳者下肢打水的幅度不是过大就是过小,为了尽快掌握正确的动作幅度,可用一个限制圈控制下肢打水的幅度,通过皮肤的触觉,消除下肢动作幅度过大或过小,强化正确的本体感觉。又如运动员推铅球时,在铅球出手的瞬间容易出现左肩后撤的错误动作。这时教师可在学生推球出手的瞬间,用手顶住学生的左肩,以帮助学生会正确的肌肉感觉,形成正确动作。

在教学过程中,如果学生不能独立完成动作,教师可以用助力帮助学生完成动作,使学生获得完成动作时的肌肉感觉。有时采用减小难度的方法,如高杠上的体操动作完不成,可先在低杠上做,学生能在低杠上完成动作获得正确的肌肉感觉后,再到高杠上就容易掌握了。因此,在练习中设法使学生获得正确的肌肉感觉,对建立运动条件反射起着有力的强化作用。

如上所述,在形成运动技能时,除视觉、听觉、位觉和皮肤感觉起重要作用外,同时也与内脏感觉机能有着密切的联系。在完成任何动作时各感觉机能都同时起作用,只不过根据运动项目的特点,对某一种感觉机能要求更高一些。所以在运动实践中,要尽量多实践,充分发挥各感觉机能作用,以便有效地加速运动技能的形成。

【小结】

1.运动技能是指人体在运动中掌握和有效地完成专门动作的能力。指在准确的时间和空间里大脑精确支配肌肉收缩的能力。运动技能可以划分为闭式技能和开式技能两类。学习和掌握运动技能,其生理本质就是建立运动条件反射的过程。形成运动技能就是建立复杂的、连锁的和本体感受性的运动条件反射。

2.运动动力定型是指大脑皮质运动中枢内支配的部分肌肉活动的神经元在机能上进行排列组合,兴奋和抑制在运动中枢内有顺序、有规律并有严格时间间隔地交替发生,形成了一个系统,成为一定的形式和格局,使条件反射系统化。

3.运动技能的形成是由简单到复杂的建立过程,并有其建立、形成、巩固和发展的阶段性变化和生理规律。一般可划分为泛化、分化和巩固三个相互联系的阶段。动作自动化是指练习某一套动作或完成某项技能时,可以在无意识的条件下完成。其特点是可以随意开始和终止,一旦开始就不需要意识的参与而能自动重复进行,并且可以在执行过程中被感觉信息所调节。

4.动机与运动技能形成之间是倒U字形的曲线关系。处于最佳动机水平,可以取得更好的学习效果和比赛成绩。形成运动技能过程中反馈信息的作用是提供信息、强化动机和激发动机。在运动技能形成过程中应该充分利用反馈信息,加快运动技能的形成和提高运动技能的质量。

5.应激水平与运动技能水平之间呈倒U关系,疲劳可以导致应激水平的降低,赛前紧张可以导致应激水平的升高。通过调整赛前状态和准备活动可以使应激水平达到最佳状态。

6.在形成运动技能时,视觉、听觉、位觉、皮肤感觉与本体感觉都起着重要的作用,因此在运动实践中,要充分发挥各感觉机能的作用,加速运动技能的形成。

【思考题】

- 1.什么是运动技能和动作自动化?
- 2.在运动技能形成的三个阶段过程中各有什么生理特点?
- 3.动机对形成运动技能有哪些影响?
- 4.反馈对形成运动技能有哪些作用?
- 5.运动成绩与运动技能形成之间有何关系?
- 6.如何利用感觉间相互关系加速运动技能的形成?

【主要参考文献】

- 1.体育学院通用教材:《运动生理学》,北京,人民体育出版社 1990。
- 2.杨锡让等:《实用运动生理学》,北京,北京体育大学出版社,1999。

(北京体育大学 熊开宇)



第十章

有氧、无氧工作能力

【提要】人体运动时能量代谢包括有氧代谢和无氧代谢。本章概述了最大摄氧量、乳酸阈和无氧功率等与有氧、无氧工作能力有关的生理指标的理论与实践意义及测试方法。

一切运动的能量供应过程都是由有氧代谢和无氧代谢过程以不同的比例组成。因此，运动能力又可分为有氧工作能力和无氧工作能力。代谢过程与运动能力密切相关。

第一节 概述

一、需氧量与摄氧量

(一) 需氧量

需氧量是指人体为维持某种生理活动所需要的氧量。通常以每分钟为单位计算，正常成人安静时需氧量约为 250ml/min(毫升/分)。

运动时需氧量随运动强度而变化，并受运动持续时间的影响。运动时随着运动强度的增大，每分需氧量也相应增加。运动强度越大、持续时间越短的运动项目，每分需氧量则越大；反之，运动强度较小、持续时间长的运动项目，每分需氧量少，但运动的总需氧量却大。例如，从 100 米赛跑速度计算出的每分需氧量可高达 40L/min(升/分)，其总需氧量只有 7L(升)左右；而中等强度的马拉松跑时每分需氧量约为 2~3.5L/min，但由于运动持续时间长(2 小时以上)其总需氧量可达 700L 以上。可见，运动时的每分需氧量反映了运动强度的大小。

运动时总需氧量的大小与运动强度及持续时间有关。从事某项运动的总需氧量可按下式计算：

总需氧量 = (运动时每分摄氧量 + 恢复期每分摄氧量 - 安静时每分摄氧量) × (运动时间 + 恢复时间)

从总需氧量中扣除运动过程中安静时需氧量的平均值，是为了精确地计算从事某项运动的净需氧量。



(二) 摄氧量

单位时间内, 机体摄取并被实际消耗或利用的氧量称为摄氧量(oxygen uptake)。有时把摄氧量也称为吸氧量(oxygen intake)或耗氧量(oxygen consumption), 通常以每分钟为单位计量摄氧量。安静时, 机体代谢水平低, 能量消耗少, 每分摄氧量与每分需氧量是平衡的。运动时, 随着运动强度的增加, 每分需氧量成比例增加, 摄氧量能否满足需氧量, 取决于运动项目的特点。在持续时间短且强度大的运动中以及低强度运动的开始阶段, 摄氧量均不能满足需氧量而出现氧的亏欠。

二、氧亏与运动后过量氧耗

(一) 氧亏

在运动过程中, 机体摄氧量满足不了运动需氧量, 造成体内氧的亏欠称为氧亏(oxygen deficit)。

在进行强度大且持续时间短的剧烈运动中, 即使氧的运输系统功能已经达到最高水平, 但摄氧量仍不能满足需氧量而出现氧亏。同样, 在低强度运动的开始阶段, 由于内脏器官的生理惰性大, 氧运输系统的功能不能立即提高到应有的水平, 其摄氧量亦不能适应运动的需要。所以, 在低强度运动的开始阶段也会出现氧亏(图 10-1)。

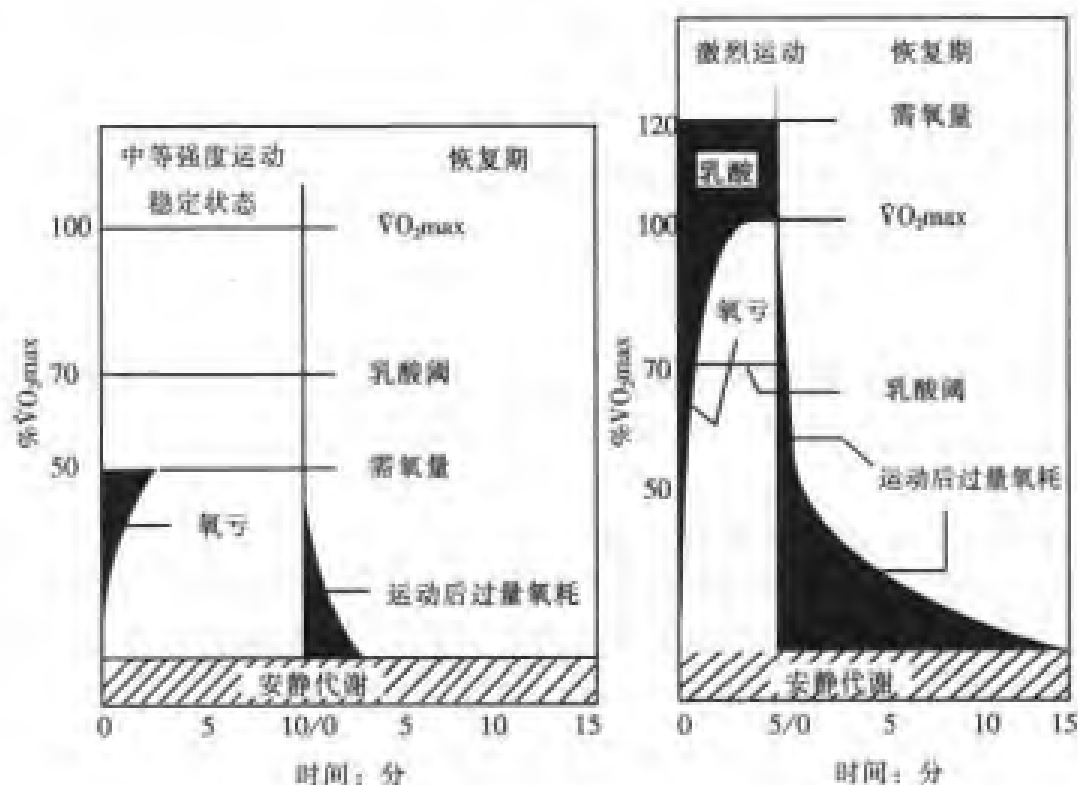


图 10-1 氧亏和运动后过量氧耗示意图
(依 Noble B.J. 1986)



(二) 运动后过量氧耗

运动结束后, 肌肉活动虽然停止, 但机体的摄氧量并不能立即恢复到运动前相对安静的水平。将运动后恢复期处于高水平代谢的机体恢复到安静水平消耗的氧量称为运动后过量氧耗(excess post-exercise oxygen consumption, EPOC)。

运动后恢复期的摄氧量与运动中的氧亏并不相等, 而是大于氧亏。因此, 运动后恢复期出现的过量氧耗, 不仅用于运动中所欠下的氧, 而且还要用于使处于较高代谢水平的机体逐渐恢复到运动前安静水平所消耗的氧量。研究表明, 下列因素是影响运动后过量氧耗的主要原因。

1. 体温升高

运动使体温升高, 而运动后恢复期体温不可能立即下降到安静水平, 肌肉的代谢和肌肉温度仍继续维持在一个较高水平上, 经一定时间逐渐恢复。实验证明, 体温和肌肉温度与运动后恢复期耗氧量的曲线是同步的。体温升高 1°C 时, 体内的代谢率可增加 13%。据赫勃格(Hegberg)计算, 运动后恢复期耗氧量恢复曲线的慢成分, 有 60%~70% 是由于肌肉温度升高造成的。因此, 运动后体温较高是运动后耗氧量保持较高水平的重要原因之一。

2. 儿茶酚胺的影响

运动使体内儿茶酚胺增加, 运动后恢复期仍保持在较高水平。去甲肾上腺素促进细胞膜上的 Na、K 泵活动加强, 因而消耗一定的氧。

3. 磷酸肌酸的再合成

在运动过程中, 磷酸肌酸(CP)逐渐减少以至排空, 在运动后 CP 需要再合成。在运动后恢复期 CP 的再合成需要消耗一定氧。

4. Ca^{2+} 的作用

运动使肌肉细胞内 Ca^{2+} 的浓度增加, 运动后恢复细胞内外 Ca^{2+} 的浓度需要一定时间。 Ca^{2+} 有刺激线粒体呼吸的作用。由于 Ca^{2+} 的刺激作用使运动后的额外耗氧量增加。

5. 甲状腺素和肾上腺皮质激素的作用

甲状腺素和肾上腺皮质激素也有加强细胞膜 Na、K 泵活动的作用。运动后的一定时间内, 体内甲状腺素和肾上腺皮质激素的水平仍然较高, 因而使 Na、K 泵活动加强, 消耗一定量的氧。

氧债 (参考内容)

经典的氧债学说将运动后恢复期内的过量氧耗称为氧债(oxygen debt)。这是 20 世纪 20 年代由希尔(Hill)、梅耶霍夫(Meyerhof)和马格利亚(Margria)等人创立和完善

的。传统的氧债理论认为,在进行剧烈运动时,由于机体摄入的氧不能满足运动的需要,此时机体要进行无氧代谢,产生大量乳酸,从而形成氧债,并将氧债分为乳酸氧债和非乳酸氧债,在恢复期机体仍然要保持较高的耗氧水平,以氧化乳酸偿还氧债。多年来,氧债理论曾是运动生理学的重要理论支柱。但自20世纪80年代中期以来,许多研究对经典的氧债学说提出了质疑。布鲁克斯(Brooks)等人的研究表明,运动后出现的过量氧耗,不完全用于偿还运动中的氧亏,还用于使处于活动状态的机体恢复至运动前安静时所需的额外的耗氧量。同时认为乳酸氧债与过量氧耗没有因果关系。研究表明,患有麦克阿特尔症(McArdle)患者的肌肉中缺乏磷酸化酶,丧失了生成乳酸的能力,但在运动后的恢复期仍可出现过量氧耗现象。人体在从事短时间、大强度的力竭性运动后的恢复早期,血乳酸浓度是持续升高的,而此时的耗氧量却已恢复到安静水平,可见,运动后的过量氧耗并非用于偿还氧债。因此,大多数学者认为,应废除“氧债”的概念,建立“运动后过量氧耗”的新概念。

第二节 有氧工作能力

氧是生物体新陈代谢所必需的,无论日常生活、各种活动及体育运动都离不开氧。所谓有氧工作,是指机体在氧供充足的情况下由能源物质氧化分解提供能量所完成的工作。氧供充足是实现有氧工作的先决条件,也是制约有氧工作的关键因素。因此,单位时间内机体的最大摄氧水平及氧利用率是评价人体有氧工作能力的重要指标。

一、最大摄氧量

(一) 最大摄氧量的概念及正常值

最大摄氧量是指人体在进行有大量肌肉群参加的长时间剧烈运动中,当心肺功能和肌肉利用氧的能力达到本人极限水平时,单位时间内(通常以每分钟为计算单位)所能摄取的氧量称为最大摄氧量(maximal oxygen uptake, $\dot{V}O_{2\max}$)。最大摄氧量也称为最大吸氧量(maximal oxygen intake)或最大耗氧量(maximal oxygen consumption)。它反映了机体吸入氧、运输氧和利用氧的能力,是评定人体有氧工作能力的重要指标之一。

最大摄氧量(以下文中均以 $\dot{V}O_{2\max}$ 表示)的表示方法有绝对值和相对值两种。绝对值是指机体在单位时间(1分钟)内所能吸入的最大氧量,通常以 L/min(升/分)为单位;相对值则是按每千克体重计算的最大摄氧量,以 ml/kg/min(毫升/公斤体重/分)为单位。由于人的个体间的身高及体重差异较大,因此,用最大摄氧量的绝对值进行个体间的比较是不适宜的,而相对值消除了体重的影响,在个体间进行比较则更有实际意义。我国正常成年男子最大摄氧量约为 3.0~3.5 L/min,相对值为 50~55 ml/kg/min;女子较男子略低,其绝对值为 2.0~2.5 L/min,相对值为 40~45 ml/kg/min。 $\dot{V}O_{2\max}$ 受遗传因素的



影响较大,并依年龄、性别和训练等因素的不同而有所差异。

(二) 最大摄氧量的测定方法

目前,常用于测定 $\text{VO}_{2\max}$ 的方法有直接测定法和间接推算法两种。

1. 直接测定法

通常在实验室条件下,让受试者在一定的运动器械上进行逐级递增负荷运动实验测定其摄氧量。常用的运动方式为跑台跑步、蹬踏功率自行车或一定高度的台阶实验。由于运动器械、负荷方式不同,实验程序各异,所测得的 $\text{VO}_{2\max}$ 也略有差异。

在直接测定 $\text{VO}_{2\max}$ 时,通常采用以下标准来判定受试者是否已达到本人的 $\text{VO}_{2\max}$:
① 心率达 180 次/分(儿少达 200 次/分)。② 呼吸商(RQ)达到或接近 1.15。糖的呼吸商为 1,脂肪的呼吸商为 0.7,在一般强度不大的运动中,主要是糖与脂肪的混合供能,呼吸商在 0.85 左右,但随运动强度增大,糖酵解的比例不断增加,RQ 为 1 时表明全部由糖酵解供能,超过 1 甚至更多时表明 CO_2 有了额外的增多,这主要是无氧酵解供能产生乳酸并被缓冲物中和生成碳酸,后者分解排出更多的 CO_2 的结果。③ 摄氧量随运动强度增加而出现平台(继续运动时,相邻两次负荷摄氧量的差别在 150 ml/min 以下或 2ml/kg/min 以下)或下降。④ 受试者已发挥最大力量并无力保持规定的负荷即达精疲力竭。一般情况下,符合以上四项标准中的三项即可判定达到 $\text{VO}_{2\max}$ 。

训练有素的运动员一般用直接测定法测 $\text{VO}_{2\max}$,其数据可靠,重复性好,能准确客观地评定运动员的有氧能力。但直接测定法对于老年人、少年或体弱者是不适宜的,需用简单的间接法来推算其 $\text{VO}_{2\max}$ 。

2. 间接推算法

$\text{VO}_{2\max}$ 的间接推算法是指受试者进行亚极量运动时,根据其心率、摄氧量或达到某一定量心率的做功量等数值推算或预测出 $\text{VO}_{2\max}$ 。国内外使用较普遍的间接推算法是瑞典学者 Astrand-Ryhmin 列线图法(图 10-2)。即根据亚极量负荷时测得的摄氧量与心率的线性相关关系绘制的推测 $\text{VO}_{2\max}$ 列线图。它较适用于一般常人和运动水平较低者。而优秀运动员用此方法推算获得的数值常与实测值有较大的误差。此外,我国学者根据定量负荷时测得的心率、摄氧量以及身高、体重等指标研究并制定了适用于不同性别、不同年龄运动员及不同人群的利用多元逐步回归推算 $\text{VO}_{2\max}$ 的方程式。用间接法推算 $\text{VO}_{2\max}$ 具有简易、经济、快速等特点,但用间接推算法预测 $\text{VO}_{2\max}$ 时,应考虑到误差因素的影响。

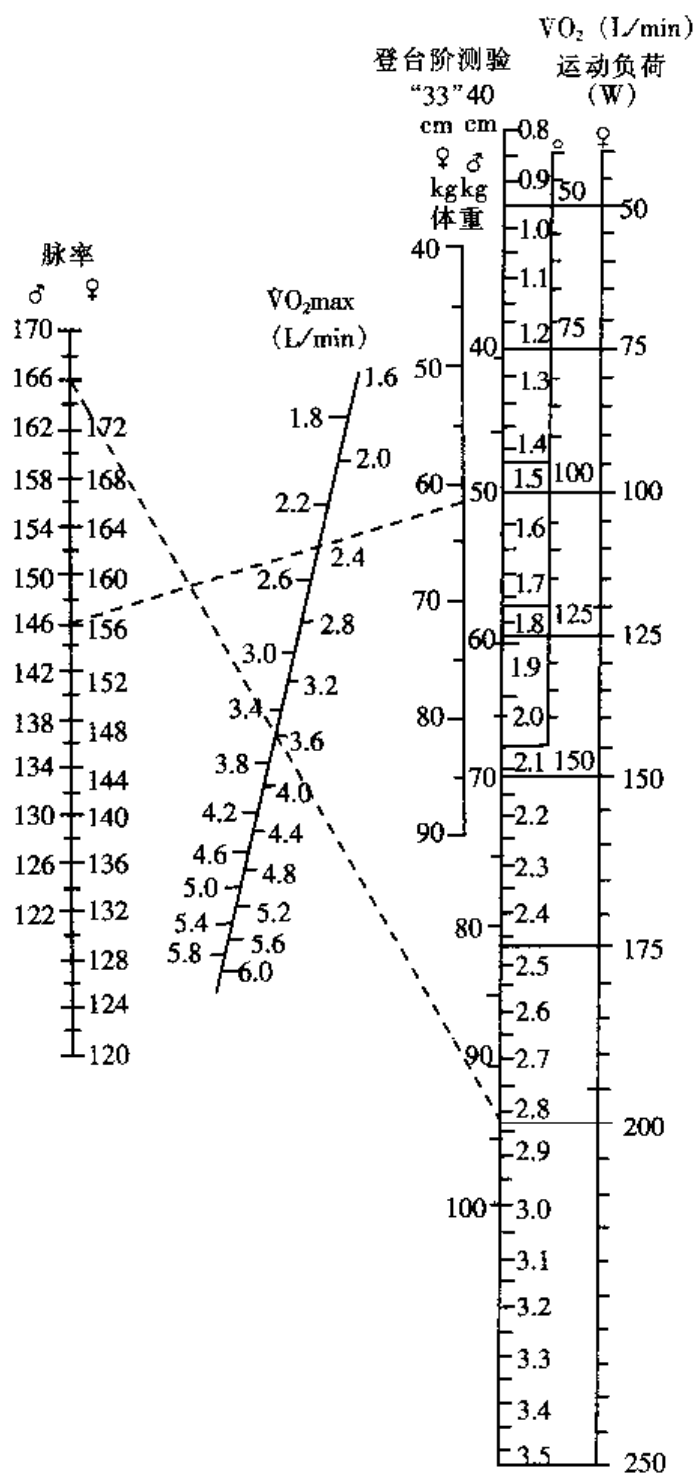


图 10-2 用亚极量运动后的心率预测 $\text{VO}_{2\text{max}}$ 的列线图
(依 Astrand, 1977)

(三) 最大摄氧量的影响因素

$\text{VO}_{2\text{max}}$ 受多种因素制约, 其水平的高低主要决定于氧运输系统或心脏的泵血功能和肌组织利用氧的能力。

1. 氧运输系统对 $\dot{V}O_{2\max}$ 的影响

空气中的氧通过呼吸器官的活动吸入肺, 并通过物理弥散作用与肺循环毛细血管血液之间进行交换。因此, 肺的通气与换气机能是影响人体吸氧能力的因素之一。肺功能的改善为运动时氧的供给提供了先决条件。

弥散入血液的氧由红细胞中的血红蛋白携带并运输。因此, 血红蛋白含量及其载氧能力与 $\dot{V}O_{2\max}$ 密切相关。而血液运输氧的能力则取决于单位时间内循环系统的运输效率, 即心输出量的大小, 它受每搏输出量和心率所制约。许多研究证明, 运动训练对最高心率影响不大。所以, 有训练者与无训练者在从事最大负荷工作时心输出量的差异主要是由每搏输出量造成的。后者决定于心肌收缩能力和心容积的大小。优秀耐力专项运动员在系统训练的影响下出现安静心率减慢、左心室容积增大和每搏输出量增加等一系列心脏形态机能的适应性变化, 表明心脏的泵血机能和工作效率提高。由此可见, 心脏的泵血机能及每搏输出量的大小是决定 $\dot{V}O_{2\max}$ 的重要因素。这是因为要实现肺泡气与肺毛细血管血液间的气体交换, 除了要有一定的肺泡通气外, 还必须有相应数量的肺部血液灌流量与其相匹配。“通气/血流比值”指每分肺泡通气量与肺血流量(心输出量)的比值。正常人安静时其比值为 0.84, 此时通气量与血流量匹配最合适, 气体交换效率最高。但从安静状态转入最大强度运动时, 其比值明显增大。这是由于剧烈运动时人体增加心输出量的能力远远跟不上肺通气的增加, 结果导致部分肺泡得不到相应的血液供应, 其中的气体不能实现与血液的交换, 使气体交换效率降低。由此可见, 心脏的泵血机能是限制运动员 $\dot{V}O_{2\max}$ 提高的重要因素。

2. 肌组织利用氧能力对 $\dot{V}O_{2\max}$ 的影响

当毛细血管血液流经组织细胞时, 肌组织从血液摄取和利用氧的能力是影响 $\dot{V}O_{2\max}$ 的重要因素。肌组织利用氧的能力一般用氧利用率来衡量。每 100ml 动脉血流经组织时, 组织所利用(或吸入)氧的百分率称为氧利用率, 可用如下公式表示:

$$\text{氧利用率} = \frac{\text{动脉血氧含量} - \text{静脉血氧含量}}{\text{动脉血氧含量}} \times 100\%$$

肌组织利用氧的能力主要与肌纤维类型及其代谢特点有关。许多研究表明, 慢肌纤维具有丰富的毛细血管分布, 肌纤维中的线粒体数量多、体积大且氧化酶活性高, 肌红蛋白含量也较高。慢肌纤维的这些特征都有利于增加慢肌纤维的摄氧能力。研究发现, 慢肌纤维的百分组成与 $\dot{V}O_{2\max}$ 有密切关系(图 10-3), 优秀的耐力专项运动员慢肌纤维百分比高并出现选择性肥大现象, 使其摄氧和利用氧的能力增加。

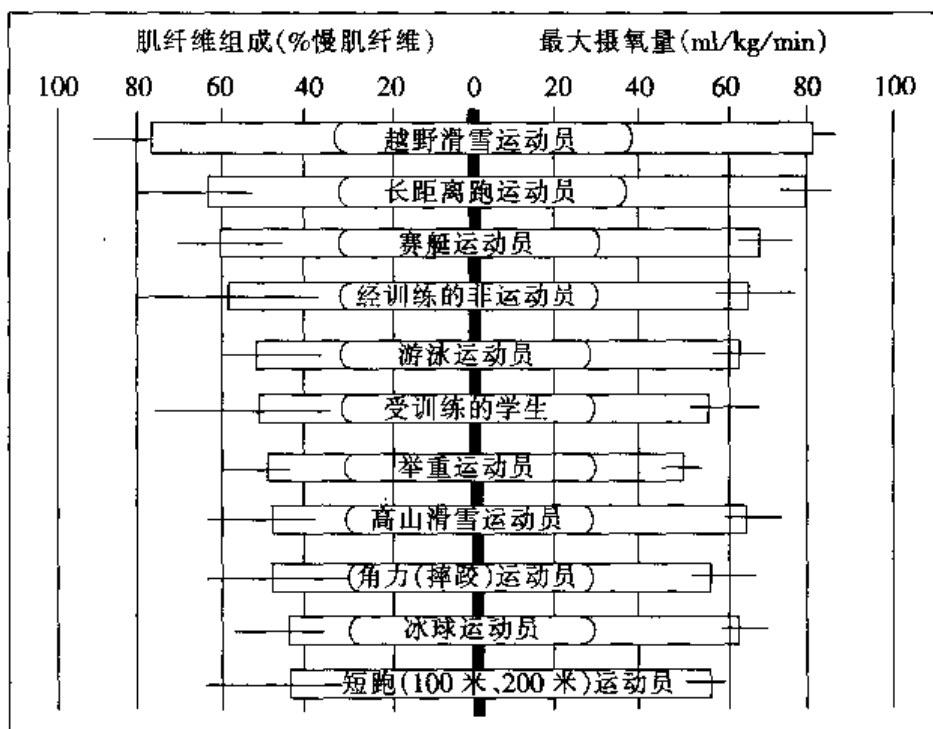


图 10-3 不同项目运动员慢肌纤维百分比 (左侧) 和 $\dot{V}O_{2\max}$ (右侧)

可见，有氧能力的好坏不仅与氧运输系统的机能密切相关，而且与肌组织利用氧的能力即肌纤维组成及其有氧代谢能力有密切关系。

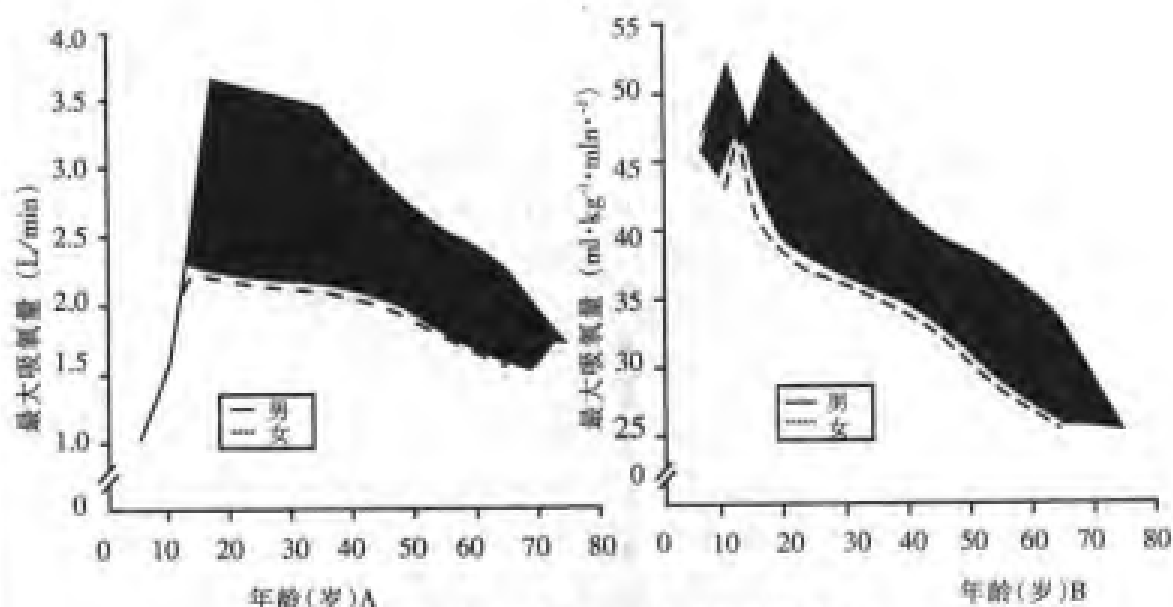
3. 其他因素对 $\dot{V}O_{2\max}$ 的影响

(1) 遗传因素

通过对双生子最大摄氧量的研究表明， $\dot{V}O_{2\max}$ 受遗传因素的影响较大。克索拉斯 (Kessouras, 1972) 等研究了 25 对双生子 (15 对单卵、10 对双卵)，发现 $\dot{V}O_{2\max}$ 的遗传度为 93.5%。许多学者的研究也指出， $\dot{V}O_{2\max}$ 与遗传的关系十分密切，其可训练性即训练使 $\dot{V}O_{2\max}$ 提高的可能性较小，一般为 20%~25%。

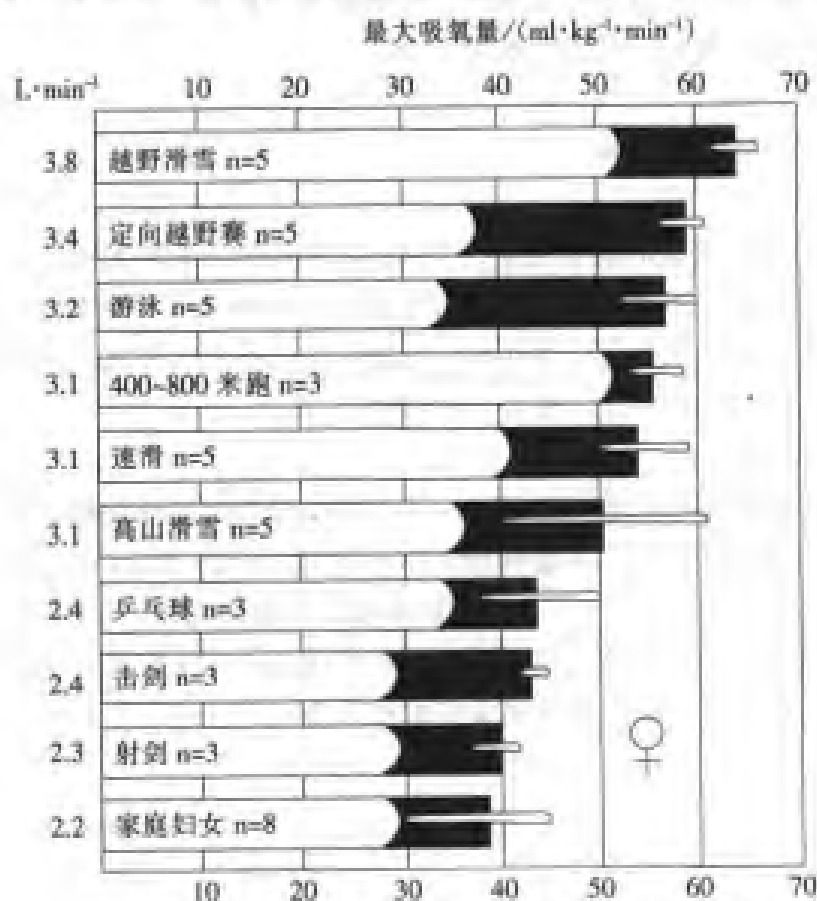
(2) 年龄、性别因素

$\dot{V}O_{2\max}$ 在少儿期间随年龄增长而增加，并于青春发育期出现性别差异，男子一般在 18~20 岁时最大摄氧量达峰值，并能保持到 30 岁左右；女子在 14~16 岁时即达峰值，一般可保持到 25 岁左右。以后， $\dot{V}O_{2\max}$ 将随年龄的增加而递减 (图 10-4)。若坚持体育锻炼， $\dot{V}O_{2\max}$ 随年龄增加而递减的幅度减小。 $\dot{V}O_{2\max}$ 出现性别差异的原因——一般认为女子的心容积、血红蛋白含量和心输出量等均比男子低。

图 10-4 $\dot{V}O_{2max}$ 的年龄、性别变化

(3) 训练因素

长期系统进行耐力训练可以提高 $\dot{V}O_{2max}$ 水平, 戴维斯(Davis)对系统训练的人进行了研究, 受试者的 $\dot{V}O_{2max}$ 可提高 25%, 表明经训练 $\dot{V}O_{2max}$ 是可以得到一定程度提高的。 $\dot{V}O_{2max}$ 与运动员所从事的运动项目有密切关系。横向与纵向的研究资料都表明, 越野滑雪和长跑等耐力性项目的运动员最大摄氧量最大, 明显高于非耐力性项目运动员和无训练者(图 10-5、图 10-6)。据报道, 男子 $\dot{V}O_{2max}$ 的最高值为越野滑雪运动员, 可达 $94 ml/kg/min$, 女子最高值达 $85.1 ml/kg/min$ 。可见, $\dot{V}O_{2max}$ 的大小与耐力训练密切相关。

图 10-5 不同运动项目运动员的 $\dot{V}O_{2max}$ 比较 (女子)

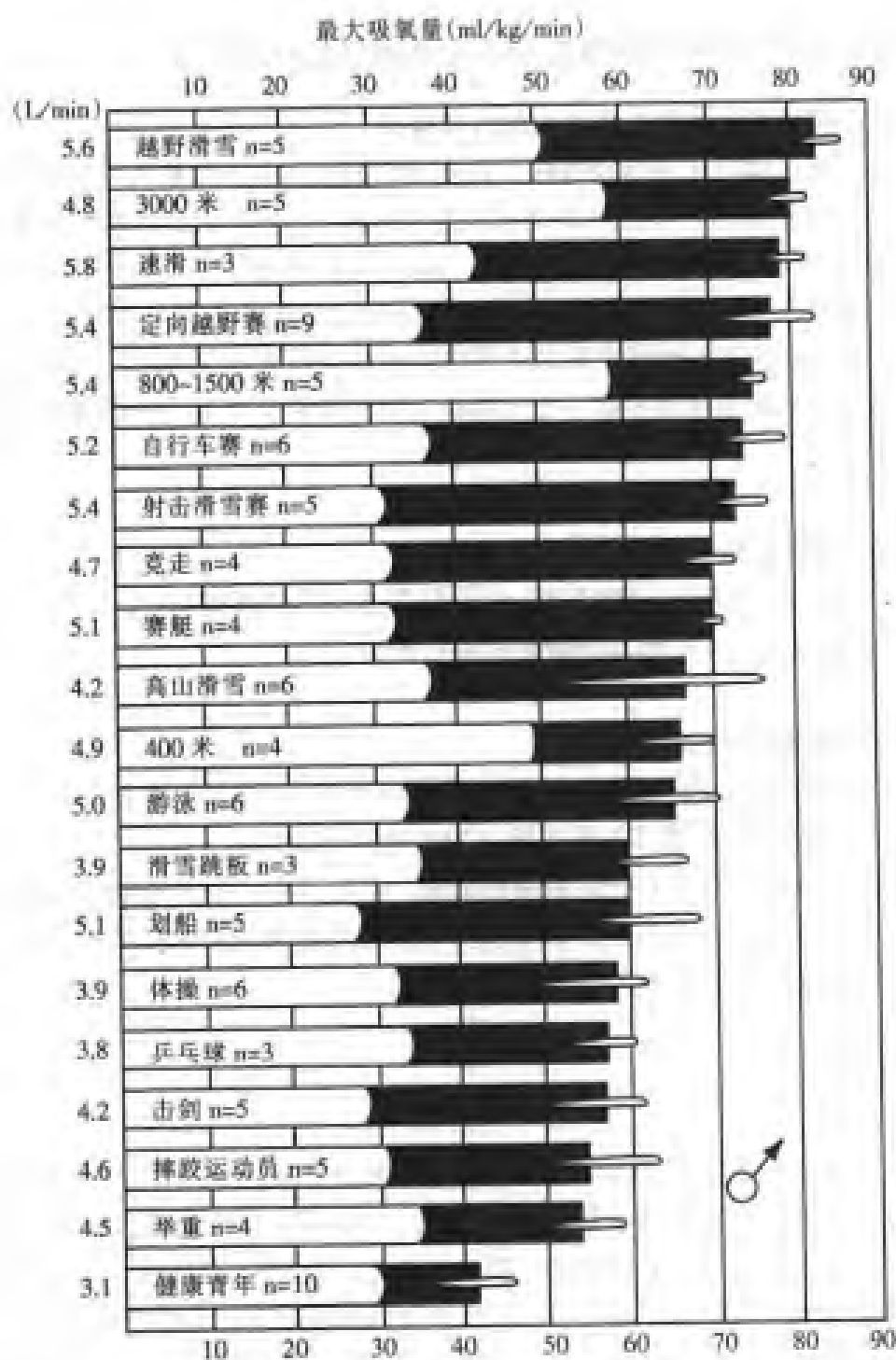


图 10-6 不同运动项目运动员的 $\dot{V}O_{2max}$ 比较 (男子)
(Saltin et al. 1967)

但不少学者指出, 在训练引起 $\dot{V}O_{2max}$ 增加过程中, 训练初期 $\dot{V}O_{2max}$ 的增加主要依赖于心输出量的增大; 训练后期 $\dot{V}O_{2max}$ 的增加则主要依赖于肌组织利用氧的能力的增大。但由于受遗传因素限制, $\dot{V}O_{2max}$ 提高幅度受到一定制约。



(四) $\dot{V}O_{2\max}$ 与有氧耐力的关系及在运动实践中的意义

1. 作为评定心肺功能和有氧工作能力的客观指标

$\dot{V}O_{2\max}$ 是反映心肺功能的综合指标。许多学者对 $\dot{V}O_{2\max}$ 与有氧工作能力之间的关系进行了研究,发现耐力性项目的运动成绩与 $\dot{V}O_{2\max}$ 之间具有高度相关的关系。如 800 米游泳成绩与 $\dot{V}O_{2\max}$ 相关系数为 0.75; 5000 米跑成绩与 $\dot{V}O_{2\max}$ 相关系数为 -0.81。因而有学者提出可以根据 $\dot{V}O_{2\max}$ 预测耐力项目的运动成绩。大量研究结果表明, $\dot{V}O_{2\max}$ 水平高低是耐力性项目取得优异成绩的基础和先决条件之一。因此,如何在先天因素的基础上最大限度地提高一个人的最大吸氧水平也是耐力性项目取得优异成绩的重要因素之一。

2. 作为选材的生理指标

如前所述, $\dot{V}O_{2\max}$ 有较高的遗传度,故可作为选材的生理指标之一。有学者指出 $\dot{V}O_{2\max}$ 尤其可作为儿童少年心肺功能最好的选材指标。

3. 作为制定运动强度的依据

将 $\dot{V}O_{2\max}$ 强度作为 100% $\dot{V}O_{2\max}$ 强度,然后以 $\dot{V}O_{2\max}$ 强度,根据训练计划制定不同百分比强度,使运动负荷更客观更实用,为运动训练服务。

虽然 $\dot{V}O_{2\max}$ 在运动实践中有较高的应用价值,但它具有一定的局限性,如受实验设备等条件限制难以普遍推广和应用;其数值有时并非与运动成绩的提高相平行等。因此, $\dot{V}O_{2\max}$ 只是诸多影响运动员运动能力的因素之一。

二、乳酸阈

如前所述, $\dot{V}O_{2\max}$ 是反映人体有氧工作能力的客观生理指标,并已广泛应用于运动实践,用于评定心肺功能水平和有氧能力。但近二十年来,耐力性项目的竞技水平有了大幅度提高,而运动员 $\dot{V}O_{2\max}$ 增加并不明显。因此,多数专家认为,运动员有氧竞技能力的提高并不完全是 $\dot{V}O_{2\max}$ 增长的结果。而与 $\dot{V}O_{2\max}$ 具有同等重要意义的另一个指标——乳酸阈(Lactate threshold,LT)或个体乳酸阈越来越得到关注。和 $\dot{V}O_{2\max}$ 相比,乳酸阈更能反映运动员的有氧工作能力。

(一) 乳酸阈与个体乳酸阈的概念

在新增负荷运动中,血乳酸浓度随运动负荷的递增而增加,当运动强度达到某一负荷时,血乳酸出现急剧增加的那一点(乳酸拐点)称为“乳酸阈”,这一点所对应的运动强度即乳酸阈强度(图 10-7)。它反映了机体内的代谢方式由有氧代谢为主过渡到无氧代谢为主的临界点或转折点。

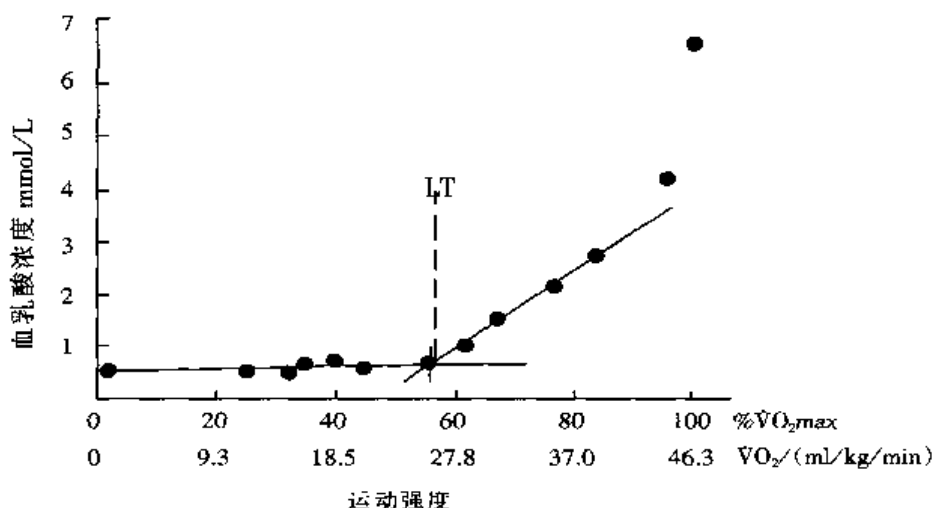


图 10-7 渐增负荷过程中血乳酸浓度变化及乳酸阈的判断

人体从事渐增负荷运动时, 机体能量的供给是从有氧代谢供能为主过渡到无氧代谢供能为主的连续过程。随着运动强度的增加, 有氧代谢产生的能量满足不了机体需要时, 糖酵解供能的比例增大, 而使血乳酸浓度明显增加, 从而出现乳酸阈。 $\text{VO}_{2\max}$ 反映了人体在运动时所摄取的最大氧量, 而乳酸阈则反映了人体在渐增负荷运动中血乳酸开始积累时的 $\text{VO}_{2\max}$ 百分利用率, 其阈值的高低是反映了人体有氧工作能力的又一重要生理指标。乳酸阈值越高, 其有氧工作能力越强, 在同样的渐增负荷运动中动用乳酸供能则越晚。即在较高的运动负荷时, 可以最大限度地利用有氧代谢而不过早地积累乳酸。

以往的研究认为, 在渐增负荷运动中, 当血乳酸水平达 4mmol/L (毫摩尔/升) 时乳酸浓度急剧增加。但更多的研究资料表明, 乳酸代谢存在较大的个体差异, 渐增负荷运动时血乳酸急剧上升时的乳酸水平在 $1.4\sim 7.5\text{mmol/L}$ 之间。因此, 将个体在渐增负荷中乳酸拐点定义为“个体乳酸阈”(individual lactic acid Threshold, ILAT)。个体乳酸阈更能客观和准确地反映机体有氧工作能力的高低。用个体乳酸阈指导运动训练已被教练员和运动员广泛接受, 并成为运动生理学和运动生物化学重要的研究课题。

传统的研究理论将随着运动强度逐渐增大血乳酸出现急剧增加的转折点定义为无氧阈。1964 年沃塞曼(Wasserman)首次提出“无氧阈”的概念。其理论基础是: 肌肉组织因缺氧导致乳酸的产生, 乳酸“拐点”的出现表明机体由有氧代谢供能向无氧代谢供能的过渡或转折。但近十多年来大量研究证据表明, 在亚极限运动时, 缺氧并不是肌肉产生乳酸的直接原因。因此, 一些运动生理学者提出用“乳酸阈”来代替“无氧阈”的概念。

(二) 乳酸阈的测定方法

通常在实验室条件下进行渐增负荷运动(跑台或功率自行车)试验, 通过连续测得血乳酸浓度的变化来确定乳酸阈, 或通过测得运动中呼出气体参数的变化来无损伤测定乳酸阈。

1. 乳酸阈测定

受试者在渐增负荷运动试验中, 连续采集每一级运动负荷时的血样(一般用耳垂或指尖末梢血)测得其血乳酸值。以运动负荷时做功量(W)为横坐标, 血乳酸浓度为纵坐



标作图，将乳酸急剧增加的拐点对应的血乳酸浓度确定为乳酸阈（或个体乳酸阈），而此时的运动强度就是乳酸阈强度。

2. 通气阈测定

在渐增负荷运动中，将肺通气量变化的拐点称为“通气阈”(Ventilatory threshold, 简称 VT)。通气阈是无损伤测定乳酸阈常用的指标。研究表明，在渐增负荷运动中，气体代谢各项指标随运动强度的增加而发生相应的变化，当乳酸急剧增加时，肺通气量、二氧化碳呼出量等指标出现明显的变化，可以此来判定乳酸阈。其具体方法是让受试者在自行车功率计或跑台上进行渐增负荷运动，通过气体分析仪记录运动过程中的肺通气量、摄氧量和二氧化碳呼出量等生理参数，以运动负荷时做功量(W)为横坐标、肺通气量等指标为纵坐标作图，将肺通气量、二氧化碳呼出量等指标出现急剧增加（或非线性增加）的拐点确定为通气阈。

伴随乳酸阈的出现，通气量、二氧化碳呼出量发生相应变化的原因是：随运动强度增大，当有氧代谢产生的能量满足不了需求时，糖酵解供能比例增大，而使血乳酸浓度增加。此时，机体将动用碳酸氢盐缓冲系统来缓冲乳酸，生成乳酸钠和碳酸，致使二氧化碳产生量增加。二氧化碳刺激了呼吸中枢，使呼吸加快、加强，产生了过度通气反应（图 10-8）。因此，在乳酸阈出现时，肺通气量及二氧化碳排出量均出现非线性增加。

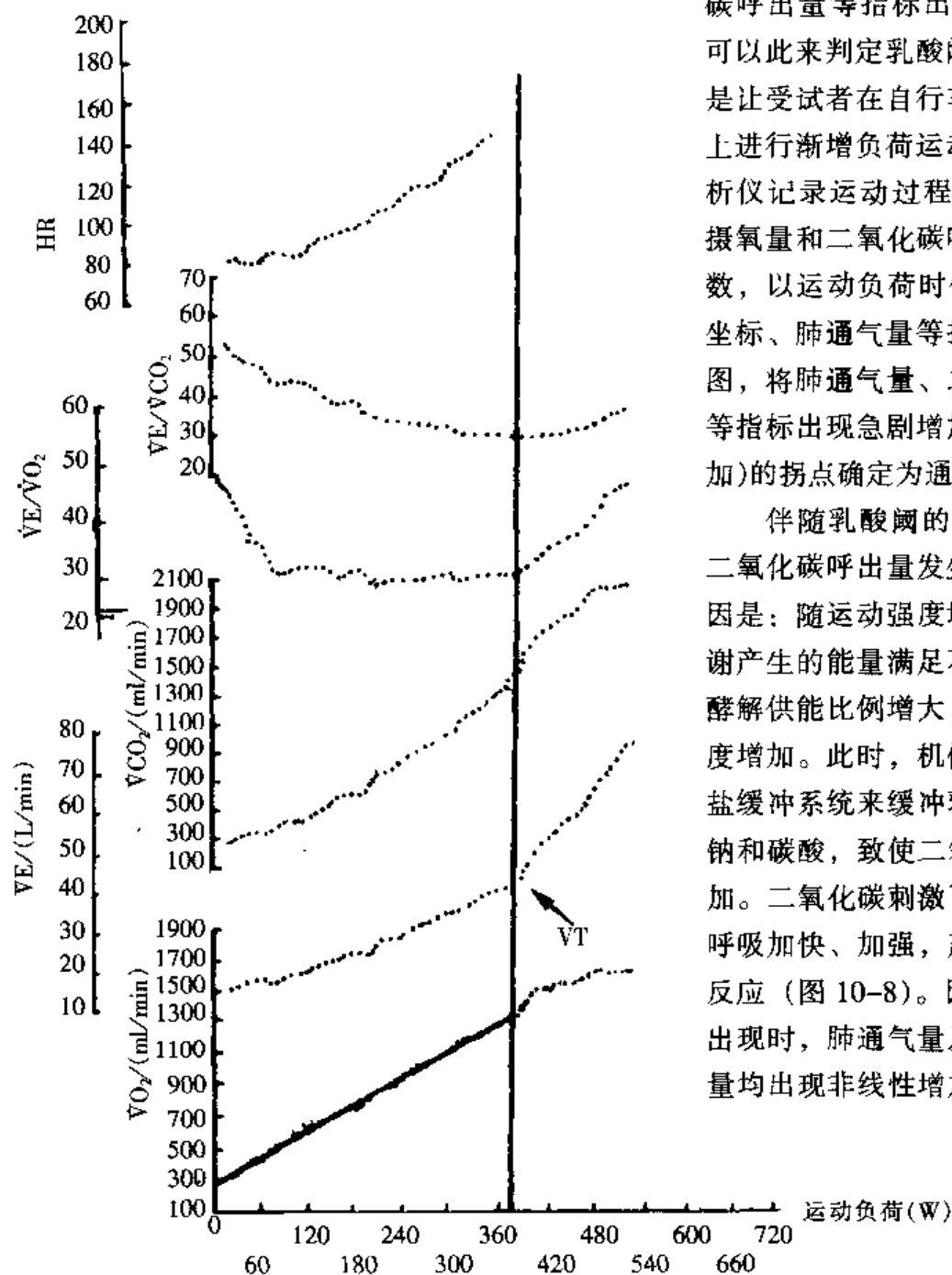


图 10-8 渐增负荷运动过程中的气体代谢各指标、心率和 VT 的判断
(依石河等, 1993 年)

(三) 乳酸阈在体育运动实践中的应用

1. 评定有氧工作能力

如前所述, VO_2max 和 LT 是评定人体有氧工作能力的重要指标, 二者反映了不同的生理机制。前者主要反映心肺功能, 后者主要反映骨骼肌的代谢水平。从训练对 VO_2max 和 LT 的影响来看, 许多研究报道, 通过系统训练 VO_2max 提高可能性较小, 它受遗传因素的影响较大。而 LT 较少受遗传因素影响, 其可训练性较大, 训练可以大幅度提高运动员的个体乳酸阈。显然, 以 VO_2max 来评定人体有氧能力的增进是有限的, 而乳酸阈值的提高是评定人体有氧能力增进更有意义的指标。

2. 制定有氧耐力训练的适宜强度

理论与实践证明, 个体乳酸阈强度是发展有氧耐力训练的最佳强度。其理论依据是, 用个体乳酸阈强度进行耐力训练, 既能使呼吸和循环系统机能达到较高水平, 最大限度地利用有氧供能, 同时又能在能量代谢中使无氧代谢的比例减少到最低限度。研究表明, 优秀耐力运动员有较高的个体乳酸阈水平。对训练前后的纵向研究也表明, 以个体乳酸阈强度进行耐力训练, 能有效地提高有氧工作能力。

三、提高有氧工作能力的训练

提高有氧工作能力的训练强度要掌握在有氧代谢范畴之内。因此, 运动负荷量和负荷强度的安排至关重要。只有在运动负荷量和强度适宜, 即在最大限度动用机体有氧代谢系统使其处于最大应激状态下训练, 才能有效地提高机体有氧工作能力。目前, 用于发展有氧能力的训练方法主要有持续训练法、乳酸阈训练法、间歇训练法和高原训练法。

(一) 持续训练法

持续训练法是指强度较低、持续时间较长且不间歇地进行训练的方法, 主要用于提高心肺功能和发展有氧代谢能力。阿斯特兰德(Åstrand)指出, 对于发展有氧代谢能力来说, 总的工作量远比强度更为重要。由于机体内脏器官的机能惰性较大, 需在运动开始后约 3 分钟才能发挥最高机能水平。因此, 为发展有氧代谢能力而采取的训练, 练习时间要在 5 分钟以上, 甚至可持续 20~30 分钟以上。

长时间持续运动对人体生理机能产生诸多良好的影响。主要表现在: 能提高大脑皮层神经过程的均衡性和机能稳定性, 改善参与运动的有关中枢间的协调关系, 并能提高心肺功能及 VO_2max , 引起慢肌纤维出现选择性肥大, 肌红蛋白也有所增加。对发育期的少年运动员及训练水平低者尤其要以低强度的匀速持续训练为主。

(二) 乳酸阈强度训练法

如前所述, 个体乳酸阈强度是发展有氧耐力训练的最佳强度。以此强度进行耐力训练, 能显著提高有氧工作能力。目前, 在田径中长跑、自行车、游泳及划船等训练中,



已广泛采用个体乳酸阈强度进行训练。

有氧能力提高的标志之一是个体乳酸阈提高。由于个体乳酸阈的可训练性较大, 有氧耐力提高后, 其训练强度应根据新的个体乳酸阈强度来确定。一般无训练者, 常以其 50% $\text{VO}_{2\text{max}}$ 的运动强度进行较长时间的运动, 而血乳酸几乎不增加或略有上升, 经过良好训练的运动员可达到 60%~70% $\text{VO}_{2\text{max}}$ 强度, 而优秀的耐力专项运动员(马拉松、滑雪)可以 85% $\text{VO}_{2\text{max}}$ 强度进行长时间运动。这表明, 运动员随训练水平的提高, 有氧能力的百分利用率明显提高。在具体应用乳酸阈指导训练时, 常采用乳酸阈心率来控制运动强度。

(三) 间歇训练法

间歇训练法是指在两次练习之间有适当的间歇, 并在间歇期进行强度较低的练习, 而不是完全休息。由于间歇训练对练习的距离、强度及每次练习的间歇时间有严格的规定, 往往不等身体机能完全恢复就开始下一次练习, 因此, 对机体机能要求较高, 能引起机体结构、机能及生物化学等方面较深刻的变化。从生理学角度分析, 间歇训练主要有以下特点:

1. 完成的总工作量大

间歇训练法比持续训练法能完成更大的工作量, 并且用力较少, 而呼吸、循环系统和物质代谢等功能得到较大的提高。阿斯特兰德发现, 让受试者用两种不同的方法进行每分钟完成 2160 千克·米的工作, 如果持续工作, 只能进行 9 分钟, 完成的总工作量为 19440 千克·米; 如果用同样的负荷强度, 每活动 30 秒后休息 30 秒, 则可以坚持 1 小时, 总工作量为 64800 千克·米。对于发展有氧代谢能力来说, 总的工作量远比强度更为重要。

2. 对心肺机能的影响大

间歇训练法是对内脏器官进行训练的一种有效手段。在间歇期内, 运动器官(肌肉)能得到休息, 而心血管系统和呼吸系统的活动仍处于较高水平。如果运动时间短, 练习期肌肉运动引起的内脏机能的变化, 都是在间歇期达到较高水平。无论在运动时还是在间歇休息期, 可使呼吸和循环系统均承受较大的负荷。因此, 经常进行间歇训练, 能使心血管系统得到明显的锻炼, 特别是心脏工作能力以及最大摄氧能力得到显著提高。

目前在许多项目的训练中, 都大量采用了间歇训练法。其方法运用成功与否的关键是要根据不同年龄、不同训练水平及不同项目的特点, 科学合理地安排每次练习的距离、强度及间歇时间。

(四) 高原训练法

随着运动水平的不断提高, 人们在谨慎加大运动负荷的同时, 着眼于提高训练难度, 给予机体更强烈的刺激, 以调动人体的最大潜力。高原训练法就是基于这种设想逐渐开展起来的一种训练方式。在高原训练时, 人们要经受高原缺氧和运动缺氧两种负



荷,这对身体造成的缺氧刺激比平原上更为深刻,可以大大调动身体的机能潜力,使机体产生复杂的生理效应和训练效应。研究表明,高原训练能使红细胞和血红蛋白数量及总血容量增加,并使呼吸和循环系统的工作能力增强,从而使有氧耐力得到提高(详见第十四章)。

第三节 无氧工作能力

无氧工作能力是指运动中人体通过无氧代谢途径提供能量进行运动的能力。它由两部分组成,即由 ATP-CP 分解供能(非乳酸能)和糖无氧酵解供能(乳酸能)。ATP-CP 是无氧功率的物质基础,一切短时间、高功率运动如冲刺、短跑、投掷、跳跃和足球射门等活动能力均取决于 ATP-CP 供能的能力,而乳酸能则是速度耐力的物质基础。

一、无氧工作能力的生理基础

综观无氧能力的研究历史可将其分为三个阶段:第一阶段是对无氧代谢理论的探讨;第二阶段是对无氧代谢能力测定方法与评价方法的研究;第三阶段是对无氧代谢能力与其他生理生化指标关系的研究。直至 20 世纪 60 年代末期才建立了无氧代谢能力较为完整的理论体系,提出 ATP-CP 系统供能的时间是 6~7 秒,糖原无氧酵解系统的供能时间是 60~90 秒。但人们对无氧能力的研究和了解与有氧能力的研究相比尚有较大的距离,其研究进展较为缓慢。

(一) 能源物质的贮备

1. ATP 和 CP 的含量

人体在运动中 ATP 和 CP 的供能能力主要取决于 ATP 和 CP 含量,以及通过 CP 再合成 ATP 的能力。一般来说,人体每千克肌肉中含 ATP 和 CP 在 15~25 毫克分子之间,在极限强度运动中,肌肉中的 ATP 和 CP 在 10 秒内就几乎耗竭。因此,这一时期的最大输出功率可用于评估 ATP 和 CP 的供能能力。

通过在多种测功计上的实验证明,以全力运动前 10 秒钟的总输出功率来评定 ATP 和 CP 能力这一方法是可靠的($r=0.83\sim0.99$)。许多研究发现,短跑运动员的 ATP 和 CP 供能能力(每公斤体重计)高于马拉松运动员和一般无训练者;在完成负荷相同的无氧运动时,运动员血乳酸积累的出现较一般人迟。表明运动员能通过 ATP 和 CP 供能完成更多的工作。这些发现与短跑训练引起的有关 ATP 和 CP 供能能力生理生化因素的适应性变化相一致,也为 10 秒钟极限负荷试验评价 ATP 和 CP 能力提供了依据。

2. 糖原含量及其酵解酶活性

糖原含量及其酵解酶活性是糖无氧酵解能力的物质基础。糖无氧酵解供能是指由肌糖原无氧分解为乳酸时释放能量的过程,其供能能力主要取决于肌组织中糖原的含量及



其酵解酶活性的高低。实验表明,通过训练可使机体通过糖酵解产生乳酸的能力及其限度提高。不少学者提出用运动后最大乳酸值来评价无氧代谢能力。他们发现最大乳酸值与多种无氧代谢为主的运动项目的成绩相关。短时间爆发性项目运动员的最大血乳酸高于耐力项目运动员和一般人。但也有一些研究指出,应用最大血乳酸值评价无氧能力有其不足之处。如长期大强度训练可以提高运动成绩,但却不能提高最大血乳酸值,故认为最大血乳酸值不是评价无氧能力的敏感指标。

(二) 代谢过程的调节能力及运动后恢复过程的代谢能力

代谢过程的调节能力包括参与代谢过程的酶活性、神经与激素对代谢的调节、内环境变化时酸碱平衡的调节以及各器官活动的协调等。如肌酸激酶、磷酸果糖酶等对于提高 ATP 再合成速率及快速恢复 ATP 含量是十分重要的。

糖酵解产生的乳酸进入血液后,对血液 pH 值产生影响。因此,血液缓冲系统对酸性代谢产物的缓冲能力,以及组织细胞尤其是脑细胞耐受酸性代谢产物刺激的能力都是影响糖酵解能力的因素。当体内酸度超过一定限度时,神经细胞的兴奋性降低,工作能力下降。

(三) 最大氧亏积累

在剧烈运动时,需氧量大大超过摄氧量,肌肉通过无氧代谢产生能量造成体内氧的亏欠,称为氧亏。最大氧亏积累(maximal accumulated oxygen deficit, MAOD)是指人体从事极限强度运动时(一般持续运动 2~3 分钟),完成该项运动的理论需氧量与实际耗氧量之差。许多研究发现,最大氧亏积累是衡量机体无氧供能能力的重要标志。短跑运动员的无氧工作能力和运动成绩与最大氧亏积累高度相关。

研究发现,最大氧亏积累的分布范围较大。其中优秀短跑运动员的最大氧亏积累值明显高于耐力性项目的运动员;而对有氧和无氧代谢均有较高要求的中跑运动员最大氧亏积累值介于以上两者之间;最大氧亏积累值与 2~3 分钟或 60 秒全力运动成绩的相关系数介于 0.66~0.97 之间。有训练者和无训练者在接受无氧训练后最大氧亏积累明显增加。与此同时,运动成绩、机体缓冲能力等同步发生相应变化,说明最大氧亏积累对无氧训练具有较大的敏感性。基于以上研究,萨尔庭(Saltin)等学者指出最大氧亏积累是目前检测无氧工作能力的最有效方法。

二、无氧工作能力测试与评价

常用的无氧能力检测方法依测试指标性质不同分为两类,一类为无氧能力的动力学检测,通常采用在最大无氧状态下进行全力运动负荷或定量负荷试验以测定机体的无氧做功能力;另一类则为无氧能力的生理学检测,即通过剧烈运动时测得的最大血乳酸水平和氧亏积累等指标来间接反映无氧能力的大小。通过这些试验可对个体的非乳酸能力、乳酸能力或无氧能力作出定性评价,并以此评估个体的无氧能力。

(一) 无氧功率

无氧功率是指机体在最短时间内、在无氧条件下发挥出最大力量和速度的能力。无氧功率的概念是 1921 年萨扎特(Sargent)首次提出的。在 20 世纪 60 年代以前,多数人沿用萨扎特提出的纵跳法测无氧功率。之后,玛加利亚(Margaria)创建了跑楼梯法测无氧功率。自 20 世纪 70 年代以来,不少学者就无氧能力测试的方法学问题进行了一系列研究,并于 1977 年建立了著名的温盖特(Wingate)无氧功率测试法。此后,有关无氧代谢测试方法的研究逐渐引起研究学者的关注,并对传统的无氧功率试验存在的不足之处进行了进一步的修正。

1. 萨扎特(Sargent)纵跳试验法

1921 年萨扎特首次提出了采用纵跳法测定人体的无氧功率,用以下公式推算:

$$P=\sqrt{4.9}\times W\times\sqrt{H}$$

其中: P=无氧功率; W=体重; H=纵跳高度。

这种方法简便易行,但精确性较差。

2. 玛加利亚(Margaria)跑楼梯(或跨登台阶)试验法

1966 年玛加利亚(Margaria)创建了跑楼梯测无氧功率的方法,计算人体以最快速度使自身体重上升到一定高度,记录跑楼梯时间,并计算出这段时间内做功的大小。1968 年卡拉门(Kalamen)对玛加利亚试验法进行了修订,二人共同制定了玛加利亚-卡拉门(Margaria-Kalamen)跑楼梯动力试验法。受试者从助跑线起跑,助跑距离为 6 米,以三阶为一步,用最快速度跑上九层台阶,记录第三层至第九层台阶所需的时间(图 10-9)。按下式计算其功率输出:

$$\text{无氧功率(kg}\cdot\text{m/s)}=\frac{\text{体重(kg)}\times\text{第三至第九级台阶垂直距离(m)}}{\text{第三至第九级登台阶时间(s)}}$$

如体重为 60 公斤的男子,以 0.52 秒跨上最后六级台阶,台阶高度为 1.05 米,其无氧功率为:

$$\text{无氧功率(kg}\cdot\text{m/s)}=\frac{60\times1.05}{0.52}=121.10(\text{kg}\cdot\text{m/s})$$



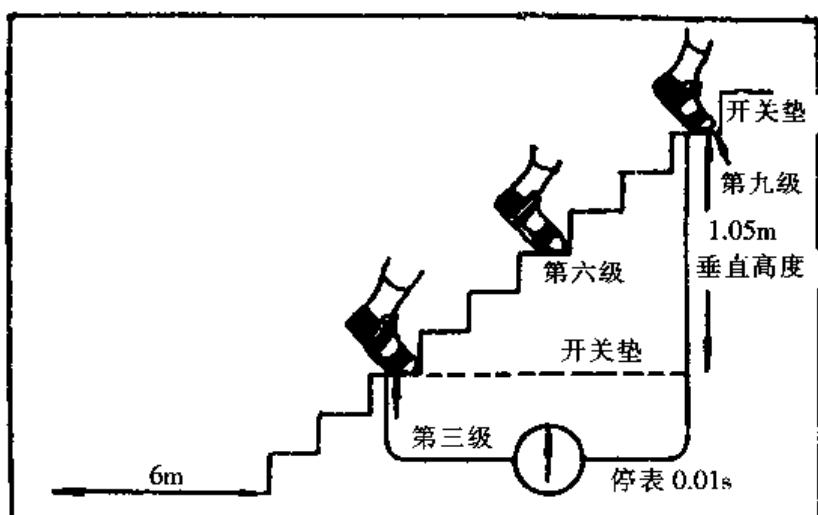


图 10-9 跨登台阶试验

下表是根据 Margaria 测验而提出的无氧功率评分标准。该试验的运动形式简便且不会导致精疲力竭，可较精确地了解 ATP-CP 供能的能力。其缺点是对年幼和部分妇女或老年人不太适宜，并在一定程度上受主观努力程度和身高与腿长的影响。为了进一步验证该试验的准确性和实用性，黄彬彬(台北,1980)和我国不少学者还提出了两步一阶、两步助跑等修正方法。

根据 Margaria 测验评价磷酸原系统功率输出能力分级表(kg·m/s)

级别	性别	年龄				
		15~20	20~30	30~40	40~50	超过 50
差	男	<113	<106	<85	<65	<50
	女	<92	<85	<65	<50	<38
一般	男	113~149	106~139	85~111	65~84	50~65
	女	92~120	85~111	65~84	50~65	38~48
中等	男	150~187	140~175	112~140	85~105	66~82
	女	121~151	112~140	85~105	66~82	49~61
良好	男	188~224	176~210	141~168	106~125	83~98
	女	152~182	141~168	106~125	83~98	62~75
优秀	男	>224	>210	>168	>125	>98
	女	>182	>168	>125	>98	>75

3.温盖特(Wingate)无氧功率试验

1977年以色列Wingate体育学院运动医学系研究并提出了以最快速度完成30秒全力蹬踏功率自行车(车的阻力是0.075千克/净千克体重)的运动并以此测定出最大无氧功率、平均无氧功率及无氧功率递减率,从能源供应的角度可以了解到ATP-CP和无氧酵解供能的状况。该试验方法实验过程是先测定受试者身高、体重、肺活量及皮脂厚度,然后让受试者以0.075千克/净千克体重负荷,以最快速度全力蹬车30秒,同时记录蹬踏圈数和心率,并将每5秒的蹬车数代入下面公式,单位是瓦特(Watt)。

$$\text{负荷阻力(千克)} \times \text{圈数} \times 11.765$$

此公式适用于摩纳克(Monark)功率自行车,其他型号的功率自行车则采用下列公式计算更为适宜。

最大无氧功率(第一个5秒)=5秒最大蹬车圈数×前车轮周长×阻力×6.11。最大无氧功率的能量来源于ATP及CP的分解。

平均无氧功率:将6个5秒钟车轮转的圈数相加除以6。其能量来源于ATP、CP及无氧糖酵解。

$$\text{无氧功率递减率(\%)} = \frac{\text{最高无氧功率} - \text{最低无氧功率}}{\text{最高无氧功率}} \times 100\%$$

该指标表示的是在无氧供能条件下的疲劳程度。

多年来的研究认为,Wingate无氧功率试验是反映无氧能力较理想的试验,表现在其平均输出功率与速度性项目的运动成绩之间存在较密切的相关关系。但研究也同时指出,通过Wingate无氧功率试验检测与评估无氧代谢能力尚存在以下不足:①30秒的全力运动尚不足以最大限度激活糖原的无氧酵解供能;②所耗电能的9%~19%来自有氧代谢。近期的研究认为,传统的Wingate无氧功率试验持续时间以40秒为佳。

除上述无氧功率试验外,研究学者还提出了与此属同一类的、持续时间介于40~120秒间的全力运动负荷试验。目前认为,评价糖酵解能力的最佳运动持续时间应为40秒。

(二) 恒定负荷试验

受试者在相应的运动器械上维持恒定功率负荷的运动,直至不能维持为止。最常用的是“无氧跑速试验”,即要求受试者在20%坡度的跑步机上以约13km/h(公里/小时)的速度跑步,以受试者能够维持运动的时间长短来判定无氧做功能力。研究表明,训练有素的短跑运动员无氧做功能力明显大于耐力性项目的运动员。并且无氧做功能力与400米跑成绩有较好的相关性。但如何准确判断受试者力竭始终是难以解决且影响检测结果的一个重要问题。

(三) 无氧能力的生理学检测

如前所述,通过实验室运动时测得的最大氧亏积累和最大血乳酸水平等生理指标来反映无氧能力的大小。

三、提高无氧工作能力的训练

(一) 发展 ATP-CP 供能能力的训练

目前,在发展磷酸原系统供能能力的训练中,主要是采用无氧低乳酸的训练。其原则是:① 最大速度或最大练习时间不超过 10 秒;② 每次练习的休息间歇不能短于 30 秒,因短于 30 秒时 ATP、CP 在运动间歇中的恢复数量不足以维持下一次练习对于能量的需求,故间歇时间一般选用长于 30 秒,以 60 秒或 90 秒的效果更好;③ 成组练习后,组间的练习不能短于 3~4 分钟,因为 ATP、CP 的恢复至少需要 3~4 分钟。

与其他供能物质相比,磷酸原的恢复较快。剧烈运动后被消耗掉的磷酸原在 20~30 秒内合成一半,3~4 分钟可完全恢复。因此,发展磷酸原系统的训练,一般采用短时间、高强度的重复训练。

此外,需要指出的是在短跑、跳跃、投掷和举重等项目比赛中,运动员要在 10 秒内以最大功率输出完成运动,从理论上来看,其能量主要由 ATP-CP 系统供应,但在能量供应过程中,相邻的供能系统也参与供能,且占一定的比重。研究发现,我国运动员 100 米跑后血乳酸为 $9.46 \pm 1.33 \text{ mmol/L}$ 。所以,在短时间、高强度运动项目的训练中,在注意磷酸原系统供能能力训练的同时,也应注意加强糖酵解系统供能能力的训练,即应有一定比例的大于 10 秒的无氧训练。

(二) 提高糖酵解供能系统的训练

1. 最大乳酸训练

机体生成乳酸的最大能力和机体对它的耐受能力直接与运动成绩相关。研究表明,血乳酸在 $12 \sim 20 \text{ mmol/L}$ 是最大无氧代谢训练所敏感的范围。采用一次 1 分钟左右的超极量负荷不可能达到这一高水平的血乳酸。而采用 1 分钟超极量强度跑、间歇 4 分钟共重复 5 次的间歇训练,血乳酸浓度可达到一个很高的水平,最高值可达 31.1 mmol/L (图 10-10)。表明 1 分钟超极量强度间歇 4 分钟的运动可以使身体获得最大的乳酸刺激,是提高最大乳酸能力的有效训练方法。

为使运动中能产生高浓度的乳酸,练习强度和密度要大,间歇时间要短。练习时间一般应大于 30 秒,以 1~2 分钟为宜。以这种练习强度和时间及间歇时间的组合,能最大限度地动用糖酵解系统供能的能力。

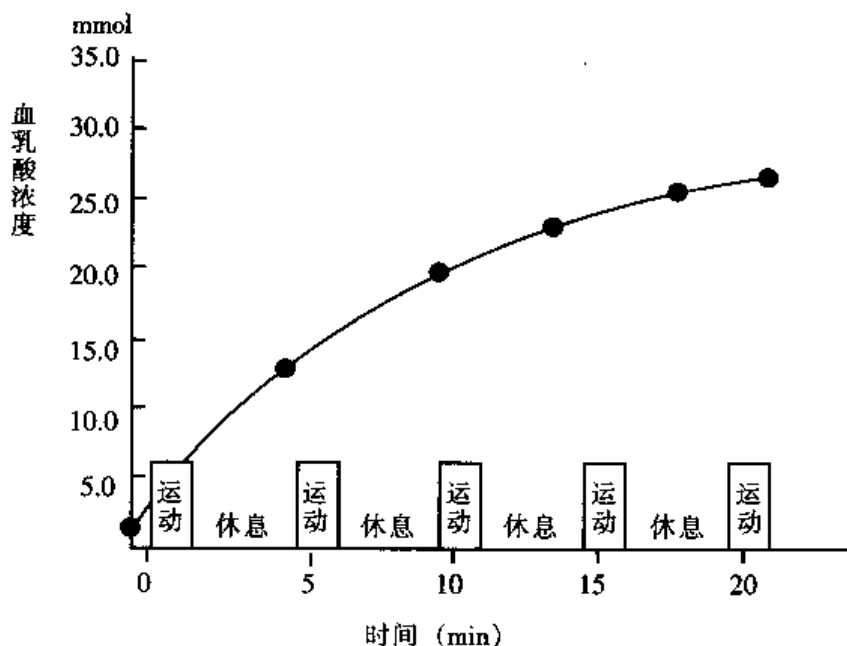


图 10-10 跑 1 分钟休息 4 分钟的 5 次间歇快跑后血乳酸浓度的变化

2. 乳酸耐受能力

乳酸耐受能力一般可以通过提高缓冲能力和肌肉中乳酸脱氢酶活性而获得。因此,在训练中要求血乳酸达到较高水平。一般认为在乳酸耐受能力训练时以血乳酸在 12mmol/L 左右为宜。然后在重复训练时维持在这一水平上,以刺激身体对这一血乳酸水平的适应,提高缓冲能力和肌肉中乳酸脱氢酶的活性。

【小结】

1. 需氧量是指人体为维持某种生理活动所需要的氧量。运动时需氧量随运动强度而变化,并受运动持续时间的影响。运动时随着运动强度的增大,每分需氧量则相应增加。运动强度越大、持续时间越短的运动项目,每分需氧量则越大;反之,运动强度较小、持续时间长的运动项目,每分需氧量少,但运动的总需氧量却大。

2. 在运动过程中,机体摄氧量满足不了运动需氧量,造成体内氧的亏欠称为氧亏。运动结束后,肌肉活动虽然停止,但机体的摄氧量并不能立即恢复到运动前相对安静的水平。将运动后恢复期为偿还运动中氧亏及运动后使处于高水平代谢的机体恢复到安静水平消耗的氧量称为运动后过量氧耗。运动后过量氧耗受体温、儿茶酚胺、甲状腺素、肾上腺皮质激素、细胞内 Ca^{2+} 浓度以及运动后磷酸肌酸的再合成等因素的影响。

3. 最大摄氧量是指人体在进行有大量肌肉群参加的长时间剧烈运动中,当心肺功能和肌肉利用氧的能力达到本人极限水平时,单位时间内所能摄取的氧量称为最大摄氧量。最大摄氧量是评定人体有氧工作能力的重要指标之一。氧运输系统的机能、肌肉组织利用氧能力、遗传、年龄、性别和运动训练等是影响最大摄氧量的主要因素。在运动实践中最大摄氧量可作为评定运动员心肺功能和有氧工作能力的客观指标,也可以作为运动员选材的生理指标和制定运动强度的依据。

4. 在渐增负荷运动中,血乳酸浓度随运动负荷的递增而增加,当运动强度达到某一

负荷时,血乳酸出现急剧增加的那一点(乳酸拐点)称为“乳酸阈”。乳酸代谢存在较大的个体差异,因此,将个体在渐增负荷中乳酸拐点定义为“个体乳酸阈”。个体乳酸阈更能客观和准确地反映机体有氧工作能力的高低。用个体乳酸阈可以更好地指导运动训练。

在运动实践中应用个体乳酸阈可以评定有氧工作能力、制定有氧耐力训练的适宜强度。

5.无氧工作能力是指运动中人体通过无氧代谢途径提供能量进行运动的能力。影响无氧工作能力的因素包括:能源物质的贮备(ATP和CP和糖原含量及其酵解酶活性)、代谢过程的调节能力及运动后恢复过程的代谢能力和最大氧亏积累。

【思考题】

- 1.试述最大摄氧量的生理机制及其影响因素。
- 2.用间接法推算最大摄氧量的原理是什么?目前常用的有哪些方法?
- 3.试述个体乳酸阈在体育运动中的理论与实践意义。
- 4.提高人体有氧工作能力的训练方法有哪些?并从生理学角度进行分析。
- 5.试述无氧工作能力的生理基础。

【主要参考文献】

- 1.体育学院通用教材:《运动生理学》,北京,人民体育出版社,1990。
- 2.王步标、华明、邓树勋等:《人体生理学》,北京,高等教育出版社,1994。
- 3.邓树勋、洪泰田、曹志发等:《运动生理学》,北京,高等教育出版社,1999。
- 4.杨锡让等:《实用运动生理学》,北京,北京体育大学出版社,1998。
- 5.J.A.布茹克斯、汤姆士D.法哈著,杨锡让等译:《运动生理学》,北京,北京体育大学出版社,1988。
- 6.王健、洪峰:《无氧能力间接检测方法研究进展》,中国体育科技,1999.6。

(天津体育学院 刘善云)

第十一章

身体素质

【提要】本章将阐述力量、速度、耐力、灵敏和柔韧等身体素质的基本概念、生理学基础和发展各项素质的训练方法及生理学分析，为身体素质的发展与提高提供一定的生理学依据。

人的日常生活、生产劳动和体育运动等，都是在神经系统支配下所实现的不同形式的肌肉活动。这些活动的基本能力可以表现在很多方面，如肌肉收缩力量的大小、收缩速度的快慢、持续时间的长短、关节活动范围的大小以及动作是否灵敏和协调等。通常人们把人体在肌肉活动中所表现出来的力量、速度、耐力、灵敏及柔韧等机能能力统称为身体素质。

身体素质是人体为适应运动的需要所储存的身体能力要素。身体素质是人体肌肉活动基本能力的表现。身体素质的发展水平不仅取决于肌肉本身的结构和功能特点，而且还与肌肉工作时的能量供应、内脏器官的机能以及神经调节能力有关。更确切地讲，身体素质是人体各器官系统的功能在肌肉工作中的综合反映。

良好的身体素质是掌握运动技能、提高运动成绩以及进行其他特殊专业训练（如舞蹈、戏曲演员、飞行员及消防队员等）的基础。没有良好的身体素质，就不能形成完善和高难度的运动技能。因此，在体育教学和运动训练中都十分重视身体素质的训练与提高。

第一节 力量素质

肌肉力量是绝大多数运动形式的基础。肌肉力量可表现为绝对肌力、相对肌力、肌肉爆发力和肌肉耐力等几种形式。绝对肌力是指肌肉做最大收缩时所能产生的张力，通常用肌肉收缩时所能克服的最大阻力负荷来表示。相对肌力又叫比肌力，是指肌肉单位生理横断面积（常以 1cm^2 为单位）肌纤维做最大收缩时所能产生的肌张力。肌肉爆发力是指肌肉在最短时间收缩时所能产生的最大张力，通常用肌肉单位时间的做功量来表示。肌肉耐力是指肌肉长时间收缩的能力，常用肌肉克服某一固定负荷的最多次数（动力性运动）或最长时间（静力性运动）来表示。通常所说的肌肉力量主要是指绝对肌力，它是上述各种肌力形式的基础。



一、决定肌肉力量的生物学因素

影响肌肉力量的生物学因素很多，主要有肌纤维的横断面积、肌纤维类型和运动单位、肌肉收缩时动员的肌纤维数量、肌纤维收缩时的初长度、神经系统的机能状态、性别和年龄等方面。

(一) 肌纤维的横断面积

力量训练引起的肌肉力量增加，主要是由于肌纤维横截面积增加造成的。用超声技术对上肢屈肌肌力与横截面积的关系进行研究，发现二者之间呈线性关系。而且这种关系不受年龄和性别的影响。

由运动训练引起的肌肉体积增加，主要是由于肌纤维中收缩成分增加的结果。肌纤维中收缩成分的增加，是由于激素和神经调节对运动后骨骼肌收缩蛋白的代谢活动发生作用，使蛋白质的合成增多。研究证明，训练引起的肌肉中蛋白质增加，主要是使肌球蛋白增加。

力量训练引起的肌肉横断面增大，除蛋白质增多外，同时伴随着肌肉胶原物质的增多。肌肉周围结缔组织中的胶原纤维起着肌纤维附着框架的作用。

(二) 肌纤维类型和运动单位

肌纤维类型和运动单位大小、类型直接影响到肌肉力量。对于同样肌纤维数量而言，快肌纤维的收缩力明显大于慢肌纤维，因为快肌纤维内含有更多的肌原纤维，无氧供能酶活性高，供能速率快，单位时间内可完成更多的机械功。运动单位是指一个 α -运动神经元及其所支配的骨骼肌纤维，由于所支配的肌纤维类型不同，运动单位可分为快肌运动单位和慢肌运动单位。一个运动神经元所支配的肌纤维数量称为神经支配比，若神经元支配的骨骼肌纤维数量多，则神经支配比大。不同的运动单位所产生的肌张力亦不同，通常情况下，同样类型的运动单位，神经支配比大的运动单位的收缩力强于神经支配比小的运动单位的收缩力。

(三) 肌肉收缩时动员的肌纤维数量

支配组成肌肉的各运动单位的运动神经元其兴奋性各不相同，通常慢肌运动单位神经元的兴奋性较高，快肌运动单位神经元的兴奋性较低。当需克服的阻力负荷较小时，主要由兴奋性较高的慢肌运动单位兴奋收缩完成，此时动员的肌纤维数量较少，随着阻力负荷的增加，运动中枢传出的兴奋信号亦随之增强，兴奋性较低的运动单位亦逐渐被动员，兴奋收缩的肌纤维数量也随之增多。在其他条件相同的情况下，动员的肌纤维数量多少成为影响肌力的主要因素。但即使运动中枢处于最大兴奋状态，也不能使所有的肌纤维同时参与收缩。

(四) 肌纤维收缩时的初长度

肌纤维的收缩初长度极大地影响着肌肉最大肌力。肌肉在收缩前常会先做离心收缩将肌肉拉长,然后再做向心收缩,这即通常所说的超等长收缩。研究表明,肌纤维处于一定的长度时,粗肌丝肌球蛋白横桥与细肌丝的肌动蛋白结合的数目最多,从而使肌纤维收缩力增加,肌肉收缩时肌纤维所处的这种长度叫做最适初长,此时肌小节长度为2.0~2.2微米。肌小节过短或过长都将因肌球蛋白横桥与肌动蛋白结合的数目减少而导致肌力下降。另外,肌肉被拉长后立即收缩,所产生的肌力远大于肌肉先被拉长、间隔一定时间之后再收缩所产生的肌力。其原因在于,拉长肌肉后快速收缩,除了前面所述由于肌肉达最适收缩初长,增加了横桥的数目,从而增加肌力外,还由于快速收缩使肌肉出现牵张反射,反射性地提高了肌肉力量。这就可以理解为什么原地下蹲后立即起跳要比先下蹲、间隔一段时间后再跳要跳得更高。

(五) 神经系统的机能状态

神经系统的机能状态主要通过协调各肌群活动、提高中枢兴奋程度、增加肌肉同步兴奋收缩的运动单位数量来提高肌肉最大肌力。中枢在完成某一收缩过程时,除了主动肌兴奋外,尚需协同肌的配合与拮抗肌的放松。中枢之间良好的协调配合将减少因肌群间工作不协调所致的能量消耗,有助于主动肌更充分地发挥收缩效益。中枢神经系统的兴奋程度对提高最大肌力具有重要的作用,中枢兴奋性通过参与兴奋的神经元数量和兴奋神经元发出神经冲动的频率来体现,兴奋性高,则参与兴奋的神经元多,所发出的动作电位频率高,可使更多的兴奋性较低的运动单位参与兴奋收缩,从而使肌力增大。研究表明,当肌肉克服相当于最大肌力的20%~80%的阻力负荷时,肌肉力量的增加主要靠神经系统不断募集动员更多的运动单位来完成;当阻力负荷超过80%时,肌肉力量的增加主要靠提高神经中枢发放冲动的频率和有关肌肉中枢同步兴奋程度来实现。克服最大负荷甚至超过最大负荷的训练有助于提高中枢神经系统的兴奋性,将有效地提高肌肉最大肌力。在举重这类运动项目中,对运动员中枢神经系统的同步兴奋性和反射协调能力提出了很高的要求,由于受体重所限,运动员要以最小的肌肉重量获得最大的肌肉力量,此时运动神经中枢的同步兴奋性将起重要的作用。

(六) 年龄与性别

肌肉力量从出生后随年龄的增加而发生自然增长,通常在20~30岁时达最大,以后逐渐下降。身体发育成熟以后,只有经过超负荷训练才能使肌肉力量增加。如果不进行力量训练,随着年龄的增长,肌肉力量会同其他器官系统功能一样开始减弱。如果继续进行超负荷训练,可使力量显著增大,超过刚成年时的力量水平。但是,如果肌肉只承担较小的负荷,力量将随着年龄的增加持续下降,到65岁时力量约下降20%。

10~12岁以下的儿童,男孩的力量仅比女孩略大。进入青春期后,力量的性别差异加大,由于雄性激素分泌的增多,有效地促进了男孩肌肉和骨骼体积的增大,使其力量明显大于女孩。成年女子由于性激素等原因,其肌肉发达程度远较男性差,故肌肉平均



力量大约仅为男性肌力的 2/3, 但不同肌群力量差异较大。如女子前臂屈、伸肌群的力量只有男子的 50%, 而大腿屈、伸肌群的力量是男子的 80% 左右。

造成男女力量差异的另一原因是后天参加的活动有所不同。男子经常参加一些能发展力量和爆发力的体育活动, 使他们比女子更接近自己潜在的最大力量水平。由于女子从事的活动一般多是非力量性的或力量水平较低的活动, 因此, 使女子距她们潜在的最大力量水平甚远。虽然女子的绝对力量水平低于男子, 但经过训练, 男女之间的差别会逐渐缩小。如女大学生经过 10 周的力量训练后, 其力量提高相对值较同龄的男子大。

(七) 体重

体重大的人一般绝对力量较大。而体重较轻的人可能具有较大的相对力量。随着体重的增加, 绝对力量直线增加。当用相对力量表示总体力量时, 随着体重的增加, 相对力量却下降。这些关系有助于解释为什么身材较小的体操运动员往往能取得较好成绩, 以及为什么体操运动员的身材要比投掷运动员小得多。因为, 为了能成功地完成体操动作, 运动员需要有较高水平的相对力量。而对投掷运动员来说, 就需要有较高水平的绝对力量, 才能将器械掷得更远。一般说来, 对仅需要克服体重但对速度、灵敏和协调性要求较高的运动项目, 运动员的身材往往较小, 相对肌肉力量较大; 而那些必须克服外部阻力项目(如投掷、摔跤和举重等项目)运动员的身材一般都较大, 绝对力量也较大。

除了上述因素, 肌糖原和肌红蛋白含量和毛细血管分布密度也会影响肌肉力量。肌糖原和肌红蛋白是分布在肌浆中的能量物质和氧贮备物质, 其含量的增加有助于肌肉长时间进行较低强度收缩时的能量和氧供应。肌肉毛细血管数量的增加有助于肌肉运动所产生的酸性物质和 CO_2 等代谢产物的运输及氧气和营养物质的供应。这些因素都与肌肉的耐力有关。

二、肌肉力量的可训练因素

在上述众多影响肌肉力量的生物学因素中, 有些因素受先天遗传所决定, 其后天可训练幅度较小, 这些因素在训练过程中将被置于较次要位置。而有些因素则通过后天训练可得到明显改善, 我们将其称之为肌肉力量的可训练因素。运动训练的目的就在于最大限度地挖掘其可训练的力量素质潜质。研究表明, 力量素质可训练因素主要有以下几种:

(一) 肌纤维的收缩力

通过后天训练, 可使单根肌纤维的收缩力得到明显的增加。研究发现, 经过 100 天的训练后, 上肢屈肌的横截面积增加 23% 时, 肌力增长 92%。据推算, 每 1 平方厘米肌肉横截面积可产生 6.5 公斤力。训练可使肌原纤维收缩蛋白含量显著增多, 肌原纤维增粗, 肌细胞内的肌糖原等能量物质大量贮备, 有关代谢酶的活性增加等。这些因素都会使肌肉的收缩能力提高。

(二) 神经系统的机能状态

运动训练能有效地提高中枢神经系统的机能水平,从而提高肌肉力量。运动对神经系统的影响主要通过提高运动中中枢同步兴奋能力和改善运动中中枢间机能协调能力来实现。前而已经提到,即使运动神经中枢处于最佳兴奋状态时,也不能使所支配的全部肌纤维同时参与收缩。研究表明,一般人肌肉完成最大随意收缩时,最多有60%~70%的肌纤维同时参与收缩,其主要原因在于一般人的运动中中枢兴奋性难以达到足够高的水平,所发出的神经冲动不能使更多的运动单位参与兴奋收缩过程。经过系统的力量训练后,运动员运动中中枢同步放电的程度将大大提高,同时参与收缩的肌纤维数量可达到80%~90%甚至更高,最大肌力自然大大增加。

(三) 肌纤维类型

对于训练是否改变肌纤维类型和数量这一问题还有争议。早期研究认为无论是速度训练还是耐力训练都不会引起肌纤维类型的改变。近期有研究表明,肌纤维间通过亚型的形式有可能出现相互转化。无论训练能否改变肌纤维类型,运动训练能使肌纤维产生适应性变化却是不争的事实。耐力训练使肌纤维的琥珀酸脱氢酶等有氧代谢酶活性、毛细血管网数量和体积、肌红蛋白含量及慢肌纤维面积百分比等增加,而速度和力量训练可使有关无氧代谢酶活性及快肌纤维面积百分比等增加。

值得提出的是,训练方法与训练内容在一定程度上会影响到最大肌力值。通常训练强度较小时,参与收缩的主要为兴奋性较高的慢肌运动单位,收缩供能形式主要以有氧供能为主,这种训练更多地是发展肌肉耐力。而大强度负荷训练则要求运动中中枢发出更强的神经冲动以调动更多的兴奋性较低但收缩力更强的快肌运动单位参与收缩,无氧供能比重加大,供能速率提高,将有助于产生更大的收缩力。

三、功能性肌肉肥大

功能性肌肉肥大是指由于运动训练所引起的肌肉体积增大。肌肉的功能性肥大主要表现为肌纤维的增粗。肌纤维的增粗可表现为肌浆型功能性肥大和肌原纤维型功能性肥大两种情况。

(一) 肌浆型功能性肥大

肌浆型肥大是指肌纤维非收缩蛋白成分的增加所致的肌肉体积增加。这类肥大表现为肌纤维的非收缩蛋白成分含量如线粒体、肌糖原、磷酸肌酸和肌红蛋白等数量增加。这类肌肉肥大对肌肉最大肌力作用不明显,由于单位生理横截面积所含肌纤维数量有所减少,故此类肥大可能会使相对肌力有所下降,但可有效地提高肌肉的有氧工作能力和收缩耐力。通常,较小强度长期运动训练会导致此类功能性肥大,肥大出现的部位主要是慢红肌(I型肌)和快红肌(IIa型肌)肌纤维中。



(二) 肌原纤维型功能性肥大

肌原纤维型的功能性肥大表现在肌纤维中的收缩蛋白含量增多,肌原纤维的体积明显增加。这种肥大导致肌肉绝对肌力和相对肌力的显著提高。长期大负荷力量训练可导致肌原纤维型功能性肥大,产生部位主要在快白肌(Ⅱb型肌)纤维中。这类肥大对肌腱化学成分的改变有明显的影响,使其更加致密。

运动形式与强度对肌肉功能性肥大的类型有极为重要的影响,可选择性使不同肌纤维发生肥大。例如,力量性和速度性全力运动最终主要使快肌产生肌原纤维型功能性肥大;而耐力性运动主要使慢肌产生肌浆型功能性肥大,从而引起不同类型的肌纤维的不同性质的选择性肥大。

值得提出的是,实际上,肌肉的功能性肥大是两种肥大的综合表现,无论哪种运动导致的肌肉肥大都既有非收缩成分的增加,也有收缩成分的增加。此外,肌外结构如毛细血管数量及体积增加等亦可对肌肉肥大有一定的影响。

四、力量训练原则

明确了肌肉力量的生理学机制后,就应努力改善相关的肌力影响因素,才能有效地提高最大肌肉力量。要有效地提高最大肌肉力量,在训练中应遵循以下基本原则。

(一) 大负荷原则

此原则是指要有效提高最大肌力,肌肉所克服的阻力要足够大,阻力应接近(至少超过肌肉最大负荷能力2/3以上)或达到甚至略超过肌肉所能承受的最大负荷。该原则的生理学机制在于,由于肌肉内各运动单位的兴奋性不同,当阻力负荷较小时,中枢只能调动兴奋性高的运动单位参加收缩,随着阻力的加大,参与收缩的运动单位逐渐增多。足够大的负荷对中枢神经系统的刺激大,能使运动中枢发出更强的信号,从而调动更多的运动单位参加同步收缩,肌肉表现出更大的肌张力。通常低于最大负荷80%的力量练习对提高最大肌力的作用不明显。

(二) 渐增负荷原则

此原则是指力量训练过程中,随着训练水平的提高,肌肉所克服的阻力也应随之增加,才能保证最大肌力的持续增长。某一负荷最初对某一个练习者来说可能是最大负荷,须竭尽全力才能克服,随着训练水平的提高,这一负荷对他来说已经不是最大负荷了。此时要克服这一阻力已不需最大限度地调动肌纤维参与收缩,若不增加负荷,则后面的练习将逐渐转向发展肌力耐力而不是发展最大肌力。因此,应逐渐增大负荷,使其训练的肌肉经常处于大负荷状态,才能有效地提高最大肌力。

(三) 专门性原则

专门性原则是指所从事的肌肉力量练习应与相应的运动项目相适应。力量训练的专

门性原则包括进行力量练习的身体部位的专门性和练习动作的专门性。即进行负重抗阻练习时,应包含直接用来完成动作的肌肉群,并尽可能地模拟其实际的动作结构及动作的节奏与速度。身体部位的专门性和动作结构的专门性,有利于神经系统的协调调节能力,以及肌肉内一系列适应性生理和生化变化。

运动技术的专门性有时显得更为重要。在一些情况下,两类运动中使用的肌群是相同的,但运动的形式却是不同的。专门训练的重要性,甚至在一些参与工作的肌群和动作结构基本一致的同类运动项目中也可以见到。例如:卓越的短跑运动员,往往不是优秀的马拉松运动员。反之亦然。短跑和长跑只是跑步的速度不同。显然,训练中动作的节奏和速度是非常重要的。因此,在进行专门训练时,练习的动作节奏与速度也要和正式的运动相一致。

(四) 负荷顺序原则

负荷顺序原则是指力量练习过程中应考虑前后练习动作的科学性和合理性。总的来说应遵循先练大肌肉、后练小肌肉、前后相邻运动避免使用同一肌群的原则。其生理机制为,大肌肉在训练时运动中枢的兴奋面广,兴奋程度高,在提高自身力量的同时,由于兴奋的扩散作用,练习过程对其他肌肉也有良性刺激作用。此外,由于大肌肉相对不易疲劳,可延长练习时间,而小肌肉练习容易疲劳,将影响大肌肉练习动作的完成。前后相邻动作若使用同一肌群,由于前一动作练习已经使该肌群疲劳,所以完成后一动作时,既不能保证动作质量,又容易出现肌肉过度疲劳和肌肉损伤,而使用不同肌群甚至相颞颥的肌群,由于交互抑制的原因,一个中枢兴奋,将对其颞颥中枢产生抑制,使前一运动致疲的肌群的运动中枢受到抑制,从而使疲劳肌群得以“积极性休息”而放松。

(五) 有效运动负荷原则

此原则指要使肌肉力量获得稳定提高,应保证有足够大的运动强度和运动时间,以引起肌纤维明显的结构和生理生化改变。并非任何运动都是有效的,当运动强度和运动量太小时,对身体机能将不产生明显的影响,只有足够大的运动强度和足够长的运动时间才会对身体机能产生运动痕迹和效果,长期的身体机能运动变化最终将导致身体形态结构的一系列变化。在运动生理学中,将导致身体产生运动痕迹和效果的最小运动强度叫做靶强度,此时的心率称为靶心率。通常每次力量训练应有不少于三组接近或达到肌肉疲劳的力量练习,才能使肌肉力量逐渐提高。

(六) 合理训练间隔原则

合理训练间隔原则就是导求两次训练课之间的适宜间隔时间,使下次力量训练在上次训练出现的超量恢复(超量恢复的概念见第十二章)期内进行,从而使运动训练效果得以积累。下次训练间隔时间与训练强度和训练量有密切的关系,训练强度和训练量大,间隔时间应长。通常较小的力量训练在第二天就会出现超量恢复,中等强度的力量训练应隔天进行,而大强度力竭训练一周进行1~2次即可。值得提出的是,完成定量负荷,训练水平高者出现超量恢复的时间较早,超量恢复的幅度较小,其训练间隔应较短;但



同样进行力竭训练后，高水平者因完成的绝对负荷量大，故其超量恢复较晚出现，超量恢复的幅度较大，持续时间较长，训练间隔时间也应稍长。

五、力量训练要素

(一) 运动强度

运动强度可分为绝对强度和相对强度。绝对强度是指机体所承受的物理负荷量（如做了多少功等），所以又叫做物理负荷强度。绝对强度的优点是简单明了，缺点是不能体现不同人之间的体能差异。相对强度是根据个人最大摄氧量百分数或最大心率百分值等生理指标来反映某一负荷量对身体的刺激程度，所以叫生理负荷强度。相对强度的优点是能反映运动者的个人体能水平。在运动生理学中衡量运动强度通常采用生理负荷强度。

常用最大重复次数(RM)来表示力量训练的负荷强度。最大重复次数是指肌肉收缩所能克服某一负荷的最大次数。RM 越小，表示运动员对该负荷的重复次数越少，负荷强度越大。例如对于举重运动，训练时应多用接近或达到最大负荷的强度进行训练。而对于健身运动来说，则只需较小的负荷强度(RM 值较大)进行运动。表 11-1 反映出不同形式力量练习的大致参考运动负荷强度。

表 11-1 不同形式力量练习的参考运动负荷强度

运动形式	发展肌力	最大负荷 (%)	起始负荷(RM)	调整负荷(RM)
举重等	最大肌力	90~100	1~3	3~5
健美等	最大肌力和爆发力	75~90	5~8	8~12
健身等	肌肉耐力	50~75	12~15	20~25

(二) 练习次数和频度

在力量训练中，练习次数和训练频度的安排受训练目的、运动形式和练习者身体训练水平等因素的影响。研究表明，对初次参加运动训练者，隔天训练的效果比每天训练效果好。每天进行力量训练者，训练 10 次后，肌肉力量提高 47%，而以同样训练负荷进行隔天训练，经过 10 次训练后肌肉力量提高 77.6%。举重等以发展肌肉最大肌力为主要目的的运动，其运动强度应足够大，一般接近或达到肌肉的最大负荷能力，练习组数至少不低于 3 次，训练频度则可适当减少，每周 1~2 次即可。以发展肌肉体积线条和爆发力为主要目的的运动如健美，其运动强度应适当降低，但练习组数和频度则相应地增多；以发展肌肉耐力和提高内脏机能水平为主要目的的运动，其运动强度更低，练习次数相应较多，练习频度亦可有所增加。运动者负荷量大小和身体恢复情况作为决定训练频度的主要依据。

(三) 运动量

运动量包括运动强度和运动时间两个因素，是二者的乘积。三者之间的关系是：运动量=平均运动强度×运动时间。在一段时间如一周或一个月训练的运动总量除了运动强度和运动时间外，还要考虑这段时间的训练频度，即：运动总量=(平均运动强度×运动时间)×训练频度。

第二节 速度素质

速度素质是指人体进行快速运动的能力或在最短时间完成某种运动的能力。按其在运动中的表现可分为反应速度、动作速度和周期性运动的位移速度三种形式。

一、速度素质的生理基础

(一) 反应速度

反应速度(reaction speed)是指人体对各种刺激发生反应的快慢，如短跑运动员从听到发令到起动的的时间。反应速度的快慢主要取决于兴奋通过反射弧所需要的时间(即反应时)的长短、中枢神经系统的机能状态和运动条件反射的巩固程度。

1. 反应时与反应速度

从感受器接受刺激产生兴奋并沿反射弧传递开始，到引起效应器发生反应所需要的时间称为反应时(reaction time)。在构成反射弧的五个环节中，传入神经和传出神经的传导速度基本上是固定的，所以，反应时间的长短主要取决于感受器的敏感程度(兴奋阈值的高低)、中枢延搁和效应器(肌组织)的兴奋性。其中，中枢延搁又是最重要的，反射活动越复杂，历经的突触越多，反应时越长。

2. 中枢神经系统的机能状态与反应速度

中枢神经系统的机能状态与反应速度有密切关系。良好的兴奋状态及其灵活性，能够加速机体对刺激的反应，使效应器由相对安静状态或抑制状态迅速转入活动状态。运动员处于良好的赛前状态时，反应时缩短。反之，如果运动员大脑皮层的兴奋性降低或灵活性低，反应时将明显延长。

3. 运动条件反射的巩固程度与反应速度

随着运动技能的日益熟练，反应速度加快。研究发现，通过训练，反应速度可以缩短 11%~25%。



(二) 动作速度

动作速度(movement speed)是指完成单个动作时间的长短,如排球运动员扣球时的挥臂速度等。动作速度主要是由肌纤维类型的百分组成及面积、肌肉力量、肌肉组织的兴奋性和运动条件反射的巩固程度等因素所决定的。

1. 肌纤维类型与动作速度

肌肉中快肌纤维占优势是速度素质重要的物质基础之一,快肌纤维百分比越高且快肌纤维越粗,肌肉收缩速度则越快。研究证实,优秀短跑运动员腿部肌肉中快肌纤维百分比高,并且快肌纤维出现选择性肥大。

2. 肌肉力量与动作速度

肌力越大,越能克服肌肉内部及外部阻力完成更多的工作。凡能影响肌肉力量的因素也必将影响动作速度。

3. 肌肉组织机能状态与动作速度

肌肉组织兴奋性高时,刺激强度低且作用时间短就能引起肌组织兴奋。

4. 运动条件反射的巩固程度与动作速度

在完成动作过程中,运动技能越熟练,动作速度就越快。此外,动作速度还与神经系统对主动肌、协调肌和对抗肌的调节能力有关,并与肌肉的无氧代谢能力有密切关系。

(三) 位移速度

位移速度(displacement speed)是指周期性运动(如跑步和游泳等)中人体在单位时间内通过的距离。以跑为例,周期性运动的位移速度主要取决于步长和步频两个变量,而步长和步频又受多种生物学因素的制约(图 11-1)。步长主要取决于肌力的大小、肢体的长度以及髋关节的柔韧性;而步频主要取决于大脑皮层运动中枢的灵活性和各中枢间的协调性,以及快肌纤维的百分比及其肥大程度。神经过程的灵活性好,兴奋与抑制转换速度快,是肢体动作迅速交替的前提;而各肌群间协调关系的改善,可以减少因对抗肌群紧张而产生的阻力,有利于更好地发挥速度。所以,在周期性运动项目中,肌肉放松能力的改善也是提高速度的一个重要因素。

此外,速度性练习时间短,主要依靠 ATP-CP 系统供能,因此,肌肉中 ATP-CP 含量较多是速度素质重要的物质基础。研究发现,通过速度训练,肌肉中 CP 的贮备量随训练水平的提高而增加。

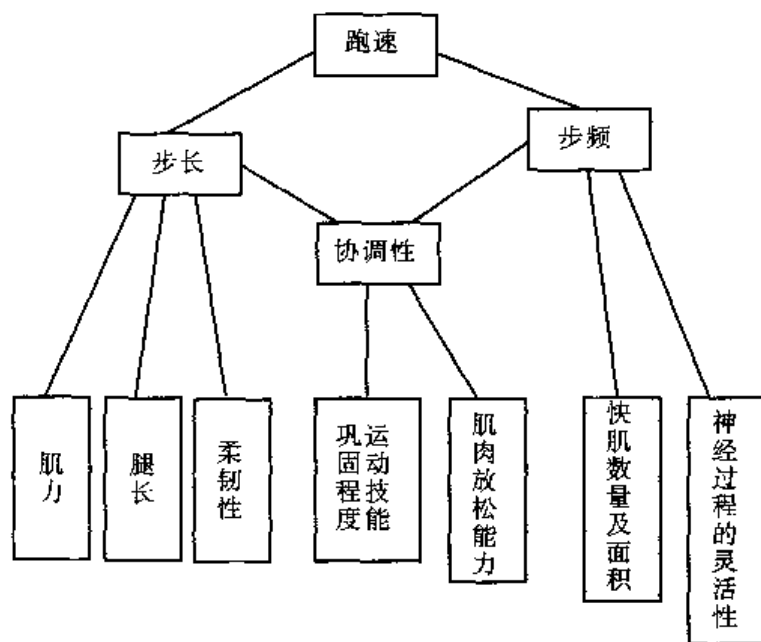


图 11-1 影响步长、步频的主要生物学因素

二、速度素质的训练

(一) 提高动作速率的训练

大脑皮层神经过程的灵活性是实现高频率动作的重要因素。为了改善和提高神经过程的灵活性，采用变换各种信号让练习者迅速作出反应的练习，以及做各种高频率动作的练习，如牵引跑、在转动跑台上跑和顺风跑等借助外力提高动作频率的练习，都可使练习者在不缩短步长的情况下增加步频，提高神经中枢兴奋与抑制快速转换的能力。

(二) 发展磷酸原系统供能的能力

速度性练习是强度大、时间短的无氧训练，主要依靠 ATP-CP 系统提供能量，因此，在发展速度训练中，应着重发展磷酸原系统供能的能力。一般常用的方法是重复训练法，如短跑运动员常采用 10 秒以内的短距离反复疾跑来发展磷酸原系统供能能力。

(三) 提高肌肉的放松能力

肌肉的协调放松能力也是速度素质提高的重要因素。肌肉放松能力的提高不仅可以减少快速收缩时肌肉的阻力，而且有利于 ATP 的再合成，使肌肉收缩速度和力量增加。有人曾对肌肉放松训练与肌肉力量之间的关系进行研究，发现在力量练习后进行放松练习的实验组与无放松练习的对照组相比，实验组肌肉的放松能力明显提高，同时肌肉力量和速度及 100 米跑成绩均较对照组明显提高(表 11-2)。

表 11-2

放松训练对力量和速度的影响

测验项目	实验组			对照组		
	前	后	提高(%)	前	后	提高(%)
单腿三级跳远(厘米)	586.40	712.10	21.05	598.60	674.20	12.60
行进 30 米跑(秒)	5.15	4.32	19.38	5.18	4.46	15.36
100 米跑(秒)	13.91	13.12	6.00	13.87	13.44	2.77

(四) 发展腿部力量及关节的柔韧性

对短跑运动员来说,腿部力量对增加步长是十分重要的,除负重训练外,可进行一些超等长练习(如连续单腿跳、蛙跳等练习)来发展腿部力量。另外,改善关节柔韧性的练习也有利于速度素质的提高。

第三节 耐力素质

耐力是指人体长时间进行肌肉工作的运动能力,也称为抗疲劳能力。耐力素质的分类及命名十分繁杂,可按运动时的外部表现划分为速度耐力、力量耐力和静力耐力等;按该项工作所涉及的主要器官划分为呼吸循环系统耐力、肌肉耐力及全身耐力等;还可按参加运动时能量供应的特点划分为有氧耐力和无氧耐力;并可按运动的性质划分为一般耐力和专项耐力等。本节将着重从能量供应的角度介绍有氧耐力和无氧耐力的生理基础,以及有氧与无氧耐力训练等问题。

一、有氧耐力及其训练

(一) 有氧耐力的生理基础

有氧耐力(aerobic endurance)是指人体长时间进行以有氧代谢(糖和脂肪等有氧氧化)供能为主的运动能力。有氧耐力有时也被称做有氧能力(aerobic capacity)。肌肉要持久地工作,必须有充足的能量供应。因此,充分的氧供应及糖和脂肪的有氧氧化能力是影响有氧耐力的关键因素。而运动中氧的供应受多种因素的制约。影响有氧耐力的有关因素概括如图 11-2 所示。

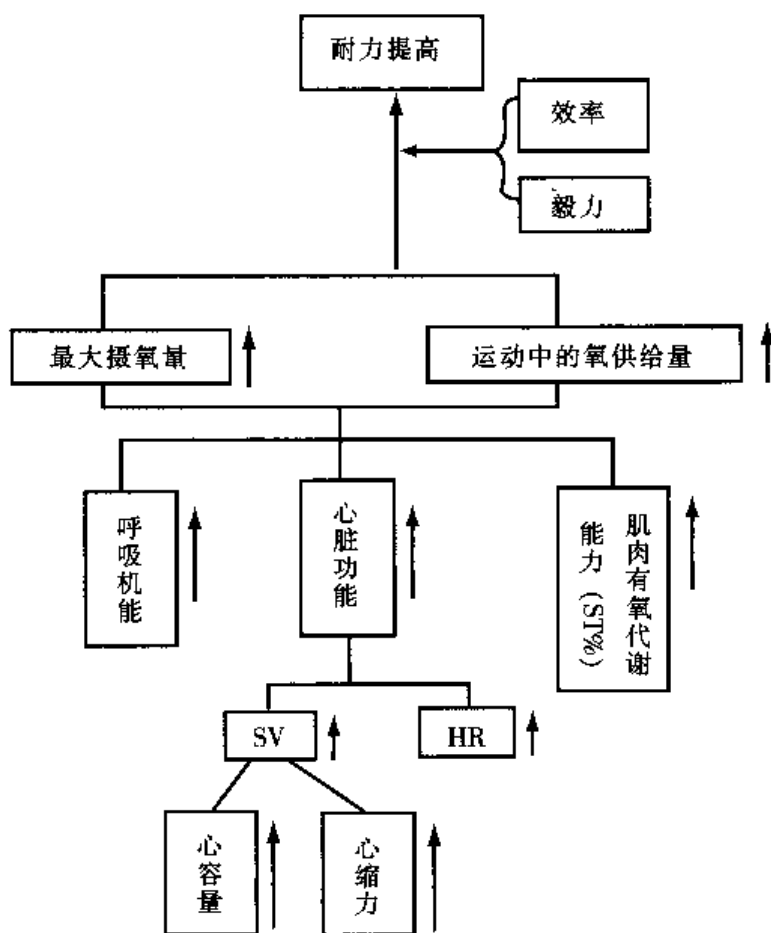


图 11-2 影响有氧耐力提高的生物学因素

1. 最大摄氧能力

最大摄氧量是反映心肺功能的一项综合生理指标，也是衡量人体有氧耐力水平的重要指标之一。研究证明，有训练的耐力项目运动员最大摄氧量大，并且最大摄氧量百分利用率也高。凡是能影响最大摄氧量的因素均能影响运动员的有氧耐力水平。影响最大摄氧量的因素有肺的通气与换气机能、血红蛋白的含量及载氧能力、心脏机能、肌肉组织利用氧的能力、遗传、年龄、性别和训练等因素(参见第十章第一节)。

心肺功能是有氧耐力素质的重要生理基础。良好的心肺功能是运动中供氧充足的保证。因此，心脏的泵血机能和肺的通气与换气机能都是影响吸氧能力的重要因素。

优秀耐力专项运动员在系统训练的影响下，心脏形态与机能都会出现一系列适应性变化，主要表现为左心室内腔扩张，心容积增大，安静时心率减慢，每搏输出量增加，表明心脏的泵血机能和工作效率得到提高，以适应长时间持续运动的需要。优秀耐力专项运动员肺的容积和肺活量均大于同性别、同年龄的非耐力专项运动员和无训练者，肺的通气机能和弥散能力也大于一般人。肺功能的改善为运动时氧的供给提供了先决条件。

2. 肌纤维类型及其代谢特点

肌组织利用氧的能力与有氧耐力密切相关。肌纤维类型及其代谢特点是决定有氧耐



力的重要因素。实验证明,优秀的耐力专项运动员慢肌纤维百分比高且出现选择性肥大现象,同时还伴有肌红蛋白、线粒体及其氧化酶活性和毛细血管数量增加等方面的适应性变化。

3. 中枢神经系统机能

在进行较长时间的肌肉活动中,要求神经过程的相对稳定性以及各中枢间的协调性要好,表现为在大量的传入冲动作用下不易转入抑制状态,从而能长时间地保持兴奋与抑制有节律地转换。长期进行耐力训练,不仅能够提高大脑皮层神经细胞对刺激的耐受力和神经过程的稳定性,而且能够改善各中枢间的协调关系,表现为运动中枢的兴奋与抑制过程更加集中,肌肉的收缩与放松更加协调;各肌群(主动肌、对抗肌、协调肌)之间的配合更趋完善;内脏器官的活动(即氧运输系统的功能)能更好地与肌肉活动相适应。由于神经调节能力的改善,可以提高肌肉活动的机械效率,节省能量消耗,从而保持长时间的肌肉活动。

4. 能量供应特点

耐力性项目运动持续时间长,强度较小,运动中的能量绝大部分由有氧代谢供给,所以,机体的有氧代谢能力与有氧耐力素质密切相关。系统的耐力训练可以提高肌肉有氧氧化过程的效率和各种氧化酶的活性以及机体动用脂肪供能的能力。在长时间耐力练习中,随着运动时间的延长,脂肪供能的比例逐渐增大,从而节省糖原的利用。人体动员脂肪供能的能力,可以从血浆中自由脂肪酸的含量来判断(表 11-3)。

表 11-3 不同持续时间中糖和脂肪的供能比例

运动时间(分)	0~30	30~60	60~90	90~120
需氧量(L/min)	2.48	2.51	2.52	2.61
糖供能比例(%)	71	66	63	56
脂肪供能比例(%)	29	34	37	44

(二) 发展有氧耐力的训练

1. 训练方法

发展有氧耐力常用的训练方法有持续训练法、间歇训练法及高原训练法等(详见第十章第二节)。

2. 训练要素

(1) 运动强度:在为发展有氧耐力而进行的持续性练习中,运动强度的选择十分重要。强度过低不能充分动员人体呼吸循环系统的机能潜力,有效地发展有氧代谢能力;若强度过大,持续时间必然缩短,供能系统向无氧代谢途径转变。一般认为,为发展有氧耐力,采用超过本人 $\dot{V}O_{2\max}$ 50%强度的运动,能使有氧能力显著提高。不少学者提

出了各自研究所得的标准,如美国的库珀(Cooper)提出,为发展心肺机能,运动中心率应达到 150 次/分;荷兰的卡沃宁(Karvonen)提出适宜强度的公式为:安静心率+(最高心率-安静心率) \times 60%,其公式中 60%可因人而异,训练水平较高者可乘以 70%,训练水平较低者可乘以 50%(上述诸强度标准可供参考)。近十多年来,国内外学者普遍提出,个体乳酸阈(ILAT)强度是发展有氧耐力训练的最佳强度。

(2) 运动持续时间:运动持续时间对训练效果也会产生明显的影响,一般认为,耐力训练产生效果的最低限度时间为 5 分钟。持续时间取决于运动强度,强度较低的活动可以持续较长的时间。

二、无氧耐力及其训练

(一) 无氧耐力的生理基础

无氧耐力(anaerobic endurance)是指机体在无氧代谢(糖无氧酵解)的情况下较长时间进行肌肉活动的能力。无氧耐力有时也称为无氧能力(anaerobic capacity)。提高无氧耐力的训练称为无氧训练。

进行强度较大的运动时,体内主要依靠糖无氧酵解提供能量,因此,无氧耐力的高低主要取决于肌肉内糖无氧酵解供能的能力、缓冲乳酸的能力以及脑细胞对血液 pH 值变化的耐受力。

1. 肌肉内无氧酵解供能的值力与无氧耐力

肌肉无氧酵解能力主要取决于肌糖原的含量及其无氧酵解酶的活性。柯蒂斯尔(Costill)等发现,优秀赛跑运动员腿肌中慢肌纤维百分比及乳酸脱氢酶(参与无氧酵解的酶)活性随项目的不同而异,长跑运动员慢肌纤维百分比高,中跑居中,短跑最低;而乳酸脱氢酶和磷酸化酶的活性却相反,短跑运动员最高、中跑居中、长跑最低(表 11-4)。

表 11-4 不同径赛运动员肌纤维组成及酶的活性比较

项目	人数	ST%	乳酸脱氢酶活性 ($\mu\text{Eq}\cdot\text{g}\cdot\text{min}$)	磷酸化酶活性 ($\mu\text{Eq}\cdot\text{g}\cdot\text{min}$)
男短跑	2	24.0	1287	15.3
男中跑	7	51.9	868	8.4
男长跑	5	69.4	764	8.1
女短跑	2	27.4	1350	20.0
女中跑	7	60.0	744	12.6

2. 缓冲乳酸的能力与无氧耐力

肌肉无氧酵解过程产生的乳酸进入血液后,将对血液 pH 值造成影响。但由于缓冲

系统的缓冲作用,使血液的 pH 值不至于发生太大的变化,以维持人体内环境的相对稳定性。机体缓冲乳酸的能力主要取决于碳酸氢钠的含量及碳酸酐酶的活性。一些研究表明,经常进行无氧耐力训练,可以提高血液中碳酸酐酶(促进碳酸分解的酶)的活性。

3. 脑细胞对酸的耐受力与无氧耐力

尽管血液中的缓冲物质能中和一部分进入血液的乳酸,减弱其强度,但由于进入血液的乳酸量大,血液的 pH 还会向酸性方向发展,加上因氧供不足而导致代谢产物的堆积,都将会影响脑细胞的工作能力,促进疲劳的发展。因此,脑细胞对这些不利因素的耐受能力,无疑也是影响无氧耐力的重要因素。

经常进行无氧耐力训练的运动员,脑细胞对血液中代谢产物堆积的耐受力提高。如短跑和短泳运动员对静脉血 CO_2 含量增多的耐受力比长跑和长泳运动员增强,这也是短跑和短泳运动员对长期无氧训练产生的适应。

(二) 提高无氧耐力的训练

1. 间歇训练法

间歇训练法是发展无氧耐力最常用的训练方法。在发展无氧耐力的间歇训练中,要考虑练习强度、练习时间和间歇时间的组合与匹配,要以运动中能够产生高浓度的乳酸为依据。因此,练习强度和密度较大,间歇时间较短,练习时间一般应长于 30 秒,以 1~2 分钟为宜。以这种练习强度和时间及间歇时间的组合,能最大限度地动用糖酵解供能的能力,从而有效地提高无氧耐力。

2. 缺氧训练

缺氧训练是指在减少吸气或憋气条件下进行的练习,其目的是造成体内缺氧以提高无氧耐力。缺氧训练不仅可以在高原自然环境中进行,而且在平原特定环境条件下模拟高原训练,同样可以获得一定的训练效果,如利用低氧口咀、低氧面罩、低氧屋等等。

第四节 灵敏和柔韧素质

一、灵敏素质

灵敏素质(agility)是指人体迅速改变体位、转换动作和随机应变的能力。它是多种运动技能和身体素质在运动中的综合表现,是一种较为复杂的素质。在某些需要迅速改变体位的运动项目中灵敏素质尤其重要。如球类和体操等项目中的急起、急停和快速改变方向等动作,都需要运动员具有良好的灵敏素质。

灵敏素质具有明显的项目特点,如体操运动员的灵敏主要表现为对身体姿势的控制和转换动作的能力,球类运动员的灵敏则主要表现为对外界环境变化能及时而准确地转

换动作以作出反应的能力。

(一) 灵敏素质的生理基础

1. 大脑皮层神经过程的灵活性及其分析综合能力

大脑皮层神经过程的灵活性及分析综合能力是灵敏素质重要的生理基础。神经过程的灵活性好,兴奋与抑制转换得快,才能使机体在内外环境条件发生变化时迅速地作出判断和反应,并根据当时的情况及时调整或修正动作,尤其在对抗性项目中,如球类、击剑和摔跤等,随着运动形式的变化,动作的性质及强度都将发生变化,机体必须迅速对情况作出判断。

2. 各感觉器官的机能状态

在完成动作过程中,需要运动员具有良好的感觉机能,表现为动作准确,变换迅速,并且在空间和时间上表现出准确的定时定向能力,这就要求各种感觉器官如视、听、位和本体感觉等器官具有极其高度的敏感性。因此,灵敏素质的发展与各种分析器机能的改善有密切关系。

3. 掌握的运动技能及其他身体素质水平

灵敏素质是多种运动技能和身体素质在运动中的综合表现。掌握的运动技能数量越多而且越熟练时,灵敏素质才能越充分地表现出来。因为运动技能是在多种感觉机能的参与下在大脑皮层有关中枢间建立的暂时神经联系,这种暂时联系建立得越多,在环境条件改变需要作出反应时,大脑皮层有关中枢间暂时神经联系的接通就越迅速和准确,并能在原有条件反射的基础上创造出更多的新颖动作和作出更完善的协调反应。

灵敏素质还需要其他身体素质作保证。如必须有一定的力量、速度、耐力及柔韧性等素质,才能真正地适应复杂的环境变化,作出准确的反应。

此外,灵敏素质还受年龄、性别、体重和疲劳等因素的影响。一般认为,少年时期灵敏素质发展最快;男孩较女孩灵活,尤其在青春期后,男孩的灵敏性更好;体重过重会影响灵敏素质的发展;身体疲劳时,爆发力、动作速度、反应速度及协调性等都下降,灵敏素质也会显著下降。

(二) 发展灵敏素质的训练

通过让运动员随各种信号改变动作的训练,可以提高大脑皮层神经过程的灵活性,并通过各种手段(如利用声、光等信号刺激)提高各种感觉器官的机能和加强身体素质的训练,熟练掌握多方面的运动技能,以促进灵敏素质的发展。

二、柔韧素质

柔韧素质(flexibility)是指用力做动作时扩大动作幅度的能力。关节运动幅度的增加,对于提高动作质量十分重要,往往柔韧性越好,动作就越舒展、优美和协调,并且有助



于减少运动损伤。

(一) 柔韧素质的生理基础

1. 关节的构造及其周围组织的伸展性

关节活动幅度的大小,与关节的解剖结构特点、关节周围组织的体积以及跨关节的韧带、肌腱、肌肉和皮肤的伸展性等生理状况有关。

关节面结构是影响柔韧性的的重要因素,主要由遗传因素决定,但训练可以使关节软骨增厚。关节周围体积过大,如皮下脂肪含量或结缔组织过多都将影响临近关节的活动幅度使柔韧性降低。肌肉及韧带组织的伸展性取决于年龄和性别等因素,并与肌肉温度有关,通过准备活动可使肌肉温度升高,降低肌肉内部的粘滞性,加大伸展性,有利于柔韧性的提高。

2. 神经系统对骨骼肌的调节能力

神经系统对骨骼肌的调节能力,尤其是主动肌与对抗肌之间协调关系的改善,以及肌肉收缩与放松调节能力的提高,可以减少由于对抗肌紧张而产生的阻力,有利于增大运动幅度。此外,肌肉放松能力的提高也是扩大动作幅度、提高柔韧性的重要因素。

(二) 发展柔韧素质的训练

1. 拉长肌肉和结缔组织的训练

拉长肌肉和结缔组织的练习,一般可分为快速爆发式牵拉和缓慢牵拉练习,前者在进行牵拉练习时有疼痛感,并且在准备活动不充分时较易拉伤肌肉,如“摆腿”和“踢腿”练习;缓慢牵拉练习是使有关部位肌肉、韧带慢慢拉长至一定程度(有轻微的疼痛感觉),一般不会超越关节伸展的限度,不易引起组织损伤,并能有意识地放松对抗肌群,使之缓慢拉长。因此,锻炼效果较爆发式牵拉练习更好,如“拉韧带”“压腿”等练习。

2. 提高肌肉的放松能力

主动放松肌肉的能力越好,关节活动时所受肌肉牵拉的阻力越小,关节活动幅度就越大。

3. 柔韧性练习与力量训练相结合

柔韧性的提高,要有一定的肌肉力量作基础。因此,在柔韧性练习中,应注意与力量训练有机地结合起来,以提高柔韧性练习的效果。

4. 柔韧练习与训练课的准备活动相结合

通过准备活动,可以使体温升高,降低肌肉粘滞性,提高其伸展性,此时增加柔韧练习能收到较好的效果,并可避免运动损伤。



5. 柔韧练习要注意年龄特征并要持之以恒

儿童少年时期关节韧带的伸展性大, 此时开展柔韧素质的训练更有成效。成年以后, 一般很难显著发展动作幅度, 甚至伴有动作幅度的减小。因此, 从少儿时期开始进行系统训练, 是发展柔韧素质的重要手段, 成年以后, 只要经常坚持练习, 已获得的柔韧性可以保持很久。

【小结】

1. 肌肉力量是绝大多数运动形式的基础。决定肌肉力量的因素主要有肌纤维的横断面积、肌纤维类型和运动单位、肌肉收缩时动员的肌纤维数量、肌纤维收缩时的初长度、神经系统的机能状态、年龄与性别、体重等因素。提高单根肌纤维的收缩力量和运动中枢间的协调性和同步兴奋能力, 是增加最大肌力最为重要和可行的途径。长期的肌肉运动可导致肌肉功能性肥大。在力量训练中应遵循大负荷、递增负荷、专门性、负荷顺序和有效负荷量等训练原则。发展最大肌力、肌肉爆发力和肌肉耐力等不同训练目的的力量练习所采用的训练强度、练习次数和训练频度等方面的组合有所不同, 力量练习应主要以相对运动强度(生理学强度)作为衡量评定标准。

2. 速度素质是指人体进行快速运动的能力或最短时间完成某种运动的能力。按其在运动中的表现可分为反应速度、动作速度和周期性运动的位移速度三种形式。

3. 反应速度的快慢主要取决于兴奋通过反射弧所需要的时间(即反应时)的长短、中枢神经系统的机能状态和运动条件反射的巩固程度。动作速度是指完成单个动作时间的长短。动作速度主要是由肌纤维类型的百分组成及其面积、肌肉力量、肌肉组织的兴奋性和运动条件反射的巩固程度等因素所决定的。位移速度是指周期性运动(如跑步和游泳等)中人体通过一定距离的时间。提高动作速率、发展磷酸原系统供能的能力、提高肌肉的放松能力、发展肌肉力量及关节的柔韧性等是提高速度素质的良好训练方法。

4. 耐力是指人体长时间进行肌肉工作的运动能力。按参加运动时能量供应的特点划分为有氧耐力和无氧耐力。有氧耐力是指人体长时间进行以有氧代谢供能为主的运动能力。心肺功能、肌纤维类型及其代谢特点、中枢神经系统机能和能量供应特点等因素可以影响有氧耐力水平。无氧耐力是指机体在无氧代谢(糖无氧酵解)的情况下较长时间进行肌肉活动的的能力。无氧耐力的高低, 主要取决于肌肉内糖无氧酵解供能的能力、缓冲乳酸的能力以及脑细胞对血液 pH 值变化的耐受力。

5. 灵敏素质是指人体迅速改变体位、转换动作和随机应变的能力。影响灵敏素质的因素包括大脑皮层神经过程的灵活性及分析综合能力、各感觉器官的机能状态、掌握的运动技能及其他身体素质水平等。

6. 柔韧素质是指用力做动作时扩大动作幅度的能力。关节的构造及其周围组织的伸展性、神经系统对骨骼肌的调节能力等因素可影响柔韧素质。

【思考题】

1. 决定肌肉力量的主要因素有哪些? 其中后天可训练程度较大的因素有哪些?



- 2.什么是肌肉功能性肥大?肌肉功能性肥大的形式及其特点是什么?
- 3.简述力量训练应遵循的原则。
- 4.发展最大肌力与发展肌肉耐力所采用的训练有什么不同?
- 5.试述影响速度素质的生理因素,并结合实际谈谈速度训练问题?
- 6.试述有氧耐力的生理基础及发展有氧耐力的训练方法。
- 7.试述无氧耐力的生理基础及发展无氧耐力的训练方法。
- 8.阐述灵敏及柔韧素质的生理基础。

【主要参考文献】

- 1.杨锡让主编:《实用运动生理学》,北京,北京体育大学出版社,1998。
- 2.杨锡让、傅浩坚主编:《运动生理学进展》,北京,北京体育大学出版社,2000。
- 3.体育学院函授教材:《人体生理学》,上海,上海世界图书出版公司,1995。
- 4.张镜如主编:《生理学》,北京,人民卫生出版社,第四版,1998。
- 5.乔奇 A.布茹克司、杨锡让等译:《运动生理学》,北京,北京体育学院出版社,1988。
- 6.佟启良、杨锡让等:《运动生理学》,北京,北京体育学院出版社,1991。
- 7.王步标、华明、邓树勋等:《人体生理学》,北京,高等教育出版社,1994。
- 8.体育学院通用教材:《运动生理学》,北京,人民体育出版社,1990。
9. [美] R. A. 伯杰著、周石等译:《实用运动生理学》,北京,人民体育出版社,1985。
10. [瑞典] 佩尔—奥洛夫、奥斯特朗等著,杨锡让等译:《运动生理学》,北京,人民体育出版社,1982。

(天津体育学院 刘善云 成都体育学院 苏全生)



第十二章

运动过程中人体机能变化规律

【提要】本章主要介绍人体在运动过程中，生理机能的一系列规律性变化。这些变化包括六个阶段，即赛前状态、准备活动、进入工作状态、稳定工作状态、疲劳和恢复。深入分析并阐述各阶段生理反应特点、机理和影响因素，并在此基础上讨论如何调整和提高身体的适应能力，为科学地从事体育教学、运动训练和健身锻炼提供基础理论知识。

在运动过程中，人体将发生一系列的规律性机能变化，研究和掌握机能变化的各个阶段的规律和特点，对于提高运动成绩和防止运动损伤具有重要意义。

第一节 赛前状态与准备活动

一、赛前状态

人体参加比赛或训练前，身体的某些器官和系统会产生的一系列条件反射性变化，我们将这种特有的机能变化和生理过程称为赛前状态(pre-competition state)。赛前状态可以发生在比赛前数天、数小时或数分钟。

(一) 赛前状态的特征及其产生机理

赛前状态的生理变化主要表现在神经系统兴奋性提高、物质代谢加强、体温升高及内脏器官活动增强。例如，心率和呼吸频率加快、动脉血压升高、汗腺分泌增加等。而这些变化常常因为越临近比赛或运动而变得更加明显。

赛前反应的大小与比赛性质、运动员的比赛经验和心理状态有关。比赛规模越大，离比赛时间越近，赛前反应越明显。运动员情绪紧张、训练水平低、比赛经验不足也会使赛前反应增强。适宜的赛前反应能促进运动员在比赛中发挥出较好的运动水平，反之，则会影响运动员在比赛中正常发挥。

赛前状态产生的机理可以用条件反射机理解释。比赛或训练过程中的场地、器材、观众、音响和对手的表现等信息不断作用于运动员，并与比赛或运动时肌肉活动的生理变化相结合。久而久之，这些信息就变成了条件刺激，只要这些信息一出现，赛前的生理变化就会表现出来，因而形成了一种条件反射。由于这些生理变化是在比赛或训练的



自然环境下形成的, 所以其生理机理属自然条件反射。

(二) 赛前状态对运动能力的影响及调整

赛前状态依据其生理反应特征和对人体机能影响的程度可分为三种类型:

1. 准备状态型

准备状态型的特点是中枢神经系统兴奋性适度提高, 植物性神经系统和内脏器官的惰性得到一定的克服, 使进入工作状态时间适当缩短, 从而有利于发挥机体工作能力和运动成绩的提高。此类型常见于优秀运动员。

2. 起赛热症型

起赛热症型的特点是中枢神经系统的兴奋性过高, 表现为过度紧张, 常有寝食不安、四肢无力、全身微微颤抖、喉咙发堵等不良生理反应, 因而使运动员工作能力和运动成绩下降。此类型常见于初次参加比赛的年轻选手, 或参加特别重大的比赛, 或运动员过分重视比赛结果。

3. 起赛冷淡型

起赛冷淡型的特点是由于赛前兴奋性过低, 进而引起了超限抑制, 表现为对比赛淡漠、浑身无力, 不能在比赛时充分发挥机体工作能力。此类型常是第二种类型的继发反应。

针对不良的赛前状态, 必须进行适当的调整, 使其达到最佳状态。为此要做到: 第一, 要求运动员不断提高心理素质, 正确对待比赛; 第二, 组织运动员多参加比赛, 增加比赛经验; 第三, 进行适当形式和强度的准备活动, 如果运动员兴奋性过低, 可做些强度大的练习, 如果运动员兴奋性过高, 准备活动的强度可小些, 安排一些轻松的和转移注意力的练习和活动。

二、准备活动

准备活动是指在比赛、训练和体育课的基本部分之前, 为克服内脏器官生理惰性, 缩短进入工作状态时程和预防运动创伤而有目的进行的身體练习, 为即将来临的剧烈运动或比赛做好准备。

(一) 准备活动的生理作用和产生机理

1. 准备活动的生理作用

(1) 调整赛前状态

准备活动可以提高中枢神经系统的兴奋性, 调节不良的赛前状态, 使大脑反应速度加快, 参加活动的运动中枢间相互协调, 为正式练习或比赛时生理功能迅速达到适宜程度做好准备。



(2) 为克服内脏器官生理惰性

通过准备活动可以提高心血管系统和呼吸系统的机能水平,使肺通气量及心输出量增加,心肌和骨骼肌的毛细血管网扩张,使工作肌能获得更多的氧。从而克服内脏器官生理惰性,缩短进入工作状态时程。

(3) 提高机体的代谢水平,使体温升高

准备活动在英文中叫做“warm-up”,因此有人把它译做“热身”,即在运动或比赛前使体温升高。体温升高可降低肌肉粘滞性,提高肌肉收缩和舒张速度,增加肌肉力量;在体温较高的情况下,血红蛋白和肌红蛋白可释放更多的氧,增加肌肉的氧供应;体温升高可增加体内酶的活性,物质代谢水平提高,保证在运动中有较充足的能量供应;体温升高还可以提高中枢神经系统和肌肉组织的兴奋性;同时体温升高使肌肉的伸展性、柔韧性和弹性增加,从而预防运动损伤。

(4) 增强皮肤的血流量有利于散热,防止正式比赛时体温过高。

2. 准备活动作用的生理机理

通过预先进行的肌肉活动在神经中枢的相应部位留下了兴奋性提高的痕迹(后作用),这一痕迹产生的生理效应能使正式比赛时中枢神经系统的兴奋性处于最适宜水平,调节功能得到改善,内脏器官的机能惰性得到克服,新陈代谢加快,有利于机体发挥最佳机能水平。但痕迹效应不能保持很久时间,准备活动后间隔45分钟,其痕迹效应将全部消失。

另外,在每次训练或比赛前做准备活动,也会形成条件反射。所以,准备活动所产生的生理效应也有条件反射的作用。

(二) 做准备活动的生理负荷

准备活动的时间、强度、内容、与正式运动或比赛的时间间隔等,都是影响准备活动生理效应的因素。一般认为,准备活动的强度以45%VO_{2max}强度、心率达100~120次/分、时间在10~30分钟之间为宜。此外,还应根据项目特点、个人习惯、训练水平和季节气候等因素适当加以调整,通常以微微出汗及自我感觉已活动开为宜。准备活动结束到正式练习开始时间的间隔一般不超过15分钟。在一般性教学课中准备活动以2~3分钟为宜。

第二节 进入工作状态与稳定工作状态

一、进入工作状态

在进行体育运动时,人的机能能力并不是一开始就达到最高水平,而是在活动开始后一段时间内逐渐提高的。这个机能水平逐渐提高的生理过程和机能状态叫进入工作状



态。进入工作状态的实质就是人体机能的动员。

(一) 产生进入工作状态的机理

人体运动除了受物理惰性影响外, 主要受生理惰性影响。生理惰性与植物性神经纤维传导速度和机能特征有关。具体表现在以下几个方面:

1. 反射时

人的一切活动都是反射活动, 完成任何一项反射活动都需要时间。动作越复杂, 有关中枢之间传递延搁时间就越长, 进入工作状态需要时间也就越长。

2. 内脏器官的生理惰性

肌肉运动必须依赖内脏各器官的协调配合才能获得能源物质、氧气和清除代谢产物。内脏器官活动受植物性神经支配。而植物性神经机能惰性比躯体性神经大, 支配内脏器官的自主神经不仅传导速度慢, 而且传导途径中突触联系较多(图 12-1)。

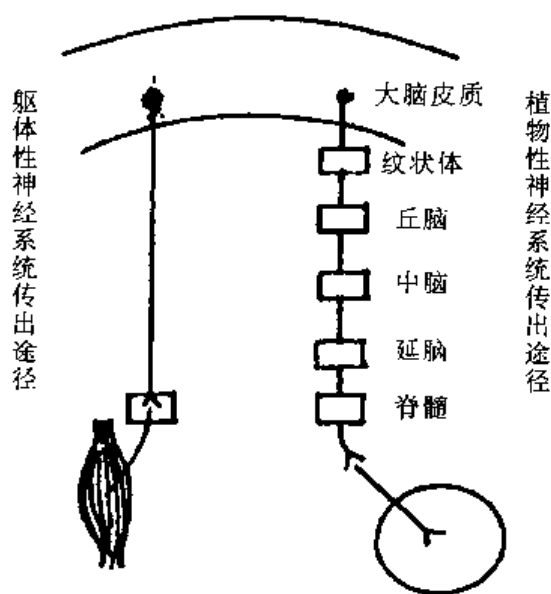


图 12-1 躯体神经和自主神经传出途径示意图

此外, 在内脏器官产生持续活动中, 神经-体液调节作用更为重要。由神经系统调节内分泌腺分泌激素, 激素随血液循环到达所支配的器官, 改变其功能状态。这一系列的生理活动, 比躯体神经调节的惰性大得多。

因此, 内脏器官的生理惰性是产生进入工作状态的主要原因。研究表明, 在不做准备活动的情况下跑 1500 米, 呼吸循环系统的活动需要在运动开始后 2~3 分钟才能达到最高水平, 而骨骼肌在 20~30 秒内就可发挥出最大工作效率。

(二) 影响进入工作状态的因素

进入工作状态所需时间长短取决于工作性质、个人特点、训练水平、工作强度及当

时机体的机能状态。一般来说,肌肉活动越复杂,进入工作状态需要的时间也就越长;训练程度低的运动员比训练水平高的运动员进入工作状态的时间要长,随着训练水平的提高,进入工作状态的时间也会缩短;在适宜运动负荷下工作强度越高,进入工作状态的时间就越短。此外,年龄和外界因素也能影响进入工作状态的时间。儿童少年进入工作状态的时间比成人短。场地条件好、气候温暖适宜以及良好的赛前状态和充分的准备活动均能缩短进入工作状态的时间。

(三) 生理“极点”与“第二次呼吸”

1. 生理“极点”及产生机理

在进行剧烈运动开始阶段,由于植物性神经系统的机能动员速率明显滞后于躯体神经系统,导致植物性神经与躯体神经系统机能水平的动态平衡关系失调,内脏器官的活动满足不了运动器官的需要,出现一系列的暂时性生理机能低下综合症,主要表现为呼吸困难、胸闷、肌肉酸软无力、动作迟缓不协调、心率剧增及精神低落等症状,这种机能状态称为“极点”。

“极点”产生的原因主要是内脏器官的机能惰性与肌肉活动不相称,致使供氧不足,大量乳酸积累使血液 pH 值朝酸性方向偏移。这不仅影响神经肌肉的兴奋性,还反射性地引起呼吸和循环系统活动紊乱。这些机能的失调又使大脑皮质运动动力定型暂时遭到破坏。

2. “第二次呼吸”及产生的机理

“极点”出现后,经过一定时间的调整,植物性神经与躯体神经系统机能水平达到了新的动态平衡,生理机能低下综合症症状明显减轻或消失,这时,人体的动作变得轻松有力,呼吸变得均匀自如,这种机能变化过程和状态称为“第二次呼吸”。

“第二次呼吸”产生的原因主要是由于运动中内脏器官惰性逐步得到克服,氧供应增加,乳酸得到逐步清除;同时运动速度暂时下降,使运动时每分需氧量下降,以减少乳酸的产生,机体的内环境得到改善,被破坏了的动力定型得到恢复。“第二次呼吸”标志着进入工作状态阶段结束,开始进入稳定工作状态。

3. 影响“极点”与“第二次呼吸”的因素

“极点”来得迟早、反应强弱及“第二次呼吸”出现的快慢等,不仅与运动项目、运动强度和训练水平有关,还与准备活动、赛前状态及呼吸方式等因素有关。一般来说,中长跑项目“极点”反应较明显;运动强度越大,训练水平越低,“极点”出现得越早,反应也越强烈,“第二次呼吸”出现得也愈迟。良好的赛前状态和充分的准备活动可推迟“极点”的出现和减弱“极点”的反应程度。

减轻“极点”反应的主要措施包括:①继续坚持运动;②适当降低运动强度;③调整呼吸节奏,尤其要注意加大呼吸深度。恰当地克服“极点”反应的措施有助于促进“第二次呼吸”的出现。



二、稳定工作状态

在运动过程中,进入工作状态结束后,人体的机能水平和工作效率在一段时间内处于一种动态平衡或相对稳定状态。此时,人体的生理功能与运动功率输出保持动态平衡,生理机能保持相对平衡。这种机能状态称为稳定工作状态。稳定工作状态可分为真稳定工作状态和假稳定工作状态。

(一) 真稳定工作状态

在进行强度较小、运动时间较长的运动时,进入工作状态结束后,机体所需要的氧可以得到满足,即吸氧量和需氧量保持动态平衡,这种状态称为真稳定工作状态。在真稳定工作状态下,肺通气量、心率、心输出量、血压及其他生理指标保持相对稳定,运动中的能量供应以有氧供能为主,乳酸堆积较少,血液中酸碱平衡不致受到扰乱,运动的持续时间较长,可达几十分钟或几小时。真稳定工作状态保持时间的长短取决于氧运输系统功能,该功能越强,稳定工作状态保持的时间则越长。

(二) 假稳定工作状态

当进行强度大、持续时间较长的运动时,进入工作状态结束后,吸氧量已达到并稳定在最大吸氧量水平,但仍不能满足机体对氧的需要。此时,机体的有氧供能能力不能满足运动的需要,无氧供能系统大量参与供能,机体能够稳定工作的持续时间相对较短,很快进入疲劳状态。故称这种机能状态为假稳定工作状态。在这种状态下,由于机体以无氧供能为主,乳酸的产生率大于清除率,使血乳酸增加,pH值下降,运动不能持久。研究证明,在假稳定工作状态下,与运动有关的生理功能基本达到极限,如心率、血压、肺通气量和呼吸频率等。同时肌肉的电活动亦加强,表明募集了新的运动单位以代偿肌肉的疲劳。

(三) “第一拐点”与“第二拐点”

应用动态数学建模分析法研究表明,人体在运动过程中,心血管和呼吸系统的机能变化表现出两个明显的拐点,即标志进入工作状态(动员阶段)结束、稳定工作状态开始的“第一拐点”和标志稳定工作状态结束、人体整体工作效率明显下降、疲劳开始的“第二拐点”(图12-2)。

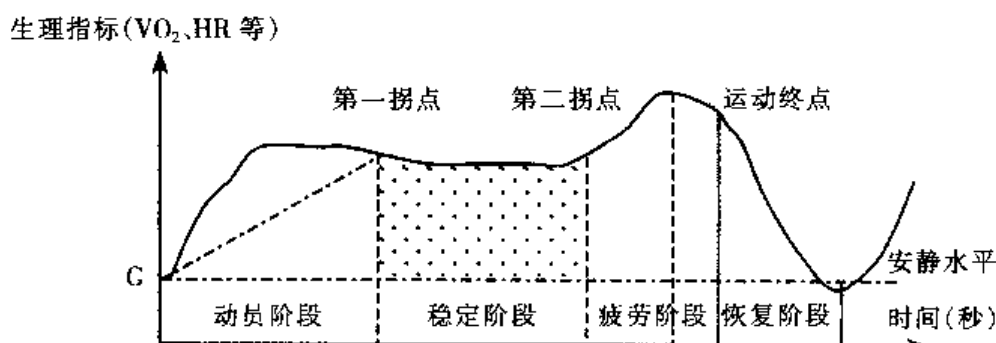


图 12-2 人体运动时心肺功能变化规律曲线

当运动达第一拐点时,人体各项机能均处于一种相对动态平衡的“高原平台”状态。在这种状态下,运动员的生理机能稳定工作时间长,说明运动潜力大,工作能力强,通常以此作为运动训练选材及评定依据。近年研究表明,用该指标的时间值、以及时间与空间相结合的积分值,更能有效地反映运动员的体能水平。

第二拐点出现时,人体内能量代谢及血液化学成分均明显高于第一拐点(表 12-1),即在第二拐点前由有氧供能为主过渡到无氧供能占优势。到达第二拐点时,人体机能以有氧系统供能已经不能满足机体对能量的需求,必须启动能量输出更快的无氧代谢系统供能。第二拐点后,乳酸的堆积明显增加,心肺功能指标也明显高于起始时刻,但并没达到机能的最大限度。

表 12-1 第二拐点时人体某些机能指标变化

指标	运动起始时	第二拐点刻
血乳酸 (mmol/L)	1.668	5.330
cAMP (pmol/L)	34.366	57.292
cGMP (pmol/L)	2.223	4.756
吸氧量 (L/min)	0.4362	3.455
氧脉搏 (ml/beat)	5.97	16.33
通气量 (L/min)	18.3	97.63
CO ₂ 呼出量 (L/min)	0.40	3.54

(依孙学川, 1998)

第二拐点是人体机能工作水平再调整的关键之点。因此,我们把第二拐点定义为:人体整体机能发生疲劳的瞬时起始点。目前有学者应用第二拐点到终点的时程和积分作为评价运动员耐受疲劳能力的敏感指标。同时,利用运动员的第二拐点强度,作为对运动员进行无氧耐力训练的参考强度值。

第三节 运动性疲劳

一、运动性疲劳的概念及其分类

(一) 运动性疲劳的概念

运动性疲劳(exercise-induced fatigue)是指在运动过程中,机体的机能能力或工作效率下降,不能维持在特定水平上的生理过程。运动性疲劳是由运动引起的一种特有生理现象。这一疲劳概念的特点是:①把疲劳时体内组织和器官的机能水平与运动能力结合起来评定疲劳的发生和疲劳程度;②有助于选择客观指标评定疲劳,如心率、血乳酸、



最大吸氧量和输出功率在某一特定水平工作时,单一指标或多指标同时改变都可以来判断疲劳。

在 1982 年的第 5 届国际运动生物化学会议上,将疲劳(fatigue)定义为:机体生理过程不能持续其机能在一特定水平上和/或不能维持预定的运动强度。另外,也有人将疲劳定义为:疲劳是运动本身引起的机体工作能力暂时降低,经过适当时间休息和调整可以恢复的生理现象。

(二) 疲劳的分类

运动性疲劳是由于身体活动或肌肉运动而引起的,主要表现为运动能力下降。根据疲劳发生部位可分为全身性疲劳和局部疲劳;根据疲劳发生的机理与表现,可分为中枢性疲劳、外周性疲劳和混合性疲劳。运动性疲劳常因活动的方式不同而产生不同的症状,如激烈运动后出现的肌肉酸痛、周身乏力、工作能力下降;棋类运动后的头昏脑胀、反应迟钝等。在运动竞赛和训练中,身体疲劳和心理疲劳是密切联系的,故运动性疲劳是身心的疲劳。本章仅介绍身体疲劳。

二、运动性疲劳的产生机理

自从 19 世纪 80 年代莫索开始研究疲劳以来,人们对运动性疲劳产生的机理提出多种假说,最具代表性的有以下几种:

(一) “衰竭学说”

依据长时间运动产生疲劳的同时常伴有血糖浓度降低,而补充糖后工作能力有一定程度的提高现象,认为疲劳产生的原因是能源物质的耗竭。Hirvonen 等 1987 年发现,当骨骼肌疲劳时,肌肉中 ATP 变化不大,但 CP 已下降至原来水平的 60%~70%、乳酸则明显上升(图 12-3)。

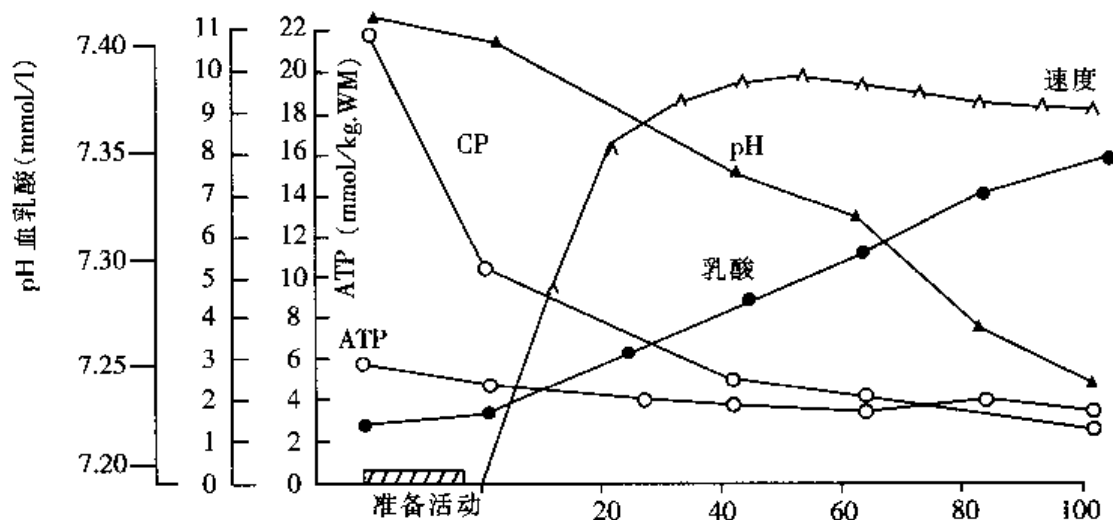


图 12-3 股四头肌受到电刺激时能源物质和力量(疲劳)的关系

(依 Hirvonen 等, 1987)

(二) “堵塞学说”

“堵塞学说”认为,疲劳的产生是由于某些代谢产物在肌组织中堆积造成的。其依据是疲劳时肌肉中乳酸等代谢产物增多,由于乳酸堆积而引起肌组织和血液中 pH 值的下降,阻碍神经肌肉接点处兴奋的传递,影响冲动传向肌肉,抑制果糖磷酸激酶活性,从而抑制糖酵解,使 ATP 合成速率减慢。另外, pH 值下降还使肌浆中 Ca^{2+} 的浓度下降,从而影响肌球蛋白和肌动蛋白的相互作用,使肌肉收缩减弱。

(三) “内环境稳定性失调学说”

该学说认为疲劳是由于机体内 pH 值下降、水盐代谢紊乱和血浆渗透压改变等因素所致。有人研究,当人体失水占体重 5% 时,肌肉工作能力下降约 20%~30%。哈佛大学疲劳研究所发现,高湿作业工人因泌汗过多,达到不能劳动的严重疲劳时,给予饮水仍不能缓解,但饮用含 0.04%~0.14% 的氯化钠水溶液可使疲劳有所缓解。

近来,离子代谢在运动性疲劳中的作用越来越受到人们的重视,目前研究较多的与运动性疲劳有关的离子有钙、钾、镁、硒等。

(四) “保护性抑制学说”

依照巴甫洛夫学派的观点,运动性疲劳是由于大脑皮质产生了保护性抑制。运动时大量冲动传至大脑皮质相应的神经元,使其长时间兴奋导致耗能增多,为避免进一步消耗,便产生了抑制过程,这对大脑皮质有保护性作用。贝柯夫(1927)的研究发现,狗拉载重小车行走 30~60 分钟产生疲劳时,一些条件反射量显著减少,不巩固的条件反射完全消失。1971 年雅科甫列夫发现,小鼠在进行长时间工作(10 小时游泳)引起严重疲劳时,大脑皮质中 γ -氨基丁酸水平明显增加,该物质是中枢抑制递质。

此外,血糖下降、缺氧、pH 值下降、盐丢失和渗透压升高等,也会促使皮质神经元工作能力下降,从而促进疲劳(保护性抑制)的发生和发展。

(五) “突变理论”

爱德华兹(Edwards, 1982)从肌肉疲劳时能量消耗、肌力下降和兴奋性改变三维空间关系,提出了肌肉疲劳的突变理论,认为疲劳是由于运动过程中三维空间关系改变所致。此学说改变了以往用单一指标研究运动性疲劳的缺陷,并提出肌肉疲劳的控制链(图 12-4)。

突变理论学派代表人 Edwards 认为在肌肉疲劳的发展过程中,存在着不同途径的逐渐衰减突变过程(图 12-5),其主要途径包括:

1. 单纯的能量消耗,此途径只有能量极度消耗,而不存在肌肉兴奋性下降,继续下去便肌肉僵直,但在运动性疲劳中一般不会发展到这种程度。

2. 在能量消耗和兴奋性衰减过程,存在一个急剧下降的突变峰。由于兴奋性突然急剧下降,减少了能量储备的进一步消耗,同时伴随着肌肉力量和输出功率的突然下降,表现为肌肉疲劳,这也是疲劳突变理论的主要内容。



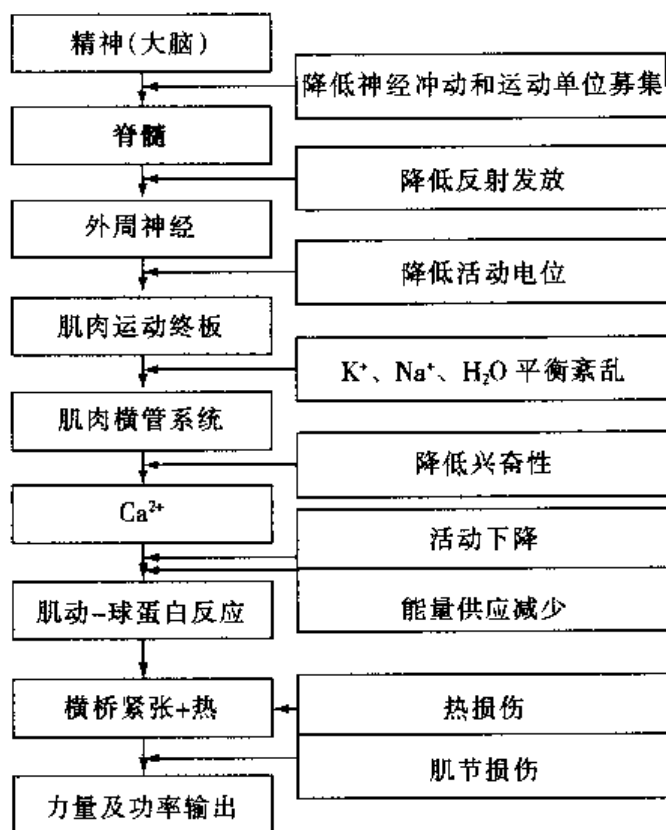


图 12-4 肌肉疲劳控制链

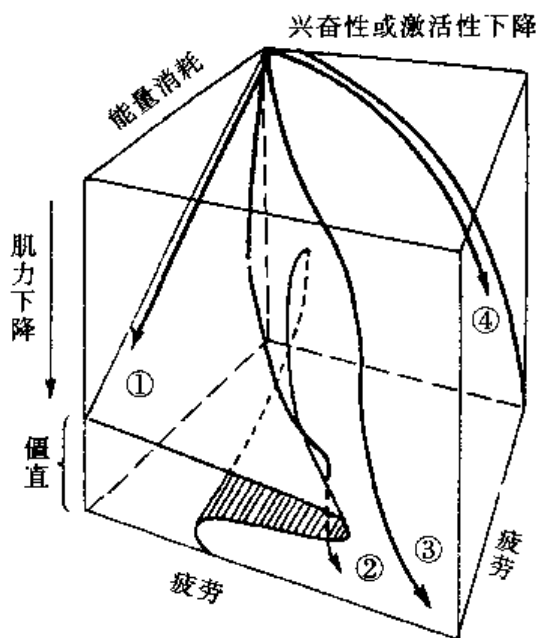


图 12-5 疲劳衰减突变过程

3.肌肉能源物质逐渐消耗，兴奋性下降，但这种变化是渐进的，并未发生突变。

4.单纯的兴奋性丧失，并不包括肌肉能量的大量消耗。

(六) “自由基损伤学说”

自由基是指外层电子轨道含有未配对电子的基团,如氧自由基(O_2)、羟自由基(OH)、过氧化氢(H_2O_2)及单线态氧(1O_2)等物质。在细胞内,线粒体、内质网、细胞核、质膜和胞液中都可以产生自由基。由于自由基化学性活泼,可与机体内糖类、蛋白质、核酸及脂类等物质发生反应,因而造成细胞功能和结构的损伤与破坏。

激烈运动时,由于肌纤维膜破裂和内质网膜变性,使血浆脂质过氧化(LPO)水平增高。LPO不仅对调节 Ca^{2+} -ATP酶产生影响,造成胞浆中 Ca^{2+} 的堆积,影响肌纤维的兴奋—收缩耦联;还对线粒体呼吸链ATP的释放、氧化酶的活性造成影响,从而导致肌肉工作能力下降产生疲劳。

虽然有关自由基与运动性疲劳产生机理的研究工作时间不长,但已经肯定了氧自由基的毒性作用在疲劳发生机理中的重要地位。

此外,内分泌功能异常和免疫功能下降也与运动性疲劳有关。疲劳产生的原因是一个非常复杂的过程,仍有待于深入广泛地研究。

三、运动性疲劳的发生部位及特征

(一) 运动性疲劳的发生部位

1. 中枢性疲劳

中枢性疲劳系指发生脑至脊髓部位的疲劳。其特点是:①由于中枢神经系统发生功能紊乱,改变了运动神经元的兴奋性。疲劳时,神经冲动的频率减慢,使肌肉工作能力下降。②中枢内代谢功能失调,表现为大胞细胞中ATP、CP水平明显降低,血糖含量减少, γ -氨基丁酸含量升高,特别是5-羟色胺和脑氨升高,可引起多种酶活性下降,ATP再合成速率下降,从而使肌肉工作能力下降,导致疲劳。

2. 外周性疲劳

外周疲劳可能发生的部位是从神经—肌肉接点到肌纤维内部线粒体。这些部位中发生的某些变化与运动性疲劳有着密切的联系。

(1) 神经肌肉接点

肌肉兴奋依赖于终板去极化,乙酰胆碱(Ach)是运动神经末梢把兴奋传向肌肉的神经递质。剧烈运动后,乙酰胆碱释放量减少,可造成神经肌肉的传递障碍,不能引起接点后膜去极化,骨骼肌也不能产生兴奋收缩。研究表明,短时间大强度运动时,如投掷和举重运动员在进行超大强度运动时,导致运动神经末梢乙酰胆碱释放减少,骨骼肌的收缩能力下降。这种状态被称为突触前衰竭。

(2) 肌细胞膜

细胞膜结构的完整性对细胞正常代谢和功能维持十分重要。运动时骨骼的机械性牵拉和化学性因素会使肌肉膜损伤或通透性改变引起肌肉收缩能力下降。研究表明,长时

间运动过程中血浆游离脂肪酸和儿茶酚胺的浓度升高、胰岛浓度下降、肌细胞失钾和自由基的产生等都可以使细胞膜上 Na^+/K^+ -ATP 酶活性下降, 从而引起肌细胞膜的通透性改变, 使膜的完整性丧失, 细胞的正常功能降低或丧失。

(3) 肌质网

肌质网终池具有贮存及调节 Ca^{2+} 浓度的作用。长时间运动引起 ATP 含量减少, H^+ 和自由基生成增多, 从而引起肌质网 Ca^{2+} 释放与摄入障碍, 进而影响肌肉的兴奋—收缩耦联, 导致运动性疲劳。

(4) 线粒体

线粒体是肌细胞氧化磷酸化的重要场所。长时间运动可引起线粒体膜电位下降、ATP 酶衰竭、自由基大量释放和 Ca^{2+} 聚集变化。这些变化可抑制氧化磷酸化过程, 使氧化磷酸化过程脱耦联, 导致肌肉收缩时的能量供应障碍, 最终表现为肌肉的收缩能力下降。

(5) 收缩蛋白

肌肉收缩蛋白是肌肉收缩的基础, 肌肉收缩蛋白的结构与功能异常必然导致肌肉收缩机能下降。研究发现, 运动可引起肌节拉长、H 区消失、Z 线扭曲加宽、A 带 I 带异常及肌丝卷曲、排列混乱等现象, 同时伴有肌钙蛋白与 Ca^{2+} 结合力及与原肌凝蛋白的相互作用下降。这些变化必然导致肌肉收缩能力下降, 造成骨骼肌疲劳, 并伴有延迟性肌肉酸痛症状。

(二) 不同类型运动疲劳的特征

运动性疲劳是一个极复杂的生理过程, 由于运动的负荷和性质不同, 对人体机能产生的影响也不同, 疲劳产生的特征也不相同(表 12-2)。不同运动项目的疲劳存在一定的规律性, 短时间最大强度运动疲劳是因肌细胞代谢变化导致 ATP 转换速率下降; 较大强度, 较短时间运动所造成的疲劳往往是由于乳酸堆积所致; 长时间中等强度运动的疲劳往往与肌糖原大量消耗、血糖浓度下降、体温升高脱水和无机盐丢失有关。

表 12-2 不同代谢类型运动项目的疲劳特点

疲劳因素	磷酸原型	磷酸原—糖酵解型	糖酵解型	糖酵解—有氧代谢型	有氧代谢型
ATP 下降%	30~40		20~30	30	不变
CP 下降%	90 以上	90	75~90	65	50
乳酸积累	少	中	最多	较多	少
肌 pH 值下降	少	较少	6.6	6.6	少
肌糖原消耗	—	—	少	中	75%~90%以上
肌肉离子变化	—	Ca^{2+} 下降	Ca^{2+} 下降	K^+ 下降 Na^+ 上升	离子紊乱

在非周期性运动项目中, 技术动作的不断变化和动作技能的复杂程度是影响运动性疲劳的重要因素。一般认为, 习惯性的、自动化程度高的和节奏性强的动作不易疲劳,

而要求精力高度集中以及运动中动作多变的练习,则较易产生疲劳。静力性运动疲劳的产生就其细胞代谢来讲和短时间大强度运动项目的运动性疲劳相似,但由于中枢神经系统相应部位持续兴奋,肌肉中血流量减少以及憋气引起的心血管系统功能下降更为明显。

四、运动性疲劳的判断

科学判断运动性疲劳的出现及其程度,对合理安排体育教学和训练有很大实际意义。由于引起疲劳产生的原因和部位不同,疲劳表现的形式不相同,选用的测试方法也应有区别。这里仅介绍几种判断疲劳程度的生理学测定方法。

(一) 测定肌力评价疲劳

1. 背肌力与握力

早晚各测一次,求出其数值差。如次日晨已恢复,可判断为正常。

2. 呼吸肌耐力

连续测 5 次肺活量,每次间歇 30 秒,疲劳时肺活量逐次下降。

(二) 测定神经系统机能判断疲劳

1. 膝跳反射阈值

疲劳时阈值升高。

2. 反应时

疲劳时反应时延长。

3. 血压体位反射

受试者坐位静息 5 分钟后,测安静时血压,随即仰卧 3 分钟,然后将受试者扶成坐姿(推受试者背部,使其被动坐起),立即测血压,每 30 秒测一次,共测 2 分钟,若 2 分钟以内完全恢复,说明没有疲劳,恢复一半以上为轻度疲劳,完全不能恢复为重度疲劳。

(三) 测试感觉机能评价疲劳

1. 皮肤空间阈

运动后皮肤空间阈(两点阈)较安静时增加 1.5~2 倍为轻度疲劳,增加 2 倍以上为重度疲劳。

2. 闪光融合频率

受试者坐位,注视频率仪的光源,直到将光调至明显断续闪光融合频率为止,即临



界闪光融合频率,测三次取平均值。疲劳时闪光融合频率减少。如轻度疲劳时约减少1.0~3.9Hz;中度疲劳时约减少4.0~7.9Hz;重度疲劳时减少8Hz以上。

(四) 用生物电评价疲劳

1.心电图

疲劳时S-T段下移,T波倒置。

2.肌电图

疲劳时肌电振幅增大,频率降低,电机械延迟(EMD)延长。积分肌电图(IEMG)和均方根振幅(RMS)均增加,中心频率(FC)和平均功率频率(MPF)降低(详见第一章第二节)。EMD是指从肌肉兴奋产生动作电位开始到肌肉开始收缩的这段时间,该指标延长表明神经肌肉功能下降。

3.脑电图

脑电图可作为判断疲劳的一项参考指标。疲劳时由于神经元抑制过程发展,可表现为慢波成分的增加。

(五) 主观感觉判断疲劳

瑞典生理学家冈奈尔·鲍格(Borg, 1973)研制了主观体力感觉等级表(RPE,表12-3),使原本粗略的定性分析变为半定量分析。具体测试方法是:锻炼者在运动过程中根据RPE表指出自我感觉的等级,以此来判断疲劳程度。如果用RPE的等级数值乘以10,相应的得数就是完成这种负荷的心率。

(六) 测定运动中心率评定疲劳

心率(HR)是评定运动性疲劳最简易的指标,一般常用基础心率、运动后即刻心率和恢复期心率对疲劳进行诊断。

1.基础心率

基础心率正常情况下都相对稳定,如果大运动负荷训练后,经过一夜的休息,基础心率较平时增加5~10次/分以上,则认为有疲劳累积现象,如果连续几天持续增加,则应调整运动负荷。

表 12-3 主观体力感觉等级表

RPE	主观运动感觉
6	安静
7	非常轻松
8	
9	很轻松
10	
11	轻松
12	
13	稍费力
14	
15	费力
16	
17	很费力
18	
19	非常费力
20	

2. 运动中心率

按照训练—适应理论, 随着训练水平的提高, 若一段时期内从事同样强度的定量负荷, 运动中心率增加, 则表示身体机能状态不佳。

3. 运动后心率恢复

人体进行定量负荷后心率恢复时间长, 表明身体欠佳。如进行 30 秒 20 次深蹲的定量负荷运动, 一般心率可在运动后 3 分钟内完全恢复, 而身体疲劳时, 恢复时间明显延长。

第四节 恢复过程

恢复过程 (recovery) 是指人体在运动过程中和运动结束后, 各种生理机能和能源物质逐渐恢复到运动前水平的变化过程。

一、恢复过程的一般规律

恢复过程可分为三个阶段, 即运动中恢复阶段、运动后恢复到运动前水平阶段和运动后超量恢复阶段(图 12-6)。

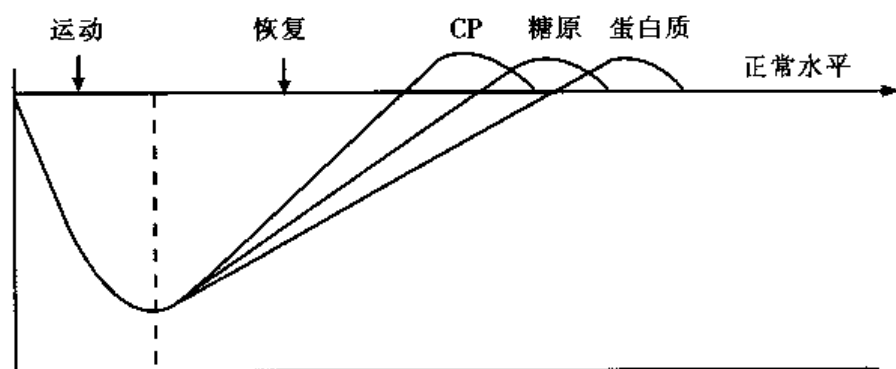


图 12-6 消耗与恢复过程

第一阶段：运动时能源物质的消耗占优势，恢复过程虽也在进行，但是消耗大于恢复，所以总的表现是能源物质逐渐减少，各器官系统的工作能力下降。

第二阶段：运动停止后消耗过程减少，恢复过程占优势，能源物质和各器官系统的功能逐渐恢复到原来水平。

第三阶段：运动时消耗的能源物质及各器官系统机能状态在这段时间内不仅恢复到原来水平，甚至超过原来水平，这种现象称为“超量恢复”(over-recovery)。超量恢复保持一段时间后又回到原来水平。

超量恢复的程度和出现的时间与所从事的运动负荷有密切的关系，在一定范围内，

肌肉活动量越大,消耗过程越剧烈,超量恢复越明显。如果活动量过大,超过了生理范围,恢复过程就会延长(表 12-4)。

表 12-4 动物进行不同活动量肌糖原的消耗和恢复

组别	活动量		肌糖原(mg%)		
	肌肉收缩(次/分钟)	持续活动时间(分钟)	活动停止后即刻	活动后4小时	活动后24小时
1	30	30	-140	-31	+16
2	60	15	-381	-194	+18
3	104	9	-519	-	+45
4	208	4.5	-785	-517	-49

超量恢复是客观存在的规律。有人让两名实验对象分别站在一辆自行车的两侧同时蹬车,其中一人用右腿蹬车左腿休息,另一人用左腿蹬车右腿休息,当运动至力竭时,测腿股外肌的肌糖原含量,结果运动后3天运动腿股外肌肌糖原含量比安静腿多1倍(图 12-7)。

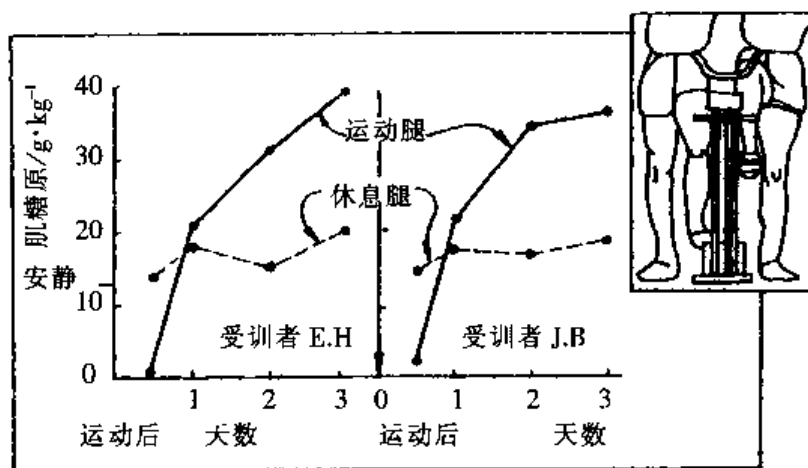


图 12-7 肌糖原的充填(超量恢复)

实践证明,运动员在超量恢复阶段参加训练或比赛,能提高训练效果和比赛成绩。如何将超量恢复规律应用于运动训练中,仍是当前亟待解决的课题。

二、机体能源贮备的恢复

在运动训练和比赛中,由于运动强度、时间及运动量大小不同,能源物质超量恢复的速度也不同。

(一) 磷酸原的恢复

磷酸原的恢复很快，在剧烈运动后被消耗的磷酸原在 20~30 秒内合成一半，2~3 分钟可完全恢复。

(二) 肌糖原贮备的恢复

肌糖原是有氧氧化系统和乳酸能系统的供能物质。不同运动强度和持续时间，对肌糖原的恢复时间也不同。长时间运动致使肌糖原耗尽后，用高糖膳食 46 小时即可完全恢复；而用高脂肪与蛋白质膳食 5 天，肌糖原恢复仍很少(图 12-8)。

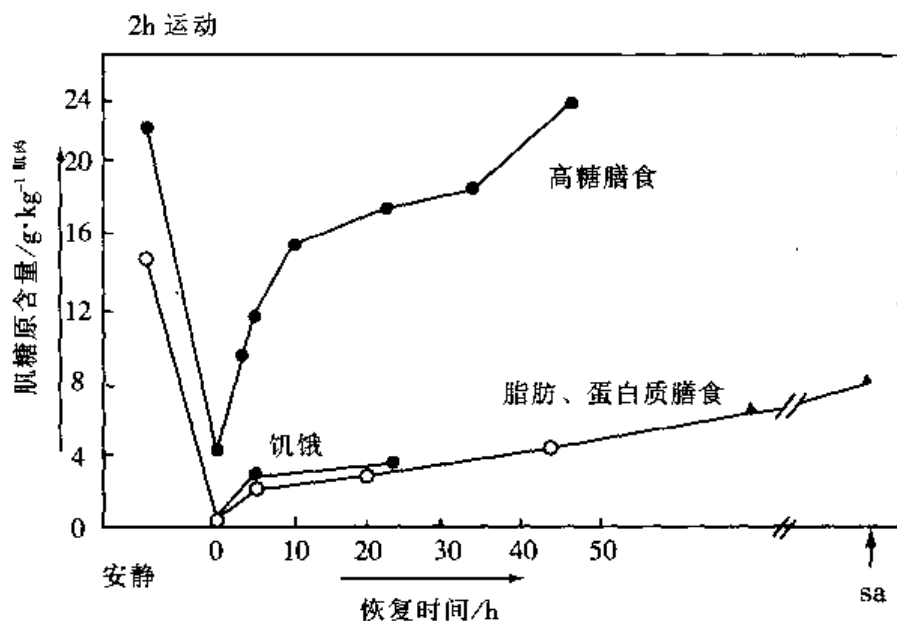


图 12-8 长时间运动后膳食对肌糖原完全恢复速率的影响

在短时间、高强度的间歇训练后，无论食用普通膳食还是高糖膳食，肌糖原完全恢复都需要 24 小时。

(三) 氧合肌红蛋白的恢复

氧合肌红蛋白存在于肌肉中，每千克肌肉约含 11ml 氧。在肌肉工作中氧合肌红蛋白能迅速解离释放氧并被利用，而运动后几秒钟可完全恢复。

(四) 乳酸再利用

乳酸是糖酵解的产物，其中蕴藏着大量的能量可以被利用。以往的研究认为，乳酸绝大部分用于肝糖原合成被再利用。近几年的研究认为，乳酸大部分是在工作肌中被继续氧化分解。布鲁克斯(Brooks, 1986)对肌乳酸生成后的转运过程概括为“乳酸穿梭”，包括两种形式：①工作肌中乳酸穿梭：指运动过程中肌肉生成的乳酸，在不同类型的肌纤维中进行重新分配和代谢的过程。即肌肉收缩时，Ⅱb 型纤维中生成的乳酸不断地



“穿梭”进入Ⅱa型或Ⅰ型中被氧化利用过程。②血管的乳酸穿梭：指运动时肌肉生成的乳酸不是在工作肌中进行代谢，而是穿出肌膜后弥散入毛细血管，通过血液循环将乳酸运输到体内其他器官进一步代谢的过程。乳酸经血液循环，主要到达心肌、肝和肾脏作为糖异生作用的底物。

根据上述能量贮备的恢复规律及乳酸利用过程，在进行力竭性运动后所需的恢复时间可参考表 12-5。

表 12-5 力竭性运动后的恢复所需的时间

恢复过程		恢复时间	
		最短	最长
肌中磷酸原恢复		2 分钟	3 分钟
非乳酸性氧债偿还		3 分钟	5 分钟
氧合血红蛋白恢复		1 分钟	2 分钟
肌糖原的恢复	长时间运动后	10 小时	46 小时
	间歇运动后	5 小时	24 小时
乳酸消除	运动性恢复	30 分钟	1 小时
	休息性恢复	1 小时	2 小时
乳酸性氧债的偿还		30 分钟	1 小时

三、促进恢复的措施

(一) 运动性手段

1. 积极性休息

运动结束后采用变换运动部位和运动类型，以及调整运动强度的方式来消除疲劳的方法称积极性休息。积极性休息生理学机理可用相互诱导理论来解释。谢切诺夫 1903 年实验发现，右手测力描记工作至疲劳后，以左手继续工作来代替安静休息，能使右手恢复更快更完全。他认为，休息时来自于左手肌肉收缩的传入冲动，能加深支配右手的神经中枢的抑制过程，并使右手的血流量增加。脑力劳动较多的人，换以肌肉运动作为活动性休息，对疲劳消除更显著。在训练课中，教练员经常采用调整训练内容、转换练习环境和变换肢体活动部位等方式，其目的在于采用积极性休息的方式，达到提高训练效果的目的。

2.整理活动

整理活动是指在运动之后所做的一些加速机体功能恢复的较轻松的身体练习。整理活动又称“放松练习”，做好充分的整理活动是取得良好的训练效果及预防运动损伤的重要手段之一。剧烈运动时骨骼肌强力持续收缩，使代谢产物堆积、肌肉硬度增加并产生酸痛。运动结束后很难使肌肉自然恢复到运动前的松弛状态。另外，由于运动时血液重新分配，内脏血液大量转移到运动器官，以保证运动时能量代谢的需要，运动后若不做放松练习而突然停止不动，由于地心引力和静止的身体姿势，严重地影响静脉回流，使心输出量骤然减少，血压急剧下降，造成一时性脑贫血，产生一系列不舒适的感觉，甚至休克，即所谓重力性休克。

研究表明，剧烈运动后，进行3~5分钟的慢跑或其他动力性整理活动，使心血管、呼吸等运动后进行动力性整理活动可加速全身血液再次重新分配，促进肌乳酸的消除与利用，减少肌肉的延迟性酸痛，有助于疲劳的消除，预防重力性休克的发生。

另外，做一些静力性牵张练习，使参与工作的肌肉得到牵张、伸展和放松，可有效地消除运动引起的肌肉痉挛，加速肌肉机能的恢复，预防延迟性肌肉酸疼。

由此可见，运动后做整理活动非常必要。

(二) 睡眠

睡眠对身体机能恢复非常重要，在睡眠状态下，人体内代谢以同化作用为主，异化作用减弱，从而使人的精力和体力均得到恢复。静卧可减少身体的能量消耗，也可加速身体机能的恢复。

(三) 物理学手段

大强度和大运动量训练之后，采用按摩、理疗、吸氧、针灸和气功等物理手段，能促进身体机能恢复。

(四) 营养学手段

运动时所消耗的物质要靠饮食中的营养物质来补充，合理膳食有助于加速恢复过程。

1.能源物质的补充

如果把运动中需要补充的热量按照蛋白质、脂肪和糖三者的比例划分为按需要均衡进补的方式，大多数项目运动员的膳食中，三种能量的补充比例为1.2:0.8:4.5；耐力性运动项目因其训练负荷的特点，要求膳食中糖的含量较高，故三种能量的搭配比例为1.2:1:7.5；而运动负荷量比较小的项目，则比普通人的能量补充稍高一些，三种能量搭配比例为1:0.6:3.5。



2. 维生素与矿物质的补充

(1) 维生素

维生素 E、C、B₁、B₂ 与糖代谢有密切关系, 当维生素缺乏或不足时可对运动能力产生不利影响, 表现为做功量降低、疲劳加重和肌肉无力等。补充维生素可以提高运动能力。维生素 A、胡萝卜素等能提高人体免疫功能。

(2) 矿物质

运动员训练期间, 由于大量排汗使身体对钾、钠、钙、镁、磷、铁的需要量增加, 因而必须从食物中补充。最近研究报道, 硒、锌营养能更有效地促进恢复过程。

(3) 中药补剂

合理地应用中医药可以增强机体免疫能力, 减小大强度运动时氧自由基对机体的损害, 从而使疲劳尽快消除, 提高训练或比赛效果。常用的中药有人参、当归、生地、酸枣仁、阿魏酸和五味子等。

【小结】

1. 从运动开始到结束, 人体经历了赛前状态、准备活动、进入工作状态、稳定工作状态、疲劳和恢复六阶段的变化。良好的赛前状态可缩短进入工作状态的时间, 而不良的赛前反应可以通过准备活动得到适当调整。正式参加比赛或训练时, 人体的工作能力是逐步提高的。在这一过程中相继产生了“极点”和“第二次呼吸”。“第二次呼吸”的出现标志着进入稳定工作状态。稳定工作状态是指人体的机能活动在一段时间内保持一个较高而变动范围不大的水平。稳定工作状态可分为真稳定工作状态和假稳定工作状态。

2. 运动性疲劳是指机体的生理过程不能保持功能在一特定水平或不能维持预定的运动强度。不同项目运动员产生的疲劳不同, 运动性疲劳按产生的部位可分为中枢疲劳与外周疲劳。中枢疲劳可能是由于神经细胞机能失调引起的; 外周疲劳主要是由于神经肌肉接点、肌细胞膜、基质网、线粒体及收缩蛋白功能障碍造成的。

3. 恢复过程分为三个阶段: 运动中恢复阶段、运动后恢复阶段和超量恢复阶段。超量恢复是指运动时消耗的物质在运动后不仅恢复到原来水平, 而且在一段时间内出现超过原来水平的现象。人体机能状态的恢复快慢与运动时强度、运动量、运动后膳食及运动员训练水平等因素有关。采用适当的运动方式、足够的睡眠、适当的物理学手段以及合理膳食营养可促进恢复过程。

【思考题】

1. 如何依据赛前状态的生理变化调整和提高机体的工作能力?
2. 进入工作状态产生的原因是什么?
3. 试述运动性疲劳产生机理的学说。
4. 试述恢复过程的阶段特点及超量恢复的实践意义。
5. 试比较不同类型运动的疲劳特点和实践意义。



【主要参考文献】

- 1.曲绵域等主编:《实用运动医学》,北京,北京科技出版社,1996。
- 2.赵家琪等编著:《实用运动生理问答》,北京,人民体育出版社,1990。
- 3.邓树勋等主编:《运动生理学》,北京,高等教育出版社,1999。
- 4.许豪文编著:《运动生物化学进展》,上海,华东师大出版社,1990。
- 5.吴纪饶等主编:《运动生理学教程》,北京,人民体育出版社,1997。
- 6.乔奇 A.布茹克司著,杨锡让等译校:《运动生理学》,北京,体育大学出版社,1988。
- 7.孙学川:《人体心肺机能第二拐点与某些生理生化指标的关系》,成都,《成都体育学院学报》,1997。
- 8.孙学川:《建立耐力性运动员心肺功能某些指标动态数学模型的方法学研究》,北京:《中国体育科学》(特刊),1998。

(沈阳体育学院 李秋萍)



第十三章

运动训练原则的生理学分析

【提要】运动训练安排必须符合人体生理机能的变化规律。本章介绍了机体对训练刺激的基本反应和生理学特征,同时从生理学角度对运动训练实践中主要的训练原则,即超负荷原则、恢复原则、周期性原则和个体化原则的生理学基础及其应用进行了分析和讨论。

科学的运动训练,不仅需要掌握训练理论,更要掌握寓于训练理论背后的生理学基础。合理地安排运动训练的各个要素(负荷强度、持续时间、运动量和恢复方式等),可使机体产生最佳的反应与适应,带来最大的运动训练效果。这样,不仅有助于更准确地把握训练过程中的各种因素及其相互作用,更合理地组织训练过程,而且有助于选取最适宜的训练方法与手段,从而获得最理想的训练效果。

第一节 概述

运动员是否能成为优秀的运动员,除受其先天因素影响外,还与能否接受科学的训练,使其得到最大的发展直接有关。身体机能对训练刺激的反应及适应有一定的规律可循,并非刺激强度越大,训练效果越好。只有将运动负荷与恢复进行最佳组合,完全按照身体机能变化的内在规律安排运动训练,才有可能获得成功。鉴于此,要取得训练成功,就必须了解运动训练的生理学本质,了解身体机能对训练刺激所发生的反应、适应规律以及恢复规律。惟有如此,才能更有效地安排运动训练,并获得事半功倍的训练效果。

一、运动训练的生理学本质

1. 运动负荷的本质

生物体最基本的生理特征之一,是可对任何内外刺激发生应答性反应,也称做应激性。刺激强度越大,所引起的机体反应也相应越大。

运动负荷的本质也是一种外部刺激,而且是一种非常强烈的刺激,并会导致机体发生非常剧烈的应答性变化。可以说,在运动负荷的强烈刺激作用下,机体几乎每一个系统与器官的机能状态都会受到程度不等的影响。所不同的是,这种刺激是人们有意识、有目的并按计划所实施的,希望机体能够产生所预期的变化。所以,运动负荷的本质就



是：刺激—反应。

2. 运动训练的影响

运动训练对机体的影响实际就是结构与机能的破坏—重建过程。人们按照训练计划对机体有系统地实施运动负荷刺激，其目的并非仅仅希望引起身体发生剧烈的应答性变化，而是希望通过身体机能的变化，多多少少能够获得一定程度的身体机能和结构改变。实际上，运动员经过训练课达至疲劳程度后，身体结构与机能均会发生许多明显的变化。机能变化方面，随着肝糖原和肌糖原几近耗竭以及相关酶的消耗及酶活性的下降，身体工作能力明显下降；机构变化方面，肌纤维的微细结构会发生程度不等的损伤，受力骨骼的微细结构也会发生某些变化。结构与机能的这些变化在运动后的恢复期可得到恢复。

3. 运动能力的提高

有机体不仅具有应激性并能够对刺激发生反应，更为重要的是，它还具有适应性。适应性表现在若长期施加某种刺激，机体会通过自身形态、结构与机能的变化，以适应这种刺激。人体对训练刺激的适应也不例外。在训练后的恢复期，所损伤的肌纤维不仅得以修复，而且修复后的肌纤维有所增粗，可以产生更大的收缩力量；骨密质有所增厚，骨小梁的排列方向有所改变，可以承受更大的力量；运动中所消耗的糖原以及酶等物质不仅得以恢复，而且会发生超量补偿。恢复期中结构的改善称做“结构重建”(structure reconstruction)。结构重建后身体机能所得到的相应提高，称做“机能重建”(function reconstruction)。这样，长期的运动训练过程实质上是一个不断重复进行的刺激—反应—适应过程，是一个身体结构与机能不断破坏与重建的循环过程。通过这个循环过程，运动能力不断增强。

需要注意的是，机体对不适宜的运动负荷刺激也能发生适应性变化，但适应的结果往往并非我们所预期的。比如长期安排过大负荷而恢复不足，机体所产生适应性变化的结果并非我们所预期的运动能力提高，而是发生过度训练(over-training)或过度疲劳(over-fatigue)现象，运动能力反而降低。这是一种不良适应。

综上所述，运动训练的本质，实质上就是人为地、有目的地和按计划地给机体施加系统化的适宜运动负荷刺激，使之产生人们所预期的适应性变化。

二、机体对运动负荷的反应特征

运动负荷刺激施加于人体时，身体的机能状态和工作水平将出现一系列特征性反应。这些反应特征主要表现为耐受、疲劳、恢复、超量补偿和消退等(图 13-1)。



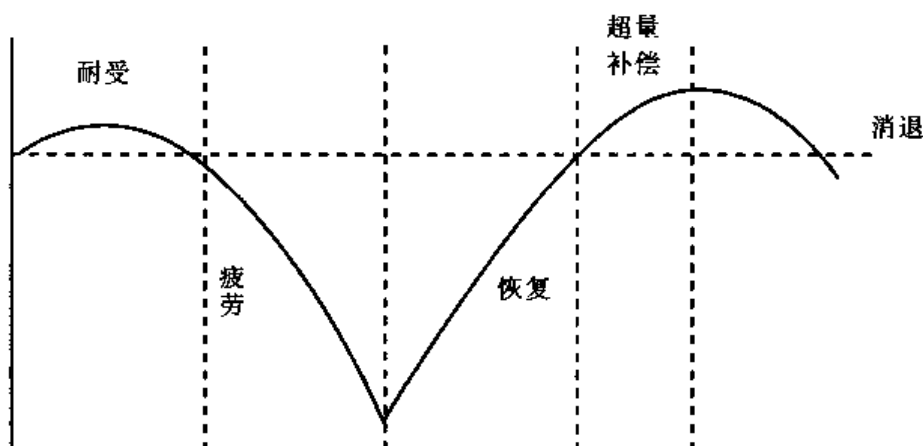


图 13-1 一次训练课引起的身体机能的基本变化过程

(一) 耐受性

人体在进行运动或锻炼时，身体机能总是表现出对运动负荷的一定承受能力。这种承受能力称为对运动负荷刺激的耐受性。不同的个体对运动负荷表现出不同的耐受性，具有明显的个体差异。

在运动开始阶段，机体的耐受水平总会或长或短(随负荷强度与机体机能状态不同)保持一段时间，此阶段称做“耐受阶段”，训练课的主要任务安排在这个阶段。在这段时间内，机体会表现出比较稳定的工作能力，能高质量地完成各项训练任务。

机体对运动负荷的耐受程度受下列因素影响：①身体机能在训练后的恢复情况。恢复越充分，耐受阶段相应越长，反之亦然。②训练课的强度与密度。运动强度越大，密度越大，耐受时间相应越短，反之亦然。③训练过程中的恢复程度。训练课次间与组间间歇时间越长，会使得机体机能在间歇期产生一定程度的恢复，有利于相应延长耐受时间。

(二) 疲劳

机体在承受一定时间的运动负荷刺激之后，机能能力和工作效率会逐渐降低，即出现疲劳现象。将运动员训练到何种疲劳程度以及耐受多长时间以后疲劳，这完全取决于训练目的。换言之，训练过程中出现疲劳以及疲劳的程度，是训练负荷安排想要达到的训练目的。因为惟有机体达到一定程度的疲劳，在恢复期才能发生结构与机能的重建，运动能力才能不断提高。“没有疲劳就没有训练”即指此意。

疲劳阶段主要受下列因素影响：①身体机能的恢复情况；②训练课的强度与密度；③训练课的负荷总量以及负荷类型等。负荷总量一般与疲劳程度呈正比例。复杂活动负荷较之简单活动负荷疲劳程度一般相对较深。

(三) 恢复

在恢复阶段，机体开始补充所消耗的能源物质、修复所受到的损伤并恢复紊乱的内环境。恢复所需要的时间主要取决于疲劳程度。疲劳程度越深，恢复所需要的时间相对越长，

反之亦然。

(四) 超量补偿

训练课后若安排有足够的恢复时间,在身体结构和机能重建完成后,运动中所消耗的能量等物质以及所降低的身体机能不仅能得以恢复,而且会超过原有水平,这种现象称做“超量补偿”(overcompensation phase)或“超量恢复”(over-recovery),一般将由于超量补偿所导致的机能改善称为“训练效果”(training effect)。产生尽可能明显的训练效果正是进行运动训练的目标。超量补偿是评价运动训练效果的重要标准之一。在超量恢复阶段,若让机体再承受与以往相同的运动负荷刺激时,机体的反应会减弱。换言之,机体能够承受更大的运动负荷刺激,这标志着运动能力得到了改善。

超量补偿的程度决定于以下因素:①疲劳程度。训练课中的疲劳程度越深,运动后超量恢复现象越明显,但在恢复期出现的时间相对越晚;反之亦然。②训练课的密度。在大强度训练课后,虽然可出现比较明显的超量恢复现象,但需要的恢复时间相对较长。若训练课与上节训练课过于接近,在机能尚未恢复时便开始训练,会影响超量恢复的出现。

(五) 消退

训练课所产生的超量恢复现象并不会永久保持。若不及时在已产生的超量恢复的基础上继续施加新的刺激,则已经产生的训练效果经过短暂时间后又会逐渐消失,我们将这种现象和过程称为机体对运动负荷刺激适应的消退。因此,合理安排训练课,不仅应重视训练负荷的合理性,而且必须重视训练课后的恢复,并在出现超量恢复后及时安排下一次训练课。运动效果的保持时间和消退速率主要取决于超量恢复的程度,即所出现的超量恢复现象越明显,保持的时间相对越长。

三、运动负荷与训练效果的关系

假定对机体施加一个不变的运动负荷刺激,开始时机体的反应会比较强烈,疲劳程度也比较深。在恢复期,机体进行结构与机能重建后,发生超量恢复现象,会使得机体对抗刺激的能力得到增强。这样,若第二次使用同样刺激,机体反应就不如第一次强烈,疲劳程度会有所变轻,超量恢复现象不如前次明显,运动效果也会下降。以此类推,若连续反复运用同样刺激,其运动效果势必会越来越小,直到消失。至此,机体的运动能力不再随着继续施加这一负荷而继续提高,而只能得以保持。在此情况下,要想继续提高运动效果,只有在原有刺激的基础上再增加负荷强度,即所谓的超负荷(overload)。

适时适量地应用超负荷是保证身体运动机能不断增长的最重要的训练因素。但即或以最佳方式安排超负荷,运动成绩也不会无限增长。这是因为,受遗传因素制约,每个人的运动能力都有一个可达到的最高高度,即运动潜能。在成绩发展过程中,即使合理应用超负荷,随个体的运动能力越来越接近其运动潜能,运动效果也会越来越小。这就是为什么在开始接受运动训练时运动成绩提高较快,而到达高水平后会逐渐减慢,甚至



停滞不前。因此,高水平运动员尽管训练负荷很大,但成绩提高很慢,甚至仅仅能够保持。

运动负荷安排不当将对训练效果产生不良影响,主要表现在两个方面。

第一,连续应用大强度训练刺激面恢复不足。这种情况在实际训练中屡见不鲜。尽管教练员用心良苦,运动员刻苦训练,但运动效果不佳。这时运动员身体机能的反应特点是:①对运动负荷刺激的耐受性越来越低,训练课中的耐受期几乎消失,往往在训练课开始阶段就直接进入疲劳过程;②疲劳程度越来越深,训练课中不但进入疲劳状态快,而且疲劳程度亦越来越深,形成疲劳堆积;③不出现超量恢复,由于每次训练课都是在未安全恢复的基础上进行,因此,恢复会越来越不完全,直至造成过度疲劳。

第二,运动负荷过小或训练频度过低。运动负荷过小,运动员机能反应很小,难于造成预期的疲劳程度,也难于导致机体发生结构与机能重建现象,因而不能出现超量补偿,或超量补偿的程度很低,即没有取得明显的运动效果。可见,运动负荷刺激过大虽不可取,但没有刺激就没有反应,也就没有运动能力的提高。

若训练频率过低,虽则每次训练课都可取得理想的运动效果,然而由于训练课频度过低,直至上次训练课所取得的超量恢复已经消退才进行下次训练课,运动能力也难以得到相应提高。

第二节 超负荷原则生理学分析

一、基本概念与意义

超负荷原则(overload principle)亦称“过负荷”原则。所谓超负荷是指当运动员对某一负荷刺激基本适应后,必须适时、适量地增大负荷使之超过原有负荷,运动能力才能继续增长。这个超过原有负荷的负荷即为超负荷。

运动训练的目的在于通过系统地施加运动负荷,使运动员的运动能力获得不断增长。而运动能力的提高,实质上就是对抗负荷能力的提高。这样看来,运动训练的过程意味着需要不断地精心地调控训练负荷的过程。对负荷强度的把握是训练是否有效的关键。

对于超负荷理论的透彻理解与把握直接关系着:①每节训练课的设计,包括负荷强度、运动量及负荷方式等;②每个小周期训练的安排思路,该小周期中各节训练课负荷的变化及搭配;③减荷阶段的安排,训练周期中不同减荷阶段的安排与时间长度等;④对增加负荷适应状态的评价,据此不断调整训练课安排;⑤对运动训练效果的评定,据此改进负荷安排并修正训练计划。

二、生理学分析

超负荷原则是基于人体机能对运动负荷刺激的基本反应与适应规律而提出的。这一

规律在上一节已经进行过比较详细的讨论。简单说来,在给机体施加一个较大运动负荷的初期,机能反应较强烈,训练效果也比较明显。但随机体对该训练负荷的逐渐适应,机能反应便会越来越低,训练效果也越来越不明显。在此情况下若要继续提高运动水平,则必须适度增加运动负荷,以引起新一轮次的反应及适应过程。依此周期不断循环,即为超负荷的基本内涵。更确切地说,所谓超负荷,实质上是指循序渐进地增加负荷,使运动员的机能水平在不断进行的反应—适应过程中,逐渐提高到最大运动潜能。

运动能力要不断提高,负荷不断增长是前提条件。这就意味着运动负荷应不断超过原有负荷。但超负荷并非指过度负荷,而是指在不引起机体机能衰竭的情况下最大限度地刺激机体,使之发生最大的适应性变化。这就意味着,在运动员机体能够承受的范围内,运动负荷必须足够大,训练频度必须足够高。

合理应用超负荷原则是影响运动训练效果最重要的因素。对其尺度的把握不仅直接影响运动员每节训练课、每一小周期、中周期和大周期的训练效果,而且会对运动员一生可能达到的最高运动成绩甚至运动寿命产生直接的影响。

(一) 不同超负荷时身体机能状态的差异

不同超负荷安排时身体机能会出现不同的变化。若负荷较小时,训练刺激小,运动员的耐受期相对较长,疲劳程度较浅,恢复速率较快,但训练效果不明显且消退较快。若负荷较大时,训练刺激大,运动员的耐受期变短,疲劳程度加深,需要恢复时间较长。但产生的训练效果较明显,保持时间较长,消退速度较慢。

比较结果提示,在训练安排时,应注意将大、中、小强度交叉使用。利用大负荷保持或发展能力,利用小负荷促进机体恢复。

(二) 不同超负荷时身体机能发展的差异

运动训练所采用的超负荷是否适宜,直接关系到运动能力的增长速率以及运动员能够达到的最高成绩。图 13-2 所示为不同超负荷安排时运动能力增长速率以及达到的运动潜能方面的差异。

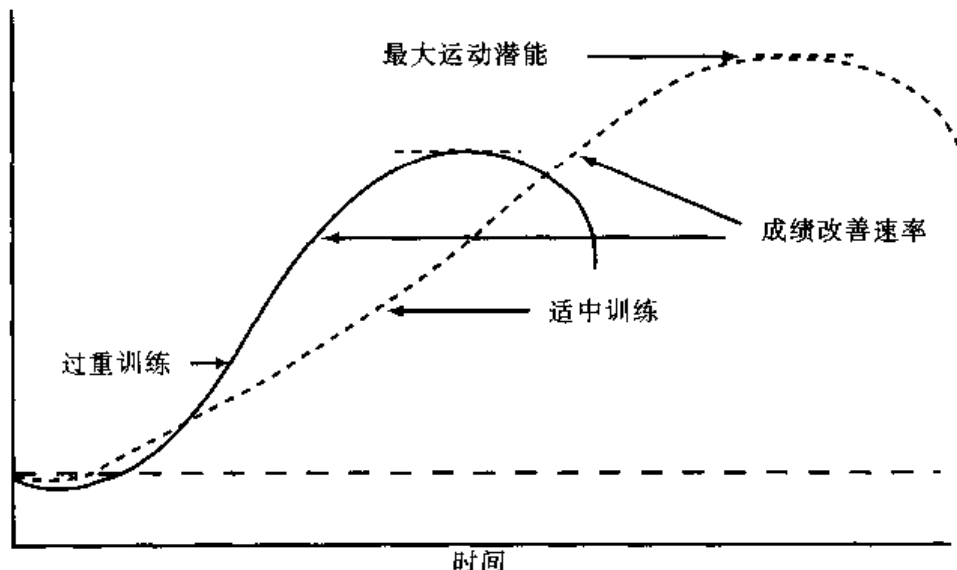


图 13-2 不同超负荷安排身体机能的不同发展速率



1. 突增式超负荷安排

从图 13-2 中的实线可以看出, 依据刺激—反应—适应规律, 施加较大增量的超负荷可使机体发生较大的反应, 并获得比较明显的适应效果, 因此能较快地出成绩。但若持续性地给机体施加较大超负荷, 运动员固然出成绩较早, 训练早期时常出类拔萃, 但极易导致机体过早衰竭, 无法达到本来具有的运动潜能, 最终能够获得的最高成绩比预期的会明显降低, 并且最高成绩保持的时间较短, 往往形成“昙花一现”。

2. 渐进式的超负荷安排

从图 13-2 中的虚线曲线可以看出, 若对机体循序渐进地、缓慢地施加超负荷, 虽然成绩发展速率较慢, 出成绩较晚, 但由于机体对此种超负荷一直会产生非常良好的适应, 故不仅可以达到运动员的最大潜能, 最终获得较高的运动成绩, 并且可以保持较长时间。

综上所述, 安排超负荷时, 不能急于求成, 不能急功近利, 一定要从长远着想, 从运动员需要最终获得的运动成绩入手, 制定出运动员的多年训练计划, 并控制每次超负荷所增加的强度, 使成绩按计划地增长。只有这样, 才能保证获得良好的训练效果, 充分挖掘出运动员所具有的最大潜能。

三、超负荷原则在训练中的应用

(一) 训练课中超负荷的应用

训练课中增加负荷的方式有: ①增加负荷强度, 如跑步训练中加快速度, 负重训练中增加负重量等; ②增加练习次数, 如在速度不变情况下增加次数或组数, 在负重量不变情况下增加练习次数与组数等; ③增加练习密度, 在其条件不变的情况下缩短次间或组间间歇; ④增加运动总量, 可以通过同时增加速度、次数及密度来实现, 应注意负荷总量增幅不能过大。

(二) 训练阶段中的超负荷应用

1. 每一负荷维持一段时间

超负荷并非指每天的训练负荷都有所增加, 而是呈阶段性增加。增加负荷的总体规律是: 机体对每一新增负荷都有一个反应—适应期, 待机体对这一负荷基本适应后再增加负荷。

2. 安排减荷小周期

连续进行数个超负荷小周期后应注意跟随一个减荷小周期。减荷期的负荷应明显降低, 以利用该小周期的轻负荷, 将过去超负荷小周期中机体有可能堆积的疲劳予以消除。

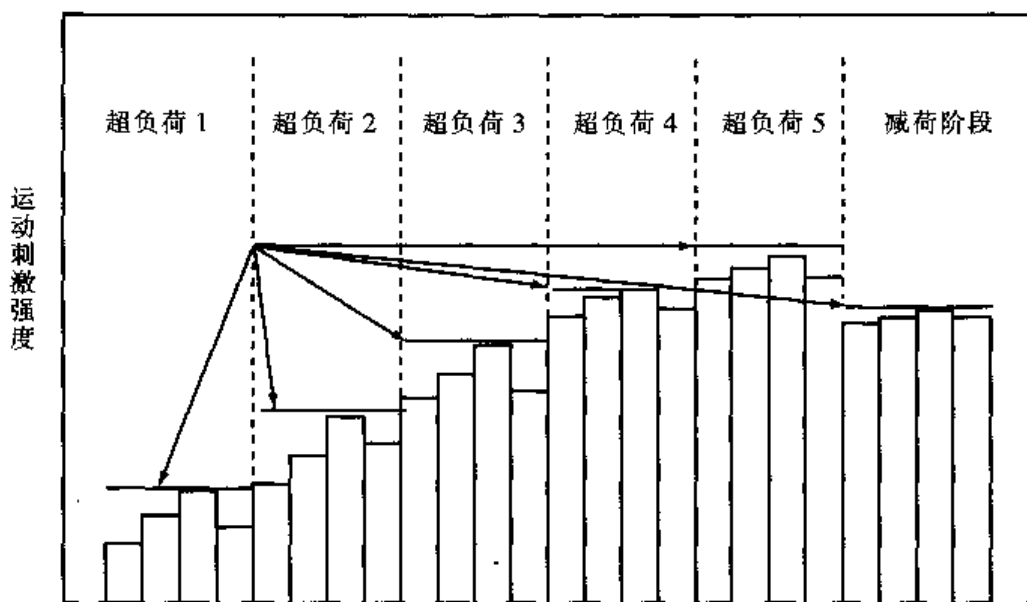


图 13-3 超负荷训练安排示意图

3. 安排减荷小阶段

每一减荷小周期后，会进入新一轮的增负荷期。连续数次增负荷小周期后，再次相应安排新的减荷期。以此类推，构成一个较长的训练阶段。应注意在连续数轮渐进性的增荷—减荷安排后，安排一个持续时间较长的减荷小阶段。负荷应比较轻松，消除前一阶段可能堆积的疲劳，以免造成过度训练或过度疲劳。

第三节 恢复原则的生理学分析

一、基本概念及意义

恢复原则(recovery principle)是指在长期的运动训练过程中，只有当运动员得到适宜的恢复，才能保证获得理想的训练效果。

人们对恢复重要性的理解经历了一个认识上的逐步深化过程。早期的运动训练中，人们主要将精力置于运动训练方面，认为恢复是自然发生的事。到了 20 世纪中后期，人们逐渐意识到没有恢复就没有训练，它在运动训练中也占据着重要的地位。到了 90 年代，随着对运动训练本质的逐步被揭示，人们意识到从一定意义上讲，恢复甚至比训练本身还重要，教练员在设计训练时也将恢复提高到非常重要的地位予以考虑。

恢复的主要意义在于：①运动训练后如果得不到足够的恢复，就根本不可能产生训练效果；②运动员在训练后的恢复速率，决定着整个训练计划的执行；③训练后连续恢复不足，会造成过度训练与过度疲劳，严重者会导致各种运动性伤病。



二、生理学分析

(一) 恢复与结构—机能的重建

训练过程实际上是一个反复进行的身体结构与机能的破坏与重建过程。通过负荷运动,消耗大量能源物质,引起微细结构产生某种程度损伤,以及造成内环境紊乱等。然后在恢复期,利用机体所具有的适应性特点,进行结构与机能的重建,使得运动能力得到一定改善。而结构与机能的重建需要一定的时间过程。若在恢复不完全情况下进行下一次训练,这时机体尚未完成重建过程,不但不能提高运动能力,反而会加重微细结构的损伤程度,使运动能力进一步下降,并需要更长的恢复时间。因此,所谓恢复,实际上意味着给予机体足够的时间在训练后进行结构与机能的重建,以承担随后更大的训练负荷。

(二) 恢复与训练效果

训练效果指在训练课后恢复期中所产生的身体机能与消耗物质的超量补偿现象。如上所述,训练课中负荷越大,疲劳程度越深,运动后产生超量恢复所需要的时间相对越长。大负荷训练后,产生超量恢复所需要的时间会明显超过24小时。这就意味着,在大负荷训练课后,随后必须注意安排小负荷训练课进行调整,以便身体机能有足够的从疲劳中恢复过来并产生超量恢复。

(三) 恢复与负荷

运动训练的成功反映在运动能力的不断提高。而要提高运动能力,就必须做到:①训练负荷要适宜,必须能够使机体产生预期的疲劳程度;②训练课后,必须留有足够时间使得机体能够消除疲劳,恢复和增强体能。可见,运动能力的改善不仅取决于运动训练的安排,而且取决于恢复是否适宜。惟有两者适宜结合,才能使训练效果最佳化。

(四) 恢复与疲劳

恢复着重是针对疲劳而言。运动性疲劳主要包括三个方面:①一次专门练习所导致的疲劳,这种疲劳本质上主要是生理性疲劳;②训练课中总的训练刺激所引起的大面积疲劳,这种疲劳主要是生理性疲劳和心理性疲劳;③运动员在一段训练阶段中所导致的疲劳积累或称长期性疲劳,这种疲劳既包括生理心理性疲劳,也包括生物力学性疲劳。教练员和运动员都应该关注这些疲劳,促进它们尽快消除。疲劳程度与恢复所需时间成比例,疲劳程度越深,恢复所需时间就相应越长。然而恢复时间也不能过长,以免产生运动效果消退。

(五) 恢复速率与体能发展

运动员从疲劳中恢复的速率决定着运动能力提高的速度与程度。教练员所制定的训

练计划,必须考虑每一名运动员恢复方面的特定需求。若恢复不足,疲劳就会积累,对训练的适应能力就会降低,运动能力就会下降,发生运动伤病的可能性就会增大。影响运动员成绩提高的重要因素,就在于在训练课中能否恰当地运用超负荷刺激,训练课后能否尽快促进运动员充分恢复。

三、恢复原则在训练中的应用

(一) 决定恢复时间的因素

安排恢复时间时,不仅要考虑个体特征、疲劳程度和所动用的供能系统等因素,同时要注意考虑下述因素。

1.从事简单活动与复杂活动相比,前者恢复速度较快,而且运动能力的改善速率及到达最大能力水平的速度均明显快于后者。

2.训练程度越高,训练中疲劳发生越晚。这主要归因于高水平运动员动作合理、经济,花费能量较少。

3.工作性质也影响着恢复速度。离心性工作较多项目其恢复速率慢于向心性工作为主的项目。

4.完成复杂活动疲劳的发生时间较之简单活动要晚。活动越复杂,完成动作时协同作用的肌群就越多,故疲劳发生较晚。因此,在训练课中可安排多项练习内容进行循环,推迟疲劳发生。这是因为每一种活动类型均要动用不完全相同的肌群,而活动类型较多时,完成一项活动所用的肌群,在进行另一项活动时就会得到休息和恢复,即每一项活动都会动员某些“新的肌群”参与工作,使运动员在训练课中将运动能力保持更长时间。

(二) 训练课后的恢复

每节训练课都会有疲劳以及代谢产物的积累。因此,训练课后的恢复至少牵涉到三方面的任务:补充训练课中所消耗的能量物质;清除积累的代谢产物;修复训练课中损伤的组织。因此,教练员应注意采取措施,尽快消除疲劳,保证随后的训练。

1.在每个小周期最后一次训练课中降低负荷,以便消除前面训练课尚未完全消除的疲劳。这样做会起到一个保护作用,以免将这个小周期的疲劳带到下一个小周期。

2.训练中必然会安排一些大负荷训练课,并由此造成机体深度疲劳,并需要较长的恢复时间。为了继续训练,需要在大负荷训练课后,安排小负荷或中等负荷训练课,采用大、中、小负荷的训练课相交替的训练安排,既能保证训练,又能促进恢复。

3.注意在训练课后安排一些促进恢复过程的活动(整理活动),以加速疲劳的消除速率。整理活动属于积极性恢复,一般包括一些低强度活动及伸展性练习。实践证明,训练课后进行整理活动,无论对于运动员的生理机能恢复抑或心理的恢复都有极大益处。



4.注意训练课后的营养补充以及不同功能的恢复速率。在力量训练及长时间的大强度训练后,应注意蛋白质的补充,以利于组织的修复与重建。摄入富含复合糖的饮食可加快肌糖原的合成速率。生理机能的恢复速率主要取决于化学底物的重新合成。磷酸肌酸恢复速率非常快,而肌糖原恢复速率以及受损伤肌肉的修复则要慢得多。

结缔组织(肌腱、韧带)的恢复速度需要的时间较循环器官长。通过分析不同系统的恢复速率,目的在于采取恢复措施时,应注重促进那些恢复较慢的系统。

5.采取各种恢复手段加速恢复。随着运动成绩接近人类体能的极限,现代训练负荷已经非常大,单凭“自然”恢复已经远远不够,而必须采取某些人为的加速恢复的措施。人们时常采取的恢复措施包括在训练课中进行的积极性休息以及肌肉群轮流工作,在训练课中或训练课后进行的心理放松,以及训练课后采取的其他措施如红外照射、物理按摩、冷热交替淋浴、水中漂浮放松以及饮食等手段。将积极性恢复与被动性恢复(放松、热水浴、按摩等)结合进行时,恢复的效果优于单纯使用积极性恢复。

(三) 过度训练的消除

过度训练是由长期的疲劳堆积而得不到及时清除所致。其根源在于在训练中忽略了训练与恢复的比率,运动员尚未从前面训练中得到充足恢复便继续进行大负荷训练,引起疲劳程度越来越深,形成过度疲劳,亦称过度训练。在周期性训练安排上,之所以在小周期、中周期以及大周期都要安排“减荷期”,其目的正在于消除前面训练可能形成的疲劳的堆积。

1.轻度过度训练的消除

轻度过度训练时不必停训,通过在一段时间内减强度、减量和延长休息时间就可以调整过来。注意鼓励运动员参与对身体机能不会产生较大压力的替代性活动,以促进其身心的恢复。注意避免进行测验课与比赛,并注意减轻心理压力。一般而言,这类过度训练在较短时间(大约一个月)就可调整过来。

2.重度过度训练的消除

重度过度训练时必须停训。主要的恢复手段是休息,并避免任何大强度身体活动。这种恢复需要的时间较长,可长达六个月或更长时间。在这一时期,受停训影响,已经提高的运动能力会急剧下降。生理上的疲劳以及负面的心理效应也会阻碍恢复的进程。尤其值得注意的是,许多优秀运动员在发生重度过度训练后,即或采取了各种措施,但其后经过训练再也无法达到原来的最高运动水平。因此,在训练中应切实注意避免过度训练。

第四节 周期性原则的生理学分析

一、基本概念与意义

(一) 基本概念

周期性原则(Periodic Principle)指的是将运动员的多年训练计划划分为时间长度不一的各种周期,每个周期赋予不同的训练目标,训练过程在不同层次上周而复始地进行循环。

按照周期性原则,一名运动员的多年训练过程可被分解为若干个年度训练计划(年周期或大周期),每一个年度训练计划依次分为数个称为中周期的训练阶段,每一个中周期又分为若干个小周期,小周期由若干节训练课所组成。实际训练过程中,每节训练课对小周期负责,小周期对中周期负责,中周期对年周期负责,年周期对多年训练计划负责,形成环环相扣的紧密结构。

(二) 意义

周期性训练原则的意义主要表现在以下三个方面:

1. 整个训练和比赛工作是一个系统工程

一名优秀运动员的成长需要经过多年的艰苦训练,加之训练与比赛会受到诸多的训练因素和非训练因素的影响,因此,训练和比赛工作就是一个系统工程。这就需要对整个训练过程进行精心的计划和实施。在周期性基础上,便可以按照系统论的观点,将整个多年训练过程视做为一个大系统,将每年的训练和比赛视做为分系统,每个分系统又由许多分支系统构成。这样便可对整个训练过程进行有效的计划、分工、实施与监控。

2. 使运动员得到最佳发展

使运动员得到最佳发展有两重涵义:第一,要能够挖掘出运动员的最大运动潜能;第二,要能够在每一年的重大比赛中出现最佳竞技状态。前者是按照多年训练目标通过系统化地实现每个训练阶段的训练目标的必然结果,后者则是合理计划和完成年周期中每个小中周期训练目标的必然结果。

3. 使训练过程的每一个环节具有可操作性

在周期性基础上,教练员对运动员经过多年训练可能达到的总目标心中有数,而且也清楚地知道每一年需要达到的分目标,以及每一个中周期、小周期乃至每节训练课的小目标。从而非常清楚什么时候该怎样练以及练的目的是什么。这样,一方面有利于教



教练员实施训练计划并组织训练过程,另一方面也便于对每个训练环节的效果进行测定和评价,并根据反馈结果随时修正训练。

二、生理学分析

运动训练中有诸多矛盾需要协调。周期性原则最重要的作用之一就在于能够以人体生物科学与身体机能发展规律作为基础,协调训练过程中的主要矛盾,包括训练内容与训练时间、精力之间的矛盾,身体素质发展与保持之间的矛盾以及训练和比赛之间的矛盾,使整个训练有序地进行。

(一) 训练内容与训练时间

绝大多数竞技体育项目均要以良好的身体素质作为基础。训练程度高低与身体素质水平直接相关。技术性较强的运动项目,如篮球、排球等,也需要很高的力量、速度、耐力和柔韧性素质水平作为基础。所以,在安排训练计划时,一定要正确处理好发展身体素质与发展技术的辩证关系。

解决好有限的训练时间和运动员有限的体力范围内,安排各种训练内容的难度,最好的办法就是将所需要发展的各种训练内容列出清单,依照一定的规律进行安排,这就形成了训练周期。

(二) 身体素质发展与保持

身体素质的发展与保持过程中,存在这样一种现象:若想保持一种已经得到较大发展的身体素质,如力量素质,每周进行一次最大肌肉力量课就可以实现。但想使之有所发展,每周至少需要两次最大肌肉力量练习课,若想使之得到更大的发展,可以安排每周三次。然而,机体经过大强度和大运动量训练后,机能恢复所需要的时间至少会超过24小时,在极高负荷训练课后,甚至需要更长时间。所以,每周能够安排的大负荷训练课的次数是有限的。也就是说,安排的大负荷训练课越多,所需要的恢复时间就相应越长,留给其他素质发展与技术发展所剩余的训练时间就相应越少。

鉴于这种矛盾,教练员必须围绕当年最重大的比赛,精心做出本年度的全年训练计划。在基础训练期,训练重点是发展身体素质,每周安排较多的大负荷身体素质训练内容,而技术训练相对较少。随着训练向前进展,基本身体素质训练的比重逐渐减少,技术训练成分逐渐增大。

在赛季前期,训练的目的在于保持住已经获得的身体素质水平基础上,重点实施技术训练内容,即在本阶段重点发展与已经提高的身体素质相适应的专项技术;待到重大比赛前,与上一个训练同期相比,身体素质已经有所发展,技术也有所改善,从而使增强的身体素质水平与提高的技术水平相结合,形成更强的运动能力,一般将此称为出现了“最佳竞技状态”。以这种状态进行比赛,应该能够表现出当年的最好成绩。

最佳竞技状态不可能保持很长时间。运动员在赛季以最佳竞技状态完成主要比赛后,体力会下落,于是进入调整期(休整期)。再次按照上述思路在更高的水平上进行新



的一轮循环。这样在更高的起点上循环往复,使运动员的运动能力不断提高。这就是蕴于运动训练的周期性原则背后的科学基础。

(三) 训练与比赛

运动训练的目的就是为了比赛。但训练和比赛实质上是一个矛盾的混合体。扎实的基础训练就像向银行存款,而大型比赛则是从银行取款。因此,运动训练安排中需要考虑的一个很重要的因素,就是力图最合理地摆正训练和比赛的关系。在指导运动员训练时,应在认真分析运动员特点与项目特点的基础上,为其大致确定长远发展目标,制定出多年训练计划。在多年训练计划基础上,制定每年的年度训练计划。在制定年度训练计划时,应紧密围绕当年的最重大比赛进行设计,将其分为若干个小阶段,并确立各个阶段的发展重点。目的是通过精心安排使最佳竞技状态出现在重大比赛时。

第五节 个体化原则的生理学分析

一、基本概念与意义

个体化原则(individuality principle)指教练员在制定训练计划时,必须严格按照每名运动员所独具的身体能力、潜质、学习特征以及从事的专项等各方面特点,设计出适合每名运动员特点的个体化方案。也就是说,整个训练过程必须依据该运动员的特点进行安排,使之得到最大的发展。

在训练实践中时常有这样一个误区:冠军的技术便是最佳技术,冠军的训练计划便是最佳训练计划。从而造成许多教练员总喜欢“拿来主义”,全然不考虑自己队员的特点、能力与训练经历等。更有甚者,许多教练员甚至将优秀运动员的训练计划不加消化地应用于青少年运动员,结果产生不良效果。

在现代运动训练中,个体化原则已经成为最重要的训练理论之一。教练员惟有在认真分析每一名运动员训练的不同方面的基础上,精心地制定出最适合个体发展的训练计划,才能使该运动员得到最佳的发展,才能发掘出该运动员的最大潜能。

二、生理学分析与应用

(一) 不同个体适应运动负荷能力的差异

不同年龄运动员在训练负荷适应性方面是有差异的。如儿童少年运动员与成年运动员在解剖结构、身体形态、机能能力以及心理成熟度方面的差异,决定了他们对运动负荷承受能力的差异。儿童少年运动员可以耐受较大的运动量,但难以承受较大的训练强度。他们疲劳快,但恢复也快。从心理角度而言,他们的兴趣难于持久,容易转移。这



些都提示教练员,在为其安排训练计划时,应注意他们的身心特点。

同等年龄层次的不同运动员个体,在训练负荷适应性方面也存在个体差异,即便是运动成绩相似的运动员,其生理机能与心理机能激活程度也不尽相同。换言之,组成运动成绩的各要素对这一成绩所作的相对贡献不同。正如对于两名800米跑成绩相同的运动员而言,一位以步频为主,反映在他的神经类型属于灵活型,白肌纤维比例较高,爆发力较好等;而另一位则可能以步幅为主,表现在个头大、腿长、柔韧性好、神经系统工作的稳定性好等方面。因此,在训练中必须充分考虑个体特点及发展需求,有的放矢地安排训练内容。

(二) 不同性别运动员适应运动负荷能力的差异

女子运动员无论从身体形态、解剖结构及身体机能方面,均与男子运动员有极大的差异,这就需要教练员充分了解女子运动员的解剖、生理与心理特点,按照女子的特点安排训练。

此外,在训练安排上尤其应注意女子特有的生理现象——月经周期。在一般体育教学情况下,女学生处于月经期时,应尽量注意不下水,不做腹压较大的跳跃性练习等。但对于竞技体育情况则完全不同。任何一项运动比赛,其日程安排都不会照顾处于月经周期的运动员,而且许多世界大赛(如奥运会)几年才举行一次,运动员一生难得有机会参加。从竞技体育角度而言,在平时训练中,就应注意逐步建立起月经期对运动训练的适应性,即逐渐做到在平时训练时基本不考虑女子运动员是否处于月经周期。但这需要一个较长时间的逐渐适应的过程。在运动员参加训练初期,在月经期教练员应给予适当照顾并酌情减量、减强度,然后在月经期逐步加量、加强度。这样,女子运动员的特殊生理机能就会有一个逐渐适应的过程,直到对运动训练完全适应。最终目的是使其即便处于月经期,也可照常进行正常训练和比赛。这时就意味着运动员的月经周期已经对运动训练完全适应。

(三) 运动员不同生理机能状态适应运动负荷能力的差异

同一运动员处于不同机能状态时,如体能下降、生病、睡眠不足、受伤和营养不良等情况下,对运动负荷的适应能力下降。故在训练时,必须及时发现运动员的机能变化情况,及时采取适当的个体化处理方案。

综上所述,在训练实践中,教练员应该充分认识到,每个运动员都是一个独特的个体,没有一个万能的训练计划能够适用于所有运动员。因此,安排训练计划时,必须根据每个运动员的爱好、习惯、特长、特定需要及发展目标,以取得最佳训练效果。此外还应注意,即使是在个体化的基础上制定训练计划之后也并非一劳永逸,该计划尚需根据运动员情况的变化随时进行调整。如该运动员对计划负荷发生的反应是否理想,完成负荷是否吃力,机体是否适应,恢复情况如何等。必须清楚:我们是要有一个计划且按照该计划安排训练,但训练计划必须根据运动员所处的特定环境的变化随时进行相应调整,以使运动员得到最佳的发展。

【小结】

1. 运动负荷的本质是一种人为的刺激, 希望借助这种刺激, 通过结构与机能的重组, 形成超量补偿。运动训练实质上就是通过有目的地给机体施加系统的负荷刺激, 获得所预期的适应性变化。长期的运动训练过程实质上是一个不断重复进行的刺激—反应—适应过程, 是一个身体结构与机能不断破坏与重建的循环过程。通过这个循环过程, 运动能力不断增强, 运动成绩不断提高。

2. 身体机能对一次训练负荷的反应大致分为耐受、疲劳、恢复、超量补偿和消退五个过程。若连续负荷过大恢复不足, 或者负荷过小训练频度过低, 均难以获得理想训练效果。

3. 超负荷原则充分利用了机体对负荷增大的反应—适应规律, 其本质就是循序渐进地增加训练负荷, 使得运动员的身体机能在不断的反应—适应过程中逐步发挥出最大潜能。

4. 恢复性原则是基于取得训练效果的需求而提出的。缺乏足够恢复, 不仅训练课中运动员的耐受期会缩短, 疲劳程度会加深, 而且机体难以获得充足时间充分进行结构与机能重建, 故难于发生所需的超量补偿现象。

5. 周期性原则主要是基于运动员发展内容繁多而精力与训练时间有限之间的矛盾, 身体素质发展与保持之间的矛盾以及训练与比赛之间的矛盾。因此, 必须将多年训练计划划分为年周期以及中小周期, 使得整个训练过程系统化。实际训练时按计划分阶段完成不同的训练内容, 以保证在所预期的时间内产生最佳竞技状态。

6. 个体化原则是指为运动员设计训练计划时, 必须仔细分析运动员的每一个方面, 包括年龄、训练经历、身体特征、心理特征、性别特征、身体能力、健康状况、负荷承受与恢复能力和发展目标等, 并分析不同个体对运动负荷适应性方面的差异。在此基础上制定出最适合个体发展的训练计划。

【思考题】

1. 试述身体机能对训练课刺激所产生的主要应答性反应特征。
2. 试述超负荷原则的基本内涵与意义。
3. 超负荷原则的实质是什么? 应用于小、中、大周期时应注意哪些问题?
4. 恢复原则的实质是什么? 为什么说没有恢复就没有训练?
5. 在训练实践中如何处理负荷与恢复的关系?
6. 训练过程为何要有周期性?
7. 试分析年周期中不同训练阶段训练重点的转移。
8. 试解释个体化原则的内涵及生理学基础。

【主要参考文献】

1. Ronald P. P et al: Concept of athletic training, Jones and Bartlett, c1998.
2. Thomas D. F, Athletic training: principles and practice, Mayfield Pub. Co., c1986.



3. Westcott W. L, Strength fitness: physiological principles and training techniques, Brown & Benchmark Publisher, c1995.
4. Sharkey B.J, Physiology of fitness, Human Kinetics Books, c1990.
5. DeVeres H. A, Physiology of exercise for physical education, athletics, and exercise science, WCB Brown & Benchmark, c1994.
6. Powers S. K, Exercise Physiology: theory and application to fitness and performance, Brown & benchmark Publishers, c1994.
7. Ploman S. A, Exercise physiology for health, fitness, and performance, Allyn & Bacon, c1997.
8. Robergs R. A, Exercise physiology: exercise, performance, and clinical application, Mosby, c1997.
9. McArdle W. D, Exercise physiology: energy, nutrition, and human performance, Williams & Wilkins, c1996.
10. Bompa T. O, Theory and methodology of training: the key to athletic performance, Kendall/Hunt Pub. Co., c1990.
11. Arnheim D. D, Principles of athletic training, Brown & benchmark, c1997.
12. Ray R, Management strategies in athletic training, Human Kinetics Publishers, c1994.
13. Arnheim D. D, Essentials of athletic training, WCB/McGraw-Hill, c1999.
14. Pfeiffer R. P, Concepts of athletic training, Jones and Barlett, c1998.
15. Hillman S. K, Introduction to athletic training, Human Kinetics, c2000.
16. Bruce E (Editor) , Training in sport, Wiley, c1998.

(西安体育学院 郝选明)

第十四章

特殊环境与运动能力

【提要】本章主要介绍人体在高原缺氧、高温、寒冷和水下等特殊环境条件下运动时的机能变化特征，以及对人体生理和工作能力的影响。在此基础上，就如何提高人体对特殊环境的适应能力、运动能力和健康水平进行简要阐述。

第一节 高原环境与运动能力

一、高原应激

高原(high altitude)是一种低气压、低氧、高寒和高紫外线辐射的特殊环境，对人体的生理活动会产生一系列特殊的应激刺激作用，其中低氧刺激对人体的影响最为明显。

(一) 最大摄氧量

氧分压随海拔的高度增加而下降(表 14-1)。高原的低氧环境会给正常氧运输带来不利的影响。从平原进入 3000 米高原时，大气氧分压从 21.2Kpa(159mmHg)降为 14.7Kpa(110mmHg)，肺泡氧分压降低的程度更大。由于大气氧分压的降低，人体血氧饱和度急剧下降，组织细胞利用氧量就减少。当海拔高度升到约 1500 米时，最大摄氧量开始下降。开始阶段每升高 300 米，最大摄氧量下降约 3%，在更高的高度下降的速率更快，如在珠穆朗玛峰高度时，最大摄氧量降低大约 70%，估计可低至 15 毫升/公斤·分。由于最大摄氧量的下降，使运动能力明显下降。

高原环境对运动能力的影响，因海拔高度及运动项目不同而有所差异。在高原 2300 米高度比赛时与平原比较，超过 2 分钟的全身耐力性运动，由于最大摄氧量降低，与有氧工作能力有关的竞技成绩会明显下降。例如，1500 米跑的成绩下降 3%；5000 米和 10000 米的成绩大约下降 8%。在高原游泳比赛，100 米的成绩下降 2%~3%，400 米以上的成绩下降 6%~8%。短时间、高强度的项目，即持续时间不超过 1 分钟的剧烈运动，特别以技术为主的项目（短跑、跳跃和投掷）并未受高原负面影响，由于空气阻力小，运动成绩反而可能会略有提高。



表 14-1

不同高度气压与分压

高度 (米)	高度 (英尺)	大气压 (mmHg)	大气 PO ₂ (mmHg)
0	0	760	159
1000	3280	674	141
1500	4920	634	133
2000	6560	596	125
3000	9840	526	110
4000	13120	462	97
5000	16400	405	85
6000	19690	354	74
7000	22970	308	64
8000	26250	267	56
9000	29530	230	48

(引自 Mcardle《运动生理学》1996)

(二) 肺通气量

从平原到达高原时最重要的反应就是由于氧分压下降所引起的肺通气过度。当高度达到 2348 米时, 安静时的肺通气量开始以指数形式增加。由于高原缺氧刺激了颈动脉体与主动脉体外周化学感受器, 反射性地引起呼吸加深加快, 肺通气量加大。而肺通气过大会造成过度换气, 排出的 CO₂ 过多, 使肺泡和血液 CO₂ 分压下降, 血液和脑脊液中 pH 值升高偏碱性, 易发生代偿性的呼吸性碱中毒而对呼吸中枢有抑制作用, 从而反射性地引起肺通气量减少。因此, 在高原缺氧时, 同时存在通气加快和减慢的相互对抗的两种调节机制。在一般情况下, 缺氧引起的肺通气功能增强的现象是主要的。肺通气量的增加提高了肺泡氧分压, 有利于氧的运载。

(三) 心血管反应

到达高原初期, 心率和心输出量增加, 而每搏输出量没有变化。每分输出量的增加主要靠心率的加快, 心率增加可以补偿运输氧能力下降。在平原安静时, 心率一般为 70 次/分, 在高原 4500 米高度时, 安静心率可增加至 105 次/分, 这种心率的增加是由于中枢神经系统处于缺氧状态, 交感神经受刺激而兴奋所致。在高原期间, 动脉血压明显增加与去甲肾上腺素水平增加有关。

(四) 高原反应症

初到高原, 机体因缺氧而产生一系列生理反应, 会出现头痛和呼吸困难等所谓急性高山病(AMS)。这主要是脑缺氧引起的, 脑组织对缺氧最敏感, 易先受损。由于体液滞留在脑部或肺部, 容易发生高山脑水肿(HAPE)或肺水肿(HACE)而危及生命。由于低氧的影响, 抑制了视网膜感光细胞的机能, 使视觉感受器对光的敏感性降低。当高度约为

1500 米时,对光敏感性下降 5%;高度约为 3000 米时则下降 25%,视力敏锐性下降 30%;当高度达到约为 6000 米时简单反应时降低 25%。

二、高原服习

高原的低氧环境给人体,尤其是呼吸循环机能带来不利的影响。但是人体在高原地区停留一定时期,机体对低氧环境会产生迅速的调节反应,提高对缺氧的耐受能力,称为高原服习 (altitude acclimatization)。高原服习是循序渐进的,所以适应需要时间。到达 2300 米高度约需两周时间适应,然后每增加 610 米,需多一周时间去适应,直到达到所需要的高度。高原服习可分为短期服习(几天、几周或几个月)和长期服习(数年)。一般将人体对高原环境的长期服习过程称为高原适应 (altitude adaptation)。

在高原的长期适应过程包括生理和代谢的调节高度适应,以便大大增强对高原缺氧的耐受能力。最重要的调节机制包括:①肺通气量的增加和体内酸碱平衡的调节;②血红蛋白和红细胞生成增加以及局部循环和细胞代谢的变化。后两方面将明显有利于氧运输和利用。如表 14-2 所示。

表 14-2 高原低氧急性和长期的调节

系统	急性	长期
肺部酸碱平衡	通气量增加 体液 pH 值升高偏碱性	通气量增加 肾脏排出碳酸氢盐减少
心血管	心率加快 心输出量增加 每搏输出量不变或略减少 量大心输出量不变或略减少	心率仍然高 心输出量减少或低于平原水平 每搏输出量减少 最大心输出量减少
血液方面		血浆量减少 红细胞压积增加 血红蛋白浓度增加 红细胞数量增加 骨骼肌毛细血管增加 红细胞中 2,3-二磷酸甘油酸增多
局部		线粒体密度增加 肌肉氧化酶含量增多 体重和瘦体重减少

(依 Mcardle《运动生理学》1996)

除通过上述变化来服习外,Weine(1976)还将高原服习分为两种:第一为安静状态的服习;第二为与摄氧能力有关的工作状态的服习。如下图所示。

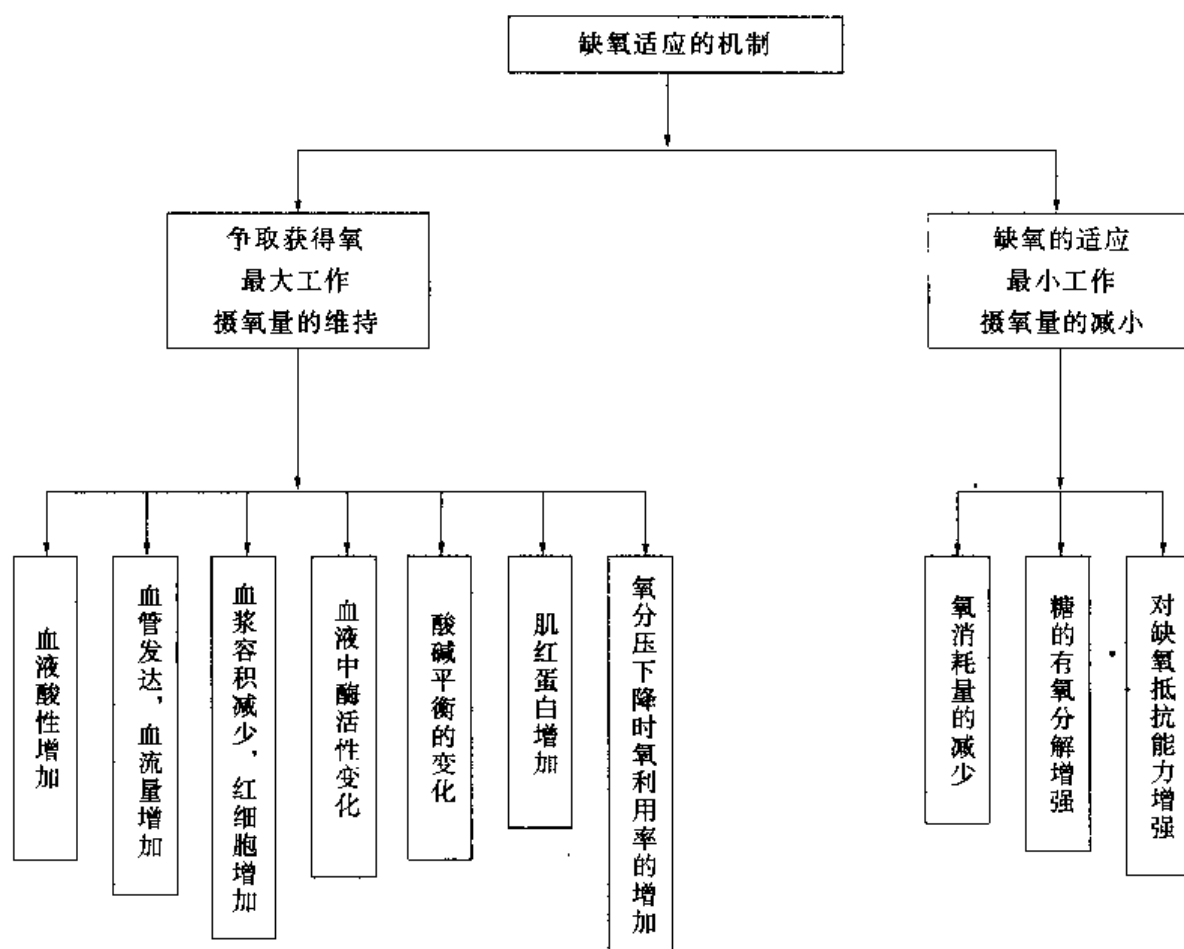


图 缺氧训练的机制
(依瓦依埃, 1967)

高原适应存在着很大的个体差异。进行登山运动必须在某一高度服习后，再继续征服更高的海拔。

三、高原训练的生理学适应

高原训练(altitude training)是一种在低压、缺氧条件下的强化训练。这种训练对人体有两种负荷，一种是运动本身所引起的缺氧负荷，即运动性缺氧负荷；另一种是高原性缺氧负荷。这两种负荷相加，造成比平原更为深刻的缺氧刺激，以调动身体的机能潜力。高原训练的生理学适应主要表现在呼吸系统、血液系统、心血管系统、骨骼肌、免疫系统和内分泌系统等的适应。

(一) 呼吸系统

平原运动员到高原后，最初反应是呼吸频率加快、肺通气量加大。运动时肺通气量可较在平原做同样负荷时增加 23%或更多。

最大摄氧量是反映运动员有氧耐力运动能力的重要生理指标。研究表明，平原运动

员到高原虽然肺通气量增加,但随高度的增加最大摄氧量却下降,认为这是血氧饱和度下降和心输出量减少所致。有氧能力在海拔 1500 米以上高度才发生明显改变。每升高 1000 米,最大摄氧量则以 10% 的比例下降。因此,4000 米高度的有氧能力相当于平原的 70% 左右,在 6248 米时,大约是 50%。有训练者和无训练者最大摄氧量下降率相似。高原训练对最大摄氧量的影响仍有争议。有报道,高原训练使最大摄氧量增加了 5%。其主要原因可能与受试者的训练水平及高原训练前的机能状态有关。

(二) 血液系统

1. 血红蛋白和红细胞

运动员到高原后 Hb 和 RBC(红细胞)增加。血液载氧能力的提高是对高原适应的主要表现。这种适应来自于两个因素,初期是血浆量减少,随着时间延长则是由于造血器官机能加强,而使 Hb 和 RBC 的生成增多。

初到高原的头几天,由于体液从血管内进入组织液和细胞内,血浆量减少使 RBC 浓度增加。例如,在 2300 米高度停留一周后,血浆量下降约 8%,而 RBC 浓度增加 4%,Hb 增加 8%;在 4300 米停留一周后,血浆量下降 16%~25%,RBC 增加 6%,Hb 增加 20%。血浆量迅速下降伴随着 Hb 浓度增加,使动脉血氧含量明显高于刚到高原时所测得的值。

高原氧分压下降也刺激红细胞总数增加,称为红细胞增多症(polycythemia)。这是由于高原缺氧引起(EPO)(促红细胞生成素)的释放,促进红细胞的生成。在高原期间红细胞仍然保持上升。例如,一些世居高原的人,RBC 为 800 万/ mm^3 ,比一般人多 50%。一定数量 RBC 和 Hb 增多,能增加血液运输氧气的能力,对提高血氧含量和血氧容量有代偿意义。例如,秘鲁的高原居民血液运载氧能力比平原者平均高 28%。每 100ml 血液中氧容量为 25~30ml,而平原居民为 19.7ml。因而即使高原血红蛋白饱和度下降,动脉血中氧含量还能接近或等于平原时水平。但是,若红细胞过分增多会增加血液的粘滞性,有可能抑制血液流动和氧扩散至组织的能力。

研究还表明,在高原服习过程中女性血液指标变化明显比男性少。但在高原前后进行了补充铁的女性与没有补充铁的女性相比,RBC 增加更多,几乎达到与男性相同的水平。

2. 促红细胞生成素

高原缺氧有促使体内 EPO 增长的作用。当人处于 3000 米高度 3 小时后,EPO 浓度升高约 50%。也有研究表明,在高原 EPO 的正常反应是初期增高,一周后下降。而 RBC、Hb 和 RC(网织红细胞)数量却增加。因此认为高水平 EPO 的维持,并不是在高原期间 RBC 和 Hb 持续增加所必需的。

研究发现,高原训练运动员似乎比单纯久居高原的人更能促进红细胞的生成。EPO 的释放也受海拔高度的影响。由 EPO 升高使 RBC 数量增加可能存在“阈”高度,这个适宜的“阈”高度为海拔 1600~2500 米。高度较低时,EPO 增加不明显。

EPO 的分泌和 RBC 的生成还与血清睾酮的水平有关。高原训练期间血清睾酮水平



的变化趋势与血清 EPO 变化趋势基本保持一致。

3. 血液流变学指标

通过对久居高原人群的研究发现,随海拔高度的不断增加,血液具有“浓”(红细胞压积增高)、“粘”(全血粘度增高)、“聚”(红细胞电泳时间延长)的典型特点。高原训练的高原缺氧和运动训练的双重刺激对血液流变特征产生复杂和深刻的影响。经过长期训练的运动员,安静时 RBC 渗透脆性、血液粘度、红细胞电泳时间和血沉比一般人有明显下降,红细胞滤过率和红细胞变形能力比一般人明显增加。由于长期训练使 RBC 变形能力增加,血细胞压积减少,运动员安静状态血粘度较一般人明显下降。

红细胞压积最适值是 50%左右。当红细胞压积升到 50%~60%时,血液粘滞性增加,当超过这一水平时血液粘滞性则呈指数增加。红细胞压积加大是对高原环境的适应,若过分增大反而对机体不利。适宜的高原训练控制血细胞压积在最适值范围内,使红细胞有效摄氧达到较佳状态,并对血液粘度也有利。

因此,高原训练期间机体血液流变特征可能会得到改善。红细胞数量增加和血液流变性改善提高了机体对低氧环境的耐受力。

4. 红细胞变形能力

红细胞的变形能力在很大程度上影响着组织的供氧能力及对 CO_2 和其他物质的运输能力。研究发现,高原训练一周后红细胞内的 2,3-DPG (2,3-二磷酸甘油酸盐)开始提高,而血中 2,3-DPG 能通过改善 RBC 膜的机能状态使 RBC 变形性增强,有利于氧的释放。

5. 血乳酸变化

高原训练初期,由于高原缺氧使组织中线粒体氧化酶的活性下降,肌肉氧利用能力降低。因此,运动中有氧代谢不能满足机体的能量需要,较多地动用了无氧代谢,产生大量乳酸,同时由于大强度运动使乳酸消除的速率也减慢,因而乳酸浓度会升高。

研究发现,机体在对高原服习的过程中,运动后血乳酸和肌乳酸存在下降的趋势,这是机体对缺氧环境的适应,也是机体代谢能力提高的反映。这种高原服习后大肌肉群训练时最大血乳酸浓度减少的现象被称为“乳酸矛盾现象”(Paradox),因为高原低氧环境应该促进血乳酸的积累。另外,长期在高海拔高原低氧训练,血乳酸水平减少并没有提高适应后的最大摄氧量水平或提高氧运输能力。换句话说,血乳酸水平减少并没有伴随有氧代谢能力的提高。乳酸下降原因,一方面是由于高原训练时动员葡萄糖的儿茶酚胺含量减少;另一方面由于中枢神经系统发放冲动减少,降低了全身运动的能力。高原训练乳酸积累减少与高原适应后的缓冲能力下降无关。

总之,在海拔 2000 米的高度,当运动强度与平原相同时,缺氧的程度明显加大,血乳酸变化有以下特点:①以相同强度做大强度运动时,高原的血乳酸值明显高于平原;②高原训练适应以后,以相同强度运动时,与初到高原相比血乳酸浓度下降,血乳酸一速度曲线右移;③高原训练能明显提高乳酸阈强度;④在 4000 米以上高原训练时,由于强度偏低,血乳酸值显著下降。

(三) 心血管系统

在高原以次极限和极限强度运动时,最初反应是心率和每分输出量比平原增加 50%,而每搏输出量没有变化。但数天或数周后,随着携带氧气的能力和对氧气的亲和力提高,最大心率和心输出量均有所下降。每搏输出量降低的原因是由于血红蛋白浓度升高后,静脉回流量减少,血浆量和总血容量下降,以及交感神经活动引起全身血管阻力的增大。而最大心率的降低,可能受长期高原应激引起的副交感神经调节增强的影响。

在高原居住的居民其血压略高于平原居民。而且是肺循环的血压较高。居住在 4330 米高度的秘鲁居民的肺动脉血压,比平原居民要高一倍。这种肺动脉高血压有助于改善肺组织的血液灌流和扩大肺泡的有效气体交换面积。由于肺血管阻力较大,使右心室肥大。这是一种适应性变化。

(四) 骨骼肌

高原训练对骨骼肌有较深刻的影响,主要表现在以下几个方面:

1. 骨骼肌的毛细血管和酶活性

对在 2300 米高度训练的运动员进行测定,发现骨骼肌毛细血管密度增高,糖酵解酶活性降低,氧化酶活性升高。

2. 肌红蛋白浓度

肌红蛋白是肌细胞内含铁的蛋白质,比血红蛋白有更大的亲和力,其主要功能是贮存和运输氧气。高原适应和训练的综合因素能引起人体骨骼肌中的肌红蛋白的浓度增加,这种增加反应在相当程度上取决于高原训练时强度,即训练强度较高、且严重缺氧时才能见到明显成效。

3. 体重和体成分

长期经受高原应激,瘦体重和脂肪明显下降,下降的大小与海拔高度密切相关。研究表明,在 4300 米高原 8 天后,体重下降 3%,而在 5300~8000 米停留三个月后,体重则下降 15%。在高原上体重的丢失首先是脱水,其次是脂肪的丢失和骨骼肌质量的下降。但也有人发现登山者体重的下降,其中的 1/3 是体脂,2/3 是肌肉组织丢失。还发现在骨骼肌质量下降同时存在肌纤维变小的现象,这是对高原环境的有利适应,它可缩短氧气从毛细血管扩散到线粒体的距离。

此外,高原应激使能量摄入下降,小肠吸收率下降,基础代谢率明显增加,因而体重下降。

4. 肌肉缓冲能力

高原训练后,肌肉缓冲能力有所改善。有人研究越野滑雪运动员高原训练后腓肠肌和肱三头肌的缓冲容量均增加 6%,并且腓肠肌缓冲容量的相应变化与短跑成绩呈正相



关($r=0.83$)。由此认为低氧对于缓冲容量的提高可能是一个关键的因素。而耐力训练不能增加肌肉缓冲容量。

(五) 免疫系统

高原训练对长跑运动员免疫功能会产生影响。经过四周海拔 2700 米高原训练后,长跑运动员血中白细胞介素 2 水平下降,但经过四周海拔 1300 米高原训练后细胞免疫水平则提高。提示高原训练的高度也是影响耐力运动员细胞免疫功能的因素之一。

(六) 内分泌系统

1. 儿茶酚胺

儿茶酚胺是交感神经末梢或肾上腺髓质所释放的一种神经递质,具有调节机体在应激状态下更有效地适应急变的功能。

缺氧结合运动训练,可使运动员尿内儿茶酚胺排出量明显增高。在较高海拔高度进行同等负荷运动后,运动员尿去甲肾上腺素的排出量明显增加,肾上腺素的排出量明显减少。认为对运动员尿中去甲肾上腺素排出量的测定,可了解运动员对高原训练的适应情况。

2. 血清睾酮和皮质醇

在人体内,血清睾酮(T)是促进蛋白质合成及运动能力提高的激素,而血清皮质醇(C)是减少蛋白质合成、降低运动能力的激素。研究发现,高原训练会使运动员血清睾酮降低。认为高原训练使血清睾酮明显下降的原因,可能是通过系统的高原训练,机体的消耗过大,同时长时间大运动强度训练使睾丸中产生的睾酮的量下降所致。高原训练后皮质醇大多呈上升变化,但也有下降的报道。这可能是由于实验的时间、强度及环境不同所致。

四、高原训练的要素

(一) 适宜海拔高度

高原训练的高度从理论上讲 1000~3000 米的高原训练都有效。近年来,国际上已基本认同世居平原的运动员高原训练的最佳高度应为 2000~2500 米。低于 2000 米,低氧缺氧刺激较少,不利于充分挖掘机体的潜力;高于 2500 米则机体难以承受较大的训练负荷,并且不利于训练后的恢复。在 2000~2500 米高度训练,最大摄氧量、总红细胞容积及 Hb 均有显著的增高,对提高运动员的速度、耐力及运动水平都有益处,不仅适用于田径运动员,而且对其他多种项目都有益处。我国运动员高原训练的高度多在 1890 米(昆明,中长跑、游泳、足球等)及 2360 米(西宁多巴,中长跑、竞走、自行车等)。埃塞俄比亚的高原世居运动员将赛前高原训练提高到 2700~3000 米。对世居高原的运动员高原训练的最佳高度要因长期居住的海拔而定。总之,适宜的高度应具备两个条件,即此高度能对机体产生深刻的缺氧刺激,同时又能承受比较大的训练量和强度。



(二) 适宜训练强度

这是决定高原训练成败的关键。强度过低,刺激小,难以收到成效;强度过大,刺激深,对适应和恢复不利。一般应遵循下面几个原则:①根据运动员训练水平的高低来定。水平高的强度可大些,反之强度则适当减少;②根据比赛的强度而定,要安排部分接近比赛强度的训练;③将高原训练的强度和下高原后的强度衔接起来,下高原后的平原强度要比高原强度高;④要根据机体对高原环境的适应阶段来安排训练强度。

(三) 训练持续时间

最近的研究表明,最适宜的持续时间应为4~6周,因为从平原到高原要有一个适应过程。高原训练时间过短,不利于机体产生适应性变化;而高原训练时间过长,又不利于机体回到平原后的适应性调整,同时还应考虑心理因素和经济因素。所以安排高原训练的时间不一定要很长。

(四) 出现最佳训练效果的时间

下高原后,何时出现最佳训练效果,对此没有统一的看法。这与个体的适应能力及高原训练的负荷有密切关系。目前普遍认为:长跑和马拉松项目的最佳比赛时间为下高原后4~5天;中长距离项目为10~14天;短距离项目为20~26天。我国游泳项目则多采取回到平原5~6周时参加比赛,以保证下山后能有较多的时间加强速度和力量训练。

高原训练的效果,下山后可保持3~5周的时间。而有的资料认为可保持45~50天。

(五) 训练效果评价

当前对高原训练效果的认识还不完全一致。许多研究认为,高原适应能明显促进有氧能力。但是高原应激和高原训练对返回平原的有氧能力和耐力的影响机理尚不清楚。目前多数认为,高原提高了局部循环和细胞代谢的适应,以及血液代偿性载氧能力的提高。此外,长时间的高原应激,呼吸系统的适应性变化在回到平原后不会马上消失。高原的低氧和训练的双重刺激对人体的作用,对提高周期性耐力项目成绩应该比平原有利。

高原适应提高了血液运载氧的能力。但长时间的高原应激对生理机能会出现一些负面的影响,例如体重下降、最大心率减少及每搏输出量减少,最大心输出量的减少将抵消来自血液载氧能力增加的受益。此外,在高原时是不可能以平原上的大强度训练,这就使得高原绝对训练的强度下降,上述种种因素可能会使运动员在平原时的竞技状态受到影响。

尽管当前对高原训练的效果认识还不完全一致,但是近几年来国内外的一些优秀选手通过高原训练在国际重大比赛中所取得的优异成绩就是很好的证明。目前世界各地高原训练基地的数量不断增加,质量不断提高,参与高原训练的项目也逐步增多。可见,高原训练正处于方兴未艾之势。

(六) 训练方法与手段

高原训练方法主要有高住低练法、间歇性低氧训练法和模拟高原训练法等。



1.高住低练法

高住低练法(Living high-training low, Hi-Lo)是由勒文(Levine,1991)最先提出的,就是让运动员在较高的高度上(2500米)居住,而在较低的高度(1300米)训练。这样,既可以充分调动机体适应高原缺氧环境,挖掘本身的机能潜力,又可达到相当大的训练量和强度。此种训练法已得到国际上的认可,并已应用于高原训练实践中。此外,还有低住高练法,即让运动员居住在较低的高度(1300米),在海拔较高的高度(2500米)进行训练;低住低练法则是让运动员居住和训练都在较低的高度(1300米);而高住高练法是让运动员居住和训练都在较高的高度(2500米)。

在以上的几种高原训练法中,高住低练法的效果最好,高住高练法次之。因为,高住低练除了可获得高住高练相同的训练效果外,其副作用远比高住高练要少,运动员易适应。但目前除了西班牙的内华达训练基地外,还没有很好的高住低练的基地。

2.间歇性低氧训练法

间歇性低氧训练法是十几年来在俄罗斯、英国和美国等国家逐渐发展起来的一种新的仿高原训练法。是采用呼吸气体发生器(氧分压有氧训练器)吸入低于正常氧分压的气体,造成体内适度缺氧,从而导致一系列有利于提高有氧代谢能力的抗缺氧生理适应,以达到高原训练的目的。

3.模拟高原训练法

芬兰学者拉斯考(Rusko,1995)提出“Hi-Lo”方案的“高原屋”,即让运动员生活在模拟海拔2500米高原状态的“高原屋”中,然后在1300米高度训练。目前这一高原训练计划已在芬兰、挪威、瑞典和中国等国家实施。还有,日本生产使用的是可移动的帐篷,帐篷内是仿高原环境。最近,美国又发明生产一种可调氧分压式睡仓(低压睡仓),它可提供1名运动员在仓内休息。这些仿高原训练法,既不需要高原训练基地,又免去往返迁移,同时使运动员机能潜力得到最大的发展,以期达到高住低练的效果。

第二节 热环境与运动能力

一、热应激与适应

(一) 热应激的生理反应

人体在运动时由于代谢产热和环境热两种因素的共同作用,使机体处于热应激状态。热应激(heat stress)会引起机体一系列反应与适应。

1. 心血管反应

在炎热环境运动时，体热的增加使体表血管扩张，皮肤血流量大大增加，约有 15%~25% 的心输出量将流过体表，较多的热量从身体内部传到体表，增强了辐射、传导和对流等的散热能力，可使末梢组织传导值增加 5~6 倍。

高热运动时，心率显著增加，最大心输出量和 $\text{VO}_{2\text{max}}$ 均下降。心输出量的减少主要是由于每搏输出量大大降低。而每搏输出量的减少可能与下列因素有关：①运动时血液重新分配，体表血流量增加使心脏的循环血量减少；②出汗增多，血液浓缩，血粘滞性增加，回心血量减少；③心率显著增加，心充盈时间缩短；④心脏温度升高，使心收缩力减弱，心率的代偿性增加不足以弥补每搏输出量的减少，因而在炎热环境运动时最大心输出量下降。

2. 发汗增加

在高温中运动时，出汗成为体热平衡的主要途径。运动开始后几秒钟就会出汗，30 分钟左右达到体热平衡。排汗增加以加快体热的散发。由于大量出汗而丢失一定量的 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Fe^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Zn^{2+} 和其他微量元素，使运动能力下降。

运动时出汗率主要受运动强度大小而变化，出汗率与运动强度呈正相关，也受运动持续时间、气温、湿度及适应程度等多种因素的影响。在炎热天气剧烈运动时，失汗量可高达 3 升/小时或 12 升/天。马拉松赛中，运动员出汗率约为 30~35 毫升/分，失水量超过 5 升，约占体重的 7%。

3. 尿量变化

运动中肾血流量和肾小球的滤过率减少；剧烈运动时大量出汗和呼吸道水分丢失使得尿量少或无尿。

4. 内分泌激素对应激反应

在热环境中，垂体释放抗利尿素以增加肾小管对水的重吸收，因而尿液浓缩，尿量减少；另外，肾上腺皮质释放醛固酮增多，也可以促进肾小管和汗腺对 Na^+ 再吸收，降低汗液中 Na^+ 浓度，从而有利于保持水和电解质平衡。

5. 代谢变化

在热环境进行次极限强度运动时，机体更多依赖无氧代谢，导致了乳酸过早堆积和糖原的储备量减少。乳酸堆积的原因可能有：①热环境运动时，由于肝脏血流量减少，使乳酸转化率下降；②用于体表散热的血流量增加，减少了肌肉的血液循环，造成了在热环境中运动时乳酸相对增多，疲劳过早出现。但也有人认为，在高热环境下运动时，高热环境对疲劳的影响比代谢变化的影响更重要。

6. 耐力下降

高温是在热环境下耐力的主要限制因素。不管是有训练者或无训练者，在高温环



境下运动时都会使耐力下降。但有氧能力水平高的人在高热环境下运动的耐力较无训练者好。有训练者在体温 39℃ 时出现疲劳,而无训练者是 38℃。

人体生活或工作的最适宜温度相当于室温 18℃~24℃。而在剧烈运动中,环境温度会给比赛成绩带来很大的影响。一般认为,短跑、跳跃及投掷等要求短时间内发挥爆发力的项目,其适宜温度为 27℃~28℃。马拉松等耐力运动的适宜温度则低些,马拉松最好成绩是在气温为 15℃ 以下时出现的。黑田等人认为,在高温下进行耐力运动时,体温调节机制是限制竞技能力的重要因素。

(二) 热服习

在高温与热辐射的长期反复作用下,人体在一定范围内逐渐产生对这种特殊环境的适应,称为热服习(heat acclimatization),也称为热适应。热服习主要表现在体温调节、水盐代谢和心血管机能等方面的改善,随适应发生的生理反应,结果是产热减少和散热增加。热服习的生理反应如下:

1. 出汗阈值下降、出汗率增加、排汗能力增强

热适应时最大出汗率由 1.5 升/小时增加为 2.5~3 升/小时,从而使散热增加。福克斯(Fox,1981)指出,无运动训练和对热不适应者的出汗阈高,在身体内部温度达到 37.7℃ 时,出汗反应开始。有运动训练但对热环境尚不适应者的出汗阈居中,在体内温度达到 37.5℃ 时出汗反应开始。在既有训练又对热适应者,其出汗阈值显著下降,体内温度达到 37.2℃ 即有出汗反应。运动训练提高了出汗反应的敏感性和出汗能力。

2. 肾脏和汗腺对 Na⁺重吸收增加

热适应时肾脏和汗腺对 Na⁺重吸收增加,汗液中 Na⁺浓度下降。Na⁺在体内保留使血浆和细胞外液的容量增加,内环境相对稳定。

3. 心功能改善,每搏输出量增加

热适应后由于心功能改善,心率减慢,每搏输出量增加,而心输出量及动脉血压基本上保持不变。同时,血液重新分配的改善,使皮肤血流量减少,肌肉血流量增多,提高了肌肉的工作能力。

在炎热环境中同时进行运动训练可加速热适应效果。热适应训练所需的时间与训练的气候条件和运动强度有关。如果运动员每天暴露在热环境中 2~4 个小时,5~7 天就可基本适应,10 天可以完全适应。在炎热环境训练期间,最初几次训练的负荷要小,持续时间约 15~20 分钟。然后,训练强度和时间逐渐增加。

二、热病及其预防

在高温环境下进行剧烈运动时,可因热造成危害而发生热病,如果对热病产生的因素有针对性地进行预防是可以避免的。热病包括脱水、热痉挛、热衰竭和中暑等。

（一）脱水

在炎热环境中剧烈运动几小时，由于大量出汗后血容量显著减少而致脱水。脱水可引起排汗率、血浆量、心输出量、最大摄氧量、工作能力、肌肉力量和肝糖原含量等下降。当脱水量占体重 2% 左右时，属于轻度脱水，以细胞外液丢失为主，血容量受影响，心脏负担加重，可影响运动能力。此时将引起渴感、尿少及尿 K^+ 丢失增加。失水量达到体重的 4% 左右时，为中度脱水，细胞内外液丢失量大致相等，会出现脱水综合症，表现为严重的口渴感、心率加快、体温升高、疲劳及血压下降等症状。这在足球、网球和长跑中极为常见。当失水量为体重的 6%~10% 时，即为重度脱水，细胞内液丢失的比例增加，并表现为呼吸频率增加、血容量减少、恶心、食欲丧失、厌食、容易激怒、肌肉抽搐、精神活动减弱甚至发生幻觉、谵妄和昏迷，对健康有严重的威胁。

随着脱水增加和血浆容量的降低，体温及心率会明显升高，心输出量下降。出汗每丢失 1 升水，运动时心率提高 8 次，而心输出量降低 1 升/分。脱水对运动能力的影响与运动员的“适应”程度有关。一般训练水平的运动员当失水量为体重的 2%~3% 时，即可影响循环机能和体温调节能力，运动能力和最大摄氧量受到明显的影响；而高水平已有适应能力的运动员，失水量达到体重的 5%，仍可无显著的影响。

（二）热痉挛

热痉挛常出现在剧烈运动中或运动后。主要是因为脱水和无机盐的丢失以及体液水平 and 电解质浓度不平衡所致。表现为肌肉痉挛、出汗多和疲劳，但体温尚正常。在运动中和运动后饮用足够的水及从食物中摄入足够的盐，就会有效地预防热痉挛。

（三）热衰竭

热衰竭常出现在对热尚未适应的人开始进行剧烈运动时。主要是由于循环系统的调节机能障碍和大量出汗导致细胞外液，尤其是血浆量减少造成的。血液储留在扩张的体表血管中，使中心血量及心输出量显著下降。表现为虚弱、脉搏加快、直立时血压低、头痛和头晕等，出汗可能稍减少，体温会有升高（通常低于 39.5℃）。出现热衰竭时应停止运动，并到阴凉处休息，补充水分，必要时输液。

（四）中暑

中暑是最严重和复杂的热应激疾病，是由于体温过高造成下丘脑热调节机能障碍而造成的。通常出汗停止，皮肤干燥而发烫，体温升高至 41.5℃ 以上，虚脱、意识丧失，甚至会导致死亡。出现中暑先兆时，应立即送医院治疗，并同时制冷降低体温，包括喝冷水、去除外衣、冰敷及冷水浴等。

（五）热病的预防

预防热环境训练时热病的发生，合理补液和预防过度脱水最为重要。在运动前后通过监测体重大致了解失水量进行补液，每减少 1 公斤体重表示脱水 450ml，或在运动前



20 分钟喝 400~600ml 的冷水；在运动中少量多次的补液，每隔 15~30 分钟补液 100~300ml，每小时的总补液量以不大于 800ml 为宜；在运动后的补液也应以少量多次为原则，并适当补盐。在热环境运动时适宜补液的指导方案如下：

1. 小于 1 小时的运动，在运动前的 0~15 分钟补充含 6%~10% 糖饮料，运动中补充的液体约相当于 1/2 出汗量的水分(水温在 5℃~15.5℃)。

2. 1~3 小时运动，建议运动前饮水 300~500ml，运动中补充 800~1600ml，含 6%~8% 糖和 12~20mEq(毫克当量)钠盐的饮料。

3. 大于 3 小时运动，运动前饮水 300~500ml，运动中每小时补充含 6%~8% 糖和 20~30mEq 钠盐的饮料 500~1000ml。

4. 恢复期中应摄取含糖 5%~10% 和钠盐 30~40mEq 的饮料以获得复合水。为使糖原合成率达到最大的恢复，在运动的最初 2 小时内，每小时的摄糖量最少应为 50g。

第三节 冷环境与运动

一、冷应激与运动

在低温情况下，如果风速和湿度越大，机体散热越多，冷应激(cold stress)对机体的影响就越明显。在冷环境中，机体是通过两种调节机制以防止体温下降的：一是通过寒颤以增加代谢产热；二是外周血管收缩，减少热量散失。如果这两种调节机制不能保持机体产热和散热的平衡，机体深部温度就会降低。

在低温环境中，体温下降会损害人体机能，也会影响运动能力。研究表明，温度每下降 10℃，神经传导速度降低 15 米/秒。局部温度为 8℃~10℃时，神经传导即完全阻滞。所以四肢受冷会伴随工作能力迅速下降；严寒的冷水应激还会使最大摄氧量和心率显著降低；冷应激会使皮肤血管明显收缩，使血流量从皮肤迅速转向中心循环，以维持机体内深部温度。但周围组织和皮肤热量减少，使手指和脚趾很容易冻伤；寒冷还会使骨骼肌的粘滞性增大，肌肉收缩速度减慢，动作灵活性和协调性变差，使工作效率下降，并容易发生运动损伤。

寒冷会导致免疫监视能力下降。对冬季项目的运动员及冷环境作业的人员来说，上呼吸道感染是疾病的主要原因，也是影响优秀速度滑冰运动员运动能力的原因。但人体实验研究表明，急性冷环境暴露对免疫球蛋白有刺激性影响，能增强免疫功能，在 5℃ 冷空气房间内暴露 2 小时，会导致机体中心体温的下降，使白细胞总数和粒细胞增多，自然杀伤细胞(NK 细胞)活性上升，以及循环血中白细胞介素-6(IL-6)水平升高。在冷空气暴露之前进行中等强度运动(有热储存)能进一步促进这些免疫指标的反应。并认为这种反应可能与血中去甲肾上腺素水平升高有关。

二、冷服习

研究表明,经常暴露在冷环境中,会加速机体对冷的适应。对冷适应(cold adaptation)的基本特征是寒颤产热减弱和外周血管收缩反应减弱。例如,职业潜水者如果每天潜入10℃的冷水中15分钟,就会产生冷适应,当口腔温度下降到约34℃时,他们仍能保持在水中活动。一般人在水温下降到28.2℃时,有50%以上的人出现寒颤。而潜水者此时才开始出现微弱的寒颤反应,说明冷适应的人寒颤阈值较高。长期生活在极端寒冷地区的人,基础代谢率比一般人高约25%。重复对手或脚进行寒冷刺激,会使流经这些部位的血流增加而提高局部的冷适应,防止组织由于低温造成的损害。

评定人体对冷的服习有三种基本方法:

第一种方法是测定产生寒颤的皮肤温度阈值。研究指出,处于较冷气温中几个星期后,寒颤发生推迟。冷服习的人可以增加非寒颤的产热过程以保证产热,使寒颤减轻。增加去甲肾上腺素的分泌,产生脱耦联的氧化磷酸化过程,即释放热而不生成ATP。

第二种方法是测量手和足的温度。未经服习的人随着处于冷环境中时间延长,手和足部的温度逐渐下降。已经服习的人能够保持基本正常的温度。

第三种方法是观察在寒冷中睡眠的能力。未经服习的人会因打寒颤而不能入睡。研究表明,服习到一定程度时便可以在寒冷中入睡,在寒冷中入睡的能力取决于增加去甲肾上腺素的分泌,使非寒颤产热过程增强。

第四节 水环境与运动

一、水环境与运动能力

水环境中的浮力、密度及导热性等特性,对人体生理功能及运动能力有较大的影响。这些影响主要表现在以下几个方面:

(一) 能量代谢

在水中活动能量消耗较多,比同样速度跑步时能量消耗大5~10倍。其原因是:①水的导热性比空气大25倍,所以在水里人体热量散失得快。例如,在12℃的水中停留4分钟所散发的热量相当于在陆地1小时所散发的热量。②水的密度比空气大,水的阻力比空气阻力大820倍。人体在水中的速度每增加2倍,则水的阻力就增加4倍,因此,游泳速度越快,所受到的阻力就越大,因而消耗的能量也就越多。水环境中运动的能量消耗还与水温、停留时间、体脂、游泳姿势及在水中运动适应的程度有关。水温越低,停留时间越长,消耗能量就越多。例如,在18℃和26℃的水中以同样速度游泳时,前者每分钟约多需500ml氧气。体脂越多,在水中不仅浮力好,且隔热效果好。所以女



子游泳时机械效率高男子，消耗的能量比男子低。另外，不同的泳姿能量消耗也有差别，以相同的速度游泳时，爬泳的能量消耗大于蛙泳。

（二）呼吸机能

在水中运动对呼吸机能的影响较陆上深刻。肺活量大是游泳运动员一大特点，最高可达 7300ml，比同龄同性别的普通人高 10%~20%。这是由于水的密度比空气大，在齐胸深的水中，胸部承受 12~15kg 的压力，使呼吸较为困难。长期锻炼，使呼吸系统产生了良好的适应，从而提高肺活量。另外，游泳时呼吸的节律必须和动作相结合，不能随意加快呼吸，因此，要提高肺通气量就必须加大呼吸深度。经常在水中锻炼可使换气效率和摄取氧的效率提高。

（三）心血管机能

游泳时的体位及所处的特殊环境对循环功能也有良好的影响。游泳时水平的体位使静脉血较易回到心脏，因而静脉回流量会增加。游泳时呼吸加深，加强了呼吸运动对静脉回流的抽吸作用；肌肉有节律的舒缩活动，对静脉有挤压作用（唧筒作用）；水对皮肤的压力，对小血管有按摩作用。这些因素都有利于静脉回流。

在极限下强度游泳时，心率、心输出量和每搏输出量随着速度加快而增加。极限强度游泳时，心率明显地低于极限强度跑。运动员游泳时的最大心率比跑时平均低 10~15 次/分，男子跑时最大心率约 200 次/分，而游泳为 185 次/分，女子则分别为 200 次/分和 190 次/分，游泳时动脉血压要高于跑步，这可能是由于水对身体的压力增加及水温较低，使皮肤血管收缩、外周阻力增加所致。

二、对水环境的适应

人在 28℃~30℃ 的冷水中就会产生寒冷应激，通过体温调节功能，从而维持正常生理状态。经常在水环境中活动，会对水环境逐渐适应，使产热和散热过程得到改善，体温调节能力提高。游泳时水温较低，体温调节功能会发生一系列变化，大致可分四个阶段。第一阶段，刚入水，冷的刺激反射性地引起皮肤毛细血管收缩、皮肤发白、散热减少、产热加强（发白阶段）；第二阶段，皮肤血管反射性舒张，血液流向皮肤，皮肤发红，有温暖感觉（发红阶段）；第三阶段，如果持续在水中停留过久，身体散热过多，会出现寒颤，以加强产热过程（发抖阶段）；第四阶段，若继续停留太长，引起小动脉收缩，小静脉扩张，血液滞留在皮下静脉中使皮肤和嘴唇紫绀（发紫阶段）。其中第二阶段是机体对寒冷的适应阶段，此时体内热量可提高 3~4 倍。寒颤是体温消耗过度的信号，所以在身体感觉寒冷时应上岸擦干身体，做些轻微活动以加强产热。如不采取保暖措施，勉强坚持锻炼，将会发生不良反应，容易导致感冒。在水环境中的急性适应过程随训练程度、体质强弱及对水环境冷刺激的适应能力而不同。进行长期游泳训练，运动员的体温调节机能提高，对低温冷水的适应能力增强。

【小结】

1.随着海拔高度上升,大气 PO_2 逐渐下降,最终将导致血红蛋白载氧能力不足。使2000米以上高原有氧活动成绩明显受影响。而依靠 ATP—CP 供能的短时间冲刺和爆发力的运动,则不受高原应激的负面影响。

2.高原 PO_2 下降和缺氧会刺激机体产生适应生理反应。主要的急性反应包括肺通气过度、心率加快及心输出量增加。长期适应包括体液酸碱平衡的重新建立、血红蛋白和红细胞增多等。高原适应的速度与高原的高度有关。进行高原训练的最佳高度为2000~2500米,最适宜的持续时间应为4~6周。采用高住低练法和仿高原训练法会加快高原适应,提高机体的机能潜力。

3.运动时身体深部温度会升高,且与运动强度相关。过量出汗会导致脱水,如果不及及时补液,血浆量会下降。当体液丢失达到体重4%~5%时,可妨碍热量的散发,降低心血管机能及运动能力。运动时补液的目的是维持血浆量,使体液的代谢平衡。反复热应激可以提高体温调节功能,提高运动能力。热适应能导致心输出量更好分配,使出汗效率大大提高。完全的热适应约需要两周左右。热病主要包括热痉挛、热衰竭和中暑。

4.冷应激时机体是通过寒颤和外周血管收缩来调节机体的产热和散热平衡的。体温过低会使运动员的运动能力受影响。长期暴露在冷环境会产生冷服习,其特征是寒颤产热作用及外周血管收缩反应减弱。

5.由于水环境的物理特性影响,在水中运动的能量消耗较陆上项目多。肺活量大是游泳运动员一大特点。极限强度游泳时最大心率明显低于极限跑。游泳时水温较低,人的体温调节机能会发生一系列变化,即所谓的“发白阶段”“发红阶段”“发抖阶段”和“发紫阶段”。

【思考题】

- 1.高原应激对人体生理功能及运动能力有哪些影响?
- 2.简述高原训练时生理功能产生的一些适应性变化。
- 3.影响高原训练效果有哪些因素?
- 4.热应激时会出现哪些反应?
- 5.试述热服习时的生理反应。
- 6.冷应激时机体是通过哪些机制进行调节的?冷服习时,这些调节反应又会发生哪些变化?
- 7.评定人体冷服习的基本测验方法有哪些?
- 8.试述水环境对运动能力的影响。
- 9.在冷水环境中,体温调节功能会发生哪些变化?

【主要参考文献】

- 1.冯连世:《高原训练及其研究现状》,《体育科学》,1999年第5期、第6期。
- 2.常芸:《第三届奥林匹克世界体育科学大会简介》,《中国运动医学杂志》,1996年



第1期。

- 3.曲绵域等主编:《实用运动医学》,北京,北京科学技术出版社,1996。
- 4.乔奇 A.布茹克司著,杨锡让等译:《运动生理学》,北京,北京体育大学出版社,1988。
- 5.石井喜八等著,王起然译:《运动生理学概况》,北京,人民体育出版社,1988。
- 6.William D.Mcardle,et al.Exercise Physiology William&Wilkins,1996。
- 7.佩尔-奥洛夫·奥斯特朗等著,杨锡让等译:《运动生理学》,北京,人民体育出版社,1982。
- 8.邓树勋等主编:《运动生理学》,北京,高等教育出版社,1999。
- 9.杨锡让主编:《实用运动生理学》,北京,北京体育大学出版社,1998。
- 10.Jose,Gonzalez-Alonso,et al.Influence of body temperature on the development of fatigue during prolonged exercise in the heat.J.Appl.Physical,86(3),1999.
- 11.Brenner,I.K.M,et al.Immuue Changes in humans during cold exposure:effects of Prior heating and exercise.J.Appl.Physecal.87(2),1999.
- 12.John W.Castellani,et al.human thermoregulatory responses during serial cold-water immersions.J.Appl Physical.85(1),1998.

(广州体育学院 龚惠兰)



第十五章

运动机能的生理学评定

【提要】本章主要介绍长期运动训练对人体各机能系统产生的影响,以及人体运动机能的生理学评定的基本原理和方法。

长期科学的运动训练可以显著改变人体各器官、系统机能水平,特别是与运动能力密切相关的系统(如运动系统、循环系统和呼吸系统等)。人体各器官、系统机能水平的高低与运动能力密切相关。为了获得最佳的运动训练效果,我们可以通过运动机能的生理学评定,定期测量和评价各器官、系统对运动训练的反应等手段来获取有关的反馈信息,并据此及时调整训练计划,使运动训练达到最优化。运动训练后机体的恢复程度也可以通过生理机能评定进行监测。

第一节 运动训练对机体机能的影响

长期系统的运动训练对人体各器官、系统的形态、结构和机能水平都会产生影响,从而形成独特的运动员形态和机能特征。如果用临床医学的诊断标准来评价运动所引起的身体形态和机能变化,能得出许多不利于运动员的诊断结论,甚至将由于运动所引起的心脏结构和机能变化称之为运动员心脏综合症。越来越多的研究表明,运动员形态和机能的变化是机体对运动负荷的主动适应的结果,是身体机能水平提高的表现,并提出运动员心脏和肌肉功能性肥大、运动性心动徐缓等针对运动员生物学特征的专业术语。因此,不能将运动引起的身体形态和机能变化以综合症定位在病理范围内。由于长期系统运动所形成的运动员生物学特征可表现在安静状态、运动过程中和运动后的恢复期,并因其运动项目特点而表现出不同的特征。

一、安静状态下运动员的生物学特征

(一) 骨骼特征

骨由骨矿物质和骨基质两大部分组成。通过测定血、尿中的钙、磷等矿物质含量可间接了解骨代谢状况。运动训练对骨骼的影响主要表现在骨密度(BMD)的变化方面。运



动训练中的骨密度变化正为人们所重视。不同的运动项目由于对骨的刺激作用不同,骨密度亦表现出不同的变化特点。力量性运动项目,如举重运动员的骨密度最高,其身体各部位的骨密度绝对值都高于其他项目运动员和普通人;而耐力性运动项目的骨密度最低,有研究表明甚至低于正常人。究其原因,可能为过量运动使女子运动员血中雌激素水平和男运动员血中雄激素水平降低,使骨代谢过程中骨的吸收大于骨的形成,从而使骨密度降低。此外,运动员不同身体部位的骨密度亦有所不同,网球运动员持拍手的骨密度高于非持拍手,足球运动员股骨近端骨密度远高于身体其他部位。研究提示,运动可能对受刺激部位的骨骼产生局部影响。

(二) 骨骼肌特征

运动对骨骼肌的影响主要表现在肌肉的功能性肥大和肌力增加。肌肉功能性肥大的主要机制可能与运动导致肌肉组织的卫星细胞、生长因子和 RNA 等细胞和物质的增加有关。卫星细胞分布在细胞外膜与基膜之间,主要作用是促进肌肉中新细胞核生成从而修复损伤肌肉或促进肌肉肥大。生长因子的作用主要是刺激卫星细胞分裂与激活。RNA 的主要作用是加强肌肉收缩蛋白的合成,促进肌肉肥大。实际上,运动对肌肉的影响是通过肌肉的物质消耗、结构损伤、修复和再生等过程使肌肉在结构和收缩力量等方面出现超量恢复,从而促进肌肉功能性肥大和肌肉力量增加。

(三) 血液循环特征

运动员的血液指标与一般人相比并无明显差异,仅在某些项目如耐力性项目的运动员中会出现红细胞和血红蛋白值有所增加、个别酶活性高于常人的现象,而在心血管形态和机能方面则表现出明显的不同于常人的特点。运动员的心脏表现为功能性肥大,主要是心肌的肥厚和心腔扩大。有人研究了滑雪、滑冰、划船、摔跤和径赛等项目 226 名运动员的心脏结构,发现心脏出现明显肥大者占 74%,其中左心室肥大者占 40.9%,左右心室均肥大者占 33.1%。进一步研究表明,力量性运动主要导致心肌的肥厚,心腔扩大较小,甚至有研究提出力量训练导致心脏出现向心性肥大;而耐力性运动主要表现为心腔的扩大,心肌也出现一定程度的肥厚,但肥厚程度远小于力量项目;速度类项目运动员的心脏没有力量和耐力项目运动员变化大。运动性心脏肥大与临床上的冠心病、肺心病及风湿性心脏病等病理性心脏肥大有本质的不同,主要区别在于运动性心脏肥大同时,心肌收缩性和心脏泵血功能得以提高,每搏输出量明显高于普通人,心力贮备也大大提高,停止运动负荷刺激后其结构和机能具有可恢复性。在电镜下可见心肌细胞线粒体密度增加,肌节增长,肌球蛋白含量明显增多,心肌毛细血管的数量增加等情况。此外,心肌 ATP 酶活性提高,肌质网摄钙能力增强。而病理性心脏肥大则伴随着心肌收缩性、舒张性及泵血功能显著降低,且肥大的发生是不可逆的。

在心肌收缩性和心脏泵血功能方面,安静时运动员心脏出现明显的心动徐缓现象,一般都低于正常值下限,有的运动员心率只有 40~50 次/分甚至更低,但同时,其每搏输出量则明显高于普通人。安静时运动员的每分心输出量与一般人无明显差异,但普通人是较高的心率和较低的心率来保证机体供血,而运动员则是以较低的心率和



较高的每搏输出量来保证供血，这一方面降低了能量消耗，同时为提高心力贮备提供了可能。因此，若甲、乙两人心输出量同样为4升/分，甲的心率为50次/分，每搏输出量为80ml，而乙的心率为80次/分，每搏输出量为50ml，那么说明前者的心泵功能优于后者，因为保证同样的供血，前者所需能量更少，表现出能量节省化。

（四）呼吸机能特征

安静状态运动员的肺活量明显高于普通人，呼吸频率减少，呼吸深度增加，但肺通气量一般并无差异。一般人安静时的呼吸频率为12~18次/分，呼吸深度约为500ml，而运动员可降至8~12次/分甚至更少，呼吸深度可达1000~1500ml。因此，虽然同样的肺通气量，由于运动员的肺泡通气量更大，其通气效率更高。

从以上介绍可见，运动员在安静状态下机能系统表现出自身特征，在总体上体现出经济实用的能量节省化。

二、运动时和恢复期运动员的生物学特征

运动员在机能动员、完成定量负荷和最大负荷时的机能变化等与一般人相比有明显的特点。

运动员在开始运动时的机能动员较无训练者快，表现在各系统的机能进入工作状态阶段短，极点症状反应较小，能较快地进入稳定状态；参与运动的肌群协调性和节奏感好。呼吸运动的节律和呼吸深度能很快适应运动形式。

在完成定量运动负荷时，运动员更表现出与普通人较大的机能差异。首先，完成同样的负荷，运动员肌肉活动的程度较小，主动肌、协同肌和对抗肌能较好地协同工作，因而，肌电放电节律清晰，肌电振幅和积分值较小。而普通人由于动作协调性和熟练性较差，在完成运动时主动肌、协同肌和对抗肌的紧张性增加，表现出肌电节律紊乱，振幅和积分值较大。主动肌在运动时需要消耗更多的能量，做更大程度的收缩，才能克服主动肌、协同肌和对抗肌不协调所造成的干扰，保证动作的完成。另外，运动员在完成定量负荷时的心肺功能变化亦较小，表现在心率提高幅度和呼吸频率增加较小，但每搏输出量和呼吸深度则增加较多。这表明运动员较一般人有较高的通气和泵血效率。有研究表明，高水平耐力项目运动员和普通大学生同样完成100瓦负荷后，两组受试者的心率分别增加38.2次/分和47.8次/分，而每搏输出量分别增加24.9ml和9.5ml，当负荷增加到150瓦时，两组心率分别继续增加了15.6次/分和21.7次/分，每搏输出量运动员继续增加4.3ml，而普通人的每搏输出量则有所减少。

在完成最大运动负荷时，机体需全力以赴去克服运动阻力，此时，运动员表现出远远高于普通人的机能水平。一方面肌肉的最大做功量和做功效率明显高于普通人，能克服更大的运动阻力。另一方面，作为衡量机能水平重要指标的最大摄氧量，普通人只有2~3升/分，而优秀的耐力运动员可以高达5升/分以上，这可保证运动员在高强度运动状态下，能获得较多的氧气供机体代谢所用。在运动时，运动员的心力贮备充分动员，主要表现在心率增快和心输出量增加，心率最高时可达200次/分以上。优秀运动员最大



每搏输出量出现在心率为 140~160 次/分时,且能维持此水平到最高心率,因此,心输出量可高达 35~45 升/分以上。而普通人最大每搏输出量出现在心率为 120~130 次/分时,且当心率超过 150 次/分时,每搏输出量出现明显减少,因而最大心输出量仅能达到 20 升/分左右。

运动结束后,运动员的机能恢复比一般人快。研究表明,完成同样的运动负荷,运动员肌肉的收缩能力,心肺功能指标,如心率、心输出量及肺通气量等恢复的绝对值和相对速率都快于一般人,血乳酸消除速率也较一般人更快。

由上述可见,长期系统的运动训练能使运动员机体机能对运动产生适应性变化,与一般人相比,表现在安静状态机能水平较低,开始运动时机能动员较快;定量运动负荷时机能变化幅度较小,最大运动负荷时机能水平较高以及运动后机能恢复较快等。

第二节 影响运动训练效果的因素

一、运动的强度、频率和持续时间

运动强度、持续时间和练习次数(运动频率)是构成运动量的三大要素,只有在运动量超过原来的水平时才能导致人体产生适应性变化,出现超量恢复,显现运动效果。但是,运动练习或训练负荷的安排是多种多样的,不同的安排可产生不同的效果。关键是要看身体各器官、系统参与运动的程度,参与得越多出现的适应性反应就越大,机能提高的可能性也就越大。

二、遗传因素

人体的机能能力与遗传因素密切相关。例如,有氧能力为 93%、乳酸能力为 81%、最高心率的 86%都取决于遗传。再如肌纤维类型和数量也是由遗传决定的,到目前为止的研究表明,运动训练对改变个体快、慢肌百分组成的作用较小。因此,在评定运动效果时还要参照运动员的先天条件,并及时发现人才,扩大训练效果。

在后天的体育和训练过程中,教师和教练员可发挥两方面的作用:①通过训练以发掘运动员的全部遗传能力;②根据运动员的遗传特征,使其有机会参加最适合于本人遗传能力的专项训练和比赛。同时还要善于根据运动员的遗传特征制定出具有针对性的训练计划。

三、年龄和性别差异

年龄和性别对运动效果的影响是显而易见的。对于女性不可避免要涉及月经周期、妊娠和分娩等问题。对此,福克斯提出了对以下几个问题的看法:①运动对月经周期无

明显影响；②大多数青年女运动员月经正常，而月经也不影响运动成绩；③女运动员妊娠及分娩时，并发症较非运动员少；④分娩后 1~2 年运动成绩可恢复到原先水平，有些甚至还能再提高；⑤妊娠本身对参加运动无副作用，运动对妊娠也无不良影响；⑥女子即使参加足球或摔跤等运动项目的比赛，发生胸部和内、外生殖器官损伤的事件也是极少的。但也有一些研究对上述问题持不同见解，因此还须慎重考虑。

成年人随年龄增长身体工作能力有下降趋势，主要原因是自然衰老所致，坚持体育运动可以延缓工作能力的下降，经常参加体育运动的人的身体工作能力显著大于不经常运动的人。

四、生物节律因素

生物节律理论认为：机体机能之所以呈现周期性变化，乃是在遗传等因素的影响下，在长期进化过程中为适应生存环境的变化而形成和完善起来的。因此，生物节律特征绝非一成不变。研究证明，生物节律与工作能力、训练效果和运动成绩密切相关（详见第二十章第二节）。

第三节 人体机能评定的方式

通常对人体运动机能的评定采用横向比较和纵向追踪两种方式。

一、横向比较

横向比较是指将某一个体与其日历年龄相同的群体进行比较。同样日历年龄的人体由于其生理机能方面的差异，可能表现出不同的生物年龄，使其生物年龄可能大于或小于日历年龄。横向比较的主要依据就是人体的生物年龄，通过体现个体与所在群体之间生理机能水平差异来进行机能评定（日历年龄和生物年龄的概念见第十八章第一节）。

二、纵向追踪

机能水平的纵向追踪是指通过对同一个体在不同时间段的身体机能的比较来评价其机能水平变化。纵向追踪以前后比较结果作为评定的依据，可能出现被测者的机能水平明显高于相同日历年龄群体的机能水平，但自身比较前后测试结果，出现机能状态下降，则其评定结果将趋否定。反之，被测者机能水平可能低于同日历年龄群体，但第二次测试结果明显优于第一次，其机能评定结果仍趋肯定。可见，机能评定须将横向比较和纵向追踪两者结合考虑方能得到较为客观的评价结果。



三、不同机能状态的机能水平比较

在人体机能评定中,还有一种评定方式,就是对同一个体或不同个体处于不同身体机能状态下各种机能指标变化进行分析比较,并据此作出评价。有些机能指标如心输出量、摄氧量、无氧阈和血乳酸值等,在安静状态下运动员与一般人相比,常常表现不出明显的差异,需要完成定量或最大运动负荷,才能显示出在运动中和恢复期间彼此的差别。因此,运动实验是人体机能评定尤其是运动机能评定极为重要的部分。

第四节 人体机能评定的常用指标

一、身体形态学指标

身体形态学指标主要有身高、体重、坐高、胸、腰和臀等部位相关围度及皮褶厚度等。通过测定身体的形态学指标可以了解身体的一般情况。

二、生理学评定指标

人体运动机能评定所采用生理指标主要分别在运动、循环、呼吸和中枢神经等系统。

(一) 运动系统

运动系统的生理学指标主要有肌肉力量、肌电图和关节伸展度等。

1. 肌力

肌力评定主要包括最大肌力、爆发力和肌肉耐力等,有等长力量、等张力量和等动力三种形式。

等长力量又叫静止力量,常采用测力计完成,在测试过程中肌肉或肌群做等长收缩,无关节活动。此方式主要了解在某一固定关节角度时肌肉或肌群所能克服的最大阻力负荷(最大肌力)或克服最大阻力的70%的最长时间(肌肉耐力)。

等张力量又叫动态力量,常用测力计、杠铃、哑铃及力量练习器械来测定。其最大肌力的测定是以受试者能克服一次最大阻力值来表示(1RM),在克服所给予阻力后,休息2~3分钟后再克服新的阻力值,通常每次增重不超过2~4公斤,直到最高阻力值。其等张耐力的测定通常以能持续克服最大等张力量70%负荷的次数作为评定指标,通常一般人可连续完成12~15次,而运动员则可完成20~25次。

等动力量的测试需要利用专门的等动测力计完成,它与等长力量和等张力量的区别

在于：等长力量只能测出某一关节角度的最大肌力，等张力量只能测出肌肉收缩过程中关节处于最不利收缩角度时的最大肌力，在其他收缩角度时所测出的肌力都小于最大肌力；而在等动力量的测试过程中，由于运动阻力是随关节活动而不断变化并自动调节的，因而只要肌肉进行最大收缩，就可准确测出肌肉或肌群在整个运动范围的最大肌力。因此，利用等动练习器进行训练，可发展肌肉各收缩角度的最大肌力。

2. 肌电图

肌电图(EMG)是通过肌电仪将肌纤维兴奋时所产生的动作电位进行放大记录所得到的图形。通过计算机可对其进行振幅、频域和时域分析，从而对肌肉兴奋程度和机能状态进行评定，其详细内容可见第一章。

3. 关节的伸展度

通过测定受试者的相关关节的活动幅度，可以评价运动员的柔韧性。

(二) 循环系统指标

循环系统指标主要包括心脏形态、结构和心血管功能方面的指标。

反映心脏形态和结构的指标在机能评定中发挥重要作用，主要有心脏体积、心肌重量、心腔容积、左心室后壁和心室间隔厚度等指标。心脏结构指标与心功能指标结合用于循环机能的评定，采用的测定手段主要是超声心动图(UCG)，它能直观准确地测量出心室肌厚度和心室腔内径，并据此推算出心肌重量和其他心功能指标，是目前较为理想的无创性心脏结构和功能测试手段。此外，核磁共振技术亦可用于心脏形态和结构的测定。

反映心血管功能的指标在机能评定中也具有重要作用，主要有心率、心电图(ECG)、心输出量、心指数、每搏输出量、心力贮备、射血分数、心肌收缩性、心肌舒张性和动脉血压等。这些指标可以通过遥测心率计、心电图仪、多道生理记录仪、超声心动仪、核磁共振仪和血压计等仪器测得。经过长年系统训练的运动员与一般人相比，其心脏结构和功能都表现出自身的特点，形成通常所说的“运动员心脏”。

(三) 呼吸系统和能量代谢指标

呼吸系统机能指标主要有肺活量、时间肺活量、肺通气量、最大肺通气量、摄氧量、最大摄氧量和呼吸肌耐力等。这些指标可通过肺活量计和气体分析仪等仪器设备测得。在测定上述指标过程中，通过气体分析仪还可测得反映机体能量代谢情况的指标，如呼吸商(RQ)、无氧阈(AT)等。

(四) 神经感觉系统机能指标

该方面的指标主要有简单视—动反应时、简单听—动反应时、综合反应时、视觉闪光融合阈值、肢体平衡机能、双手协调机能、前庭器官稳定机能、视深度(立体视觉)和肌肉本体感觉等。上述指标可通过反应时测定仪、闪光融合仪、平衡测力台、双手协调



仪：一维或三维旋转仪、视深度仪及肌肉本体感觉仪等仪器测得。

三、其他机能评定指标

在机能评定中还常通过专门仪器测试运动医学和运动生物化学方面的指标，如血乳酸值、尿蛋白值、血红蛋白、血尿素及睾酮等相关激素水平及与代谢有关的酶类活性。此外，尚有心理方面的指标，如注意分配实验等，与生理学指标共同对被试者作出较全面的机能评定。

四、机能评定的一般步骤

(一) 明确机能评定目的及范围

机能评定的范围很广，测试指标内容繁多，运动员、普通健康人、伤病康复者等不同受试者所测内容各异，测试目的亦不同。运动员机能测试通常是为了解最大机能水平，所用运动负荷强度很大，常处于极限或亚极限运动状态；普通健康人机能评定通常是完成同年龄群体机能测试内容，以了解自身的生理年龄和机能状况；伤病康复者通常是了解受伤部位机能恢复情况或病愈后相关机能水平。因此，应根据被测者实际情况予以分别处理。在确定测试范围时首先要了解测试者的年龄、性别、职业，身体基本状况及测试目的，才能确定其具体的测试项目。

(二) 常规健康检查

常规健康检查主要了解被测者基本身体状况和有无运动禁忌症等。健康检查的内容和项目较多，应因人因条件不同而异。一般应包括下列项目：一般史(既往病史和生活史)、运动史、体表和肌肉骨骼检查、人体测量、各系统和器官检查、心肺机能试验和心电图等。其检查重点是肌肉骨骼系统、心血管系统、神经系统和心理状态。

(三) 机能测试过程

机能测试与评定通常遵循以下步骤完成，其具体测试内容因人而异。

首先，被测者填写基本情况表，由主测者询问相关情况。然后，进行受试者安静状态指标测试(身高、体重、形态学指标、运动系统指标和其他系统的指标)，运动状态指标测试(一般运动机能水平、最大运动机能水平和康复运动机能水平)和恢复过程机能测试(机能恢复速率、绝对恢复值和相对恢复值等)。

(四) 评定报告及运动处方和膳食处方

根据所测结果对被测对象身体形态和机能状态作出全面客观的评价，并结合其实际情况提出与身体状况相适应的运动方案和饮食建议，供受试者了解和应用。

第五节 适宜运动量的生理学评定

运动效果的生理学评定应着眼于远期效果。但远期效果是日常运动训练效应的积累所产生的质的飞跃。因此,没有经常定期的检查评定和对计划与方案实行反馈调整或再调整,就不能保证获得远期效果。

运动量的安排是否得当,是能否取得运动效果的前提。运动量怎样才算适宜,目前尚无衡量的标准模式。运动员的身体状况千差万别,个体间或个体在不同机能状态下,对运动量的负担能力皆不尽相同。评定运动量是否适宜最好通过多途径、多指标和多学科进行同步测试,再做综合分析。至少应包括以下几方面的材料。

一、生理指标的检查

运动训练对人体机能引起的深刻变化,即使是大运动量也必须在2~3天之内恢复。为了及时掌握恢复情况,一般在早晨起床前后的基础状态下进行各种简易指标的测试(如脉搏、呼吸及血压等),至少每周周末安排一次检查。为了得到较多指标,还可以进行多次检查和一些特殊指标的测试。平时,为了简便易行也可仅查记每天的晨脉。如运动量适宜,晨脉变化每分钟不超出正常值的3~4次;血压变化范围上下在10mmHg以内;体重减少不多于0.5公斤。数日内如有脉搏、血压明显的持续上升或肺活量、体重等明显的持续下降,则说明运动量偏大,有疲劳积累的征兆。

了解高级神经活动的变化是评定适宜运动量的又一个方面,可用反应速度和建立分化抑制的准确程度来评定皮质机能的恢复情况。如反应速度不变或加快,分化能力不变或提高,视觉基强度不变或下降,说明皮质机能恢复良好。反之,则说明由于运动量偏大,运动员没有得到良好的恢复,疲劳尚未消除。再如感官的阈限和平衡觉等机能变化也都能反映疲劳消除的程度。

在有些运动项目中,身体局部负担很大,但整体反应并不明显,其结果往往导致局部疲劳积累,进而可造成局部肌肉出现慢性劳损。为此,可用肌电图研究肌肉活动的潜伏期。即当看到刺激信号时肌肉做快速收缩;而当收缩期间看到刺激信号时做快速放松。研究发现,未消除疲劳的肌肉,收缩和放松的潜伏期均延长,尤以后者最为突出。

运动心电图试验是近年来广泛用于判断疲劳程度的重要指标。研究表明,过度疲劳时心电图发生变化的阳性率达50%。过度疲劳时做运动试验,心肌代谢率发生异常变化,中枢神经系统机能失常,并有兴奋性增高或降低两种趋势的变化。

此外,诸如肺的最大通气量、尿的成分、气体代谢及体温等指标的变化,也都可以作为观察疲劳消除的依据。

根据上述指标的变化,一般说来,小运动量导致的疲劳在24小时之内即应消除,而大运动量后的恢复一般不宜超过3天。

出于评定身体素质和评定长期身体训练状况的需要,还可采取不同强度的负荷进行



多级测试。如第一次负荷（可按照受试者最大摄氧能力的40%），工作6分钟之后，测出此时的摄氧量、心率和心输出量等指标；接着进行第二次负荷（按受试者最大摄氧能力的70%），工作也是6分钟；然后休息10分钟；第三次负荷，采取重复第一次负荷的工作量，此时将测得的摄氧量、心率和心输出量等数据与第一次负荷的数据进行对比。研究发现，不同恢复速度的受试者，各指标的反应各不相同。训练好、恢复快的受试者，第一次和第三次负荷的变化幅度几乎完全相同；机能状态不好的受试者心率显著提高，每分钟增加20次以上，每搏输出量也相应减少。受试者的机能状态越好，心率增加越少。

二、运动员的自我感觉及教育学观察

疲劳程度不深时，运动员主观感觉的变化不大，食欲和睡眠也都正常，微感困倦思睡，缺乏完成训练任务后所出现的安慰感。如在此基础上继续追求大运动量，可能造成疲劳积累，久之，运动员即可产生许多异常感受，如食欲不振、不易入睡、多梦、乏力、易汗、心悸、自信动摇以及对体育场地、器材、练习信号产生厌恶感等等。这就是不合理的大运动量训练所致的过度疲劳，此种现象易于在自觉性高、意志力强的运动员身上发生。在检查运动员的训练日记时，应予以重视，以便作出防患于未然的调整。

在疲劳继续发展的过程中，教师和教练员还可应用教育学指标对运动员进行观察。即运动员在训练过程中是否出现烦躁不安、脸色苍白、眼光无神、表情淡漠、反应迟滞、协调性差、注意力不集中以及运动成绩明显下降等。哪怕只有部分现象出现，也都意味着疲劳积累已经到达非调整运动量不可的地步了。

【小结】

1. 人体机能评定方法可以应用于运动员选材、运动员机能水平评价、训练效果评价、适宜运动量监控和大众健身效果评价。

2. 运动员与普通人相比，在安静状态下、运动过程中和运动后恢复期都表现出特有的生物学特征，总的表现为安静状态机能水平较低、开始运动时机能动员较快、定量运动负荷时机能变化幅度较小、最大运动负荷时机能水平高以及运动后机能恢复较快等。

3. 影响运动效果的主要因素包括运动强度、持续时间、练习频率、性别、年龄、遗传和生物节律。

4. 人体运动机能的评定分横向比较和纵向追踪两种方式。横向比较是指将某一个体与其日历年龄相同的群体进行机能指标比较，了解个体的生物年龄与日历年龄的符合程度；纵向追踪是对同一个体在不同时间段机能状态的变化比较。机能评定须将横向比较和纵向追踪两者结合并考虑不同机能状态的机能水平，方能得到较为客观的评价结果。

5. 人体机能评定主要涉及形态学和生理生化指标，评定内容重点在肌肉骨骼系统、血液循环系统、呼吸系统、能量代谢系统和神经系统等方面。

【思考题】

1. 简述运动员安静状态下的生物学特征。
2. 运动员与普通人相比,在完成定量运动负荷和最大运动负荷时机能水平变化有何不同?
3. 试述机能水平的横向比较和纵向追踪的特点及不足。
4. 机能评定的常用生理学指标有哪些?
5. 举例说明人体机能评定的方法。
6. 如何根据机能评定结果监控运动量。

【主要参考文献】

1. 浦钧宗等:《优秀运动员机能评定手册》,北京,人民体育出版社,1989。
2. 体育院校通用教材《运动生理学》,北京,人民体育出版社,1996。
3. 科查主编、王步标等译:《运动生理学》,长沙,湖南师范大学出版社,1991。
4. 乔奇 A.布茹克司、杨锡让等译:《运动生理学》,北京,北京体育学院出版社,1988。
5. 佟启良等:《运动生理学》,北京,北京体育学院出版社,1991。
6. 奥斯特朗等著,杨锡让等译:《运动生理学》,北京,人民体育出版社,1982。
7. 范振华等编著:《运动医学》,上海,上海医科大学出版社,1991。

(成都体育学院 苏全生)



第十六章

儿童少年生长发育与体育运动

【提要】本章主要介绍儿童少年生长发育的一般规律，影响儿童少年生长发育的主要因素，儿童少年解剖生理特点，儿童少年身体素质发展的一般规律，以及如何根据儿童少年生长发育规律和解剖生理特点正确指导体育教学、运动训练和运动员选材。

第一节 儿童少年生长发育

一、基本概念

(一) 生长

生长是指人体随着年龄的增长，机体内细胞增殖、增大和细胞间质增加，整体上表现为组织、器官及身体形态和重量的变化，以及身体化学组成成分改变的过程。关于对生长的认识，是随着生物学的发展而变化的，早期的认识主要局限于机体整体或局部的变化；进入细胞生物学时期，则包含了细胞大小和数量的改变；在分子生物学有着巨大发展的今天，生长还包含了身体组成的化学成分的变化，即化学的生长。

(二) 发育

发育是指人体随着年龄的增长，各器官系统的功能不断分化和完善，心理、智力持续发展和运动技能不断获得和提高的过程。发育通常涉及人体达到成熟过程中所出现的一系列变化，例如，在胚胎期器官和组织的分化，出生后循环和呼吸功能的发展，消化功能逐渐建立等。

生长和发育有着不同的概念和内涵，然而在人体生长发育过程中两者是相互依存的，在有些场合两个词可以相互替代，例如，将身高生长说成是身高发育；而另一些场合，则不能替代，如性发育不能说成是性生长，通常用发育替代生长的情况较为多见。

(三) 成熟

人体进入成熟期就意味着生长发育的结束。机体在形态和机能等方面达到成人水

平,表现为身高、体重达到一定水平,各系统功能基本完善,骨骼牙齿的钙化基本完成,性器官具有繁殖子代的能力等。

二、儿童少年生长发育的一般规律

(一) 生长发育的量变和质变规律

人体生长发育是从婴儿、幼儿、少年、青年、壮年直到老年的完整过程。儿童的身体比成年人小,但绝不是成年人的缩影,因为在机能方面比成人简单,是具有质的差别的。生长发育是从微小的量变到根本的质变的复杂过程,是在体积增大的过程中,完成结构和机能的分化和成熟。例如,在脑的生长过程中,大脑的思维记忆和分析综合机能不断发展,而且在脑的重量不再增长后,其机能仍在进一步完善。这种从量变到质变的过程是逐渐发生的,其间没有明显的界限,但又 not 是一种无区别的现象。

(二) 生长发育的连续性和阶段性规律

生长发育过程是连续的,而不是跳跃的。不过,这个过程又不是直线变化和不分层次的。虽然在生长发育过程中,我们看不出朝夕的变化,但却自然地表现出阶段性的质的特点,并有一定的变化程序。例如,在运动器官和神经系统的生长发育过程中,首先发育的是头部的运动(如转头、抬头),然后过渡到上肢运动(如抓物),再发展成躯干的运动(如翻转、直坐),最后发展到下肢运动(如站和走)。这种从头部向下的发展过程称为“头尾发展规律”。就身体某一部位的机能发育来看,也有一定规律可循。例如,上肢的发展是:新生儿时期上臂只是无意识地运动,手很少起作用;四五个月时,手才能拿东西而且常常是全手抓握;十个月左右才会用指尖拿东西;一岁左右发展成能用两个手指捏起小的物体。这种由正中部位向末端发展的过程称为“正侧发展规律”。

(三) 生长发育的波浪式规律

生长发育不是匀速直线上升,而是有时快、有时慢的波浪式发展。以身高和体重为例,从胎儿到成熟有两个突增阶段:第一次突增是胎儿时期,为第一个生长发育高峰期;出生后生长的速度逐渐变慢,一直到10~12岁,出现第二个生长发育高峰期。

在第一个生长发育突增阶段,身高在孕中期(4~6个月)增长最快,在三个月内约增加27.5厘米左右。体重在孕末期(7~9个月)增长最快,三个月约增加2300克。出生后生长发育速度逐渐变慢。出生后第一年身高增加20~25厘米,体重增加6~7公斤。出生后第二年内身高增加10厘米,体重增长2.5~3.5公斤,增长速度还是较快的。以后增长的速度迅速下降并逐渐保持相对平稳的速度。到青春发育期,又出现第二个生长发育突增期,在这个期间身高年增长约为7~8厘米,体重一般年增长约为5~6公斤。以后的增加速度又逐渐缓慢,直到发育成熟,骨化完成后,身高的增长停止。

需要说明,在这两个生长发育的高峰期,生长发育各有不同的特点。在第一次突增期,胎儿从一个特大的头、较长的躯干及短小的四肢,发育到儿童时期的身体各部分



较匀称的比例。而在第二次突增期,则是下肢迅速发育,再向躯干发育,而头的发育不明显,最后发育成头较小、躯干较短、腿较长的体形。在整个发育过程中,头大约增长1倍,躯干大约增长2倍,上肢大约增长3倍,下肢大约增长4倍。

(四) 身体各系统发育的不平衡规律

人体各部位和各器官、系统发育的时间和速度不同。早在1930年斯卡姆曼(Scamman)就分析了身体四种不同器官和系统的发育趋势。身高、体重及内脏器官(如呼吸、消化、血管、心脏、肾脾、肌肉和血量等)的发育属于总的体格发育。内脏器官的发育与身高、体重一样呈波浪式的,在青春期开始时这些器官也出现突增现象。

神经系统的发育最早。新生儿的脑重已达到成年时期的25%,而此时的体重只为成年时的5%。出生后第一年脑的发育仍然很快,能达到整个发育过程的50%,第二年再增加20%,到6岁时,脑的重量已达到成年时的90%。出生后的5~6年中,随着脑的重量的发育,神经系统的机能也迅速发展,如语言发展和肌肉活动的调节等。不过,6~20岁之间脑的重量虽然只增加10%,但脑细胞的结构和机能的变化很复杂,尤其在18~25岁之间,其变化更加激烈,从而达到神经系统机能上的完善。

在出生后的十年中,淋巴系统的发育特别迅速。12岁左右淋巴系统已达到成年时的200%,从而使机体对疾病抵抗力增强,10~20岁期间,随着机体各系统的成熟和抵抗力的增强,淋巴系统逐渐退缩。

在各系统的发育过程中,生殖系统的发育最晚,10岁以前几乎没有什么发展。青春期开始后才迅速发育并逐渐成熟。

三、影响儿童少年生长发育的因素

儿童少年的生长发育是机体与外界、遗传性与适应性的对立统一过程。遗传因素决定机体发育的可能性,环境条件影响着发育的进程。现将影响生长发育的几个主要因素叙述如下。

(一) 营养

营养是生长发育的物质基础,新陈代谢的正常进行离不开摄取各种营养物质。生长发育阶段要保证同化作用超过异化作用,必须有充分的营养物质供应。少年运动员处于生长发育阶段,体育锻炼、运动训练又要消耗较多的能量,因此,要特别注意营养物质的补充。研究表明,营养对儿童生长发育无论在形态、机能和智力方面都会产生一时性的和永久性的影响。

(二) 疾病

急慢性疾病对儿童少年生长发育的影响是不言而喻的。影响的大小取决于病理变化的部位、病程的长短与严重程度。某些器官的器质性改变,必然影响其本身乃至全身的机能,破坏新陈代谢的正常规律,从而影响生长发育。严重的慢性病、流行病和地方

病,对儿童少年生长发育的影响更大。目前,近视眼、沙眼、龋齿、结核及蛔虫等疾病,在儿童少年中的患病率相当高,风湿病、肝炎、肾炎和慢性扁桃腺炎也是影响儿童少年健康成长的常见病。

(三) 气候和季节

中国科学院儿科研究所 1975 年曾对我国北方、中部和南方几省 17 岁男女学生的生长发育状况进行了调查研究,发现北京 17 岁男生的身高平均为 168.7 厘米,武汉为 167.6 厘米,广州为 164.7 厘米;17 岁女生的身高,北京为 157.7 厘米,武汉为 157.3 厘米,广州为 155.3 厘米。1979 年,全国青少年体质研究组对全国 16 个省市 20 余万人的调查发现,以淮河、秦岭为界,各种形态指标也是北方大于南方。从这些材料来看,似乎有北方人身高高于南方的趋势。日本学者调查发现,出生在日本而在美国加利福尼亚成长的日本女孩,月经的初潮年龄早于出生在加州而在日本成长的日本女孩约 1 年半。同样,在加州成长的日本儿童,无论身高和体重都较在日本成长的更高更重。但他们的下肢与躯干的比例以及体重与身高的比例关系基本一致。

季节对发育有明显的影响。一般来说,春季身高增长最快,秋季体重增长最快。有人发现在身高增长较快的月份,新的骨化中心出现要多于身高增长较慢的月份。在 1~3 月份,基础代谢率和血清蛋白结合碘达到高峰,而在 7~9 月份达到最低值。因而认为,寒冷刺激与甲状腺机能增强有关。

(四) 社会因素

社会因素对儿童生长发育的影响是综合性的。其中,主要的决定因素是经济发展的情况,以及与之有关的营养、居住、医疗和体育等条件。我国解放后儿童的发育水平较之解放前有显著的提高。把 1975 年的调查材料与 1955 年对比,各年龄组在 20 年内各项身体指标都有较大幅度的增长。仅以北京市男生的身高为例,各年龄组在 20 年内的增长幅度在 2.0~5.7 厘米之间,11 个年龄组在 20 年内平均增长 3.6 厘米,即每 10 年平均增长 1.8 厘米。

在同样经济条件下,家庭中子女的多少对生长发育的影响很大。多子女的家庭,无论经济收入多少,儿童的生长发育都会受到明显的影响。

生长发育的城乡差别,也是社会因素对生长发育影响的表现。国内外的调查均说明,城区儿童的发育水平高于近郊区,近郊区儿童的发育水平又高于远郊区,这是历史造成的城乡差别在儿童生长发育方面的反映。随着农业的发展,农民生活水平的提高,这种差别也会日益缩小。例如,我国解放后农村儿童发育水平提高的速度甚至高于城市。据 1975 年的调查,农村 7~17 岁各年龄组男、女儿童少年的胸围/身高的值均高于同年龄的城市儿童。

环境污染也是影响儿童少年生长发育重要的社会因素。上海市于 1975 年在城区工业区、商业交通区及对照区进行了定点、定期的大气监测,同时观察了不同地区学生的发育和健康情况。结果发现:慢性喉炎、慢性结膜炎、沙眼和后期鼻炎的阳性率,在工业区、商业交通区比对照区为高;慢性扁桃腺炎,商业交通区比对照区高;肺活量对照



区比工业区、商业交通区大,0.75 秒时间肺活量对照区大于工业区;身高、体重无显著差别,胸围指标男生对照区大于工业区和商业交通区。

(五) 遗传因素

遗传对儿童少年生长发育的影响是肯定的。遗传不仅能预示子女的身高或体重,甚至在一定程度上决定着子女的体形等特性。当然,子女从父母那里得到的遗传素质各有不同,在生长发育上有很大的可塑性。因此,后天因素的影响也是非常明显的。研究发现,甚至单卵双生的两个机体,无论在形态、机能、素质和心理方面也有所不同。

(六) 体育锻炼

儿童少年生长发育是受先天遗传和后天环境双重作用的复杂生物现象。在诸多环境因素中,营养是生长发育的物质基础,体力活动是生长发育的源泉。“生命在于运动”,体育运动和体力劳动是促进身体发育和增强体质的最有利因素。尽管遗传特征可以使机体自然增长,但在保证营养供给充足的前提下,体育锻炼作为自觉的有目的的自身改造手段,可以充分发挥机体的生长潜能,有效利用各种营养物质,促进代谢过程加强,全面提高人体形态和功能的发育水平,并且可提高细胞免疫活性及体内非特异性免疫水平。

体育运动可通过调节机体的新陈代谢及神经内分泌系统的作用机制,对儿童形态发育产生不同程度的影响。但是,这需要一个长期积累的过程,企图通过参加短期的体育锻炼而使身体发育水平明显提高是不切实际的。

1. 运动对体格发育的影响

国内外学者通过横向调查和追踪调查取得的资料发现,经常参加体育锻炼的青少年儿童身高、体重和胸围的增长幅度,一般高于不经常锻炼的儿童青少年。对数百名从事体操、游泳等业余运动 2~5 年与不从事运动的同龄少年进行对比研究发现,各年龄组的身高、体重和胸围年增长值,从事运动少年比不从事运动的对照组高 1 倍以上。杨泽林等在 1985~1990 年的研究中,将 50 名学生(男女各半)分为实验组和对照组。实验组每天一节体育课和一次课外体育活动;对照组每周两次体育课和一次课外体育活动。结果到 1990 年时,无论男女两组各项指标的增长值皆为实验组明显高于对照组。

在青春发育期,后天的因素对机体的影响比任何时期都大。双生子的调查表明,积极参加体育活动和不经常参加体育活动生长发育水平和体质状况有明显的差异。爱好运动的人比少参加体力活动的身高平均高 4 厘米,体重重 3 公斤。

体育锻炼也是调节体重的重要因素。为避免皮下脂肪积聚过多,体育锻炼是有效的途径之一。体育锻炼可使脂肪消耗增加,增加瘦体重,从而改变体成分,使青春期少年体格得以协调匀称地发育。

2. 运动对骨骼、肌肉系统发育的影响

儿童少年经常从事体育锻炼,可明显改善骨的血液供应,使其得到充分的营养物



质,能促进骨的生长,使管状骨变长,横径增粗,骨重量增加。体育运动有利于平衡全身及骨骼的钙磷代谢,加速矿物质在骨内沉积,使骨皮质变厚,骨密度增大。长期运动可使新陈代谢旺盛,有利于骨细胞的增殖,加速钙化过程,使骨质坚实。通过X线摄片可看到,青少年运动员股骨的皮质比一般青少年厚0.5~3毫米;骨松质的骨小梁排列也比一般人整齐,使骨能承受更大的压力。

运动时血液循环加速,使肌肉获得更多的营养物质,使肌纤维变粗,体积增大,弹性增强,整个肌肉变得更发达。据测定,一般人肌肉重量占体重的40%左右,而经系统训练的运动员肌肉重量可达体重的50%。

3.运动对生理机能发育的影响

(1)运动对心血管系统机能的影响

①心肌收缩力增强。经常参加体育锻炼的人,迷走神经和交感神经的调节活动加强,有助于心肌收缩力量的增强;运动可使心脏冠状动脉血管扩张,营养心肌的血流量可增加3~4倍;另外,运动可使心脏肌球蛋白ATP酶作用的活性增强,肌球蛋白与肌动蛋白之间相互作用速度增快。因此,经常进行体育锻炼可使心肌收缩力量增强。

②心输出量增加。正常人安静时每搏输出量一般为50~80ml,每分输出量约5000ml。剧烈运动时,每搏输出量一般男子为140~160ml,男运动员为190~200ml,一般女子为100~120ml,女运动员为150~160ml;每分最大输出量男子25~30L,女子18~20L,有训练的男运动员可达35~40L。

③心脏容积增大。有训练的长跑运动员心脏容积可达1000ml,一般人仅是750~800ml。埃可罗姆(Eklom)发现11岁男孩训练两年后,心脏容积增加45%,大大超过同龄青春期男孩水平。

④心脏质量增加。一般人的心脏质量是300~400克,有锻炼者心脏可达450~500克。这种由于体育锻炼带来的心脏质量增加是良好的生理适应性。

⑤窦性心率徐缓。运动员的心率在安静时比一般人慢。一般成人平均为75次/分,而运动员为50~60次/分,甚至40次/分或更低。这是由于在安静时运动员迷走神经机能加强所致。

(2)运动对呼吸系统机能的影响

人体运动时可使呼吸深度加深,呼吸频率加快。这种呼吸深度和频率的变化主要来自于:①锻炼时肌肉活动产生CO₂刺激呼吸中枢,使呼吸加深、加快;②由于运动产热量激增,体温升高对呼吸的刺激作用;③肌肉运动使静脉回流增快,腔静脉及右心房感受器的传入冲动刺激呼吸中枢;④条件反射性作用;⑤肌肉本体感受器发出冲动引起呼吸加深加快。体育锻炼时引起的呼吸变化是条件反射与非条件反射两者的复合反射,大脑皮层起调节作用。

儿童肺脏分化过程7岁时基本完成,此后主要是肺脏的增长。大量研究证明,肺泡数量的增加和肺泡直径的增大,以及肺脏弹性组织增加均能引起肺活量的增长。7岁以前,肺活量增长是缓慢的,而8~9岁开始则进入肺活量快速增长时期,性成熟期肺活量增长最大。



据瑞典学者安德森等研究,在青春期进行游泳训练的女孩较一般女孩肺总容量可大12%,肺活量大13.4%,最大吸氧量大10.2%。COMOBEB(1983)的研究证实,每周参加4~5次游泳训练、坚持2~5年的少年比每周只参加2次体育课的对照组少年肺活量年增长均值高200~300ml。

(3)运动对肌力的影响

肌肉力量(简称肌力)是指人体肌肉紧张或收缩时所表现出来的能力。力量素质是人体运动和体力劳动最重要的素质之一。

体育锻炼有助于肌力增强,有测验证明,15~16岁的运动员右手平均握力为42公斤,而同年龄普通少年右手平均握力仅34公斤。对比观察,坚持两年以上业余体校训练的2~4年级女学生右手握力平均每年增长约5.6公斤,而同年级对照组女生此值仅为1.1公斤;坚持5年以上业余体校训练的8~10年级男生右手握力年增长均值5.7公斤,同年级对照组男生此值仅1.79公斤。

据胡虞志(1980)对1369名中小學生右手肌耐力进行观测,发现不同年龄肌耐力的年增长百分数是不一样的。女生14~15岁增长速度最快,男生则14~17岁肌耐力增长最快。到青春发育后期(女16岁、男18岁),男女少年的肌耐力增长速度都减慢下来。由此看来,儿童少年在青春发育中期积极从事与增强肌耐力有关的运动项目,如屈臂悬垂、负重练习、篮球和慢跑等,会有助于成年时具备较高水平的肌肉耐力。

4.运动对神经、内分泌和免疫机能的影响

经常参加体育运动能使大脑和神经系统得到锻炼,提高神经系统工作过程的强度、均衡性、灵活性和神经细胞工作的耐久力;能使神经细胞获得更充足的能量物质和氧气的供应,从而使大脑及整个神经系统在紧张的工作过程中获得充分的营养。据研究,当脑细胞工作时,它所需的血液量比肌肉细胞多15~20倍,大脑耗氧量占全身耗氧量的20%~25%。体育锻炼能使大脑的兴奋与抑制过程合理交替,避免神经系统过度紧张;并且按大脑皮层功能轮换的原则,可以消除脑力疲劳,这对于学习负担很重的儿童青少年无疑是极其有利的。

体育锻炼可提高人的反应速度。普通人反应潜伏期是0.3~0.5秒,而运动员是0.12~0.15秒,优秀乒乓球运动员平均只有0.1秒,比一般人快3~5倍。运动可使儿童身体各器官系统的控制和调节能力得到提高和完善。运动还能提高大脑皮层的紧张度,并有助于形成良好的情绪,增进心理健康。适量运动还可使原来兴奋的神经细胞抑制得更完全、休息得更充分,因此对用脑过度的失眠者有改善作用。

体育锻炼可使一些激素分泌增加,如生长激素和皮质激素等。在运动时,血清雄激素含量也提高,它可协同生长激素加速青春期的生长。因而,经常参加体育锻炼的人的身高比不参加或少参加体育锻炼的人为高。血清雄激素含量的提高可能是由于儿茶酚胺、前列腺素的刺激及睾丸血液循环加强所致。

体育运动可使非特异性免疫功能增强。如少年运动员的淋巴细胞转化率等比一般学生高,白细胞数暂时增多,中性粒细胞吞噬能力增加。经常从事体育锻炼的儿童,上呼吸道感染等疾病的发病率明显降低。从预防医学角度出发,可把体育锻炼看做是一种增



强人体非特异性免疫的手段。

四、生长发育年龄阶段的划分与青春发育期

(一) 年龄阶段的划分

根据生长发育的规律以及形态、生理和心理的特点,将儿童少年的年龄划分为以下几个时期:

婴儿期:2~3岁

幼儿期:4~6岁(学龄前儿童)

学龄儿童:7~12岁

少年期:13~17岁

青年期:18~25岁

各年龄阶段的上下相邻年龄之间并无明显界限,前一年龄段的发育为后一年龄段的发育奠定必要的基础。本章只介绍儿童少年时期的生长发育特点。

学龄儿童即通常所说的“儿童”,相当于小学时期。少年期相当于中学时期(少年甲组相当于初中,少年乙组相当于高中),中学毕业意味着少年期结束,跨入青年期。从7岁到17岁总称为儿童少年时期,这一时期是长身体的阶段,是人体生长发育中最重要的时期。

(二) 青春发育期

青春发育期(即青春期)是由儿童少年时期过渡到成人的一个迅速发育的阶段,以生长突增为青春发育期开始的标志,以性成熟为结束。青春发育期可分为三个阶段,如表16-1所示。

表 16-1 人体青春发育期的三个阶段及发育特点

	前期	中期	后期
女孩	10~12岁	13~16岁	17~23岁
男孩	12~14岁	14~17岁	18~24岁
特点	以身体形态发育突增现象为主。是人体成熟前的一个迅速生长阶段,也称为生长加速期	以第二性征发育为主,又称为性成熟期,此阶段形态的发育速度减慢	身体发育到完全成熟阶段

注:乡村比城市晚一年

(三) 第二性征

出生时由于性的染色体不同,决定性腺不同,因而有男女的性别,称为第一性征。

在性激素的作用下,出现男女性征上的继发性特征,称为第二性征或副性征。第二性征标志着已进入青春发育期,性腺逐渐成熟,机能逐渐完善,男女之间的性别差异格外明显。男女第二性征有如下的征象。

男性的特征是:喉结增大突出,音调变低变粗,皮下脂肪减少,肌肉强健有力,毛多,长胡须,生殖器官增大,颜色加深,睾丸发育成熟,产生精子,开始遗精。

女性的特征是:音调变得细而高,乳房逐渐隆起,乳头突出,骨盆变宽,脂肪有选择性地沉积(在胸部、乳腺和臀部),皮下脂肪丰富,生殖器官发育增大,外生殖器官颜色加深,出现月经。

第二节 儿童少年的解剖生理特点和 体育教学与运动训练

一、骨骼

儿童少年软骨成分较多,水分和有机物质(骨胶元)多,无机盐(磷酸钙、碳酸钙)少,骨密质较差,骨富于弹性而坚固不足,不易完全骨折而易于发生弯曲和变形。随着年龄增长,骨的无机盐增多、水分减少、坚固性增强而韧性减低,直到20~25岁骨化完成后,骨不再生长,身高也不再增长,但骨的内部构造仍在变化。下肢骨在16~17岁以后骨化迅速,而脊柱椎体到20~22岁才完成骨化。常用骨龄作为选材的指标,通常以腕骨的骨龄来预测身高,作为运动员选材根据之一(注:骨龄是骨骼发育的年龄,以化骨核出现和干骺愈合时间作为骨龄评价标准)。

根据儿童少年骨骼的上述特点,在体育教学或运动训练中,应注意下列问题:

(一) 注意养成正确的身体姿势

儿童少年骨承受压力和肌肉拉力功能比成人差,如果长期处于不良身体姿势状态下,则其骨易弯曲变形,其中常见的是脊柱的变形。据调查,小学生中脊柱变形者占受检人数的20.9%,而脊柱侧凸的又占脊柱变形者的80.8%。因此,体育教师必须教育儿童少年,养成坐、立、走等正确的身体姿势。在儿童少年时期,由于构成儿童少年脊柱的椎骨尚未完全骨化,椎骨之间的软骨垫(椎间盘)也未成型,脊柱的四个生理弯曲虽然已初步形成,但其弯曲度不及成人。椎骨完全骨化要到20岁以后。因此,如果儿童少年在日常生活中长期不注意保持正确的身体姿势,很容易发生脊柱后凸(驼背)或侧凸(脊柱偏歪)等畸形。

采取坐位姿势读书写字时要坐端正,腰部要挺直,头部不要过于前倾(前倾角不应大于 $15^{\circ}\sim 20^{\circ}$),前胸不要压在桌缘上,两足平放于地面,桌椅之间的高度大约为坐高的 $1/3$ 左右(同一年龄组的儿童少年,根据身高情况,约有3~5厘米的差别),以两肘能平放在桌面上不负担上体的重量,两肩呈水平为合适。不宜长时间从事坐着处于佝偻状态

的工作，如女孩绣花织毛线等。站立时，从侧面看耳、肩和股骨大转子应在一条垂线上，此线通过膝关节的前方。从后面看，两肩要平，两侧的肩胛骨要对称。站立时间不宜过长，稍长一点时间可用“稍息”姿势两腿轮换休息。行走时，要抬头挺胸，步子要匀，两臂配合脚步自然前后摆动。提物或背挎包行走时，重量不宜太重，要左右轮换提物。总之，要使儿童少年养成坐、立、走的正确姿势，注意各种姿势的轮换，做到左右结合、动静结合、劳逸结合。

（二）注意身体的全面训练

有些运动项目的动作是非对称的，肢体的负荷不均匀，例如乒乓球、羽毛球和网球的握拍手，投掷运动中的投掷臂，跳跃运动中的踏跳腿等，这些部位在练习过程中锻炼机会较多，而负荷也较重。有些运动项目，在运动中身体常处于某些比较固定的姿势，如速度滑冰、自行车、射击运动等。对儿童少年来说，进行这些项目的训练时，要加强弱侧肢体的锻炼。另一方面，对一些基本技术的训练不要过于集中，应采用分散的办法，用多种形式交替进行。否则会由于肌力发展不平衡，或长期保持某种姿势而容易发生脊柱的变形或肢体发育的不均衡。

（三）在进行力量训练时，应注意负荷的意量

儿童少年的椎骨尚未完全骨化，髌骨是由髌骨、坐骨和耻骨以软骨连接起来，到15~16岁才愈合，股骨还存在骺软骨，承受压力的能力比成人差，维持足弓的肌肉和韧带也较弱。因此，对儿童少年进行力量的练习时，如果负重过大，或采用静止性力量练习过多，容易导致脊柱变形、腿型异常、髌骨移位和足弓的下降(扁平足)。一般在10岁以前不宜进行负重练习，可采用抗体重的一些练习，如徒手跑、跳等。12~13岁可增加一些抗阻力(如拉橡皮筋)或哑铃等的力量练习。15岁以后，进行较大重量的力量练习，并应以动力性练习为主。进行必要的静力性练习时，也要控制时间，做到动静结合。

（四）注意练习场地的选择

由于儿童少年骨骼骨化未完成，易变形，脊柱的生理弯曲较成人小，缓冲作用比成人弱，故不宜在坚硬的地面上反复进行跑跳等练习，以免对足骨、胫骨的骨化点会产生过大而又频繁的刺激，引起过早骨化或骺软骨的损伤，影响骨的生长发育。因此，进行跑跳练习时，应尽量不要在柏油或水泥路上进行。

（五）注意预防“骺软骨病”的发生

“骺软骨”的损伤是儿童少年在体育运动中的特有的一种损伤。主要发生在腰椎、膝关节和肘关节。体操运动中要做许多下腰练习，如果教练员在练习中单纯用力去挤压或上提运动员的腰部，过多地用静力性的练习去发展腰部的柔韧性，而不注意积极发展腰背肌肉的力量，可引起椎骨骺软骨损伤。又如篮球、排球等运动，常处于半蹲位，膝关节的韧带松弛，全靠股四头肌和髌骨来稳定膝关节，儿童少年股四头肌力量较弱，稳定膝关节的能力差，加上髌骨比股骨较早完成骨化。在这种情况下，如膝关节反复摇晃



旋扭或多在半蹲位突然发力,使髌骨与股骨下端经常发生摩擦撞击,而致股骨下端髌软骨病变。尤其在过硬的场地上经常用力踏跳等,更容易引起髌软骨的损伤。

体育教师和教练员安排半蹲位练习时不要过于集中,每次时间不宜过长。平时应采取积极的手段来发展儿童少年股四头肌力量,这对预防膝关节损伤有良好作用。在运动中,如发现儿童少年有腰、膝及肘部疼痛,应引起重视,并及早进行诊断,作出适当的处理。

(六) 适当营养

儿童少年的骨正处在生长发育的旺盛时期,因此,对钙和磷的需要增多。膳食中钙和磷含量要丰富。

二、关节

儿童关节面软骨相对较厚,关节囊及韧带的伸展性大,关节周围的肌肉细长,关节活动范围大于成人,牢固性相对较差,在外力作用下较易脱位。这些特点在体育教学与训练中应加以注意。

三、肌肉

儿童少年的肌肉中水分多,蛋白质、脂肪和无机盐类少,收缩机能较弱,耐力差,易疲劳。肌肉随着年龄增长,有机物增多,水分减少,肌肉重量不断增加,肌力也相应增强。身体各部肌肉发育顺序是:躯干肌先于四肢肌,屈肌先于伸肌,上肢肌先于下肢肌,大块肌肉先于小肌肉。8~9岁以后;肌肉发育速度加快,15岁以后,小肌肉群也迅速发育,15~18岁是躯干力量增长最快的时期。全身整体肌肉力量男子在25岁、女子在20岁左右达到峰值。肌力可保持到30~35岁才开始减退。肌力发展的规律性是,在生长加速期,肌肉主要向纵向发展,长度增加较快,但仍落后于骨骼增长。所以,肌肉收缩力量和耐力都较差。生长加速期结束后,身高的增长缓慢,肌肉横向发展较快,这时肌纤维明显增粗,肌力显著增加。女孩在15~17岁、男孩在18~19岁肌力增长最为明显。

根据儿童少年的解剖生理特点,在体育教学和运动训练中应注意下列问题:

(一) 根据年龄特点安排运动负荷

儿童少年的肌肉正处在生长发育中,从事体育锻炼或运动训练,能促进肌肉的生长发育,使肌纤维增粗,肌肉中蛋白质代谢旺盛,肌肉收缩力量、速度以及肌肉的伸展性与肌肉活动的协调性等均可得到提高。在8岁以前,儿童的肌肉生长和肌肉力量的增长速度较慢,因此,应以大量的徒手操以及不负重的跑、跳练习为主。12~15岁,肌肉体积和力量增长速度加快,这一年龄阶段的少年,可采用一些阻力和较轻的负重练习来发展肌肉力量。15~18岁,肌肉体积和力量增长的速度最快,在练习中,可以增加阻力或

负重,以有效地发展肌肉力量。

(二) 选择适宜的练习方式

发展儿童少年肌肉力量的练习,应以动力性力量练习为主,辅以适宜的静力性练习。动力性力量练习是在克服阻力(包括负重或克服体重)的情况下,肌肉的收缩与放松交替进行。静力性练习是在抗阻力的情况下,肌肉做持续性的紧张收缩。两种方法都可发展肌肉的力量,但对儿童少年来说,由于肌肉的纤维较细,肌纤维的张力小,加上支配肌肉的神经中枢的兴奋强度和维持高度兴奋的时间比成人差,对持久而紧张的肌肉收缩更易疲劳。因此,对他们最好采用动力性的力量练习。但是,只要安排适当,做一些静力性练习对发展肌肉力量也是有益的。最好采用动静结合的方法,如发展肩部和上臂伸肌力量时,采用握哑铃臂伸直上举维持5秒钟,然后再屈肘上举,反复数次。无论是动力性练习或静力性练习,负荷不宜过大,组数不宜过多,练习结束后,注意做好放松活动。

(三) 根据肌力发展规律安排训练

由于儿童少年肌肉的生长发育不均衡,在运动训练中,应注意全面身体训练和发展小肌肉的力量以及肌肉耐力的训练。在身高增长加速时,肌肉的长度增加较快,肌肉收缩力量和耐力都较差,宜采用伸长肢体练习,弹跳和支撑自身重量的力量练习,重负荷力量练习宜少采用。生长加速期结束后,身高的增长缓慢,肌纤维增粗速度加快,肌力显著增加,可以适当增加力量性练习。

(四) 注意神经系统的训练

儿童少年神经系统对肌肉运动的调节不够完善,在运动训练中应注意加强儿童少年的协调能力的训练,提高对肌肉运动的感觉,培养对运动的节奏感,做一些使肌肉主动放松的练习。

四、血液循环

儿童血量占体重的百分比略高于成人。新生儿血量约占体重的15%,周岁时约为11%。新生儿的红细胞为每立方毫米550万个,血红蛋白含量为每100毫升血15~23克,以后逐渐减少,15~16岁时红细胞数为每立方毫米440万个,血红蛋白含量为每100毫升血13.9克,接近常人水平。新生儿白细胞总数特别多,平均可达每立方毫米2万个,出生两周后接近常人水平。淋巴细胞的百分比在1岁以后逐渐减少,到青春期接近成年人水平。9~10岁以前中性粒细胞比例较低,淋巴细胞占百分比相对较高。

儿童少年的心脏重量和容积均小于成人,但相对值(即按体重的比值)却大于成人,幼儿心脏重量占体重的0.89%。成人占0.48%~0.52%。心脏的重量随年龄逐渐增大,到青春期时心脏已达到成人水平。心脏容积增长也有类似的规律。儿童心脏发育不够完全,神经调节也不够完善,而新陈代谢又比较旺盛,因而心率较快。随着年龄的增长心



率逐渐减慢, 20 岁左右趋于稳定。

儿童少年的血管系统在 6~7 岁以前发育比心脏早, 血管壁弹性好, 血管口径相对较成人, 外周阻力较小, 所以, 儿童的血压较低。儿童的心脏发育尚差, 心肌收缩力较弱, 弹性纤维少, 每搏和每分输出量比成人小, 但心输出量的相对值较大。这说明儿童少年的心脏可以胜任较紧张的肌肉活动。青春发育期后, 心脏发育速度增快, 血管发育处于落后状态, 同时由于性腺、甲状腺等分泌旺盛, 引起血压升高, 称为青春期高血压。青春期高血压一般多见于身体发育良好, 身高增长迅速的青春少年, 表现为收缩压较高, 但一般不超过 150 毫米汞柱, 并有起伏, 而舒张压在正常范围。据统计, 青春期高血压始发年龄为 11~12 岁, 随年龄增长而增多。高峰年龄为 15~16 岁, 以后逐渐减少。

儿童少年时期交感神经调节占优势, 心肌发育不十分完善, 运动时主要靠加快心率来增加心输出量以适应需要(表 16-2、3)。

表 16-2 不同年龄组以 100 米/分的速度步行时心率比较

年龄(岁)	心率(次/分)
8	170
10	164
14	160
18	150
成人	134~146

表 16-3 不同年龄段最大摄氧量心率

年龄(岁)	心率(次/分)
13	205(次/分)
14~15	200(次/分)
16~18	189(次/分)

根据儿童少年血液循环系统的解剖生理特点, 在体育锻炼和运动训练中, 应注意下列问题:

(一) 合理安排运动负荷

儿童少年血液和循环系统机能指标, 其绝对值比成人差, 但以相对值来说, 并不比成人差。在正常情况下, 儿童少年的血液循环机能与他们的身体发育水平是相适应的。因此, 在体育锻炼和运动训练中, 他们还是能承受一定的大运动负荷训练, 并且对逐步加大运动负荷有较大的机能潜力。但是, 儿童少年的心肌纤维较细, 心肌收缩力量较弱, 心容量较小, 神经系统对心血管活动调节还不够完善。因此, 在体育锻炼和运动训练中, 运动负荷要适宜。一般儿童少年对强度较大且持续时间较短的运动, 如 60 米、100 米和 200 米跑, 各种活动性游戏, 徒手操及哑铃等力量性练习, 以及短距离游泳和

跳水活动等有一定程度的适应。而对一些长时间紧张性运动、重量过大的力量练习及对身体消耗过大的耐力性练习等,则不宜过多采用。在安排儿童少年的运动负荷时,练习的强度可以稍大一些,但间歇次数应多,密度不宜太大。13~14岁以后,心血管机能逐渐接近成人水平,可以承受更大的运动负荷,但也要注意循序渐进和区别对待。同年龄的儿童少年,个子高大的,心脏的负担量相对较大;性成熟发育迟缓的,其心脏的发育也较迟缓,在运动负荷方面应注意区别对待。儿童少年在运动时,较大程度上依赖心跳频率的增加来加大心输出量。心跳频率过快,心舒张期缩短,营养心脏本身的冠状循环受影响,心肌营养不良,长此下去,会使心脏受损。因此,对儿童少年的体育锻炼和运动训练,如运动负荷安排不当,不但不能促进其身体的生长发育,增强其体质,反而有损于他们的健康。

(二) 不宜做过多和过长的“憋气”

许多力量练习如举重,常需要“憋气”。“憋气”时,肺停止于扩张状态,腹肌紧张,胸腔和腹腔内压力加大,回心血量减少,心脏输出血量减少,对心脏本身的血液供应也会减少。“憋气”后,反射性地使呼气加深,这时胸内压和腹内压突然降低,大量血涌入心脏,使心脏充盈过度,负担加大。因此,带有“憋气”的运动练习不宜多做,即使“憋气”,时间也不宜过长。此外,倒立和背桥等动作由于头部朝下,头部血液回流困难,使心脏处在正常位置时的阻力加大,增加了心脏的负担。因此,对儿童少年来说,过多及过长时间从事这类练习是不适宜的。

(三) 正确对待“青春期高血压”

在青春期,个别青少年会出现“青春期高血压”。随着年龄的增长,内分泌腺机能逐步稳定,神经系统对心血管活动调节逐步完善和血管进一步生长发育,这种现象便会自然消失。对患有青春期高血压的青少年,首先要消除紧张心理。其次,对主观上无不良感觉的人,可以照常参加体育活动,但运动的强度和密度要适当降低,并控制参加比赛次数和密度。对有头晕及头痛等不良感觉的人,应适当减小运动负荷,并注意医务监督。对青少年中有“青春期高血压”的人,适当地进行体育运动,可能还有助于血压恢复正常。

(四) 促进血液循环系统生长发育和机能水平提高

不能只偏重于技术水平与运动成绩的提高,而忽略了对儿童少年采取积极的手段来发展他们血液循环系统机能。正确的体育锻炼和运动训练能促进儿童少年血液循环系统的生长发育,提高机能水平。如儿童少年适当地进行一些越野跑,15~30分钟的匀速跑、间歇跑和篮球活动等,对促进他们的血液循环系统的发育将有良好的作用。

五、呼吸系统

儿童少年由于胸廓狭小、呼吸肌力较弱且呼吸表浅,故肺活量小,呼吸频率快。随



年龄增大呼吸深度增大,呼吸频率逐渐减少而肺活量逐渐增大。在10~11岁和13~14岁时摄氧量增大最明显,16~17岁增加较缓慢。儿童少年肺通气量小,每公斤体重相对值较大,在运动时主要靠加快呼吸频率来增加肺通气量,而呼吸深度增加得很少。这是因为儿童少年的呼吸肌较弱、调节机能不完善所致。

根据儿童少年呼吸系统的解剖生理特点,在体育运动中应该注意下列问题:

(一) 注意呼吸卫生

鼻腔是人体与外界进行气体交换的门户。由于鼻腔内有粘膜,粘膜内血管丰富,粘膜又能分泌粘液,而且鼻腔里还有鼻毛,所以用鼻呼吸,能对吸入的空气加温加湿,还能阻止一部分细菌和灰尘的吸入,对吸入的空气起到过滤作用。儿童少年的呼吸道比成人狭小,呼吸道的上皮较薄而血管丰富,容易感染引起呼吸道发炎。因此,应教育儿童少年,在平时要用鼻呼吸。在运动时,仅用鼻呼吸不能满足身体的需要,可用口鼻同时呼吸。

(二) 注意呼吸与运动的配合

一般来说,肢体伸展的动作便于吸气,而肢体屈曲的动作便于呼气;在胸廓肩带需要固定的动作便于腹式呼吸,而腹肌用力 and 收缩的动作便于胸式呼吸;爆发用力和上下肢体大幅度活动的动作有时必须在呼气中进行或暂时屏息甚至憋气;周期性运动项目,如跑、游泳和划船等,呼吸必须有一定节奏,例如,长跑采取两步一呼、两步一吸,或三步一呼、三步一吸等。人体呼吸运动受大脑皮层调节,可以随意调整。体育教师和教练员应根据动作的结构、动作的节奏及用力的情况,教会儿童少年在运动中掌握适宜的呼吸方法,使他们在运动中学会呼吸与运动配合。

(三) 要有意识地加大呼吸深度

由于无效腔的存在,在运动时只有加大呼吸深度,才能有效地提高肺泡通气量。因此,在运动中要让儿童少年学会深呼吸。深呼吸时,吸气和呼气都要用力,使呼吸系统的机能提高。同时,深呼吸对心脏能起到良好的挤压作用,有利于静脉血回心。膈肌运动幅度也扩大,对胃肠道起到按摩作用,可促进消化和吸收。

六、神经系统

神经系统是发育最早最快的器官。新生儿脑重约350克,以后迅速增长,7~8岁已接近成人水平(表16-4)。脑发育在胎儿期出生后1~2年最为重要,随脑重量增加,脑细胞数量也增多,一年后可达120~140亿个。大脑随年龄的增长,不但脑细胞的数量增加、体积增大,而且突起增多、变大并向皮质各层深入,脑的机能逐渐发育。7~8岁时神经细胞的分化已基本完成,大脑额叶迅速生长,使儿童动作的精确性和协调性得到发展。以后神经细胞突起的分支越来越多,联络纤维大大增加,形成许多新的神经通路,脑的功能不断完善趋于复杂化。随着神经系统结构的发育,机能也逐渐完善起来,并表

现出在不同发育阶段各有其机能上的特点。例如，初生后的小儿脊髓反射的神经通路已发育完全，婴儿期即可以形成简单的暂时联系；3~6岁大脑皮层各区域之间增加了暂时联系的可能性，分化机能大大提高；6岁时条件反射的形成已比较稳定和巩固，形成动作技能的能力更加提高。新生儿小脑发育很差，1岁时增大最快，3岁时小脑发育基本上达到成人水平，能维持身体的平衡和动作的准确性。

表 16-4 不同年龄阶段脑重

	新生儿	6岁	7~8岁	9岁	12岁	20岁
脑重(克)	350	1200	1300	1350	1400	1427
占20岁脑重%	24.5%	84.1%	91.1%	94.6%	98.6%	100%

(依体育学院通用教材《运动生理学》，1989)

儿童少年的神经活动过程不稳定，兴奋过程占优势，兴奋和抑制过程在皮质容易扩散。因此，儿童少年活泼好动，注意力不易集中，做动作时不协调、不准确，易出现多余动作，建立条件反射快，消退快，重新恢复也快。年龄越小，皮质抑制过程越弱，而且不完善，分化能力也就差。8岁以前精确分化能力很差，错误动作多。8岁以后皮质细胞的分化能力与成人无大区别。13~14岁时皮质抑制调节机制达到一定强度，分析综合能力明显提高，能较快地建立各种条件反射，但由于分化能力尚不完善，又受到小肌肉群发育较晚的影响，所以，掌握复杂精细的动作困难。14~16岁时，反应潜伏期缩短，分化能力提高，女孩的分化抑制发展较早，能够掌握复杂的高难动作，在体操、花样滑冰和技巧项目中尤为突出。儿童的第二信号系统发育不完善，第一信号系统的活动占优势，直观形象思维能力相对较强，善于模仿，而抽象思维能力相对较差，对示范等直观形象教学容易接受。9~16岁时第二信号系统机能进一步发展，联想、推理的思维活动逐渐提高。16~18岁时第二信号系统机能已发展到相当的水平，两个信号系统的相互关系已相当完善。

根据儿童中枢系统的生长发育特点，在体育教学与训练时应注意下列问题：① 体育课程内容要生动活泼和多样化，可穿插游戏和竞赛，避免单调；② 要注意安排短暂休息，使学生情绪饱满，精力旺盛，不易疲劳；③ 在教学方法方面多采用直观形象教学，如示范动作、图表、模型等，多采用简单易懂和形象生动的语言或口诀等形式的讲解，年龄越小直观教学法作用越重要；④ 儿童少年时期正是世界观形成时期，要加强意志品质的培养和组织纪律的思想教育；⑤ 青春期神经系统受内分泌腺活动的影响，会使稳定性暂时下降，儿童少年表现出动作不协调，少女更为明显，应注意区别对待。

七、内分泌系统

内分泌系统对儿童少年的生长发育有重要的作用。其中，脑垂体、肾上腺、甲状腺、胸腺和性腺的发育特别重要。



脑垂体在出生时已发育很好,4岁前和青春期生长最迅速,机能也更活跃。脑垂体分泌的生长激素是促进生长的最重要激素。肾上腺皮质所分泌的雄激素与性发育有关。甲状腺在出生时已形成,14~15岁甲状腺体发育最快,机能也达高峰,它对骨的生长发育、骨化过程、牙齿生长,面部外形及身体比例等方面都能产生广泛的影响。

第三节 儿童少年身体素质的的发展

一、儿童少年身体素质发展规律

身体素质是机体各器官和系统机能的综合表现。儿童少年随生长发育而身体素质得到发展。在体育教学和训练中,应根据儿童少年身体素质发展的特点,采取科学的训练方法,促进身体素质的发展和运动技术水平的提高。

(一) 身体素质的自然增长

儿童少年各项素质随年龄而增长的现象称为身体素质的自然增长。在青春发育期(男15岁、女12岁左右)身体素质自然增长的速度快且幅度大。在性成熟期结束时,身体素质增长的速度开始减慢。在不同年龄阶段,各项身体素质的增长速度不同,即使在同一年龄阶段,不同的身体素质的发展变化也不一样。

(二) 身体素质发展的阶段性

各种身体素质的自然增长包括增长阶段和稳定阶段。增长阶段是身体素质随年龄增长而递增的年龄阶段,其中,包括快速增长阶段和缓慢增长阶段。稳定阶段是身体素质增长的速度明显减慢或停滞,甚至有所下降的年龄阶段。身体素质增长阶段和稳定阶段的年龄如表16-5所示。

身体素质由增长阶段过渡到稳定阶段有先后之别,按先后顺序排列如下,速度素质最先、耐力素质次之、力量素质最晚,男女顺序一致。

表 16-5 青少儿身体素质增长阶段和稳定阶段的年龄

身体素质	增长阶段年龄(岁)		稳定阶段年龄(岁)	
	男	女	男	女
60米跑	7~15	7~12	15以后	12以后
400米跑	7~15	7~12	15以后	12以后
1分钟快速仰卧起坐	7~16	7~15	16以后	15以后
立定跳远	7~18	7~18	18以后	18以后
屈臂悬垂	7~19	25	19以后	25以后

(依体育学院通用教材《运动生理学》,1989)

(三) 各项身体素质发展的敏感期

在不同的年龄阶段,各项素质增长的速度不同。把身体素质增长速度快的年龄阶段叫做增长敏感期。以年增长率的均值加一个标准差作为确定敏感期范围的标准。年增长率等于或大于标准值的年龄阶段为敏感期,小于标准值的为非敏感期。据此,60米跑、400米跑、1分钟快速仰卧起坐、立定跳远和屈臂悬垂五项素质的敏感期年龄如表16-6。

表 16-6 身体素质敏感期

素质指标	男(岁)		女(岁)
60米跑	7~10	14~15	7~10
400米跑	7~11	13~14	7~11
1分钟快速仰卧起坐	7~10	12~13	7~9
立定跳远	7~10	13~14	7~11
屈臂悬垂	7~10	13~14	7~8

(四) 各项身体素质达到最高水平的年龄

各项素质发展高峰的年龄男子在19~22岁,23岁后缓慢下降呈单峰型;女子在11~14岁出现第一个波峰,14~17岁趋于停滞或下降,18岁后回升,19~25岁出现第二次波峰呈双峰型。

二、儿童少年主要身体素质发展特点

(一) 绝对力量的发展特点

儿童少年7~9岁为力量发展的第一个可训练阶段。因为在7岁后随着整个身体的生长和各器官、系统机能的发展,肌肉长度开始改变,相对力量有所提高。女孩从10岁开始,绝对力量的自然发展可分为四个阶段:第一阶段,10~13岁,力量增长的速度很快,特别是屈肌的力量,绝对力量可提高46%。第二阶段,13~15岁,力量增长的速度明显下降,绝对力量只增加8%。第三阶段,15~16岁,力量增长14%。第四阶段,16~21岁,绝对力量增长很慢,只增长6%,接近最大力量。男孩在10岁以前与女孩差异不大,增长速度也较慢,从11岁起男孩与女孩出现差异,增长速度也开始加快。在11~13岁期间力量增长最快,18~25岁力量增长缓慢,到25岁左右达到最大力量。

(二) 相对力量的发质特点

对男、女孩来说,相对力量发展都较平缓,虽然绝对力量快速增长,但相对力量增长的速率并不大,甚至在个别年龄阶段,例如从12~14岁,每年只增长2%~3%。形成



这种现象的原因有两个：1.体重增长较快；2.在身高增长的最快时期肌肉横断面增长缓慢。要增加相对力量可进行全面训练，通过改变肌肉重量与体重的比例，改善相对负荷与肌肉力量的相互关系，不使肌肉出现过度肥大，而提高相对力量。

（三）速度力量的发展特点

男女孩在7~13岁速度力量增长都很快，13岁后，男女之间的差别越来越大，男孩的增长速度大于女孩，到16~17岁时增长速度下降。在儿童时期，速度力量的发展与最大力量的发展相比，速度力量发展要快些和早些。所以，在儿童时期发展速度力量可收到较好的效果。

（四）力量耐力的发展特点

男孩从7~17岁，力量耐力的发展是直线上升。女孩15岁前是持续上升的，但15岁后则开始产生停滞，甚至下降。

（五）反应速度的发展特点

儿童少年6~12岁反应速度大幅度提高，在12岁时反应速度达到第一次高峰点。在性发育阶段，反应速度稍减慢。到20岁左右出现第二次高峰点。

（六）步频的发展特点

儿童从7岁起步频自然增长，13岁后下降。在阻力较小时，动作频率主要决定于协调性。因此，应在协调性最佳发展期进行增加步频的训练。6~13岁是协调性发展的敏感期，所以，7~13岁步频也随之自然增长。在此阶段可对儿童少年进行提高步频的训练。

（七）最高跑速的发展特点

男女孩7~13岁期间跑的最高速度的发展几乎是平行的，从13~16岁期间男女之间开始产生差异，男孩持续增长，女孩落后于男孩。7~13岁是提高跑速最快的时期，而10~13岁期间尤为突出，增长值最大。如果将男女性别分开，男孩在8~13岁、女孩在9~12岁增长最快。

（八）耐力素质的发展特点

男孩10岁时，耐力素质出现首次大幅度提高；13岁时，再次出现较大幅度的提高；16岁时，耐力有最本质的提高；15岁时，男孩已进入性成熟期，此时耐力增长明显减慢。女孩9岁时，耐力素质出现首次大幅度的提高；12岁时，耐力指标再次提高；14岁后，即进入性成熟期，耐力水平逐年降低；15~16岁，耐力水平下降最大，16岁后下降速度减慢。

（九）协调能力的发展特点

儿童少年 6~9 岁是发展一般协调能力的最有利时期，9~14 岁是发展专门协调能力的最有利时期。随着发育的成熟，从 11~12 岁起开始素质训练，力量、速度及耐力则可较快地发展。协调能力的自然发展在 13~14 岁（个别人到 15 岁）达到高峰。协调能力在学习技术动作的过程中可从灵活性、空间定位能力和节奏感等方面表现出来。

【小结】

1. 生长指细胞繁殖、增大和细胞间质增加，表现为组织、器官及身体各部以至身体形态变化和重量的增加以及身体化学组成成分的变化。发育指功能的分化和不断完善，心理、智力的发展和运动技能的获得。成熟指生长发育基本结束，机体在形态和机能等方面达到成人水平。

2. 儿童少年生长发育的一般规律有：生长发育的量变和质变规律，生长发育的连续性和阶段性规律，生长发育的波浪式规律，身体各系统发育的不平衡规律。

3. 影响儿童少年生长发育的因素有营养、疾病、气候季节、社会因素、遗传因素和体育锻炼。

4. 据生长发育的规律以及形态、生理和心理的特点，可以将儿童少年的年龄划分为婴儿期、幼儿期（学龄前儿童）、学龄儿童、少年期和青年期。

5. 青春发育期指由儿童少年时期过渡到成人的一个迅速发育的阶段。以生长突增为青春发育期开始的标志，以性成熟为结束。青春期高血压指青春发育期开始后，心脏发育速度增快，血管发育处于落后状态，同时由于性腺、甲状腺等分泌旺盛，引起血压升高，称为青春期高血压。

6. 在体育教学与训练中应根据儿童少年骨骼、关节、肌肉、血液循环、呼吸系统和神经系统解剖生理特点来安排教学和训练计划。

7. 儿童少年身体素质的发展特点有身体素质的自然增长、身体素质发展的阶段性、各项身体素质发展的敏感期（增快期）及各项身体素质达到最高水平的年龄。

【思考题】

1. 正确解释生长发育、成熟、生活年龄和发育年龄、青春发育期和青春性高血压的概念。

2. 如何划分儿童少年的年龄阶段？

3. 儿童少年生长发育的一般规律是什么？

4. 体育锻炼对儿童少年有什么影响？

5. 如何根据儿童少年生理特点指导体育教学和训练？

6. 如何根据儿童少年身体素质发展规律安排体育教学和训练？

7. 如何通过体育锻炼促进儿童少年的生长发育？



【主要参考文献】

1. 体育院校通用教材《运动生理学》，北京，人民体育出版社，1990。
2. 叶广俊等：《现代儿童少年卫生学》，北京：人民卫生出版社，1999。
3. 过家兴、延烽：《青少年业余训练》，北京，北京体育大学出版社，1986。
4. 邢文华等：《中国国民体质监测系统的研究》，北京，北京体育大学出版社，2000。
5. 沈海琴等：《儿童少年生长发育12年追踪研究》，北京，北京体育大学出版社，1998。
6. 杨锡让等：《实用运动生理学》，修订本，北京，北京体育大学出版社，1998。

（北京体育大学 熊开宇）



第十七章

女子的生理特点与体育运动

【提要】女性的生理机能及运动能力与男性相比具有明显的差异。本章着重介绍与运动关系密切的女性各器官、系统的生理特点、运动能力特点、月经周期及调节、运动训练以及健身运动对月经周期的影响等内容。

女性是一个特殊的群体，其体质潜能及运动能力，已经通过许多过去只有男子才能参加的运动项目，如马拉松跑等得以充分证明。由于女性机体的结构、功能及心理诸方面具有明显区别于男子的特点，使得女性在进行某些运动时，必须付出更大的能力。

第一节 女性生理特点

一、女性生理阶段划分

女性一生中根据其性腺卵巢(ovarium)分泌机能的变化划分为五个生理阶段。

(一) 幼年期

幼年期指卵巢机能尚处幼稚状态的年龄阶段，约为 10 或 12 岁之前。

(二) 青春期

青春期指卵巢机能由幼稚向成熟状态过渡的年龄阶段。此阶段从 10 或 12 岁开始到 17 或 18 岁结束，以月经来潮为标志。该阶段的显著特点是卵巢及生殖器官明显发育。

(三) 性成熟期

性成熟期指卵巢功能成熟的年龄阶段。约从 18 岁开始，持续近三十年。该阶段性腺及性器官发育完全成熟，卵巢有周期性排卵，并分泌女性激素；子宫内膜出现周期性脱落，产生月经周期。该期为女性生殖机能最旺盛的时期，又称为生育期。

(四) 更年期

更年期又称为绝经期，指女性从性成熟期进入老年期的过渡时期。更年期指卵巢功能



由旺盛向衰退过渡,并直至萎缩的年龄阶段,这一阶段为44~54岁。该时期的显著特点是,月经由不规律到完全停止(闭经),生殖能力丧失。更年期结束,即意味着老年期的开始。

(五) 老年期

老年期指卵巢功能完全终止的年龄阶段。年龄约为60岁以上。在此阶段,人体各器官的机能能力均明显降低。

二、生理特点

(一) 身体发育特点

女性青春期的生长加速期比男性约提前两年出现,女孩从10~12岁开始,男孩从12~14岁开始。就我国儿童和青少年生长发育的调查结果来看,男女存在明显的性别差异。10岁之前,女孩的发育速度比男孩快;10岁以后,男孩的发育速度加快,并后来居上,身高显著超过女孩。

(二) 氧运输系统特点

女性心脏的重量较男子轻10%~15%,体积约小于男子18%,容量小150~200ml;安静状态女性心率较快,快于男子10次/分左右,每搏量少于男子10~15ml,收缩压平均低于男子10.5mmHg,舒张压约低5.1mmHg。所以,女子的心血管机能弱于男子,运动中必须依靠加快心率来保证足够的心输出量,运动后的恢复过程中,女子心率恢复速度较慢。

女子的胸廓较小,呼吸肌力量较弱,安静时呼吸频率较男子快4~6次/分,且呼吸深度浅;女子的肺活量约为男子的70%,最大吸氧量比男子少0.5~1L,因此,女子的呼吸机能亦较男子为低。从而制约了女子运动中机体氧的供应量。

女子血量约占体重的7%,男子则达8%;女子的红细胞数量为每立方毫米380~420万个,血红蛋白为11.5~14克%,均低于男子,每千克体重的血红蛋白女子约为8.3克,男子则可达11.6克,全血中血红蛋白的总量女子仅为男子的56%。因此,女子机体运输氧的能力较男子差。

总之,由于女性的呼吸和循环机能水平低,血液的携氧能力差,因而限制了氧的利用能力,导致女子的有氧能力较男子低,约为男子的70%。

(三) 运动系统特点

1. 骨骼肌特点

在青春发育期,女孩的肌肉发育慢于男孩,肌肉体积及重量均低于男孩,这主要是由于雄性激素的同化作用引起的。因而,女性肌肉占体重的21%~35%,仅占男子肌肉重量的80%~89%。女性的肌肉力量弱于男性,有资料报道,女性上肢伸肌的肌肉力量仅为男性的2/3,腰部肌肉力量亦为男性的2/3,下肢爆发力为男性的3/4。训练程度相同的男女赛跑运动员相比,女运动员肌肉中琥珀酸脱氢酶及肉毒碱软脂酰转移酶的活性较低,因而,脂肪的氧化能力亦较男子弱。

2. 骨骼系统特点

女性骨骼重量占体重的 15%，较男子轻 10% 左右，抗弯能力较差，但韧性较佳。脊柱椎骨间软骨较厚，弹性和韧性优于男子，因而其柔韧性优于男子，有利于完成劈叉等动作。

女性脊椎骨较长，四肢骨较细而短，形成上身长、下身短的特点。而且，女性的股骨、肱骨两侧上髁的直径、臂长、胸围及肩宽等指标均低于男子，而髌部则大于男子。形成上体长而窄、下肢短而粗、肩窄盆宽的特殊体型。这种体型使身体重心低且稳定性高，有利于完成平衡动作，但奔跑速度及负重能力均受到一定限制。

女子约从 30 岁开始骨中矿物质逐渐丢失，绝经后女性骨骼的矿物质（特别是钙）减少更加明显，极易产生骨质疏松。骨质疏松导致骨密度及抗张强度下降，增加了骨折的危险性。许多研究已经证实，运动能充分有效地降低骨钙的减少程度。更年期女性应多进行一些有氧运动，并与低强度力量训练相结合，一方面具有预防和治疗骨质疏松的作用，另一方面亦具有维持体内雌激素水平、延缓衰老的作用。

（四）身体成分特点

女性体脂含量约占体重的 28%~30%，主要分布在胸、腹、臀和大腿等部位的皮下。皮下脂肪约为男子的 2 倍。有研究证实，体脂与运动员的有氧和无氧运动成绩呈负相关。在完成跑、跳、爬山等须抗重力做功以使身体腾空或移动的运动中，较厚的体脂成为限制运动能力的因素。而且，运动中机体的散热能力也会受到较厚的皮下脂肪的影响。但较厚的皮下脂肪具有很好的保温及保护作用，并可增加机体的浮力，有利于女性参加冰雪类及游泳运动。

三、运动能力特点

（一）力量和速度

女子的肌肉力量平均为男子的 $2/3$ 左右，因此，女子在需要绝对力量及绝对速度的项目中，其运动能力明显弱于男子。例如，女子投掷运动的能力为男子的 50%~70%；跳跃运动的能力为男子的 75%~85%；短跑运动的能力为男子的 50%~85%；在爆发力及力量性项目上的差异更为显著。这是由于女子肌纤维的横截面积小于男子、因而肌肉的收缩力量较小的缘故。女子对静力性运动的适应能力则优于男子。

（二）耐力

如前所述，女子的有氧能力弱于男子，这与女子最大摄氧量水平较低、运氧能力及耐酸能力较差等综合因素有关，限制了运动中氧的利用，使得耐力水平较低。

（三）柔韧和平衡

由于女子的肌肉和韧带弹性好，关节活动范围大，因而动作幅度大而稳定，具有较好的柔韧性。另外，由于女子特有的肩窄盆宽体型，决定了女子具有身体重心较低的特



点, 因此平衡能力强于男子。

第二节 月经周期、妊娠与运动能力

月经周期和妊娠是女性突出的生理特征。在不同的月经周期和妊娠阶段, 女性的运动能力将产生明显的变化。

一、月经周期及其调节

月经周期是女性特有的生理现象, 表现为卵泡的生长发育、排卵与黄体形成, 周而复始。同时, 在卵巢女性激素的影响下, 子宫内膜发生周期性剥落, 产生流血现象, 称为月经(menstruation)。故女性生殖周期称为月经周期(menstrual cycle)。

(一) 月经周期的时相划分

卵巢及子宫的周期性变化, 受制于下丘脑—垂体—卵巢轴的调控。卵巢的周期性变化是月经周期形成的基础, 可以分为卵泡期(follicular phase)、排卵期(ovulation phase)、黄体期(luteal phase)、经前期(premenstrual phase)和月经期(menstrual phase)。

1. 卵泡期

卵泡由原始状态经初级、次级卵泡发育为成熟卵泡的过程。从初级卵泡阶段开始, 卵泡接受垂体促性腺激素的调控, 促使其发育成熟。同时, 子宫内膜亦产生相应变化, 主要表现为内膜增厚、腺体增多变长, 称为增生期。

2. 排卵期

成熟卵泡在垂体 LH(黄体生成激素)作用下发生破裂并排出卵细胞的过程。人的每个月经周期初有 15~20 个原始卵泡同时开始发育, 但通常只有一个卵泡发育成熟并排卵(ovulation)。

3. 黄体期

排卵后, 残余的卵泡壁内陷、大量新血管长入, 形成一个黄色的内分泌腺细胞团, 称黄体(corpus luteum)。黄体细胞在垂体 LH 作用下, 大量分泌孕激素和雌激素。同时, 子宫内膜细胞体积增大, 糖原含量增加, 称为分泌期。分泌期的子宫内膜为妊娠做好准备。

4. 经前期

排出的卵子若不受孕, 黄体则发生退化。许多女性此期内可出现一系列症状, 如烦躁、易怒、失眠、头痛和浮肿等, 称为经前期紧张症候群。

5. 月经期

黄体退化，血中雌孕激素浓度明显下降，子宫内膜血管发生痉挛性收缩，继而出现子宫内膜脱落与流血，形成月经。

(二) 反馈调节

在卵泡开始发育时，血中雌激素及孕激素浓度处于较低水平，对垂体 FSH(卵泡刺激素)和 LH 分泌的反馈抑制作用较弱，血中 FSH 表现逐渐增高的趋势，随后 LH 亦有所增加。随着卵泡渐趋成熟，雌激素的分泌逐渐增加，于排卵前一周左右，卵泡分泌的雌激素明显增多，血中浓度迅速升高。与此同时，血中 FSH 水平由于雌激素及卵泡抑制素的抑制作用，水平有所下降。于排卵前一天，血中雌激素浓度达到最大，形成第一个高峰。在其作用下，下丘脑增强 GnRH(促性腺激素)分泌，进而刺激腺垂体 LH 与 FSH 的分泌，特别是 LH 的分泌，形成 LH 高峰，雌激素这种促进 LH 大量分泌的作用称为雌激素的正反馈效应。LH 峰值出现后导致排卵的发生。

在黄体期，大约在排卵后 7~8 天黄体成熟时，血中雌激素形成第二个高峰，但较第一个高峰的峰均值为低。同时，孕激素分泌量达到最高峰。孕激素及雌激素浓度的增加，将使下丘脑与腺垂体受到抑制，GnRH 释放减少，FSH 与 LH 在血中浓度相应下降。至黄体退化时，雌激素孕激素分泌减少，使腺垂体 FSH 与 LH 的分泌又开始增加，重复另一个周期(图 17-1)。

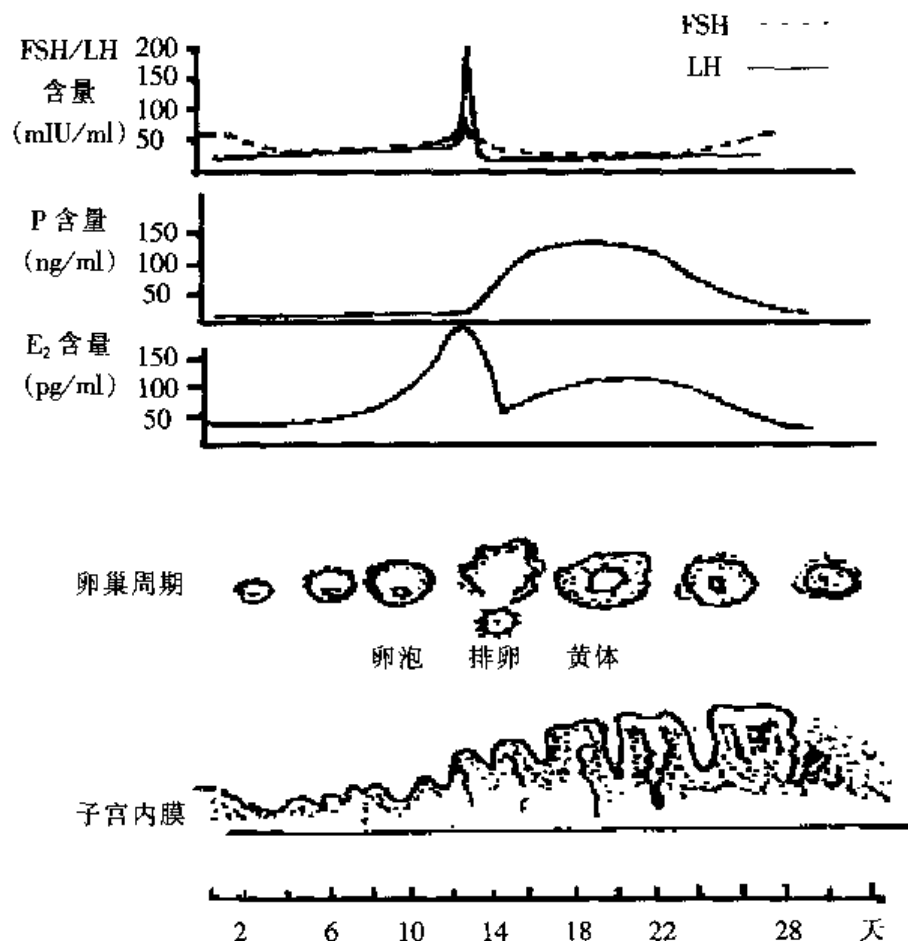


图 17-1 月经周期中血 FSH、LH、雌二醇 (E₂) 及孕酮 (P) 含量的变化



二、月经周期中运动能力的变化

(一) 不同时相中运动能力的变化

月经周期中由于女性激素水平的规律性波动,导致机体的运动能力发生相应变化。在月经周期不同时相中,人体运动能力的变化具有明显的个体差异。但有研究证实,人体有氧工作能力及整体体能以黄体期为最强,卵泡期及排卵期其次,经前期及月经期最弱。因此,在女性运动员的训练和竞赛安排中,应充分注意其体能与月经周期的关系,根据各时相体能的变化规律合理安排训练负荷量,大负荷训练应与体能的高峰时期相吻合,以使负荷作用达到最佳状态,从而提高训练效果和比赛成绩。

(二) 运动性月经失调

大多数运动项目对女性的月经周期没有影响,但大强度、长时间的剧烈运动则易引起运动员月经失调(athletic menstrual irregularity, AMI),表现为周期延长或缩短、月经过多或过少,甚至闭经。如长跑运动员约有 20% 发生长期闭经或月经过少,我国女运动员中闭经的发生率为 17%。

运动性月经失调的发生与运动负荷、体脂含量、运动项目、饮食营养和应激等因素有关。而长期运动训练中,下丘脑—垂体—卵巢轴的功能状态对月经周期的影响具有重要作用。这条轴的任何一个环节出现障碍,均可能发生月经失调。

研究证实,运动性闭经的产生与长期大强度、长时间运动训练后雌激素和孕激素水平下降有关,亦与一个月经周期中雌激素、孕激素正常规律的改变有关。这种变化的原因,一方面可能是由于下丘脑功能改变,调整激素的分泌模式,并修正其对运动应激的反应;另一方面,可能与运动时激素的代谢廓清率加快、性腺分泌能力下降有关。

目前大多数研究认为,运动性月经失调是可逆的,当运动员停止训练后,月经周期将恢复正常。

(三) 月经期与健身运动

对于参加健身运动的女性来说,即使在月经期亦可参加适当的体育活动,这是因为,适度的体育活动能改善人体机能状态,促进血液循环,改善盆腔生殖器官的血液供应,并可通过运动时腹肌、盆底肌收缩与舒张交替进行,对子宫起到一定的按摩作用,促进经血排出。

一般认为,经期运动负荷量应该适度,强度不宜过大。一些跳跃、速度和腹压增大的练习应该避免,以免造成经血量过多或子宫位置的改变。

三、妊娠期运动能力

研究表明,妊娠期女性进行适当的、时间不长的中等强度有氧运动,可以增强机体

各器官、系统的适应能力,减缓体重的增长速度,并有助于减轻下肢浮肿,减轻机体由于负担加重所产生的疲劳,保持良好的肌肉力量,这既有利于胎儿的生长发育,亦有利于分娩过程的顺利进行。

美国的一项调查表明,195名孕妇中,90%在孕期的前七个月内仍参加运动,均未产生不良反应。对平时无运动习惯的孕妇,应鼓励其参加舒缓轻柔的运动,如行走、柔软体操、健身跑和骑自行车等,以提高机体和心理的适应能力。但是,随着妊娠月份的增加,身体重心下降,运动能力受到影响。在整个妊娠期进行同样强度的运动,孕妇的耗氧量、心率肺通气量、肺通气当量和呼吸交换率逐渐增加。而且,有氧能力的下降幅度与孕妇体重的增加及适应能力的下降程度呈正比,与子宫体积增大的速度亦呈正比。

动物实验表明,长期运动可使动物幼仔出生体重减轻。随着运动强度和运动时间的增加,豚鼠的出生体重下降(特别是运动时间超过30分钟影响严重)。但对人类的研究大多报道胎儿出生体重不受母亲孕期运动的影响。对于正常女性或运动员,只要妊娠期内运动对孕妇及胎儿无显著不良反应,均可适度进行运动,但接触性的、对抗性的运动应该避免。

【小结】

1. 女子的生长发育比男子约提前两年,女子的呼吸和循环机能水平低,血液的带氧能力差,限制了氧的利用能力,有氧能力较男子为低。
2. 由于雄性激素水平的差异,女子的肌肉力量弱于男子。
3. 由于女子特殊的体型特征,其奔跑速度及负重能力均受到一定影响,而柔韧性及平衡能力强于男子。
4. 月经周期是女子特有的生理现象,月经周期的不同时相中,在下丘脑—垂体—卵巢轴的调控下,出现卵巢及子宫的周期性变化。
5. 女子的运动能力随月经周期时相的不同,产生较具规律性的变化。有氧工作能力及整体体能以黄体期为最强,卵泡期及排卵期其次,经前期及月经期最弱。
6. 大强度、长时间的剧烈运动较易引起运动员的月经失调,但运动性月经失调大多是可逆的。

【思考题】

1. 结合女子生理特点分析健身运动及运动训练中应注意的问题。
2. 从运动能力与月经周期的关系考虑,应如何安排运动负荷?

【主要参考文献】

1. Jacqueline L. Puhl, Sport science perspectives for women, Human kinetics publishers, Inc 1988.
2. 杨锡让主编:《实用运动生理学》(修订本),北京,北京体育大学出版社,1998.
3. 张镜如主编:《生理学》(第四版),北京,人民卫生出版社,1995.



4. 郑陆等:《女子篮球运动员月经周期中运动能力变化的研究》,《体育科学》,1994年第6期。
5. 郑陆等:《女子篮球运动员月经周期中 PWC_{170} 及 VO_{2max} 的变化规律初探》,《山东体育学院学报》,1994年第2期。
6. 郑陆:《生殖激素及抗生殖激素在运动性月经失调中的作用》,《中国运动医学杂志》,1997年第3期。
7. 童坦君、张宗玉主编:《医学老年学》,北京,人民卫生出版社,1995。

(山东体育学院 郑陆)



第十八章

老年人的生理特点与体育锻炼

【提要】本章以运动对老年人神经系统、运动系统、心血管系统、呼吸系统、体成分、血液流变学、免疫功能、抗氧化能力以及代谢能力的良好影响,说明运动能增进老年人健康,提高生活质量,预防某些疾病,有着延年益寿的作用;同时也提出了老年人锻炼时应遵循的生理学原则。

随着时代发展和科学技术的进步,人类的物质文化生活水平不断提高,使人的平均寿命明显延长。在许多国家,老年人口的比例逐渐增加,并出现了明显的老龄化趋势。研究老年人的健康,重视加强老年保健措施,延缓衰老过程已经成为重要的研究课题。

第一节 概 述

一、日历年龄与生物年龄

年龄是衡量每个人生命存在的时程和发展阶段的重要生物学指标。人体的年龄可分为日历年龄和生物年龄两大类。前者以日历为衡量单位,后者以生物学特征为单位。人们习惯上所指的年龄均是人体的日历年龄。

(一) 日历年龄

日历年龄是以每个人从出生之日起,以年、月、日为单位进行计算的年龄。通常所指的年龄是指每个人的生命已经存在的日历时间。一旦人体生命体征消失之时,该个体生命活动所覆盖的时间段,即为该个体的寿命。在目前正常的生存环境条件下,人类的寿命介于几十年到一百年之间。但随着科学技术的进步和生存条件的改善,人体的寿命将得到一定程度的延长。

(二) 生物年龄

生物年龄是以日历年龄为参照,以每个人在生长、发育、成熟与衰老等生命活动的不同阶段所表现出来的相对独立的生物学特征为依据而划分的年龄。生物年龄就是指每



个人当前所展现出来的,代表一定日历年龄特征的群体平均水平的实际生物学发展阶段和程度。通常用相对于日历年龄的“岁”来表示。如某少年的日历年龄为8岁,但其骨骼发育的生物年龄(骨龄)为10岁,即说明该少年的骨龄发育已经具备了日历年龄为10岁的少年的发育程度。

生物年龄还可以再分为生理年龄、解剖年龄和心理年龄等。生理年龄是以机体的生理机能为评定标准的年龄评定方法;解剖年龄是以机体的结构成分和发育程度为评定标准的年龄评定方法;而心理年龄是以人的心理活动特征为评定标准的年龄评定方法。

(三) 日历年龄和生物年龄的关系

从生命发展规律来讲,具有一定日历年龄的个体总会具有相应的生物学特征,而一定的生物年龄反映了个体当前所具有的生物学特征相对于一定阶段的日历年龄的生物学发展程度。日历年龄是不可抗拒的客观规律,生物年龄却是可以通过自然的和人为的方法与手段,在一定程度上进行调整,改变个体的生物年龄。

(四) 影响人体寿命和生物年龄的因素

影响人体寿命和生物年龄的因素包括遗传因素、营养因素、社会因素、环境因素和体育运动等。

二、衰老的概念及老年人划分标准

从老年医学角度讲,衰老(aging)是指人体随着年龄的增长,形态结构和生理功能出现的一系列退行性变化。加拿大的谢泼德(1985)指出,衰老是机体保持内环境稳定的调节能力降低,使得生存的概率下降。简单地说,老年人的生理调控机制变差,反应时变慢,抵抗疾病的能力变弱,工作能力下降,工作后恢复时间延长,身体结构的弹性变差。

人类的衰老变化是循序渐进的,它受到先天遗传因素和后天环境因素等多方面的影响。因此,每个老年人的个体差异很大,机体不同的器官其衰老的速度也不同。一个人的年龄或衰老程度主要受实际年龄、生理年龄和心理年龄等多方面的影响。实际年龄是一种不以人类意志为转移的客观现象,年复一年的增加;生理年龄、心理年龄会受到人体组织结构、生理功能和心理状态等因素的影响。因此,不能划定一个年龄作为所有器官衰老的起点。一般来说,60岁以上为老年人。世界卫生组织(WHO)对老年人的划分提出新的标准(表18-1)。

表 18-1 世界卫生组织提出的老年人划分标准

年龄(岁)	称 呼
44 以下	青年人
45~59	中年人
60~74	年轻的老年人
75 以上	老年人
90 以上	长寿老人

(依耿德章, 1994)

三、衰老的机制

现代科学的迅速发展,推动了对衰老机制的研究。各国学者对衰老的机制提出了以下几种学说。

1. 自由基学说

自由基学说认为随着年龄的变化,机体代谢过程产生一些自由基,与体内某些成分(如蛋白质、脂肪)发生反应,生成脂质等过氧化物,对机体产生损害作用,导致衰老。

2. 交联学说

该学说认为,机体中的核酸和蛋白质等大分子可以通过共价键联结成难以分解的聚合物,而不能在体内发挥正常的功能,且对细胞产生严重损伤,引起组织理化性质改变、酶活性降低、蛋白质合成障碍以及废物积累等,最终导致细胞衰老。

3. 遗传程序学说

根据遗传程序学说,衰老过程是由人体生物钟所预设的,通过遗传因素按各自的程序预先已作好安排,按时由特定的遗传信息激活一些组织产生特异性的退行性变化,最终导致衰老死亡。

4. 免疫学说

免疫学说认为,衰老是自身免疫现象对机体自身组织破坏的结果。随着年龄的增长,正常免疫机能降低,免疫系统失控,不再起保护作用,对疾病的抵抗力下降,疾病发生率增加,且女子的发病率是男子的两倍,其衰老也比男子快。

5. 内分泌机能减退学说

还有的学者提出了内分泌机能减退学说。该学说认为,老年人体内激素分泌减少对体内各种物质代谢及某些疾病的发生产生一定的影响,是引起衰老的一个重要因素。如妇女绝经期分泌雌激素减少,会引起骨质疏松症等一系列变化。

6. 突变学说

突变学说则认为细胞受有害因素(如辐射、化学损害和脱氧核糖核酸自发水解等)的影响,使控制基因发生突变,细胞不能正常工作,导致各器官、系统失调而致衰老。

最近又有人提出了“遗传基因理论”,认为人的生老病死归根结底都与基因相关,认为人的衰老主要是由于人体的“保养”及“修补”系统有缺陷,而这些系统最终由基因所控制,因此,通过改造或“关闭”某些基因,便可控制人类的衰老过程。



第二节 老年人生理特点与健身作用

一、神经系统

随着年龄的增长,老年人的神经系统生理机能也发生许多变化。这些变化包括感受器退化,中枢处理信息的能力降低,平衡能力和神经系统的工作能力下降。表现为视力、听力下降,记忆力减退,对刺激反应迟钝,容易疲劳,恢复速度减慢等。

中枢处理信息能力下降的主要原因是大量神经细胞萎缩和死亡。老年人脊髓运动神经元数目减少 37%,神经冲动的传导速度减慢 10%,因而使神经肌肉活动能力受影响,表现为单纯反应时和复杂反应时变慢,运动时延长。65 岁的老年人反应时比 20 岁青年人延长了 50%。老年人由于脑干和小脑中细胞数量减少,中枢肾上腺素能系统发生退行性变化,神经系统内的去甲肾上腺素水平逐渐降低,小脑皮质 β -肾上腺素能受体密度降低,加上外周本体感受器机能下降,限制了精确地控制身体运动的能力,平衡能力和运动协调性减退,容易跌倒。由于动脉硬化和椎动脉血流受阻,老年人中有 15%~24% 的人会出现体位性低血压。

研究表明,老年人经常进行体育锻炼,其反应时较不锻炼的老年人短。连续二十年体育运动的老年男子的动作反应时与 20 岁无运动的青年男子相似或更快。因此,有规律地进行体育活动,在某种程度上能延缓神经肌肉功能的生物学衰老。

二、运动系统

(一) 骨骼肌

在衰老过程中,骨骼肌发生显著的退行性变化。其特征是肌纤维的体积和数量减少,尤其是下肢肌的快肌衰退更明显。伴随着肌肉体积的减小,肌肉力量也下降。因而老年人的动作灵活性、协调性及动作速度下降。研究表明,老年人最大力量的下降为 18%~20%,并认为肌肉力量下降的速度与肌肉活动情况有关。经常进行抗阻训练,能促进蛋白质的合成,保持肌肉体积及力量,降低其衰老的速度。例如,以 80% 最大肌力进行抗阻练习,屈膝力量和伸膝力量都增加,随着力量的显著增长,肌纤维也产生适应性肥大。老年人运动训练引起的力量变化和年轻人是相似的。老年人进行步行或慢跑训练,可选择性地使 I 类和 II_a 类肌纤维横断面增大,毛细血管和肌纤维比值、毛细血管的数目和密度增加,线粒体增大、增多,琥珀酸脱氢酶活性增加。研究表明,老年人在生理、结构及运动能力上具有很大的可塑性。经常进行高强度训练能取得迅速的效果。在 60 岁的人群中训练引起力量增长率为 1.9%~72%。



(二) 关节

随着年龄增长, 关节的稳定性和活动性逐渐变差。衰老常伴有胶原纤维降解, 关节软骨厚度减小及钙化、弹性丧失, 滑膜面纤维化、关节面退化。骨关节的变性会使关节僵硬, 活动范围受限制。但是有人认为, 老年人的骨关节炎是衰老的结果还是反复损伤(病理性引起)的结果尚未清楚。体育锻炼可增加肌肉力量, 防止肌肉萎缩的退行性变化, 保持关节韧带的韧性和关节的灵活性, 使老年人的动作保持一定的幅度和协调性。研究表明, 经常参加太极拳练习的老年人脊柱外形多保持正常, 脊柱活动功能较一般人好, 脊椎椎体唇样增生的发生率大大低于一般的老年人。

(三) 骨骼

骨质疏松是老年人中较普遍发生的现象, 尤其是绝经后的妇女更普遍。患有骨质疏松症的人极易发生骨折。据第 14 届国际老年学术会议(1989)报道, 绝经后的妇女至少有 1/4 发生骨质疏松, 70 岁以后其中 40% 发生过骨折。骨质疏松症发生是一个渐进的过程。女子约从 30 岁开始骨中矿物质逐渐丢失, 而男子约从 50 岁才开始。麦卡阿特尔报道, 60 岁以上的老年人由于骨矿物质的丢失及多孔疏松, 会导致骨质量减少 30%~50%。随着年龄增长, 骨质疏松引起骨密度和抗张强度下降, 使骨折发病率也随之升高。脊柱、髌骨和腕部是骨折的易发部位, 而髌部骨折在老年人尤为多见。

老年人骨质疏松的原因尚未完全清楚, 可能与性别、性激素分泌水平降低、消化功能低下导致钙吸收障碍、运动减少、吸烟、酒精、咖啡因及遗传等综合因素有关。这些因素可能引起负钙平衡, 使骨中的矿物质含量减少。

运动能有效地防止和治疗骨质疏松症。坚持经常性负重运动不仅能阻止骨质的丢失, 而且还能增加骨矿含量, 增加骨矿密度, 预防骨质疏松症的发生。此外, 还可以矫正变形、改善关节功能、增加柔韧性、增强肌力和耐力, 保证肌肉和运动器官的协调性并防止摔跤, 从而减少骨质疏松和发生骨折的危险。但是, 单纯运动还不能完全代替雌激素治疗绝经期妇女骨质疏松症。Kohrt(1998)报道, 激素替代疗法加运动对于增加总体骨矿密度比替代疗法更有效, 尤其是增加腰椎部和髌部大转子的骨矿密度, 且能减少脂肪积累。研究也表明, 在运动的基础上, 适量增加钙的摄入, 再加上激素的调节, 三者联合应用, 可产生互补作用。健骨运动配合钙剂补充可抑制骨矿的丢失, 对绝经期女性骨量的维持起重要作用。绝经前期的妇女每天需补钙 1000 毫克, 绝经后妇女每天需补钙 1500 毫克。

运动时骨密度的增加受负荷大小、骨骼局部应力及运动量等因素影响。负重运动能增加负重骨的骨质量, 使骨骼变得粗壮; 没有负荷应激时则骨质减少。即使是 80 岁老人, 坚持每日步行 1 英里能有效地减少骨质丢失, 预防骨质疏松的发生。而在失重状态下工作的宇航员, 骨矿含量明显低于正常人群。但是, 非负重项目(如游泳、自行车运动)与负重项目(如跑步、举重)相比, 对负重骨的影响则较少。骨骼局部应力负荷与骨质量关系最为密切。骨骼承担的压力负荷越大, 越能够增强成骨细胞活性, 使骨生成增强。例如, 专业网球运动员运动侧前臂的桡骨骨矿含量较对侧高 30% 以上。另外, 机械



压力负荷重复作用于某一骨骼的运动,也能增加该骨的骨密度。如长跑者跑步时下肢所承受的重复压力负荷很大,所以下肢骨和肌肉均较一般人粗壮有力。

三、心血管系统

衰老使氧运输和氧摄取的能力都下降。最大摄氧量约在二十多岁开始以每年 0.4~0.5ml/kg(毫升/公斤)速率递减,到 65 岁时下降近 30%~40%。有氧能力的下降受氧运输系统的中枢机制和外周机制功能下降的影响(表 18-2)。研究发现,如果坚持体育活动、体成分又保持不变的话,VO₂max 递减率为 0.25ml/kg。无训练者的 VO₂max 递减率是有训练者的两倍。所以过于肥胖或活动少的人将会加快最大摄氧量的下降速率。

表 18-2 男子年龄增长时机能能力和身体成分的变化

指 标	年龄(岁)	
	20	60
最大摄氧量(ml/kg·min)	39	29
最大心率(次/分)	194	162
安静时心率(次/分)	63	62
最大每搏输出量(ml)	115	100
最大动静脉氧差(ml/min)	150	140
最大心输出量(升/分)(L/min)	22	16
安静时收缩压(mmHg)	121	131
安静时舒张压(mmHg)	80	81
肺总容量(L)	6.7	6.5
潮气量(L)	5.1	4.4
肺余气量(L)	1.5	2.0
脂肪百分比	20.1	22.3

(依 Brooks, 1988)

(一) 心率

随着年龄增长,静息时心率的变化很小,而最大心率却下降。25 岁的青年人最大心率(最大心率=220-年龄)为 195 次/分,而 65 岁老人则下降到 155~160 次/分。老年人最大心率下降的原因可能是由于交感神经活动减弱、传至窦房结的神经冲动减少所致。

(二) 心输出量

一般来说,老年人的心脏容积仍保持不变,但静息时的每搏输出量减少,在力竭性工作时,老年人的每搏输出量比青年人少 10%~20%。这反映了伴随衰老过程,老年人心肌细胞萎缩,冠状动脉出现粥样硬化,左室舒缩功能减弱,心肌灌血不足及收缩力下降。由于最大心率的降低和每搏输出量的减少,故心输出量也随之降低。65 岁老年人的最大心输出量为 17~20 升/分,比 25 岁的青年人低 30%~40%。

大血管和心脏弹性随年龄增长而减低。血管硬化增加了血流的外周阻力,增大了心脏的负荷,使心肌的耗氧量增加。冠状动脉粥样硬化会引起心肌缺氧。外周阻力较高也使安静时和最大运动时的收缩压升高,但舒张压变化甚小。由于老年人心血管系统的生理功能明显减退,所以在剧烈运动时,其心率和血压会急剧增加,成为心血管发病的重要诱因之一。

(三) 动静脉氧差

最大动静脉氧差随年龄增长而趋向减少,65岁老人的动静脉氧差仍可达140~150毫升/升。其减少的原因可能与体能水平下降、动脉氧饱和度下降、肌红蛋白的含量减少、外周血流分配不足以及组织中氧化酶系统的活性减弱等因素有关。随着年龄增长,组织毛细血管数量下降及肌纤维萎缩,使毛细血管数量与肌纤维比值减小及酶活性下降,从而导致氧利用率下降。

研究证实,缺乏体育活动与衰老本身都能导致老年人心血管机能下降。适宜的有氧运动能改善心血管机能。耐力训练可使老年人的心脏机能和肌肉的有氧代谢能力提高。进行耐力训练后,老年男女的最大摄氧量分别增加了19%和22%,增加程度与年轻人相似。

总而言之,运动对老年人来说受益最大的器官是心肺功能系统。老年人经常练太极拳、长期散步锻炼能使静息心率减慢、动脉血压降低,每搏输出量、心输出量增加,心电图S-T段异常发生率降低。

四、呼吸系统

衰老伴随着呼吸系统的结构和机能产生不良的变化。这些变化表现为肺泡壁变薄、肺泡增大、肺毛细血管数目减少、肺组织的弹性下降及呼吸肌无力等,从而导致肺泡扩散的有效面积减小、肺残气量增加和肺活量的下降。因此,在剧烈运动时,只能通过增加呼吸频率来提高肺通气量,而不是依靠呼吸深度的增加。

静态和动态的肺功能指标随着年龄的增长而衰退。肺活量、最大通气量和时间肺活量等机能指标呈现进行性下降。有资料表明,老年男女的1秒钟用力呼气量分别以每年大约32毫升和25毫升的速度下降。老年男性第一秒时间肺活量从正常的82%下降到75%左右,女子则从86%下降至略少于80%。虽然随衰老的产生使呼吸系统机能下降,但65岁的健康老人仍具有相当程度的肺通气贮备。

有氧训练可使老年人的肺功能能力提高,使最大通气量增加,其增长速度与心输出量的增长相适应。坚持体育锻炼能抑制与衰老相关的肺功能下降。

五、血液系统

随着年龄的增长,老年人血液出现浓、粘、聚、凝的状态,临床上称之为高粘滞血症(HVS)。高粘滞血症可使微循环的血管形态和血液流变发生异常,直接影响到组织



及器官的生理功能。

血液的粘稠度主要取决于红细胞的压积、血浆粘度与红细胞的变形能力。随年龄增长,老年人的纤维蛋白原增加,而纤溶能力下降,使血浆粘度增加。另外,机体造血机能下降会使血液中年轻的红细胞数量减少,衰老的红细胞数量增加,过氧化脂质在体内不断积聚以及血管硬化等,这些因素都可引起血液粘度升高。红细胞变形能力是影响血粘度和血流阻力的重要因素。随着衰老过程的发展,红细胞膜弹性下降、血沉增加,导致变形能力下降。血液粘度的升高和红细胞的变形能力下降,使血液的流变性降低,循环阻力增加,心脏负担加重。因此,心输出量、有氧能力及清除代谢产物等机能都将减弱,成为诱发心血管疾病的主要因素。

研究表明,长期运动锻炼使纤溶能力增强,对于增强血液的流变性、降低血粘度有重要作用。长期进行冬泳、门球、太极拳、长跑、散步和舞蹈等锻炼均可对老年人血液流变学指标产生良性影响。这对改善老年人高粘血症及预防心血管疾病有一定的作用。

六、免疫系统

随着年龄的增长,免疫系统的功能显著降低。表现在免疫细胞数量的减少和活性的下降、T细胞增殖反应、白细胞介素-2 (IL-2)水平、受体表达、信号传送及细胞毒性作用等下降。尤其是T细胞功能受到的影响更明显,功能性T细胞数量下降及T细胞亚群比值发生了改变。60岁以上的老年人外周血液中T淋巴细胞的数量可降至青年时期的70%左右。这是由于胸腺随着年龄的增长发生退化所引起的。

IL-2对 CD_4^+ (辅助性T细胞)、 CD_8^+ (细胞毒性T细胞)及抑制细胞的增殖、分化有重要作用。衰老过程使IL-2受体的数量、亲和力和表达等下降。IL-2的减少对机体免疫反应有副影响,使T细胞信号传送减少,钙调节障碍。由于免疫系统功能衰退,直接影响老年人的身体健康。

适当的运动可使机体免疫系统的功能增强。运动引起免疫系统机能变化趋势因运动强度、方式、个体健康和训练水平而有所差异。实验证明,一次剧烈运动可抑制免疫机能、辅助性T细胞与抑制性T细胞比值(CD_4^+/CD_8^+)下降,NK细胞(自然杀伤细胞)的百分比及活性升高。进行适当的耐力运动后,机体的免疫系统机能加强。坚持冬泳、慢跑、太极拳和网球锻炼会对老年人NK细胞活性及数量产生良好影响。坚持海水冬泳的老年人,其 CD_4^+ 升高幅度要大于 CD_8^+ ,故 CD_4^+/CD_8^+ 细胞比值增高,提示免疫功能增强。在实际生活中,常参加锻炼的人患感冒少,因而由感冒引起的一系列疾病,如扁桃体炎、气管炎和肺炎等呼吸道疾病就不容易发生。

七、抗氧化系统

衰老机理的“自由基学说”认为自由基在人机体衰老过程中起重要作用。通常认为,LPO(过氧化脂质)含量表示自由基损伤的程度,而SOD(超氧化物歧化酶)活性反映体内自由基清除系统的功能状况。人体各组织中的LPO随年龄增长而升高,而细胞内

的 SOD 随年龄增长而逐渐下降。

研究证明,长期健身运动均能不同程度地提高老年人抗氧化系统的功能。可阻止血清 LPO 的升高及减慢中老年人体内 SOD 的下降速率,使机体自由基清除系统中的酶活性维持在较高的功能状态,减少对正常细胞组织的攻击作用。

八、体成分和体重

随年龄增长,身体成分和身高发生显著的变化。40 岁左右身高开始下降,60 岁时身高可降低 6 厘米。60~80 岁身高下降速度加快,每十年降低 2 厘米。有人认为,多年从事负重工作的人身高下降速度较快。身高随年龄而降低是因为脊柱后凸(驼背)、椎间盘压缩及椎骨退化造成的。人的体重通常在 25~50 岁之间处于上升阶段,其后开始逐步下降。体重增加伴有体脂增加和去脂体重下降。男女老年人的体脂平均值一般分别约为 26%(男青年为 15%)和 38%(女青年为 25%)。

老年人的瘦体重较年轻人小,老年男性的瘦体重为 47~53 公斤(青年男子为 56~59 公斤),女性为 31~41 公斤(青年女子为 38~42 公斤)。身体活动能力随着年龄增长而逐渐下降,因而使瘦体重减少和体脂增加,这种体成分的改变会增加老年人发病率及生理机能减退。

有氧运动可有效地氧化体内脂肪使体脂下降,而对去脂体重的影响较小。抗阻运动对减少去脂体重和增加瘦体重均有良好效果。老年人抗阻运动后,会引起骨骼肌产生适应性肥大、质量增加,而骨骼肌中约 73%是水,所以表现为瘦体重增加。

九、血脂代谢

血液中脂质水平增高称为高脂血症,它是动脉粥样硬化的启动因素。动脉粥样硬化是常见的老年性疾病。体内的 TC(胆固醇)、TG(甘油三酯)及载脂蛋白等的代谢与粥样硬化密切相关。HDL-C(高密度脂蛋白胆固醇)具有促进外周组织胆固醇消除的作用,其增高有助于减少患粥样硬化的风险。LDL-C(低密度脂蛋白胆固醇)和 VLDL-C(极低密度脂蛋白胆固醇)的作用是将全身脂肪转向细胞,包括血管内皮细胞。当 LDL-C 被氧化时,容易形成动脉血块及脂肪斑块而导致动脉粥样硬化。所以 LDL-C 和 VLDL-C 水平增高可增加粥样硬化的发病率。

中等强度有氧运动能有效地改善脂蛋白和载脂蛋白的代谢。长期坚持健身跑、太极拳、太极剑、步行和迪斯科健身舞锻炼可有效提高 HDL-C 水平,降低血清 TG、LDL-C、VLDL-C 及载脂蛋白 β 水平。而抗阻练习对血中 TC、TG 以及脂蛋白的水平影响不大。

摄入低胆固醇的食物(如大豆蛋白)能改善血胆固醇状况。维生素 C、E 及 β -胡萝卜素能够阻止 LDL-C 的氧化。有人还认为,葡萄酒中某些成分可以抑制 LDL-C 的氧化,从而抑制脂斑的形成,降低正常人患动脉粥样硬化的风险。



第三节 老年人健身运动原则

进行健身运动要想达到健身祛病、防病抗衰、延年益寿的目的,就必须讲究科学的锻炼方法。老年人进行健身运动时,必须遵守以下原则:

一、适宜运动项目原则

老年人进行健身运动时,适宜从事耐力性项目,而不宜进行速度性项目。在耐力健身运动项目中常采用的有步行、健身跑、游泳、自行车、登山和跳健身舞等。有条件时还可以打网球、门球及高尔夫球等。在我国传统体育项目中,可选择气功、太极拳和太极剑等。还有自然锻炼法(如日光浴、空气浴和冷水浴等)和医疗体育锻炼都可增进老年人的身心健康。在进行耐力性健身运动同时,还要适当进行一定程度的力量性锻炼,以减轻老年人肌力的减退。

二、循序渐进原则

在进行健身运动的初期,运动负荷和运动量要小,经过锻炼适应后再逐步增加和达到适宜的运动负荷和运动量。经过一段时间锻炼后,如运动时感到发热、微微出汗,运动后感到轻松、舒畅,食欲、睡眠均好,说明运动负荷和运动量合适。锻炼的动作应由易到难、由简到繁、由慢到快,时间要逐渐增加。老年人运动时,可用运动后即刻脉搏变化和恢复时间来控制运动量。老年人的适宜运动量可用 $170 - \text{年龄}$ 这个公式来掌握,即运动后即刻脉搏达到 110 次/分,5~10 分钟内脉搏恢复到安静时水平较为适宜。

三、经常性原则

健身运动一定要持之以恒。每周锻炼不应少于 2~3 次,每次锻炼不低于 30 分钟。同时,要合理安排锻炼时间,养成按时锻炼的良好习惯。只有这样才可使身体结构和机能发生良好的变化,增强身心健康。

四、个别对待原则

老年人在锻炼前应做一次全面的身体检查。通过检查可了解自己的健康状况和各脏器的功能水平。要根据老年人的年龄、性别、体力特点、健康状况、运动基础及运动习惯来选择最适宜的运动项目,并制定合理的锻炼计划,要因人而异,不能千篇一律。



五、自我监督原则

老年人参加体育锻炼要加强医务监督。要学会观察并记录自己的脉搏、血压及健康状况,以便进行自我监督,防止过度疲劳,避免发生运动损伤,提高锻炼效果和健康水平。运动时要注意适当安排短暂休息,运动前后要认真做好准备活动和整理活动。老年人锻炼时气氛应轻松愉快和活跃,尽量避免做憋气的动作和参加精神过于紧张的比赛活动。如在运动中出现脉搏过快或过慢,或变得不规则时应停止锻炼,去医院检查。遇有感冒或其他疾病以及身体过度疲劳时,应暂停锻炼,并及时进行治疗或休息。

【小结】

1.衰老对细胞功能和系统调节两方面都有影响。30岁以后大多数生理功能以每年0.75%~1%的速率下降。身体能力下降的特征有最大摄氧量、最大心输出量、肌肉力量、神经功能、抗氧化能力、免疫能力和血液流变性等降低,并伴有骨质疏松及体脂增多等。

2.健身运动可减慢衰老过程中人体退行性的机能变化,提高神经系统、运动系统、心血管系统、呼吸系统、血液系统和免疫系统的机能,增强抗氧化能力,对身体成分和脂代谢产生良好的影响。

3.老年人只有进行科学的健身运动,才能达到健身祛病和延年益寿的作用。在进行健身运动时,要遵循适宜运动项目原则、循序渐进原则、经常性原则、个别对待原则和自我监督原则。

【思考题】

1. 衰老过程中人体机能能力下降的主要表现是什么?
2. 健身运动对延缓衰老过程有哪些影响?
3. 老年人最适宜的运动项目有哪些?体育锻炼时应注意哪些生理原则?

【主要参考文献】

1. 谢泼德著,陶心铭等译:《体力活动与衰老》,北京,人民体育出版社,1987。
2. 耿德章主编:《中国老年保健全书》,北京,人民卫生出版社,1999。
3. 乔奇·A·布茹克司著、杨锡让等译:《运动生理学》,北京,北京体育学院出版社,1988。
4. 曲绵域等编著:《实用运动医学》,北京,北京科学技术出版社,1996。
5. William D.Mcardle, et al. Exercise Physiology.Williams & Wilkins, 1996.
6. Frank W. Effect of aging on human skeletal muscle and motor function. Med. Sci. Sports Exerc. 1994.
7. Goggdn, at al.Skeletal muscle adaptations to endurance training in 60-to 70 yr old men and women.J.Appl.physiol.1992.



8. Wendy M.et al.HRT preserves increases in bone mineral density and reductions in body fat after a supervised exercise program.J Appl.Physiol 1998.
9. Hepple, R.T., Resistance and aerobic training in older men:effects on $\dot{V}O_2$ peak and the capillary supply to skeletal muscle.J.Appl. Physiol 1997.
10. Michae L J.Physical activity and the progressive change in body composition with aging:current evidence and research issues.Med,Sci.Sports Exerc.1999.
11. Mazzeo,R.S.The influence of exercise and aging on immune function. Med, Sci. Sports Exerc.1994.

(广州体育学院 龚惠兰)



第十九章

运动处方的生理学基础

【提要】本章介绍了运动处方的概念和内涵，并就运动处方的基本要素以及制定与实施进行了系统阐述。在此基础上，以健身跑为例，具体讨论了运动处方的应用。

第一节 概 述

体育运动对增强体质、预防疾病和促进健康等有良好作用。但是，并非所有的人从事相同的运动都有同样好的效果。对于同一种运动负荷，在运动员、一般健康者和不同程度的疾病患者中机体产生的反应差异是很大的。即使同一个体，在不同的时期、不同的机能状态下，对同一运动负荷的反应和效果也不一样。因此，不同的个体应有适合其机能需要的不同的运动形式、强度、时间、频度或间隔、持续周期等。如何科学地从事体育锻炼，使机体最大限度地保持或提高机能水平，使某些疾病得到有效的防治或消除、机体尽快地得到康复，是运动生理学和运动医学研究的重要课题之一。

运动处方是随着运动生理学的发展而逐渐成熟和完善起来的。早在 50 年代，就开展了对运动处方的研究和应用，其在运动健身中的作用和地位也已被越来越多的人所认识。作为一个专有名词，运动处方(The Exercise Prescription)是指针对个人的身体状况而制定的一种科学的、量化的周期性锻炼计划。即根据对锻炼者所测试的实验数据，按其健康状况、体力情况及运动目的，用处方的形式制定适当的运动类型、强度、时间及频度，使锻炼者进行有计划的周期性运动的指导性方案。

运动处方可根据运动目的不同，分为健身运动处方、健美运动处方、竞技运动处方和康复运动处方等。

第二节 运动处方的基本要素

运动处方的基本要素包括运动目的、运动类型、运动强度、运动时间、运动的时间带、运动频度和注意事项等。



一、运动目的

根据个体不同的身体情况确定目标即运动目的。运动目的具有主观和客观的双重性。主观性表现为对运动的意向、愿望和兴趣，是以情绪为核心的主观意愿需要。而客观性则更多的是由于健康状况、疾病程度等身体客观状况产生的需求，把运动作为满足机体健康需要的一种手段。运动目的主要有以下方面：

1. 促进生长发育。
2. 防治某些疾病，保持健康，延缓衰老。
3. 增强体质，提高工作效率。
4. 丰富文化娱乐生活，调节心理状态，提高生活质量。
5. 学习掌握运动技能和方法，提高竞技水平。

二、运动类型

运动类型即运动的种类是确定运动处方性质的重要因素，必须根据运动目的来选择适当的运动类型。

（一）身体运动的生理学分类

在运动处方中较常应用的运动种类分类有以下几种：

1. 按肌肉活动特征分类

按肌肉活动特征分类，运动可分为动力性运动与静力性运动。进行动力性运动时，身体多个环节均有位移，如走、跑、跳等。进行静力性运动时，身体多数环节在一定时间内维持相对面定姿势静止不动，如支撑倒立、蹲马步和十字悬垂等。

2. 按动作结构特征分类

按技术动作结构特点，将运动分为周期性运动、非周期性运动和混合性运动三大类。

周期性运动是按一定程序周而复始地重复相同动作的运动，如走、跑、骑自行车、滑雪、划船和游泳等。这类运动的动作结构简单，强度易于控制。周期性运动是运动处方中采用较多的运动类型。

非周期性运动是按一定顺序进行的、各个动作要素没有周期性重复的运动，如体操、武术、摔跤、跳水、羽毛球和乒乓球等。这类运动对动作的技术要求较高，不容易掌握，但能较好地提高参与者的运动兴趣和保持运动的兴奋状态。

混合性运动是既有周期性运动成分又有非周期性运动成分的运动，如跳高、跳远、篮球、足球、手球和花样滑冰等运动项目。运动中的跑动是周期性的，而跳跃、投篮、射门和传球等动作属于非周期性运动。

3.按肌肉工作的相对强度分类

根据完成各种距离跑的速度与时间之间的关系,把肌肉工作的强度划分为极限强度、次极限强度、大强度和中等强度的运动。

极限强度(最大强度)运动是指人体持续以最大速度或最大力量(肌肉快速紧张工作)工作的运动,持续时间约为10~30秒,如100米和200米跑、50米游泳和短道速滑等周期性运动,以及跳高、跳远、投掷、举重和跳马等非周期性运动。

次极限强度(次最大强度)运动是指人体快速紧张工作能持续30秒到3分钟的运动,如400~1500米跑、100~200米游泳等周期性运动,以及自由体操、武术、散打、摔跤和拳击等非周期性运动。

大强度运动一般指人体紧张工作能持续5~30分钟的运动,如10000米跑等运动。

中等强度运动则指人体能持续30分钟以上的周期性运动,如马拉松跑、公路自行车、长距离游泳和越野滑雪等。

4.按运动供能特点分类

根据肌肉收缩时的代谢特点,可将运动分为无氧供能(或无氧供能为主)运动和有氧供能(或有氧供能为主)运动两大类。

无氧供能为主的运动包括最大强度及次最大强度的运动。有氧供能为主的运动包括无氧阈强度运动、中等强度运动和低强度运动等。中等强度的有氧运动是健身运动处方中经常采用的运动。供能物质是以糖和脂肪的有氧氧化为主,如竞走、超长跑、长距离游泳和滑雪等,以及群众性体育活动中的健美操、有氧舞蹈和球类运动等。低强度有氧运动主要以脂肪的有氧氧化提供能量,心肺功能指标变化不超过本人最大值的50%~60%,如步行、慢跑、保健操、太极拳和养生气功等。

(二) 运动类型的选择

1.运动类型

为达到全面身体锻炼的效果,健身运动处方应包括以下三种主要运动类型:①有氧耐力性运动;②抗阻力量性运动;③伸展柔韧性运动。

根据运动目的和身体具体情况,选择三种类型的比例应有不同侧重。有氧耐力性运动主要是改善和提高人体的有氧工作能力,这类运动有步行(散步、快走、定量步行及竞走)、慢跑(或健身跑)、走跑交替、自行车、跑步机上跑步、有氧舞蹈、健美操和不剧烈的球类运动等。抗阻力量性运动是以增强力量、健美形体为主的运动,如利用哑铃、杠铃、弹簧和橡皮筋等负重法或阻抗法进行的力量练习。伸展柔韧性运动是以调整呼吸节律为主的运动,如慢节奏健美操、医疗体操和各种养生气功等等。

2.健身处方运动类型选择的原则

(1) 运动应是以有氧供能为主的有氧耐力性运动。

(2) 参与运动的主要大肌群的动力性运动与静力性运动结合,全身运动与局部运动



结合,以全身动力性运动为主,局部静力性运动为辅。

(3) 对于不常运动的人,动作结构上选择以周期性运动为主,动作简单,强度易于控制。

(4) 要兼顾个人运动习惯和爱好。

(5) 运动类型既相对稳定又要有所变换,避免长时间重复单调动作引起疲劳。

三、运动强度

人体运动中,运动强度是指单位时间移动的距离或速度,或肌肉单位时间所做的功。运动强度是运动处方中决定运动量最主要的因素。运动强度分为绝对强度和相对强度两大类。过去的运动处方多使用绝对强度,现在相对强度的使用越来越广泛。

在表 19-1 的“主观运动感觉”栏内 6~20 的 15 个主观感觉等级上,每一单数等级各有不同的负荷强度感觉描述。这 7 个负荷强度感觉描述都具有相应的分值,如果各等级的等级数值乘 10,其数值常与达到该等级的心率大体一致。有的学者还计算出相应的负荷强度。由于两者有很好的相关性,因此,近年来得到广泛的应用。但按运动类型及对运动的熟练程度而有所不同,对习惯于运动的人可靠性相当高。运动者的运动感觉等级在 12~15 之间,说明负荷强度是合理的,中老年人运动时也应达到 11~13 级为宜。

表 19-1 主观运动强度(RPE)测定表

RPE	主观运动感觉	相对强度(%)	相应心率
6	安静	0.0	
7	非常轻松	7.1	70
8		14.3	
9	很轻松	21.4	90
10		28.6	
11	轻松	35.7	110
12		42.9	
13	稍费力	50.0	130
14		57.2	
15	费力	64.3	150
16		71.5	
17	很费力	78.6	170
18		85.8	
19	非常费力	95	195
20		100	最大心率

应用篇 确定合理负荷强度的最好方法,是将靶心率和主观运动强度两种方法进行结合。即先按适宜的心率范围进行运动,然后在运动中结合主观运动强度评价表来掌握负荷强度。这样,在运动中不用停下来测心率便可知道自己的负荷强度是否合理。



健身运动处方中负荷强度的设定,以控制在人体有氧代谢工作的范围内为原则。即按肌肉工作相对强度分类中的大强度、中等强度以下的负荷强度;或按运动供能特点分类中有氧代谢供能为主的运动,青壮年可以进行个体乳酸阈强度以下的有氧运动,中老年则只适宜中等以下强度的有氧运动;若以心率为指标则达到有氧工作心率范围,一般人相当于本人最大心率的60%~85%,中老年人在本人最大心率的60%~75%较为适宜,即每分钟120~160次。

四、运动时间

运动时间指每次运动持续的时间,是组成运动量的重要因素。在持续的周期性运动中运动时间乘以运动强度就是运动量。因此,运动时间依负荷强度而发生变化。在制定运动处方时,有时采取较低的负荷强度和较长的运动时间,而有时则采用短时间高强度的重复运动。负荷强度确定后,持续该强度的运动时间就成为影响锻炼效果的重要因素。运动时间过短,对机体不能产生作用,达不到应有的效果;运动时间过长,又可能超过机体的负担能力,造成疲劳积累而损害身体。因此,确定运动时间应根据运动目的及负荷强度来设定能引起机体产生最佳效果的运动时间,即必要的运动时间。比如,锻炼心血管功能的健身运动处方,较适宜的运动时间至少应在15分钟以上,其原因有三:第一,在进行运动时,人体各器官、系统的工作效率是在运动开始后一段时间内逐步提高的,人体开始运动20~60秒后心率即可达到必要的水平,而心输出量、吸氧量和氧脉搏在开始运动后2~3分钟才急剧增加,其后逐渐增加到较高水平需4~7分钟。其次,人体通过一段时间的运动,从相对安静状态到进入适宜强度的运动状态,并非达到了运动目的,只是完成了克服生理惰性、激发和动员心脏储备力的工作。研究表明,健康人心率达到150次/分以上时,所持续运动的最少时间必须在5分钟以上才开始产生效果。第三,在完成正式的运动以后,应逐渐降低负荷强度继续运动5分钟以上,使人体由较紧张的肌肉活动状态逐步过渡到相对放松状态,以利于身体的恢复,即进行整理活动。据研究,每次运动持续20~60分钟对于提高心血管系统机能和有氧工作能力较适宜。

五、运动的时间带

运动的时间带是指一天中进行运动的时机(即在何时进行运动)。应根据人的生物节律周期及日节律来合理安排进行运动的时间带。例如,高血压患者运动的时间带,白天比早晚要好,其理由是脑溢血的发病有早晚多而白天少的倾向。特别是冬天,由于低气温、血压也容易升高,在早晚进行健身运动存在潜在危险。

研究表明,人体在凌晨至8点血液粘度显著增高。也有资料显示,人体血液流变学各项指标从20点至凌晨6点呈不同程度上升趋势。其中血粘度、红细胞压积和红细胞聚集指标呈线性上升,尤其0~6点升高明显。这与临床资料显示的脑溢血发生在凌晨数小时内明显增多极为相关。可能是由于连续睡眠期间液体摄入量减少,动脉血压及纤维蛋白原改变等因素所致。



一次性中等强度的运动对血液流变学的影响多表现为血容量增加,并且血细胞容量增加相对更多,血粘度随运动时间的延长亦趋增加。根据人体血液流变学的生理节奏变化和运动中的变化特点对其的影响,心血管病患者或中老年人运动的时间带应避免在清晨8点以前。当然,清晨在空气清新的环境中做一些轻松的活动,如散步、练气功、打太极拳、做柔韧体操等,对于增进健康亦是非常有益的。

空腹时进行运动会产生不良影响,特别是胰岛素依赖型糖尿病(IDDM)患者,有可能导致低血糖的危险。所以对于清晨空腹时运动(清晨跑步等)必须加以注意。此外,还应注意饭后不宜立即进行运动,以免影响消化和吸收。

六、运动频度

运动频度通常指每周运动的次数。运动的效果是在每次运动对人体产生的良性作用的逐渐积累中显示出来的,是一个量变到质变的过程,所以要求经常锻炼,或根据不同的运动目的,实施一定周期的运动计划(运动处方)。而不能凭一时的兴趣,三天打鱼、两天晒网,也不能急于求成使运动频度过高。如果一次运动后,运动对机体的良性作用完全消退后再进行第二次运动,则前一次运动的效果不能被蓄积;如果一次运动后,运动对机体的良性作用还未出现(也就是前一次运动的疲劳尚未消除)就紧接着进行第二次运动,则会造成疲劳被蓄积。以上两种运动间隔形式都不能取得满意的效果。后一种形式如长期下去还将对机体造成过度疲劳。可见,运动频度在制定运动处方中的作用是非常重要的。正确的设定运动频度,要根据运动目的和身体情况的不同而区别对待。

如果以健身或康复为目的,一般人的运动频度应以每周三次以上为适宜,同时还应结合每次运动的强度、持续的时间、个人的身体恢复情况以及对运动的适应能力等因素综合考虑。如果每次锻炼的运动量不大(但要达到锻炼效果的最低限度)也可增加运动频度,每天运动一次,甚至两次,使体育锻炼成为生活方式中的组成部分,作为每天生活中习惯性活动,只要没有疲劳的积累,对身心健康是有益的。

七、注意事项

以治疗和康复为目的的运动处方中应指出禁忌参加的运动项目、健身运动中自我观察指征和停止运动的指征,重视做好准备活动和整理活动等等。同时要让参加健身运动的人掌握和了解一些必要的体育卫生知识,如运动后不要立即坐下或躺下,以免引起“重力性休克”或其他不适感觉,不能立即吃生冷食物,不能马上游泳或冷水浴等等。

第三节 运动处方的制定

制定运动处方时,首先应按照一定的程序进行较系统的身体检查,对健康状况进

行评定。在此基础上选择运动试验方法进行运动试验,对身体机能进行评定。对于健身运动处方尤其要对心血管机能进行评定,以发现潜在的心血管疾病,确定是否可以进行运动锻炼。然后再进行体质测试,以评定身体素质和体力等级,确定其进行运动的负荷范围。通过以上程序,获得为制定运动处方所必需的全面资料和信息,为运动处方的科学性提供依据。最后,在此基础上制定出运动处方,并在实施过程中定期进行反馈和调整。

一、制定运动处方的步骤

(一) 健康调查与评价

通过询问、观察和本人填写调查表等方法全面了解受试者的病史、运动爱好、饮食情况、生活方式、运动目的和居住环境等情况,并进行一般体检、人体测量及身体成分测定,其目的是对受试者的健康状况作出初步评价。

健康的评价不能仅限于躯体的健康,还应包括精神、心理状态、道德行为及社会适应能力等多方面,需要进行多指标的综合评判。此处的健康调查与评价由于条件所限,故只能是初步的定性评价。

(二) 运动试验

根据健康调查的初步健康评价进行运动试验,其目的在于评定受试者的心血管机能,发现潜在的心血管疾病,测定最大摄氧量和最大心率等指标,为制定运动处方提供定量依据。根据试验的条件、检查目的以及受试者的特点,如健康状况、年龄和运动经历等选择适当的试验方法。目前较普遍采用的方法是“多级负荷试验”。对于运动能力较高的运动员及青年运动爱好者等可采用多级负荷试验中的极量试验。对于一般无运动经历的健康者,可采用亚极量试验和症状限止试验。此外,对于身体某些指标异常(例如总胆固醇异常、血脂值偏高等)但血压和其他方面尚属正常而且无合并症,不能属于完全健康而又没有明显疾病的情况,即所谓亚健康受试者,运动试验也可采用亚极量试验和症状限止试验,但要求有较完善的监护设施。

对于已确诊有心血管疾病者,通过彻底的医学检查,排除运动试验的禁忌症,方可进行运动试验。采用低负荷试验或症状限止试验,要求有密切的监护及必要的应急设施。为了保证安全,对心血管病患者不宜进行最大摄氧量和最大心率的测定,可根据定量负荷时的心率或吸氧量间接推算最大摄氧量,用 $220 - \text{年龄}$ 推算最大心率。

(三) 体质测试及生理年龄评定

1. 体质测试

体力是指身体运动的基本功能,或者说为进行运动或劳动身体所具备的基本素质,它是通过人体在运动或劳动中表现出的力量、速度、耐力和灵敏等机能能力来体现的。

可以通过测定握力、背力、立位体前屈、闭眼单足立、反复横跨、俯卧撑、5 分钟跑、12 分钟跑和纵跳等指标来反映。

2. 生理年龄简便评定方法

每个人都有自己的日历年龄，但和实际生理机能水平是有差异的，只有“生理年龄”才能反映一个人实际的生理机能状况。如表 19-2 所示。

表 19-2 生理年龄评定表

项 目	等 级	男 40 岁	男 50 岁	男 60 岁	女 40 岁	女 50 岁	女 60 岁
反复横跨 (次/分)	A	35	32	27	30	27	22
	B	30	27	21	25	22	17
垂直跳 (cm)	A	41	36	30	24	20	16
	B	34	29	23	18	14	10
握力 (kg)	A	29	37	33	25	24	22
	B	32	30	28	21	19	17
俯卧仰体 (cm)	A	44	40	34	37	31	25
	B	38	35	29	32	26	20
5 分钟跑 (m)	A	975	925	857	775	725	675
	B	900	850	800	700	650	600

注：A 为健康合格下限数；B 级水平以下为警戒信号，应引起注意。

3. 有氧耐力测定法

(1) 摄氧能力

摄氧能力是评定身体机能状况的主要指标，这项指标主要反映人的心脏血管状况。库珀经研究，将男女四个年龄组定出了五个有氧耐力的级别。例如，40 岁男子的最大摄氧量低于 25ml/kg/min，其健康状况评为劣。这表明，其心血管系统不能保证各器官和组织获得正常生命活动所必需的氧(表 19-3)。

表 19-3 男子最大摄氧量(ml/kg/min)与体力级别

有氧能力	年 龄			
	30 岁以下	30~39 岁	40~49 岁	50 岁以上
很差	低于 25.0	低于 25.0	低于 25.0	—
差	25.0~33.7	25.0~30.1	25.0~26.4	低于 25.0
及格	33.8~42.5	30.2~39.1	26.5~35.4	25.0~33.7
好	42.6~51.5	39.2~48.0	35.5~45.0	33.8~43.0
很好	51.6 以上	48.1 以上	45.1 以上	43.1 以上

(2) 12 分钟跑或游泳测试

库珀经过研究发现,用 12 分钟运动足可以测出每个健康者的耐力水平。受试者通过(跑、走或游泳等运动方式)在 12 分钟之内尽可能完成更长距离的运动。例如,一位 40 岁的男子在 12 分钟内跑不到 1300 米,就说明他每分钟 1 公斤体重的摄氧量不到 25 毫升。他的有氧机能水平评为劣等(表 19-4)。12 分钟尽力游泳的距离也可反映受试者的耐力水平(表 19-5)。

表 19-4 男子 12 分钟跑测验评定标准(公里)

耐力水平	30 岁以下	30~39 岁	40~49 岁	50 岁以上
很差	少于 1.6	少于 1.5	少于 1.3	少于 1.2
差	1.6~1.9	1.5~1.84	1.3~1.6	1.2~1.5
及格	2.0~2.4	1.85~2.24	1.7~2.1	1.6~1.9
好	2.5~2.7	2.25~2.64	2.2~2.4	2.0~2.4
很好	2.8 以上	2.65 以上	2.5 以上	2.5 以上

表 19-5 12 分钟游泳测验评定标准(不限姿势)(米)

等 级		30~39 岁	40~49 岁	50~59 岁	60 岁以上
很差	男	<320	<275	<230	<230
	女	<230	<185	<140	140
差	男	321~410	276~365	231~320	231~275
	女	231~320	186~275	141~230	141~185
及格	男	411~505	366~460	321~410	276~365
	女	321~410	276~365	231~320	186~275
好	男	506~595	461~550	411~505	366~460
	女	411~505	366~460	321~410	276~365
很好	男	>730	>550	>505	460
	女	>640	>460	410	>365

(3) 2400 米跑

除了用测定 12 分钟跑(或其他运动)评定受试者的耐力水平外,定距离的耐力跑也常被采用,如 1600 米、2400 米跑。库珀认为 2400 米跑可以反映受试者的有氧代谢能力。可通过测试 2400 米跑成绩对照相应的评定级别和评分表进行耐力水平评定。如表 19-6。



表 19-6

2400 米跑测验评定标准(分钟)

级	别	30~39 岁	40~49 岁	50~59 岁	60 岁以上
很差	男	>16:31	>17:31	>19:01	>20:01
	女	>19:31	>20:01	>20:31	>21:01
差	男	14:44~	15:36~	17:01~	19:01~
	女	19:01~	19:31~	20:01~	21:00~
及格	男	12:31~	13:01~	14:31~	16:16~
	女	16:31~	17:31~	19:01~	19:31~
好	男	11:01~	11:31~	12:31~	14:00~
	女	14:31~	15:56~	16:31~	17:31~
很好	男	10:00~	10:30~	11:00~	11:15~
	女	13:00~	13:45~	14:30~	16:30~
非常好	男	<10:00	<10:30	<11:00	<11:15
	女	<13:00	<13:45	<14:30	<16:30

在进行上述测试时,健康情况欠佳的人,以及很久没有从事体育活动的人一定要谨慎,不能强度过大。因为没有运动经历的人,测验时往往对自己的体力不能正确估价,也不会有效地控制强度,会造成一定的危害。对于没有运动经历的人,至少要用六周时间进行系统的训练。先练走步,后练跑步,有机体经过一番准备,才能经受各种耐力水平测试的考验。

二、运动处方的制定

通过以上几个步骤的工作,可以对受试者健康状况、体力水平和运动能力等有较全面的了解。根据以上检查结果便可制定运动处方。制定运动处方时要按照处方的内容逐项决定运动目的、运动类型、运动强度、运动时间及时间带、运动频度和注意事项等等。其中负荷强度应设定出安全界限和有效界限,运动时间应设定出必要的运动时间。如表 19-7、8 所示。

表 19-7

运动处方调查表

姓名:_____性别:_____年龄:_____职业:_____
联系地址:_____处方号:_____

(一)临床检查

现有病诊断:_____就诊日期:_____年 月 日

1.心电图检查:_____静息时心率:_____次/分,血压:_____。

2.X 射线检查;肺脏:_____CT 或 B 超:_____。

3.化验检查:尿常规:_____胆固醇:_____mg/l;脂蛋白:_____;甘油三酯:_____mg/l。

4.运动试验:_____最大负荷时心率:_____次/分。

5.12 分钟跑测验:跑距_____米,跑速 100 米/____秒;2400 米跑体质测试_____分钟,体力等级:_____。

6.体质强壮指数:强壮、优良、中等、体弱;体型:一般、消瘦、肥胖。身高体重指数:_____。

7.运动爱好:_____。



(二) 体质测量及身体素质测验

日期	身高 (cm)	体重 (kg)	胸围 (cm)				握力 (kg)		引体 向上 (次)	仰卧 起坐 (次)	纵跳 (cm)	体前屈 (cm)
			吸 气 末	呼 气 末	呼 吸 差	肺活量 (ml)	左 手	右 手				

(三) 肢体围度、径度及皮褶厚度测量

上臂围 (cm)		前臂围 (cm)		大腿围 (cm)		小腿围 (cm)		颈围	肩围	臀围	腰围	腰臀比	皮褶厚度 (mm)					
左	右	左	右	左	右	左	右	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)		胸部	腹部	大腿	小腿	上臂	髂上

表 19-8

运动处方卡

姓名: _____ 性别: _____ 年龄: _____ 预计每日得分: _____ 每周得分: _____

最大有氧能力: _____ 梅脱: _____

1. 运动目的: _____。

2. 运动类型及时间分配: _____。

3. 负荷强度: 心率控制在 _____ 次/分; 相当于最大耗氧量的 _____ %; 靶心率: _____ 次/分; RPE _____ 分。

4. 锻炼次数及每次持续时间: 每周(天) _____, 每次 _____ 分钟, 力量锻炼方法: _____ 次/周。

5. 准备活动项目: _____ (5~10 分钟); 心率 _____。

6. 整理活动项目: _____ (5~10 分钟); 心率恢复时间 _____ 分。

7. 注意事项: _____。

第四节 运动处方的实施

按照运动处方规定的运动内容, 如强度、时间和频度等进行体育锻炼即是运动处方的实施。这种体育锻炼不同于学生的体育课, 它更强调以个人的身体机能状况为依据, 实行有针对性的和周期性的身体锻炼。这种健身运动处方也不同于运动员的竞技运动处方, 它是以促进身体健康为目标, 更注重身心健康, 而不是强调运动竞技水平的提高。

一、实施过程的阶段性

任何一次有目的的锻炼, 都应该由三个阶段组成, 即准备阶段、训练阶段和整理阶



段。

(一) 准备阶段

通过做准备活动使身体机能由相对安静状态过渡到适宜强度的运动状态。该阶段的任务是：通过准备活动提高神经中枢和肌肉的兴奋性；动员和加强心脏活动和呼吸机能，增加肌肉的血流量和供氧量；使体温适当升高，提高酶系统的活性，加快生化反应过程，使肌肉粘滞性下降，弹性增强，防止受伤，加强体内物质代谢过程，为机体进行正式锻炼做好准备。

准备阶段的时间一般在 10 分钟以上，根据年龄、季节和运动水平等情况可适当增减。儿童少年神经系统灵活性高，准备活动时间可少些；寒冷季节准备活动时间可多些；运动水平低的体弱者，准备活动的运动强度和运动量不能过大，时间也可短一些；高水平的耐力性项目运动员准备活动时间可长些，有的要达 30~50 分钟。

准备活动的量与强度应低于正式活动，活动的形式通常可先做一些伸展性的柔软体操，依次活动身体各部位关节，再做一些轻松的节律性运动，逐渐增大运动幅度和速度，使心血管及呼吸系统的机能逐渐动员，直至接近正式活动的强度。适宜准备活动的标志是身体发热，微微出汗，呼吸明显增加。

准备活动后应有一短时间的休息间歇，然后开始正式运动，间歇的时间不宜长，约三分钟为好。

(二) 训练阶段

训练阶段是指通过实施运动处方的运动项目，使身体维持在相对较高机能状态下持续运动锻炼的过程。健身运动处方中该阶段的主要任务是：达到和保持适宜的负荷强度，使机体在稳定状态下持续运动所需要的时间，促使心血管、呼吸系统和有氧代谢系统等持续高效率工作，从而锻炼其机能适应能力，提高机能潜力。

适宜的负荷强度，即运动处方中设定的负荷强度要在实际运用中通过一定时间的自我反复调试和校正，才能达到较准确的程度。持续运动所需要的时间，即运动处方中设定的时间，一般至少应在 10 分钟以上。若是采用有间歇训练的运动类型，如球类运动等，整个持续运动的时间可长些。

(三) 整理阶段

整理阶段是指通过做整理活动，使身体机能由激烈的运动状态逐渐恢复到相对安静状态的过程。整理活动是在正式运动后，逐渐降低负荷强度，做一些较轻松的身体运动。其目的是使人体激烈的肌肉活动逐渐得到松弛，心血管和呼吸系统紧张的机能活动逐渐缓解，减轻疲劳程度，促进体力恢复。

整理活动的内容和准备活动的内容相似，但安排的顺序要颠倒，动作应较缓和，尽量使肌肉放松。最后还可以做一些拉长肌肉的运动，以利于疲劳的消除。整理活动的时间一般应在 5 分钟以上。

二、实施过程中的自我监控

在运动处方的实施过程中，除了按照运动处方中设定的运动类型、负荷强度、时间、间歇和重复次数等进行运动锻炼外，还应根据运动过程中和运动后身体的反应情况掌握运动量的自我监测和调节。

（一）心率自我监测

首先要学会计算自己的目标心率(靶心率)，并能熟练地测定自己的脉搏。常在手腕桡动脉处或耳前方颞浅动脉处用手指触扪动脉搏动次数，亦可把手放在左胸部，直接测数心跳次数。但不可在颈总动脉处测定，因为触摸颈总动脉的压力有时会引起心率明显减慢，并有可能出现心脏活动异常。通常用运动停止后即刻测得的 10 秒钟脉搏数乘以 6 近似地作为运动时的每分钟心率。

（二）主观强度感觉

主观强度感觉判定法是已被广泛应用的一种简易而有效的评价运动量的方法，通常以 RPE 表示。RPE 也是介于心理和生理之间的一种指标。可以说 RPE 的表现形式是心理的，但反映的却是生理机能的变化。

心率结合 RPE 值测试是最常用而简易的方法。将客观生理机能的变化与主观心理对运动的体验结合起来，可以避免单纯追求某一靶心率的盲目性。例如，某人的靶心率为 150 次/分时，RPE 值为 13，而当患有轻度感染或工作劳累后，再以 150 次/分心率强度运动时会感到非常困难和费力，RPE 值会增加，与以前的主观感觉相比较，这可能是一种前期病理症状，在这样的情况下勉强保持靶心率运动将是十分危险的。而通过 RPE 值的运用就正好避免了这种潜在危险的发生。由于身体承受运动负荷的能力具有可变性，所以在运动中通过主观感觉和客观生理指标相结合进行监控较适宜。

（三）自我感觉与基础指标检查

观察每次运动后疲劳的消除情况，运动量适宜的标志是：睡眠良好、次日晨起疲劳感完全消除，感觉轻松愉快，体力充沛，有运动兴趣和欲望。

运动后次日基础状态测定基础心率，每分钟波动不超过 3~4 次；呼吸频率每分钟不超过 2~3 次；血压变化范围上下在 10mmHg；体重减少在 0.5 公斤以内。如数日内有脉搏、血压明显的持续上升，或肺活量、体重等明显的持续下降，则说明运动量偏大，有疲劳积累的征兆，应及时减少运动量。

第五节 健身运动处方示例

一般人认为，运动就是健身，只要运动就能增强体质。其实，只有运用运动生理学



等知识,科学地进行运动锻炼才能达到健身的目的。学会了运动只是解决了健身手段,是用运动去健身的开始,而运动处方是解决学会运动之后,如何科学健身的方法问题。

一、健身跑

慢跑亦称健身跑,是增进健康、尤其是心血管健康和抗病延年的有效手段,被人们视为“有氧代谢运动之王”而风行全球。健身跑的方法有多种,根据个人不同体质及运动习惯可选择采用。

健身跑可以自己控制速度,并有节奏地进行运动,适合不同年龄、性别和不同身体状况的人,尤其适合中年人锻炼。健身跑可以调节人体的生理机能和各器官的共济协调功能。人在进行一定强度的跑步运动时,在中枢神经系统的统一支配下,动员人体各器官和系统加强活动,以适应运动的需要。

健身跑时呼吸深度加大、呼吸频率加快,使平时不利用的肺泡得到利用,增强肺泡的开放数量,肺通气量比安静时增加10~15倍以上。在健身跑时心血管系统的活动也加强,促进全身的血液循环,及时供给组织细胞的能量和氧气,及时排出汗液和二氧化碳。与此同时,大脑也获得了充足的氧气供应,增强了兴奋和抑制过程的调节能力。所以跑步之后可使精神状态良好、周身轻松、精力充沛,祛病强身。

从心理健康方面,健身跑可以缓解抑郁症。据美国健身专家报告,他们以120名患抑郁症病人作为对象进行运动试验,坚持每天慢跑30分钟,三个月后80%的病人病情好转,20%的病人不良感觉完全消失,情绪明显改观。

系统参加健身跑三个月或更长时间,身体状况才能有根本的改善,其标志是:持续跑的速度已提高到每5分钟1公里,而且在跑程中不用特别费力就能做一定的加速。表明锻炼者心血管系统的机能有了很大的提高。

二、健身跑运动处方

(一) 运动目的

- 1.改善心肺功能,提高有氧耐力,增强体质。
- 2.调节神经系统功能,尤其是调节植物性神经系统功能。
- 3.改善消化系统功能。
- 4.促进脂肪代谢,控制体重,减肥健美。
- 5.防治高血脂、高血压和动脉硬化等心血管疾病。

(二) 运动形式与方法

健身跑的方法很多,如走跑交替、匀速跑、间歇跑、变速跑和重复跑等等。锻炼者根据身体情况和健康水平等进行选择。对开始从事健身跑的人,最重要的是循序渐进,

持之以恒,最好采用走跑交替和匀速跑为好。

1. 走跑交替

走跑交替适合于体弱和缺乏锻炼的人。方法是先走 100~200 米,然后慢跑 300~500 米,重复数次。初参加锻炼的人,一般是走 1 分钟,跑 1 分钟,交替进行。经过一段时间锻炼之后,就可以缩短走的时间,直到能慢跑 5~8 分钟。以后每隔 1~2 周逐渐增加跑步时间和距离,每周跑 3~5 次。如表 19-9 所示。

表 19-9 20 分钟走跑交替运动方案(30~49 岁)

周次	每周跑 2~4 次	总时间(分)
1	跑 1 分钟+走 1 分钟,重复 3 次,再跑 1 分钟	7
2	跑 2 分钟+走 1 分钟,重复 3 次	10
3	跑 2 分钟+走 1 分钟,重复 4 次,再跑 2 分钟	14
4	跑 3 分钟+走 1 分钟,重复 4 次	16
5	跑 4 分钟+走 1 分钟,重复 4 次	20
6	跑 5 分钟+走 1 分钟,重复 3 次,再跑 2 分钟	20
7	跑 6 分钟+走 1 分钟,重复 3 次	21
8	跑 8 分钟+走 1 分钟,重复 2 次,再跑 2 分钟	20
9	跑 10 分钟+走 1 分钟,重复 2 次	22
10	跑 20 分钟(要求不休息地连续跑)	20

2. 匀速跑

匀速跑是在跑的过程中跑速基本保持不变、均匀地分配体力的一种跑步方式。匀速跑对中年人来说是合适的,可根据自己的体力合理地选择跑步速度,也能够比较容易地控制运动中的心率。锻炼者还可采用定时间或定距离的匀速跑,灵活多样,由自己来掌握。

3. 间歇跑

是慢跑和行走交替的一种过渡性运动。一般从跑 30 秒、行走 30~60 秒开始,逐渐增加跑步时间,以提高心脏负荷。这样反复进行 10~20 次,总时间在 12~30 分钟,以后每两周根据体力提高情况再逐渐增加运动量。每日或隔日进行 1 次。如表 19-10 所示。

表 19-10 常用间歇跑方案

周次	慢跑 (秒)	行走 (秒)	重复次数	总时间 (分)	总距离 (米)
1	30	30	开始 8 次,以后每天加 1 次,至 12 次	8~12	500~800
2	60	30	开始 6 次,以后每天加 1 次,至 10 次	9~15	1200~2400
3	120	30	同上	15~25	2400~4000
4	240	60	开始 4 次,以后加至 6 次	20~30	3200~4800



4.变速跑

变速跑是采用快跑和慢跑交替进行的健身跑。变速跑的形式很多,如等距的、不等距的、直道快跑、弯道慢跑、不均匀的快跑和慢跑等。

跑步时呼吸自然,有适宜的深度。呼吸的节奏与跑的节奏相协调,采用长呼短吸方式,尽量使呼气更充分,才能使吸气加深。一般可采用单脚两步一吸、三步一呼(计左或右腿迈步落地的次数)的呼吸节奏,体力较好的人也可采用三步一吸、四步一呼。可用鼻子吸气、嘴呼气,也可采取口鼻兼用的呼吸方式。

(三) 负荷强度

健身跑的负荷强度主要通过跑步的速度来反映。在锻炼的初期,要严格控制跑速,跑步的持续时间则可逐步加长。健身跑负荷强度一般采用中等强度。负荷强度是否适宜,可用测定心率和自我感觉来掌握。通常采用的标准是:180减去年龄为适宜心率,如40岁的人运动时的适宜心率为 $(180-40=140)$ 140次/分左右。30~45岁身体健康而未经训练的人,心率应在每分钟140~150次。50~60岁的健康中年人在参加锻炼的初期,其脉搏频率一般不应超过每分钟140次。

(四) 运动时间、频度与时间带

1.运动时间

对于身体健康且经常锻炼者,每次持续运动时间在20~40分钟,至少15分钟。对从未参加过运动锻炼或身体虚弱者,锻炼初期阶段每次运动时间可适当减少,待身体适应后再逐渐增加每次运动的时间,直至达到要求的限度。对以减肥为目的的健身跑,可适当延长运动时间,一般不少于40分钟。

2.运动的频度

可根据个人对运动的反应和适应程度确定运动的频度,一般采用每周三次或隔日一次较好,每周运动总时间不得低于80分钟。

3.运动的时间带

一天中何时锻炼较好,应因人而异。有人认为清晨空气新鲜,习惯于早起的人多喜欢清晨跑步。现在选择晚上跑步的人也日渐增多。对于中青年人可以根据自己的生活习惯选择方便的时间,不过每次锻炼的时间带尽量相对固定更好。

对于中老年人运动的时间带应有所选择。人体血液流变学的日节律研究证明,血液的粘度在晚上22点以后至清晨8点呈不同程度的增高趋势,尤其是凌晨4~6点升高更明显。据统计,此时间带心脑血管意外的发生率亦最高。所以为避免意外,中老年人应尽量不选择清晨做较大强度的锻炼;要注意加强清晨锻炼的准备活动,不要一起床就跑步;尤其是在前一天工作较紧张、睡眠不充分,或身体感觉不适的时候不要勉强锻炼。

（五）注意事项

1. 做好充分的准备活动

跑步前要做好充分准备活动，促进血液循环，加强肌肉的收缩功能，防止肌肉拉伤和剧烈运动开始时出现心肌缺血。长期在水泥地跑步的人要避免小腿胫骨劳损，尽量选择在草地或泥土地跑。

2. 冬天跑步要注意防寒

穿衣多少要根据天气寒冷、个人抗寒能力和跑步运动量来确定，以跑时不感到太冷又不大量出汗为原则。

3. 患病时要注意休息

患感冒、发热和腹泻时暂不宜跑步。妇女在月经期间也应暂停健身跑锻炼。慢性病患者进行运动健身跑须经医生的检查许可，并做好自我检查和按时去医院复查。

【小结】

1. 运动处方是随着运动生理学的发展而逐渐成熟和完善起来的，是根据锻炼者的健康状况、体力情况及运动目的，用处方的形式，制定适当的运动类型、强度、时间及频度，使锻炼者进行有计划的周期性运动的指导性方案。

2. 运动处方的基本要素包括：运动目的、类型、强度、时间、实施的时间带、频度和注意事项等。健身运动处方应包括以下三种主要运动类型：①有氧耐力性运动；②抗阻力性力量运动；③伸展柔韧性运动。健身运动处方中负荷强度的设定，以控制在人体有氧代谢工作的范围内为原则，一般人心率应达到本人最大心率的60%~85%，中老年人达到最大心率的60%~75%；每次运动持续的时间20~60分钟较适宜；运动频度应以每周三次以上为适宜。

3. 制定运动处方时，首先应按照一定的程序对锻炼者进行较系统的身体检查，对健康状况进行评定，然后对身体机能进行评定。制定运动处方时要按照处方的内容逐项决定运动目的、运动类型、负荷强度、运动时间及时间带、运动频度和注意事项等。

4. 运动处方的实施过程可分为准备阶段、正式锻炼阶段（或训练阶段）和整理阶段。在运动处方的实施过程中，锻炼者还应根据运动过程中和运动后身体的反应情况进行自我监测和调节。自我监测包括心率自我监测、主观强度感觉和自我感觉与基础指标检测等。

5. 健身跑可以控制速度并有节奏地进行运动，适合不同年龄、性别和不同身体状况的人，是一项很好的健身运动。健身跑包括走跑交替、匀速跑、间歇跑和变速跑。

【思考题】

1. 什么是运动处方？
2. 试述运动处方的基本要素，以及各要素在运动处方中的作用。
3. 试述制定运动处方的基本程序。



【主要参考文献】

1. 体育学院通用教材:《运动生理学》,北京,人民体育出版社,1990。
2. [瑞典] 奥斯特朗等著,杨锡让等译:《运动生理学》,北京,人民体育出版社,1982。
3. 范振华等编著:《运动医学》,上海,上海医科大学出版社,1991。
4. 北京医学院主编:《生物化学》,北京,人民卫生出版社,1981。
5. 任建生:《心血管运动生理与运动处方》,北京,北京体育大学出版社,1996。
6. [日] 小野三嗣等编著:《运动の生理科学》,朝会书店,1978。
7. [日] 伊藤朗著,宋成忠等译:《从运动生化到运动处方》,北京体育大学出版社,1989。
8. [日] 常山、彰一等编著:《体力、健康概论》,株式会社书院,1983。
9. [日] 池上晴夫著:《运动处方——理论と实际》,东京株式会社朝仓书店,1990。
10. [日] 伊主一等编著:《图解·成人病の运动处方,运动疗法——虚血性疾患篇》,第一版,东京医齿药出版株式会社,1986。
11. [日] 石河利宽等编著:《スポーツ医学》,株式会社杏林书院,1978。
12. Guegue, D.M., et al. Effects of maximal physical exercise on hemorheological parameters in top level sportsmen. Clin. Hemorheol. 1989, 9:625~632.
13. COLT, E: Coronary-artery disease in marathon runners. N Engl J Med 302:57, 1980.
14. Galea, G. et al. Hemorrheology of marathon running. Int. J. Sports Med. 1985, 6: 136~138.
15. HANDLER, JB, ASAY, RW, Warren, SE, et al: Symptomatic artery disease in a marathon runner. JAMA 248:717, 1982.
16. Knowlton, R.g., et al. Plasma volume changes and cardiovascular responses associated with weight lifting. Med. Sci. Sports Exerc., 1987, 19:464~468.
17. JOKL, E and McGLELLAN, JT: Exercise and cardiac death. Med and Sport Vol. 5:1, 1971.
18. Nathan J. Smith. Common problems in pediatric sports medicine, Year book medical publishers, INC. 1989.
19. Noakes, T.D. Heart Disease in marathon runners: a review. Med Sci. Sports Exerc., Vol. 19, No. 3, pp. 187~194, 1987.
20. Saito, M., et al. Muscular sympathetic nerve response to graded leg cycling. J. Appl. Physiol. 1993, 75:373~381.
21. Weiner, DA: Prognostic value testing early after myocardial infarction. J Cardiac Rehab 3:114, 1983.

(武汉体育学院 任建生)



第二十章

生物节律与运动能力

【提要】本章将系统介绍生物节律的基本概念、内涵、要素、原理及主要研究方法，并在此基础上，对运动员的生物节律特征、人体机能状态的调整、时差服习及生物节律在运动员选材中的应用等进行阐述和讨论。

生物的时间结构特性是生命的基本特征之一。在生物体内的各个层次，从微观的脱氧核糖核酸(DNA)复制和转录、酶催化的生物化学反应，到细胞、组织、器官的生长与修复以及人体的机能活动，都表现出明显的周期性变化规律。我们将生物体的这种周期性变化规律和特性称为生物时间结构或生物节律性，简称为“生物节律”(biorhythm)或“生物节奏”。从生物存在的时间属性角度，专门研究生物体内这种时间结构的本质、特点及变化规律的学科，已经发展成为一门独立的生物分支学科——现代时间生物学(chronobiology)。

人体的生物节律特性是人适应环境时间条件的一种表现，是生物遗传性与其所生存环境长期相互作用的结果。在自然或人工实验条件下，通过长时间、连续监测与生物数据信息采集，用现代时间序列分析方法进行分析处理，探索人体时间结构的本质、特点及变化规律，这是科学生物节律观的核心。

随着现代时间生物学在体育运动中的广泛应用，人们更注重用科学的生物节律理论与方法，研究竞技体育和全民健身活动中的一些生物节律现象和问题，揭示和掌握在体育运动(锻炼)影响下，人体生物机能变化与时间变量之间的内源性函数关系、特点及动态变化规律，指导全民科学健身，提高运动训练效率和成绩，减少或避免运动伤病。目前，探索和揭示在体育运动影响下人体生物时间结构的本质、特点及变化规律，并将此规律应用于体育运动实践，已逐步发展形成了体育科学体系中的一门新兴分支学科——运动时间生物学(exercise chronobiology)，并成为运动生理学科的重要组成部分。

第一节 概 述

一、生物时间结构的基本成分

(一) 节律周期

周期是指完成一个节律循环所需要的时间，即从一个峰值到下一个峰值的时间，或



两谷值间的时间(图 20-1)。

(二) 中值

中值是指节律的统计学估计中线。它是实验所获原始数据被拟合为余弦曲线(函数)的平均值,通常指介于节律最佳拟合函数(余弦函数或其他模型)的峰值与谷值之间的点(见图 20-1)。

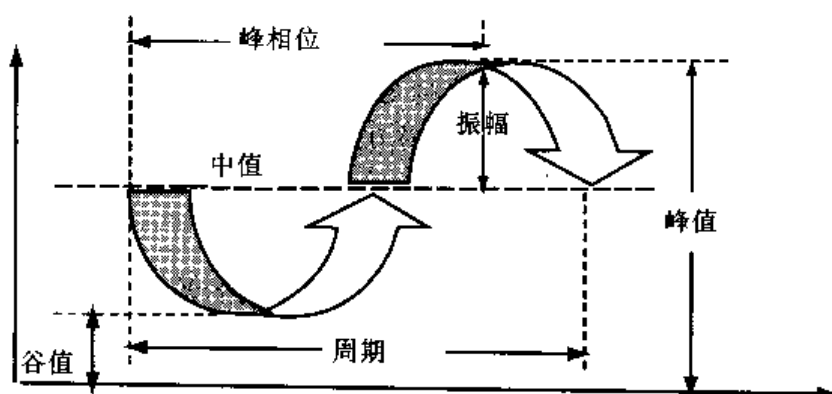


图 20-1 生物时间结构基本成分示意图

(三) 振幅

振幅是指在一个拟合节律函数(曲线)中,总估计量的一半、即从中值水平到峰值或谷值的距离(见图 20-1)。

(四) 峰值时相

峰值时相又称峰相位,指用数学模型表示节律时,其最适函数的峰值出现时刻与特定的参考时刻之间的时间间隔(见图 20-1)。

(五) 峰值

峰值又称节律最大估计值,指用数学模型(如余弦函数)来描述生物节律时,根据其函数关系所求出的最大值(见图 20-1)。

(六) 谷值时相与谷值

谷值时相又称谷相位。谷相位与峰相位恰好相反,彼此相差 180° 。谷值又称节律最小估计值,与峰值相对应,是根据节律拟合函数所求出的最小值(见图 20-1)。

二、生物时间结构的分类

(一) 近似昼夜节律

近似昼夜节律(circadian rhythm, CR)是描述生物变化或节律的周期在 24 小时 \pm 4 小

时区间内的生物节律,如体核温度、激素浓度等。

(二) 超日节律

超日节律(ultradian rhythm, UR)指周期小于 20 小时的生物节律,如心率、脑电波和呼吸频率等节律。

(三) 亚日节律

亚日节律(infradian rhythm, IR)指周期大于 28 小时的生物节律,如女性的月经周期等。亚日节律可进一步细分为近似周、月、年节律。

三、生物节律特殊研究方法

从方法学的角度上分析,生物节律研究的特殊实验方法主要体现在实验材料或对象、实验条件与方法以及节律数据的获取与分析处理等方面。

(一) 实验材料或对象

1. 实验材料的选择

由于不同种类及属性的生物学实验材料,其生物学属性和生活习惯等有一定的差别,故在生物节律研究中,常以行为方面具有较明显节律性的生物体(如人、猴、树鼯和大鼠等)作为实验材料。动物实验材料的选择原则,主要基于其基本生物学特性和时间生物学属性(即属于昼型或夜型动物)。如生长在我国西南地区的树鼯,外形似鼠,但生物学分类上属灵长类动物,其生理机能具有很明显的生物节律性。哺乳类动物中的大鼠,因其实验成本较低成为实验研究中最常选用的材料。人体实验研究则常以健康的志愿人员为实验对象。

2. 实验材料的分型

根据实验材料的时间生物学属性,可将动物分为三大类,即以夜间活动为主的“夜型”动物,以白天活动为主的“昼型”动物,以及行为规律兼有上述特点的昼-夜型动物。

对于人类来讲,根据时间生物学属性主要分为两大类,即习惯早睡早起的“早型”或称“百灵鸟型”;喜欢晚睡晚起的“晚型”又称“猫头鹰型”。由于类型的不同,他们的生物学机能节律参数,尤其是节律的相位(如峰相位)参数有很大的差异。因此,在实验前必须弄清楚每个受试者的生活习惯,以尽量减少实验的个体差异。

(二) 实验条件与方法

1. 隔离法

隔离法(isolation technique)是生物节律研究中的最主要实验方法之一。其特点是采用隔离外界的光照、声音、温度和湿度等时间信息的方法,将实验动物或受试者生活



环境中的时间信息与外界自然环境中的时间信息全部或部分隔离开来。根据对时间信息隔离屏蔽的程度,隔离法分为全封闭(whole-isolation)和半封闭(semi-isolation)式隔离两大类。

2. 时差模拟法

时差模拟法(time-zone simulation)又称为模拟飞行法(mimic flight)。该方法是在全封闭隔离法的基础上,根据实验设计要求,采用调整光照(明暗)时间制度等手段,建立起新的人工光照时间环境。如将白天变为晚上,晚上变为白天,即模拟跨越12小时时区。在模拟飞行的当天,如果采用将一天的时间延长几小时的方法而达到新的时间制度,称为“向西飞行”,反之,则为“向东飞行”。

3. 光脉冲刺激法

光脉冲刺激法(light-pulse)即指在特定时刻及时程里,通过采用强光照射,在24小时的作息时间制中,形成鲜明的明暗对比的方法。该方法由光照强度、作用时刻和持续刺激时程三个要素构成。恰当地应用该方法,可使受作用的某些生物节律产生明显的“峰相位移”(phase shift)效应。

4. 择时运动法

择时运动法(chrono-exercise)也称择时训练法,是指在特定时刻进行特定时间、且具有一定强度的身体活动,使生物体在相应的时刻产生机能振荡高峰,以造成节律的峰相位移。择时运动理论和实验方法是由孙学川提出。它是一种以人为主动调整生物节律的方法,在运动员赛前生理机能调整和克服时差反应等方面具有很高的应用价值。

(三) 节律数据的获取与分析处理

生物节律研究中的数据采集和分析处理方法具有独特的一面。主要体现在长时间的连续采样、应激和非应激状态条件下采样以及现代时间序列分析等方面。

1. 节律数据的获取

数据采集的特点:①长时间的连续采样。这是生物节律研究方法的一大特点。在揭示某一节律的特征时,为了保证完整、客观地获取到该节律完整周期中的各种参数,必须连续采集几倍或十几倍于周期数的数据。②同步采样。这是研究几个节律之间的内在时间函数(内相位)关系时所必须遵循的实验方法,以避免各节律间相位关系的实验性(假性)滞后或超前结果。③应激和非应激状态采样。这是在动物和人体实验中经常遇到的采样条件控制问题。当测定人体某项生物节律的峰值、最大振幅值和最大变化范围等指标时,常在其应激状态下进行采样。反之,当研究人体某些节律在常态情况下的模型时,应尽量排除一切可能产生应激反应的因素,保持受试者始终处于一种平稳的状态。为此,在动物实验中,常采用在新的生活环境中驯化一周,以避免实验性数据误差。

2.分析处理方法

时间序列分析法、明尼苏达余弦图法(Minnesota cosinor)、“非常量对照组参数比较法”和频谱分析法等是节律研究中最常使用的数据分析处理方法。其中,余弦图法包括单余弦图法、组平均余弦图法及群体平均余弦图法三种。

第二节 运动员的生物节律特征

一、血气指标和心肺功能的近似昼夜节律特征

(一) 血气指标

血气指标着重反映了人体的气体运输和维持酸碱平衡的机能,而这两大功能又是影响运动员体能的重要因素。研究表明,运动员的许多血气指标在安静状态下均表现出明显的昼夜变化特点(表 20-1)。因而,在运动医务监督、训练及赛前调整时,应该充分注意这些特点。

表 20-1 中国运动员血气指标的近似昼夜节律特征

指 标	中值水平	高峰时刻*	P 值
血红蛋白(g/L)	130.8	15:30	0.005
氧饱和度(%)	44.55	05:17	0.236
氧分压(kPa)	4.3	03:06	0.054
二氧化碳分压(kPa)	7.02	11:54	0.732
二氧化碳总量(kPa)	25.26	17:20	0.008
碳酸氢根离子(kPa)	24.4	16:10	<0.001
标准碳酸氢盐(kPa)	21.3	16:06	<0.001
pH 值	7.29	17:12	<0.001

* 以北京时间 00:00 为参照

(二) 心肺功能指标的近似昼夜节律特征

运动员的心肺功能指标是影响耐力素质的重要因素,也是运动医务监督工作中最常用的指标。心肺功能既有明显的超日节律特点,又表现出明显的近似昼夜周期性。但在运动实践中,最受到关注的是近似昼夜节律(表 20-2、3)。从表中可见,人体心肺功能的峰相位绝大多数处于 17~21 时,即人体的心肺功能在此时间内处于最高水平,与之相关的运动能力也处于最佳状态。这是人体下午体能和运动成绩普遍高于上午的时间生物学基础。

表 20-2

中国运动员心血管功能的近似昼夜节律特征

指 标	中值水平	高峰时刻	P 值
心脏射血速度(m/s)	0.79	18:26	<0.05
心脏射血加速度(m/s ²)	18.33	18:42	<0.05
心脏射血距离(cm)	11.03	18:20	<0.05
心指数(l/min/m ²)	37.11	16:18	<0.05
心输出量(l/min)	6.08	17:05	<0.05
心脏做功(kg/m)	5.72	17:10	<0.05
收缩压(kPa)	14.72	18:24	<0.05

表 20-3

运动员呼吸功能的近似昼夜节律特征

指 标	高峰时刻	变化范围
肺活量	18:00	16:00~22:00
肺阻力	06:00	05:00~07:00
吸氧量	18:00	17:00~21:00
呼吸频率	18:30	16:00~20:00

二、人体体能的近似昼夜节律特征

人体体能是人体在运动(或劳动)过程中所表现出来的综合生物学机能能力。人体体能可分为两大类,即整体工作能力和局部工作能力。掌握运动员的体能生物节奏规律特征,对于选拔优秀运动员尤其是耐力性项目运动员、准确了解运动员生理机能状态的周期性变化特点和实施科学的择时训练等,都具有重要的实际意义。实验研究表明,人体的整体和局部工作能力,都具有明显的近似昼夜节律(表 20-4)。

表 20-4

人体体能的近似昼夜节律变化参数

指 标	高峰时刻	变化范围
整体体能	19:28	18:00~20:00
起跑速度	17:00	16:00~18:00
50 码冲刺速度	17:00	16:00~18:00
手拍击速度	17:30	17:00~18:00
握力	17:00	16:00~18:00
俯卧撑	15:00	12:00~17:00

目前,对于运动员体能的月节律和年节律的实验研究尚不够充分,因为年、月节律不仅与运动员的生活习惯有关,而且与长年的训练节奏和比赛季节安排有关,故有待于进一步研究。在研究体能节律时,特别要注意人体主观因素的影响。为尽可能排除这一因素的干扰,一方面应要求受试者配合,另一方面应采用较好的测试及研究方法,并尽可能测试三天以上的数据。在测试整体体能时,可采用“人体体能评定数模法”,以排除主观因素和生理指标本身的生物节律对测试数据的影响。

三、激素水平的近似昼夜节律特征

睾酮、可的松的血液浓度水平与生物节律特点,直接影响着运动员的肌肉力量、速度耐力及运动应激等能力。目前,国内外许多教练员已把运动员体内的睾酮、可的松等激素水平,作为选拔优秀运动员和评定适宜运动量的重要指标。大量实验研究表明,人体内的绝大多数激素的分泌都表现出明显的近似昼夜节律性(表 20-5)。

表 20-5 中国优秀散手运动员血中睾酮、可的松近似昼夜节律特征

指 标	中值水平	高峰时刻 *	P 值
睾酮(nmol/L)	23.14	07:10	<0.05
可的松(nmol/L)	218.08	06:18	<0.05

* 以北京时间 00:00 为参照

四、体温近似昼夜节律特征

体核温度的生物节律在体育运动的医务监督、适宜运动量的评估和最佳竞技状态的调节中,具有很广泛的应用价值,也是教练员和运动员在运动实践中最常采用的生理指标之一。通过掌握运动员体温的近似昼夜和月节律的特点,可以间接推算出与该指标密切相关的其他生理和生化指标的变化情况。实验表明,运动员的体温近似昼夜节律的峰相位为 21 时 55 分,中值水平为 37.05℃。

第三节 运动员生物节律模型的建立和应用

运动员生物节律的建模,指建立每名运动员生理、生化指标周期性变化的节律模型,包括节律的曲线、对应的参数、最佳机能状态时刻(峰相位)、中值水平以及正常变化范围。建立每名运动员自己的生物节律模型后,在一定的阶段中,教练员和科技人员既可通过将低频采样所获得的数据与模型进行比较,及时发现运动员的机能变化情况,调整训练计划;又可以了解运动员体内机能最佳状态的发展,在一定时期内和一定程度上具有预见性。

一、运动员生物节律模型建立的主要步骤

从实际应用的角度考虑,运动员的生物节律模型可分为近似昼夜节律、近似周节律、近似月节律以及近似年节律模型四大类。建模完成后,随着运动员训练程度的提高、训练计划的不断调整和修改,原来建立起来的节律模型特征可能会发生相应的一些改变。故在建模一段时期后,需对模型的某些参数进行复测和适当修改。现以近似月节律模型为例,说明其建立过程。



(一) 采样

连续测定运动员在相对稳定状态下(每日起床前)1个月的生理和生化指标(如体温、血压、脉搏和尿蛋白等)。在有条件的训练淡季,可连续测定2~3个月,这样建立的模型更为准确。在冬训或大运动量训练期间不宜建模。

(二) 数据分析

将采样过程中所获数据输入计算机,进行时间序列分析;并编制该运动员有关指标的近似月节律模型参数表和曲线图,以及该运动员各种指标的节律特点分析报告。

二、运动员生物节律模型的应用

(一) 为适宜大负荷、大运动量提供依据

在大负荷及大运动量的训练期间,运动员的机体会产生一系列的变化,由不适应变为适应,其体内的一系列生理和生化指标也会有相应的变化。以模型参数为对照,将运动训练后所引起的显著变化与机能的正常节律特征进行比较,确定训练所引起的变化程度,从而为掌握适宜大负荷及大运动量提供了参考数据。

(二) 为调整运动员机能状态提供依据

为了适应比赛的日程安排,有时教练员必须对运动员的最佳机能状态进行调整。调整过程是否成功,调整的程度如何,均要以节律模型的曲线和参数为对照。

第四节 人体生物节律的调整

生物节律调整是指通过人为地改变外部时间信息环境(条件),使体内原有生物节律特征发生相应变化的过程。目前,在生物节律调整实践中,应用最为广泛的是对节律的峰相位进行调节,即将人体最佳机能状态出现由原来的某一时刻调至另一所期望出现的时刻,故又称峰相位移。

一、调整方向和跨度

调整方向是指节律峰相位在时间轴上水平移动的方向。跨度指峰相位提前或推后的程度。调整的方向和跨度是构成生物节律调整难度的两大主要因素。

(一) 调整方向

节律的峰相位提前称为“超前”,用“+”表示;推后称为“滞后”,用“-”表示。

如将运动员的最佳竞技状态由下午的 4 时调至下午 6 时,即滞后 2 小时。一般而言,节律滞后调整的难度小于超前调整。因为人体内原有的生物节律周期,在完全排除外部时间信息的诱导作用后(如在很深的山洞里生活),表现为 26 小时,这种节律周期称为自由运转节律周期。调整的方向越向自由运转节律周期值靠拢,调整的难度越小,引起的时差反应也就越小。

(二) 调整跨度

跨度常用时间(时区)或度数表示。跨度分为外部时间跨度和内部(峰相位移)跨度。前者指以外部时间(如北京时间)为参照所形成的跨度,后者是以该节律在调整前所具有的峰相位为参照。

二、调整方法

(一) 择时运动法

择时运动是生物节律调整的主要方法之一。运用择时运动应遵守如下原则:

1. 时序原则

时序原则要求调整训练的振荡高峰、新时间信息所包含的高峰、谷时相以及作息时间安排,都应目标时序特征相一致。

2. 强度原则

强度原则是指作用于运动员机体的、含有新时间信息的外部条件变化(刺激)的强度,应尽可能与比赛时的强度相一致,以给机体的节律系统产生一个有效的导引作用,使原来的节律峰相位向新的目标时刻迁移。

3. 峰谷时相对比原则

峰谷时相对比原则要求在调整训练中,施加在运动员机体上的机能振荡高峰时相与谷值时相的对比一定要鲜明,大强度运动休息之间,在时序上有明显的区别,以便于给机体留下一个清晰的时序“断面”,从而较快地建立起新的节律模型。

(二) 光脉冲刺激法

光照是生物最易感受到的外部时间信息。光刺激法在应用时应注意以下四个环节:

1. 光一暗周期制

所谓光一暗周期制,即光与暗的时程比例,如光照 13 小时,黑暗 11 小时(LD13:11)。一般而言,光一暗比例可参照自然季节(如夏季昼长夜短)或实验设计要求而定。如为使某人生物节律由常规早上 8 时起床提前 3 小时,则在早上 5 时开灯。



2.光刺激时刻

光刺激时刻的差异对节律峰相位的迁移方向会产生明显的影响。对人体而言,早晨或黎明前施以强光照射,可使节律相位明显超前;若黄昏和夜晚进行光照刺激,则可能产生节律滞后效应。

3.光刺激时程

光刺激时程,即指光刺激持续作用时间。时程大小主要取决于所需节律调整相位迁移的程度,相位迁移的跨度越大,则时程就越长;反之则短。

4.光照强度

在其他条件不变的前提下,增加光照强度,可加速节律调整过程。增加明-暗强度对比,有利于节律调整和峰相位的最后定位。

(三) 改变作息制度与环境温度法

改变作息制度是生物节律调整中最常用的方法之一,也是人们最熟悉的方法。在全封闭隔离或半封闭隔离条件下,运动员的作息制度应与目标作息时间制度相一致,才能获得最佳调整效果。

适当地提高环境温度和体核温度,有利于机体在该时刻处于一种兴奋状态,加速峰相位移;而低环境温度和体温不利于节律调整。

(四) 药物法

用于节律调整和加速时差服习的药物主要有五大类:即镇静剂类(安定、二唑二氮草)、激素(褪黑激素、拟 ATCH 同步酞)、苯巴比妥类、茶碱类和中药。从药物化学成分的角度分析,这些药物均属国际奥委会严格禁用的兴奋剂类药物,所以运动员绝不能服用。

(五) 综合调整法

为取得理想的效果,通常采用时间生物学综合调整措施,如综合搭配使用上述调整方法。但在应用综合方法进行调整时应注意:①性质不相同而周期值相同的外部时间信息(方法)可以复合使用;②周期值不同的时间信息不能复合使用,以免干扰新节律周期的形成;③振荡周期相同、峰相位也必须一致的授时因子,才能产生良好的协同效应,加速节律目标峰相位的形成。

三、标志节律

在判断生物节律的调整程度时,不能单凭观察和运动员的主观感觉。为了从宏观和微观的角度,客观反映并检测运动员的生物节律调整情况,如峰相位移的程度、速率以及是否达到预期目标时刻等,必须设置一些能敏感反映节律调整程度的参考节律,这些

节律称为标志节律(mark rhythm, MR)。根据标志节律的特性,可分为外标志节律和内标志节律两大类。

(一) 外标志节律

外标志节律指那些在一定程度上能反映节律峰相位移的某些外在节律表现。如睡眠-觉醒节律、行为节律等。外标志节律易受外界环境条件的影响,故只能作为评估节律调整程度的参考指标。

(二) 内标志节律

内标志节律指那些内源性成分较多、能较准确地反映机体内部的节律峰相位变化的节律。体温和血液中可的松近似昼夜节律是目前国内外最为常用且较为公认的内标志节律。标志节律在反映被调整节律中的作用,主要体现在标明被调节律的峰相位移是否已到达目标时刻位置。如拟将某运动员的最佳体能节律由当天下午6时调至当天上午10时(即超前了8个小时),若以体温为标志,则体温的峰相位也应由原晚上8时,超前8个小时。若标志节律仅迁移了6个小时,则说明人体内部的节律只适应了6个小时的跨度,调整尚未完成,须继续调整。

四、时差调整

时差调整(jet-lag modulation)指根据机体时间结构的特点,人为地采取一系列时间生物学综合措施,主动克服时差反应,以加速适应的进程,故又称为人为(主动)服习。对于运动员而言,应采用积极主动的适应性调整方法与手段来克服时差反应。

(一) 时差调整方法

1. 择时适应性运动法

择时适应性运动(chrono-adaptive exercise)即指择时训练,是在跨时区参加国际比赛出发前后,根据运动员的生物节律特点、比赛举办国的当地时间制以及比赛的日程安排,为使节律峰相位特征适应新的时间制而制定和实施的一系列适应性练习。择时适应性运动也包括前、后适应性运动,两种方法常结合应用。

2. 心理调整法

心理调整法是克服时差反应的一个重要方法。有些运动员在到达新的时间制国家后,在心理上仍对原时间制有一种“留恋”,常将两种时间制进行比较。这种心理“留恋”效应极大地干扰了对新时间的服习。因此,运动员在到达比赛国后,应主动地“忘掉”本国的时间,从心理上去主动接受新的时间制,在时间概念上入乡随俗。在模拟飞行的时差调整实验中发现,凡从心理上积极(主动)去适应新时间制的受试者,其直肠温度和血浆皮质醇的近日节律相位迁移率都明显高于那些总是留恋旧时间制的受试者。



3.睡眠法

嗜睡和失眠(睡眠-觉醒节律紊乱)是时差反应的最突出症状之一。充足的睡眠是促进时差服习的一个重要途径,也是运动员在到达比赛地后首选的时差服习方法,因为充足的睡眠和休息是时差服习的基础。它能最大限度地消除嗜睡等时差反应,消除旅行带来的疲乏,促进机体机能的快速恢复。

4.社会活动法

国外学者曾研究了社会活动对克服时差反应的作用。他们发现,在新的时间环境生活时,经常外出参加社交活动的人们较总是留在旅馆房间里的人,能更快适应新的时间制,且时差反应小,服习时程明显缩短。

(二) 国内调整

1.调整特点

国内调整属于前适应(pre-adaptation)调整。调整的方式可采用半封闭式和全开放式两种。前者对某些室内比赛项目的运动员来讲可行性较大,如运动员白天可在地下室(或半地下室)休息,晚上在训练馆内进行训练。全开放式调整则使运动员的训练及作息制度等日常安排作相应的调整,但对时间环境不作任何屏蔽。一般而言,半封闭式调整的效果优于全开放式调整。

根据国内调整过程中新时间制介入的速度,又可分为急性“飞行”调整和慢性“飞行”调整。前者指一夜之间将实行新的作息制;后者则使新的作息制逐步到位。目前大多数研究资料支持急性调整,主张新的时间制一次到位,且总时差服习时间相对较短。国内时差调整的难度在于,一方面要求运动员尽快适应新的时间制,另一方面又要使运动员保持良好机能和竞技状态。

2.影响因素

在国内前适应性调整中,下列因素将影响该过程:①“飞行”方向。向西(滞后)方向比向东(超前)方向更容易适应,且时差反应轻;②跨时区数。跨越时区越多,产生的时差反应症状越明显,所需时差服习的时间则越长。一般而言,1~2小时的时差不会给运动员的竞技水平发挥带来不良影响,4个小时以上的时差则会产生明显的影响;③运动员的神经类型。研究数据表明,灵活型和胆汁质型的人更易适应新时间环境;而粘液质的人,其峰相位移速率低,对过去时间的“留恋”意识强,因而时差服习的难度相对较大。

(三) 国外调整

抵达比赛举办国后的时差调整属于后适应(post-adaptation)调整。最大特点是一种在自然新时间环境中进行的时差调整。主要环节包括:①充足的睡眠。②尽早形成机能振荡高峰。国内外许多著名教练员早已应用了这方面的原理,并采用了一系列加快适应进程的训练措施。在一定范围内,振荡强度越大,相位迁移越快,机能时差服习周期越短。这就是各国运动员在出国参加重大比赛到达比赛举办地后,便尽快投入适应性训练

的时间生物学依据。③注意发挥人的主观能动性,“忘掉”原时间制,振奋精神,主动适应新的时间制,以加速适应进程。

第五节 激素节律变化与运动员选材

科学选材是运动员成才之路的第一步。目前,运动员的选材已由单纯的形态测量,发展到了生理、生化机能测试和遗传基因检测的综合评估阶段。近年来,检测运动员体内某些与运动能力密切相关的激素水平,并作为选材的重要指标的工作已有了较快的发展。根据人体激素分泌和血中浓度变化的生物节律特点,将时间生物学原理和方法应用于运动员选材,具有重要的实际意义。

一、某些激素的昼夜变化特点

睾酮、可的松和生长素与人体运动能力密切相关,许多教练员和运动员都十分关注这些指标的绝对值。近年来,人们发现甲状腺素对人体的运动能力也有较大的影响。一些国家的运动生理学工作者在选拔运动员时,也将血甲状腺素水平列入激素选材的范畴之内。上述四种激素的昼夜变化有一个共同的特点:即在早晨觉醒前后,分泌水平和血液浓度均达到最高峰;觉醒约2小时后,血浓度迅速下降,并保持在一个低水平状态,直至在晚间睡眠的最初2~3小时达到最低水平,然后再缓慢回升(表20-6)。

表 20-6 正常人体血清睾酮、可的松、生长素和甲状腺素昼夜分泌特点

指 标	峰相位时刻	变化范围	节律性 P
睾酮	07:10	05:00~08:30	<0.001
可的松	06:18	05:00~08:00	<0.001
生长素 *	22:39	21:00~05:00	<0.001
甲状腺素	07:44	04:32~11:00	<0.05

* 为 7~12 岁年龄段的昼夜节律特点

表中四种激素均具有明显的近似昼夜节律性,这意味着在抽血和检测分析激素浓度时,必须高度重视采血的时刻。如同一被检者,早晨和下午血样中的睾酮浓度就有很大的差别。由于上述激素早晨水平高,下午浓度低,因此,早晨抽血组的运动员的血中激素水平明显高于下午采血组的水平。这样在选材评估时就容易将下午抽血组中较好的运动员苗子漏掉,而对早晨抽血组的运动员产生误判。故在应用激素选材时,必须考虑到激素分泌的昼夜节律特征。

二、用激素节律选材的主要指标

经过时间序列分析处理后的激素水平数据用于选材时,主要包括激素水平的中值、

双倍振幅、节律最大值以及应激分泌最大值。

(一) 中值水平

该指标较准确地反映了运动员体内的激素浓度在昼夜 24 小时内节律性变化的平均水平。一般而言,中值水平越高越好。

(二) 双倍振幅值

双倍振幅值是振幅值的一个派生指标,它反映了激素浓度在昼夜 24 小时内,从最大值到最小值的变化程度,也反映了机体内分泌功能调节水平的潜力和可塑性。在选材时,若运动员某激素的双倍振幅值大,则其体内激素的有效变化范围也大,该运动员更有机能潜力。

(三) 激素节律性变化最大值

激素节律性变化最大值是经过统计学时间序列处理后所得到的激素浓度最高估计值,它反映了运动员在安静状态下的激素水平上限。此值不同于过去选材中常用的自然(未经处理)最大值。用激素节律性变化最大值既排除了可能存在的干扰因素,更能反映实际水平,又能与其他节律指标联系起来,从整体、多指标分析的角度,筛选出更有发展潜力的运动员。将激素节律性变化最大值与双倍振幅值结合起来分析,更能反映运动员体内激素作用的实效性。如甲、乙两位运动员,他们的节律性变化最大值均相等,但若甲的节律振幅值明显大于乙,则在同一激素水平上,甲体内的激素作用强于乙。

(四) 激素应激分泌最大值

激素应激分泌最大值是指在最大强度运动(应激)状态下,激素分泌量能够达到的最高水平,它既反映了人体内分泌机能随运动强度的提高而增加的激素分泌储备能力(故又称内分泌储备);同时也反映了运动员能够达到的最大应激水平。一般而言,运动员的激素应激分泌最大值越高,其机能潜力就越大,这类运动员更能承受大强度的运动训练和比赛应激的刺激。

三、注意事项

(一) 适当的采样密度

从理论上讲,较高的采样频率能更准确地反映体内激素水平昼夜变化的真实情况,但在实际操作工作中有较大的困难。一般而言,24 小时内应有 2~4 次的采样频率,且采样时刻至少应包括所要测试激素节律的峰、谷时相。

(二) 减少应激反应

在采样时尽可能取得运动员的配合,因为每次采血均会造成一定程度的损伤,给运

动员造成一定的不适和痛苦。这样易引起精神紧张,导致体内可的松等激素浓度的实验性升高,影响测试数据的真实性。

(三) 生活习惯

运动员的生活习惯不同,其激素节律模式也有一定程度的差别。如早型的受试者,其节律的高峰值出现的时刻往往比晚型的人早。故在检查前应询问受试者平时的训练情况和生活习惯,以便评价时作为参考。

(四) 同时刻对比

在进行运动员之间的横向比较时,特别要注意,同一时刻采样所获得的数据才具有可比性。

【小结】

1.生物体的机能运转表现出周期性变化特性称为生物节律性,简称生物节律。人体的生物节律特性是人适应环境时间条件的一种表现,是生物遗传性与生存环境长期相互作用的结果。

2.生物节律可分为近似昼夜节律、亚日节律以及超日节律三大类;每个节律的基本成分包括周期、中值、振幅和峰相位等。生物节律研究的特殊实验方法主要体现在实验材料或对象的选择、实验条件与方法的控制以及生物数据获取与时间序列分析等方面。其中,择时运动、模拟飞行和隔离法是时间生物学在体育领域研究中最常使用的方法。

3.运动员的体温、心肺功能、体能和激素等指标表现出明显近似昼夜节律性。其中大部分与运动能力密切相关的生理学指标(体温、心肺功能和体能等)的峰相位均处于下午4~8时。许多激素(睾酮、可的松等)节律的峰相位则出现在早晨6~8时。

4.生物节律调整是通过人为地改变外部时间信息环境(条件),使体内原有生物节律特征发生相应变化的过程。调整的难易程度与“飞行”方向、跨时区数及调整方式等有关。调整手段主要采用时间生物学综合措施(包括改变作息制、择时运动、光脉冲刺激和药物等);另外,在运动员时差调整中,还必须保障充足的睡眠,并注意心理调整,从心理上主动适应新的时间制。

5.根据人体激素分泌和血中浓度变化的生物节律特点,进行运动员选材时,必须应用经过时间序列分析处理后的激素水平数据。其时间生物学指标主要包括激素水平的中值、双倍振幅、节律性变化最大值以及应激分泌最大值。同时,还须注意受试者的生活习惯,并尽可能保证2~4次/天的采样频率,减少采样过程中的应激反应。

【思考题】

- 1.叙述科学生物节律观的主要标志及内涵。
- 2.与其他运动生理学内容相比较,生物节律研究在实验方法和技术方面有何特点?
- 3.人体生理、生化指标体系的主要时间结构特征是什么?
- 4.叙述生物节律在运动员选材和健身锻炼中的应用。



5.叙述运动员生理机能和时差调整的时间生物学理论与方法。

【主要参考文献】

- 1.孙学川：《运动时间生物学》，成都，四川教育出版社，1994。
- 2.Franz Halberg. Glossary for chronobiology[J]. Chronobiologia, 1987.
- 3.孙学川、宋开源主编：《应用时间生物学》，成都，四川大学出版社，1996。
- 4.Rhonda K, Elizabeth L, et al. Exercise performance in those having Parkinson' s disease and healthy nomal [J] . Medicine & Science in Sports & Exercise, 1999.
- 5.孙学川、陈槐卿：《运动生物科学研究中的“非常量对照组参数比较法”》[J]，《中国运动医学杂志》，Vol.23, No.1, 1998。
- 6.何少雄、宋开源、苏兆虞主编：《时间药理学与时间治疗学》，天津，天津科技出版社，1995。
- 7.简坤林等：《择时运动对大鼠兴奋性氨基酸类神经递质的影响》[J]，《体育学刊》，2000，27(5)。

(中国人民解放军体育学院 孙学川)



第二十一章

运动生理负荷的监测与调控

【提要】本章着重从方法学的角度,系统介绍运动生理负荷的基本概念、要素(负荷强度、负荷时间、负荷积分)及其相互关系;阐述运动中进行生理负荷监测与调控的基本原则、主要方法与手段及发展趋势;在此基础上,进一步讨论对生理负荷检测数据进行分析的基本要求、步骤与方法,以及运动过程中人体生理负荷反应的基本规律。

运动生理负荷(exercise physiological workload, W_{EP})的监测与调控,是实现科学化运动训练和体育锻炼的核心要素和重要内容,也是应用运动生理学原理指导体育运动实践的重要方面和具体体现。随着高新技术在运动人体科学研究中的广泛介入,运动过程中生理负荷实时监测的数字化、负荷量实时调控的智能化,以及训练负荷反应数据分析的非线性化将逐步形成,从而为提高训练效率、减少训练伤病提供了强有力的科技手段和方法。

第一节 概 述

一、基本概念

(一)生理负荷与运动负荷

从广义上讲,生理负荷(physiological workload, W_P)是指机体内部器官和系统在发挥本身所具有的生物学功能,保持一定生理机能活动水平的过程中,为克服各种加载的内、外阻力(负荷)所做的生理“功”。由于生理负荷是机体内部所承受的生物学负荷,故又称为“内负荷”。如心脏为推动血液在脉管系统中流动,必须承受一定量的生理负荷或完成一定量的生理功;当血管阻力增大时,心脏所承受的生理负荷增加,其生理功也相应增加。人体在安静状态下的生理负荷称为静态生理负荷(rest physiological workload, W_{RP})。

生理负荷反应是指机体在承受一定生理负荷量时各器官和系统所表现出来的机能变化或反应,如呼吸加快、心输出量增加等。机体承受生理负荷的能力和负荷反应程度随个体差异、机能状态和训练程度等因素影响,表现出明显的差异性。

运动负荷(exercise workload, W_E)是指加载于机体上的各种外部物理“功”的总称,



也称为运动量。由于运动负荷是机体外部所承受的机械负荷,故又称为“外负荷”。

运动负荷(量)常用运动时间、强度、密度来表达。在实际制定和实施训练计划(如长跑训练)过程中,当运动距离确定时,运动强度可用通过运动距离所用的时间或目标生理负荷强度(如最大摄氧量百分数、心率等)来表达;当运动时间确定时,运动强度又可用在该时间内所通过的距离来表达。

(二) 运动生理负荷与负荷反应

运动生理负荷是特指机体在一定强度和持续时间的运动负荷刺激作用下,机体器官和系统所承受的额外生理负荷,即除安静状态下的生理负荷外,机体为维持运动状态下的机能活动水平而额外做的生理“功”。机体所承受的总生理负荷(total physical workload, W_{TP})等于静态生理负荷与运动生理负荷之和,即:

$$\text{总生理负荷}(W_{TP}) = \text{静态生理负荷}(W_{RP}) + \text{运动生理负荷}(W_{EP})$$

运动生理负荷反应指机体在运动负荷刺激作用下,身体内部承受一定量生理负荷时各器官、系统所表现出来的明显机能变化或反应。如血液重新分配,耗氧量、心输出量比安静状态明显增加等。在实际体育运动训练中,有时也将运动生理负荷反应简称为“负荷反应”。

运动负荷是外部条件,身体机能活动是内在因素。在正常生理机能状态下,由于外部运动负荷的刺激作用,机体出现一系列应答性机能活动,形成了运动生理负荷。反之,机体的运动生理负荷反应程度又制约了身体能承受运动负荷刺激的能力。如当较大的运动负荷强度引起机体出现强烈的运动生理负荷反应并超过人体本身的承受力时,机体承受运动负荷刺激的能力就会明显下降。

二、运动生理负荷的基本要素

运动生理负荷的基本要素包括运动生理负荷强度、负荷时间及负荷积分。三者既紧密联系,又相互区别。一般人们所称的运动生理负荷量,实际上包含了上述负荷强度、时间及积分。

(一) 负荷强度

运动生理负荷强度(workload intensity, I_w)指在运动负荷强度刺激作用下所引起的整体生理机能反应程度或幅度,简称负荷强度。一般而言,负荷强度与运动强度(负荷)呈平行关系,即运动强度越大,产生的生理负荷强度就越大;反之则小。

1. 负荷强度指标的量值

负荷强度的量值可分为瞬时负荷强度和平均负荷强度(I_{mw})。前者主要反映最大(极值)、最小或某时刻的负荷强度变化量;后者主要反映整个过程中的平均变化量。平均负荷强度的计算(以心率 HR 为例): $I = \left(\sum_{i=1}^N HR_i \right) \div N$ (其中, t 表示每个采样时刻、 HR_i

为 t 时刻的心率值、 N 是心率样本数)。在运动训练和体育教学等实际工作中,教练员常用平均强度(值)来反映整个训练课中的负荷强度。

2. 负荷强度指标的分类

表达运动生理负荷强度的指标分为两大类,即频率性指标和振幅性指标。

(1) 频率性指标: 主要指以单位时间内的变化次数(如次/分)为计量单位的生理指标,如心率(脉搏)、呼吸频率等。频率性指标往往是反映机体快速适应生理负荷强度变化的敏感指标,当生理负荷强度增加时,频率性指标就能立即作出应答。如当跑步速度加快时,生理负荷强度增加,心率、呼吸频率就会立即随之加快。故当对运动训练中生理负荷强度的变化情况进行实时监控时,可首先选择这类指标。

在运动负荷增加的初期,机体的生理负荷强度反应往往是以频率变化性指标变化为主;运动训练程度较低的运动员和普通人,心肺机能也往往是以频率性增加为主。

(2) 振幅性指标: 主要指以单位体积和时间内的变化幅度为计量单位的生理指标,如血乳酸值(毫摩尔/升)、每搏输出量(毫升/次)、最大吸氧量(升/分)、潮气量(毫升/次)等。振幅性指标往往是反映机体承受生理负荷强度机能潜力(储备)或机体运动生理负荷积累程度的敏感指标。如血乳酸值水平是反映机体以糖原酵解供能方式为主的运动时,体内运动生理负荷(尤其是无氧供能负荷)的积累程度,同时也可反映机体承受无氧(酵解)供能的能力。

在对运动负荷反应的方式上,由于两类指标各有侧重,故在进行生理负荷强度监控时,应注意生理指标的选择。一般而言,频率性指标主要反映负荷强度的变化程度,振幅性指标主要反映机能潜力和负荷强度的积累程度。

在训练程度的机能评价时,在运动(负荷加载)的初期,机体往往以频率性指标变化为主,如以增加心率来提高心输出量。在运动负荷的中、后期,机体动员机能潜力,以振幅性指标变化为主,如以增加每搏输出量来提高心输出量。人体的训练程度也反映在两类指标上,优秀运动员的振幅性指标增加最为明显。如运动过程中心输出量增加至8升时,优秀耐力性项目运动员的心率为80次/分,每搏输出量100毫升;而缺乏体育运功者的心率为100次/分,每搏输出量80毫升,反映出二者的心肺机能不同。

(二) 负荷时间

运动生理负荷时间(workload time, T_w)指机体在整个运动过程中,持续负载运动生理负荷的时间。由于赛前状态等因素,增加了生理负荷时间,加之运动停止后的生理机能恢复时间,实际上的运动生理负荷时间往往比运动时间长。但为了便于计算,把运动生理负荷时间特指为运动阶段的负荷时间,从而使负荷时间与运动时间一致起来。

运动生理负荷时间的表达方式与运动时间相同,如进入工作状态时间、稳定工作状态时间等。在机能评定中,稳定工作状态下的负荷时间是评价机能潜力的一项重要指标。



(三) 负荷积分

运动生理负荷积分(workload Integral, ITw)是指运动过程中生理负荷强度随负荷时间变化的函数关系,其本质是负荷强度与负荷时间的积分。用符号“Sp”来表示(图21-1)。负荷积分将负荷强度和负荷时间结合起来,是既反映运动生理负荷量、也反映人体运动生理负荷机能潜力的一项综合指标。一般而言,负荷积分值越大,运动生理负荷量值就越大,其机能潜力也就越大。目前,此项指标在运动员心肺机能评定中逐渐被使用。

负荷积分值的计算:

$$y = \int_a^b [f(t)] dt \quad (\text{其中 } a、b \text{ 分别代表运动生理负荷的起始时刻和终止时刻})$$

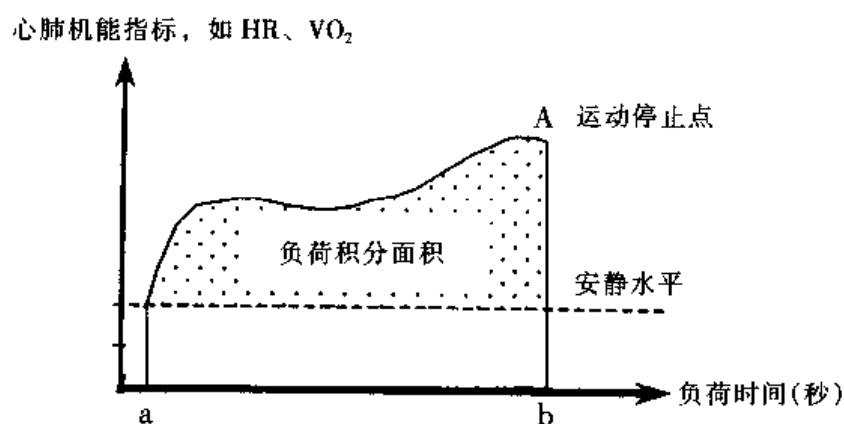


图 21-1 运动生理负荷积分示意图

从本质上讲,负荷积分量就是运动生理负荷量,简称负荷量。计算时按负荷单位进行。在具体评价时,应根据指标的特点加以说明。如用心率指标进行计算时,负荷量值称为心率负荷单位;用吸氧量指标进行计算时,则称为吸氧量负荷单位。

三、运动生理负荷的决定因素

运动生理负荷量主要取决于运动强度、运动时间及负荷(强度)反应三方面。运动时间与运动强度、负荷(强度)反应呈反比关系。运动强度越大,所引起的生理负荷(强度)反应就越大,持续运动时间则必然缩短,负荷积分值也相对较小;适宜运动强度刺激,能引起较大负荷强度反应,可持续运动时间也最长,所产生的负荷积分值则最大。三者的关系可以用一个三维坐标图来宏观表示(图21-2)。

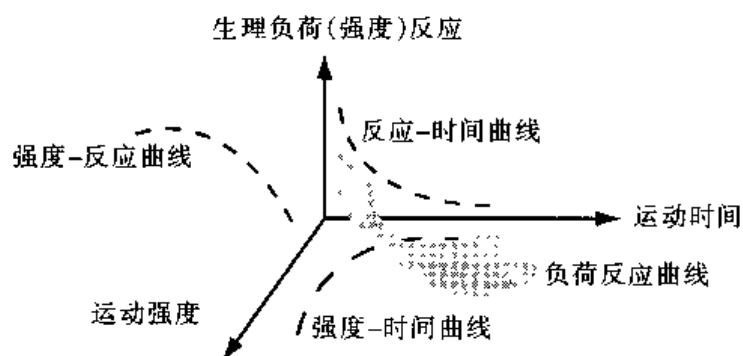


图 21-2 运动强度、运动时间、负荷反应三者关系曲线示意图

就运动生理负荷反应而言,对同一运动强度的刺激,不同个体表现出一定的差异性。如进行同一速度及坡度的跑台跑运动,甲乙二人的吸氧量、心率和血乳酸值等负荷反应可能出现较大的不同。这既与受试者的训练程度、机能状态等后天因素有关,也与其本身的先天遗传等个体差异性有关。故在应用运动生理负荷指标进行机能评定、运动负荷监测和调控时,应充分考虑到各种影响因素。

第二节 运动生理负荷的监测与调控

在体育锻炼和运动训练过程中,准确掌握运动者身体对运动负荷的生理学反应,及时调整运动负荷量是科学化运动的关键环节之一,也是运动生理负荷监测的目的。训练的运动量不足,达不到训练效果;运动量过大,又容易造成过度疲劳和运动伤病等。因此,在体育运动中,对运动员或锻炼者的运动生理负荷进行科学实时监测,具有重要的现实意义。

一、监测的基本原则

在实施生理负荷的监测时,为了保证运动训练和监测两方面工作的顺利进行,减少误差,获得准确的数据,及时将可靠训练数据反馈给教练员或科研人员,必须遵循不干扰、简便、可靠性、无创性和连续性等基本原则。

(一) 不干扰原则

不干扰原则是指在实施生理负荷实时监测时,操作过程和使用的监测器材都应尽量避免干扰运动员的正常训练过程。坚持不干扰原则,一方面可保证训练过程的连续性,为获得训练中的准确负荷反应数据创造了条件;另一方面,能有效地避免监测工作影响运动员训练计划的实施和训练效果。

目前,随着计算机、遥测技术的广泛应用和先进监测设备的应用(如Polar遥测心率仪的应用),监测的手段有了很大的改善,连续自动监测已成为可能,为实现不干扰原则提供了可靠保障。

(二) 简便原则

简便原则是指负荷监测的方法和手段要简便易行,包括操作程序简便、检测指标精少、监测器材小巧等。简便原则是监测方法与手段具有很强的可操作性的基础。如果监测操作繁琐、过程复杂、运动员佩戴的传感器过多或过重,将给被监测者带来诸多不便,影响训练进程和监测工作。

坚持简便原则最关键的环节是:第一,需佩戴传感器监测的原始测试指标不能太多,尤其是进行生理负荷实时监测与调控时,所选原始指标以1~2项为宜。如对长跑运动员心肺机能负荷进行监测时,原始指标可选用心率、呼吸频率,所佩戴的传感器也相对较小巧。第二,数据记录方式应尽可能实现一次开关、连续、自动记录,确保监测者



或被监测者均可容易操作。第三,被监测人员对操作程序一定要非常熟练,密切配合,尽可能减少不必要的操作环节。

(三) 可靠性原则

可靠性原则是指监测所获得的数据要稳定可靠。这是对运动生理负荷进行分析和调控的基本保障。监测数据的可靠性与监测器材的性能和工作状态、数据采集手段和条件控制、被监测者的生理机能状态和个体差异等因素有关。因此,在监测前应认真检查仪器设备,规范数据采集操作程序,观察被测者的机能状态,尽可能排除各种可能的干扰因素。

为确保数据的可靠性,在测试采样时,还须防止应激反应。如采血可造成有些运动员的情绪紧张,使其机体的应激性增加,血中肾上腺皮质激素水平升高,全身整体机能工作水平提高,从而影响了数据的真实性。

(四) 无创性原则

无创性原则是指在监测采样过程中,采用不造成受试者创伤的监测方法或手段,如采用表面电极采集心电、肌电信号等。推广应用无创性监测方法和手段,是人体机能检测的一个发展方向。

(五) 连续性原则

连续性原则是指在实施生理负荷监测时,运用连续采样的方式进行数据采集,以保证数据的连续性和统一性,从而减小采样误差,以便较为完整地了解整个运动过程中生理负荷量的变化规律和特征。从理论上讲,采样的密度越大,持续采样的时间越长,样本数就越大,数据的连续性就越好,所获数据的可靠性就越高。因此,实施生理负荷监测时,应尽可能保持采样的连续性。

二、监测的基本内容

运动生理负荷监测的基本内容包括负荷强度、负荷积分、变化趋势与特征三大方面。

(一) 负荷强度的监测

负荷强度监测包括各训练阶段负荷强度的最大值、最小值、平均值、强度分布特征以及变化规律等。

1. 负荷强度的最大值、最小值和平均值

整个训练过程中的负荷强度最大值、最小值及平均值,代表了本次训练的特殊阶段所出现的特殊强度反应值。负荷强度最大值和最小值的表达方式:①在运动的什么时刻出现了最大值和最小值;②在运动中最大值、最小值各是多大,如本次训练中,最大负荷强度(以心率为例)为201次/分,最小负荷强度为120次/分。平均负荷强度表示的是

某一训练阶段负荷强度的平均值。

负荷强度的最大值和最小值仅仅代表了在本次训练中出现的负荷强度两极值,但该数值并不一定是该受试者的生理负荷极限值(极大值和极小值)。在一般运动条件下,人们往往不容易达到自己的生理负荷极大值。

2. 负荷强度的分布特征

负荷强度的分布特征主要反映一次训练中负荷强度变化的基本特点和规律,常用强度变化“曲线模型”来表达。负荷强度的“曲线模型”是反映运动负荷模式最直观的表达方式之一。如“波浪式”“双峰式”“阶梯式”强度分布模型(图 21-3)。

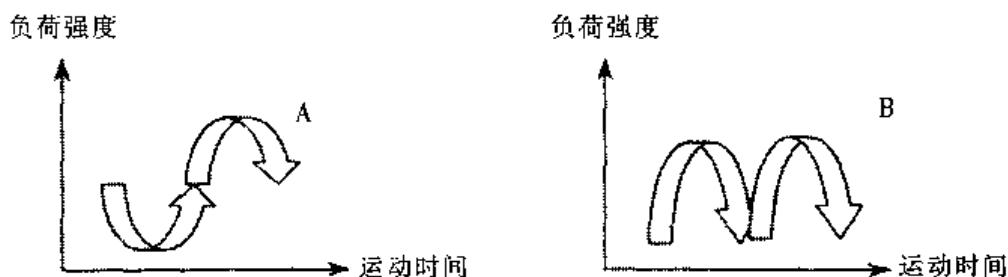


图 21-3 负荷强度分布曲线模型: A “波浪式”模型, B “双峰式”模型

(二) 负荷积分的监测

整个运动训练课的负荷积分值(各训练阶段的负荷积分值、平均积分值和总负荷积分值)实质上代表了本次训练课的总运动生理负荷量和各特殊阶段的负荷量。换言之,生理负荷量的多少和计算单位,都是以负荷积分值的多少和单位来表示的。

负荷积分值的表达方式: ①阶段积分值: 阶段积分值用某运动阶段的积分值表达,如以吸氧量指标进行计算,动员阶段的负荷积分值(负荷量)为 28 千负荷单位_{吸氧量}(KUwvo₂)等。②平均积分值: 平均积分值为各阶段积分值之和再除以阶段数,主要反映运动过程中的平均生理负荷量。③总积分值: 总积分值为各阶段积分值之和,反映该次训练课的总生理负荷量。

(三) 生理负荷反应变化趋势与特征的监测

监测运动过程中生理负荷反应的变化趋势与特征,主要是依据负荷强度和负荷积分两类指标的变化趋势与特征来进行。这种监测的意义在于它能给教练员提供一个比较信息,协助掌握被监测者在运动中的生理机能变化情况,以便及时调整训练计划,提高训练效率,避免运动伤病。如当某一受训者完成与前次训练课相同的运动量,但其生理负荷反应(负荷量)出现明显增加的趋势,负荷强度也明显加大。这个现象提示:该受训者上次训练有可能出现了过度训练,导致本次训练课中出现疲劳尚未消除。

三、监测的方法

训练的生理负荷监测有两大类:一类是现场生理负荷信息采集,即通过采集系统和



其他方式,将训练中的负荷反应数据或包含负荷反应信息的样本(如血液)采集、记录存储下来,待训练结束后再进行分析处理,最后将结果提供给教练员和科技人员。另一类是实时监测,即应用计算机、遥测等技术,将实时检测到的负荷反应数据实时地展现出来(如显示在计算机屏幕上),并及时反馈给教练员,从而为教练员适时调整训练计划提供反馈数据信息源。

(一) 现场生理负荷信息采集

现场生理负荷信息采集是将训练过程中反映被监测者生理负荷变化的生物学信息及时采集或记录下来,待训练结束后进行分析处理,属于滞后分析。该方法是人们较为熟悉且经常运用的一类运动生理负荷监测方法。采用的具体方法和指标都较为丰富。

1. 指标体系

指标体系包括生理、生化指标(如心率、呼吸频率、肌肉血氧含量、血压、红细胞、血红蛋白、血乳酸、肾上腺皮质激素和睾酮等)及其他指标。其中,血乳酸、血红蛋白、睾酮及皮质激素等指标,仍然是目前体育训练科研中应用最为广泛的监测指标,它们特别能反映机体内代谢供能方式、生理负荷量的积累和整体机能水平等变化信息。心率或脉搏、血氧含量、血压等指标对生理负荷强度变化最为敏感,是监测运动强度变化反应速度很快的指标。

2. 基本步骤

(1) 采集安静状态的指标参数或样本,以备比较之用。

(2) 连续采集生理机能指标,如心率、血压、肌肉血氧含量等。目前,在运动训练实际工作中,广泛应用遥测心率仪、肌血氧含量分析仪等器材,进行运动现场生理负荷信息采集。

(3) 在各训练间歇休息期内,分阶段采集生化血样标本(血乳酸、血红蛋白、睾酮、皮质激素)。

(4) 数据整理与测试,如心率记录数据的整理、血液样本的生化测试等。

(5) 分析与反馈,即对所采集的数据进行分析,并把分析结果反馈给教练员,为制定和调整下一阶段的训练计划提供依据。

3. 主要特点

现场生理负荷信息采集监测方式的最大特点,在于其应用的指标较为丰富和系统,能较全面地记录和反映训练中的生理负荷反应变化情况。但现场生理负荷信息采集方式所获得的数据或样本,需要一定的时间进行分析处理,待训练结束后再反馈给教练员。所以,现场生理负荷信息采集属于滞后分析,不能及时将训练情况反馈给训练监测者。

(二) 实时监测

1. 指标体系

指标体系包括通过传感装置直接从被监测者的身体上采集的原始指标,如心电、心率或脉搏、呼吸频率及体温等,以及由原始指标派生的指标和与原始指标相关联的指标,如最大吸氧量、氧脉搏、血乳酸和能量代谢率等。另外,还有教学观察指标,如对训练的态度、动作的协调性、完成动作的质量和注意力等。

2. 基本步骤

(1) 信号采集与发送:应用微电子传感器、计算机和遥测等技术的仪器设备,实时采集反映生理负荷变化的数据,并通过遥测或有线连接的方式,将数据发送到接收装置上。

(2) 数据接收与传输:接收装置收到信号数据后,再通过无线或有线传输方式,将检测到的生理负荷反应数据传输到监测站。

(3) 数据整理与显示:监测站收到数据后,首先进行整理,并将变化数据实时显示在计算机屏幕或接受设备的监测显示器上,及时为监测者(如教练员)提供训练反馈信息。

在数据整理与显示的技术处理上有两种方式:一是自然监测,二是对比监测。前者的基本特征是将运动生理负荷反应的数据与曲线直接显示出来;而后者则是在自然监测的基础上,将教练员教案中的目标生理负荷反应数据曲线(也称“目标轨迹”)也同时显示在同一坐标系中(图 21-4),并对两组数据进行比较,从而更有效地帮助监测者直观、准确和及时地发现被监测者的机能变化情况,为其调整训练方案提供科技手段。

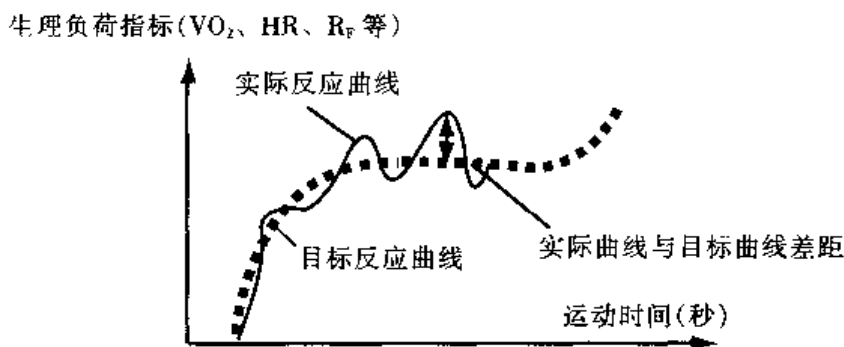


图 21-4 对比监测示意图

(4) 分析与应答:教练员根据实时反馈数据,可迅速作出决定,或继续执行既定训练计划,或对接下来的训练计划进行适当修改,从而更有效地控制运动员所承受的运动量。

3. 主要特点

实时监测的最大特点是能将被监测者体内的生理机能变化数据实时显示出来,并及时提供给教练员。同时,运用专门的数据库系统还能教练员提供许多相关指标的变化



情况,使运动指导者能及时地有针对性地调整训练计划,较科学地掌握适宜运动量。但这种监测的原始指标数量较少,并受到一定的限制。一方面因为运动者佩戴过多、过重的传感器,会影响运动训练;另一方面监测仪器的体积、重量和性能等受到科学技术发展的制约。

四、实时调控的方法

生理负荷实时调控是在实时监测的基础上,根据训练计划的要求和被监测者的生理机能变化,及时进行调整的过程。根据调控过程的具体执行者情况,调控方法分为人工实时调控和计算机智能调控。

(一) 人工实时调控

人工实时调控即指在实时监测的基础上,由训练的指导者(如教练员、体育教师)直接制定调整方案,并亲自组织实施生理负荷量调整的过程。这种调控方法是目前运动训练实际工作中应用最为广泛和最主要的方法。教练员亲自到训练现场组织实施既定训练计划,指导运动员训练,其中最关键的职责之一,就是根据场上受训者的机能变化情况,进行人工实时调控,以确保训练质量,防止训练伤病的发生。

1. 调整练习的次数和组数

调整练习的次数和组数是指增加或减少每组练习的次数、整个训练课或某项练习内容的组数,其特点是负荷强度无变化,负荷时间变化较小,负荷积分量变化最为明显。这种调控方法常应用于整体机能状态不佳,如疲劳的消除不彻底、睡眠不足等而不能承受大运动量或正处于调整阶段的受训者。

2. 调整练习的强度和时间

调整练习的强度和时间是指增减运动练习的强度和时间的方法。这种调控方法能较明显地影响到每次训练课运动量和生理负荷量,常应用于伤病康复期、机能状态不佳或处于调整期、年龄较小等情况的受训者。

自我调控运动强度是人工实时调控的一种特殊形式。这种方法是借助于一些简易的监测器材(如心率遥测仪等),设置运动时生理负荷反应强度的上、下报警限。在运动中,当器材发出报警(声音)信号时,运动者自己立即作出相应的调整。

3. 调整器械的速度、坡度和阻力

在实验室借助于器械进行训练或进行运动测试时,可通过操作器械的控制面板,增减练习的速度、坡度,增减阻力等方法,达到调整负荷强度、时间以及负荷积分量的目的。

(二) 计算机智能调控

计算机智能调控是运动生理负荷实时调控的发展方向之一。目前使用的计算机智能调控系统主要有心脏——跑台模式系统、心脏——跑速模式系统、游速——水流模式系统等。

1. 心脏——跑台模式系统

心脏——跑台模式是根据反映心脏机能的心率指标变化, 调控跑台的速度和坡度, 达到自动调控的目标。当心率过高时, 跑台自动降低速度和坡度, 以降低负荷反应强度; 反之, 则增加负荷强度。

2. 心脏——跑速模式系统

该系统主要是采用计算机、数字化和遥测技术, 实时检测运动者的心脏机能变化指标(心率), 将实际负荷强度反应数据与经过数字化处理的目标负荷强度参数进行比较, 再通过应用模糊控制原理对比较结果进行处理, 最后将调控信号同时反馈给教练员和运动者, 令后者调整跑速, 使实际运动负荷强度曲线回复到目标强度曲线所允许的变化范围内(见图 21-4)。

3. 游速——水流模式系统

游速——水流模式是指人体在特制泳道游泳时, 当游泳速度较快超过上限时, 泳道内的水流速度自动加快; 反之, 当游泳速度减慢超过下限时, 泳道内的水流速度自动减慢, 从而达到自动调控的目的。该系统目前主要用于游泳运动员的技术诊断。

第三节 运动生理负荷的实时分析

一、实时分析的概念和基本要求

(一) 概念

运动生理负荷的实时分析(on-the-spot analysis, OSA)是指在运动训练或体育锻炼的现场, 将运用各种检测方法和手段采集到的反映运动生理负荷的数据进行及时地分析处理, 编绘分析报告, 并及时地将分析结果向指导者(教练员)和受训者(运动员)报告的过程。与“滞后分析”(delaying analysis)相比较, 实时分析的最大特点就在于它的及时性、直观性和简捷性。

实时分析的目的就是要在训练现场, 及时向运动指导者和受训者本人提供有关训练过程的测试数据, 为他们了解训练效果、探索适宜运动量、制定和修改下一步训练计划提



供科学依据。运动生理负荷的实时分析是运动训练和体育健身的重要环节和组成部分,它对于提高体育运动的科学化程度,减少运动伤病和提高训练效率都具有重要的现实意义。

(二) 基本要求

根据实时分析的目的和教练员的实际情况,实时分析在选择指标、分析数据、表达形式、反馈速度和报告文本五个方面必须遵循以下基本原则。

1. 实用性原则

实时分析指标的筛选必须遵循实用性原则,即所选择的分析指标一定要具有实用价值,既能在训练现场分析处理完毕,又便于理解、掌握和使用。虽然在生理负荷量监测分析指标体系中,可供选择的负荷量指标内容非常丰富,但应用于实时分析时,必须对指标精选,切忌为追求新颖性,将实际应用价值很小的指标纳入实时分析指标体系之中。

2. 可靠性原则

实时分析的数据源必须符合可靠性原则,即分析所用的原始数据和分析结果的报告数据一定要可靠。这是实时分析的科学基石和根本保障。为了确保分析数据的可靠性,对被监测者的(生理、心理)机能状态、训练的内容与条件、监测仪器的运转状况、数据采摘与传送的抗干扰性、数据前期处理的原理与方法等关键环节,必须予以高度重视。

3. 简练性原则

实时分析报告的内容应遵循简练性原则,即分析报告中所展现的内容(指标及数据)应尽可能做到逻辑清晰、简捷明了,以便于教练员能迅速了解训练负荷反应。分析报告的篇幅要小,且尽量避免反映同一生物学意义的数据反复出现。

4. 直观性原则

实时分析结果的表达应尽可能体现直观性原则,即分析所产生的主要特征、变化规律、数据关系及趋势等结果,一定要用直观和形象的方式(如反应曲线及统计表格等)来表达。要求分析内容和结果的表达形式,必须有利于能迅速抓住负荷量变化的主要特征和变化规律,准确理解各指标动态变化数据间的相互关系,及时发现存在的主要问题。

5. 及时性原则

实时分析结果的反馈应充分体现及时性原则。对于训练数据的分析报告,应尽快反馈到教练员和运动员手中,使他们在训练现场及时得到分析、评估本次训练效果的有关数据,为他们定量了解本次运动训练的实际执行情况、客观评价训练的质量、科学地制定下一次训练计划并提高训练的效率提供重要依据。

二、实时分析的基本步骤与方法

(一) 确定指标体系

根据分析报告的目的, 确定相关的指标体系。

1. 反映负荷强度的指标

(1) 无创性指标: 常选用心率(HR)、呼吸频率(R_f)、代谢指数(MET)、氧脉搏(OP)、最大吸氧量(VO_{2max})和体温(T)等反映整体机能的指标。

(2) 有创性指标: 利用便携式测试仪, 可选择血乳酸(LA)、血红蛋白(Hb)和尿蛋白(UP)等。

2. 反映负荷积分的指标

主要采用能满足长时间、连续采样方法的上述反映整体机能的指标。

3. 反映训练主动性的指标

主要采用教学观察方法所采用的指标, 如填写问卷表等。

(二) 划分和计算各负荷阶段时间

1. 熟悉训练计划内容

包括熟悉训练课教案中的练习项目、次数和组数、完成质量等, 为较为准确的训练阶段和负荷时间划分提供依据。

2. 确定和计算各阶段负荷时间

一般而言, 在实时监控的基础上, 按训练计划和实际训练时各阶段的练习时间, 即可确定各阶段的负荷时间。①在较为宏观的分析(如对大学、中学体育课生理负荷的分析)报告中, 可按课的准备部分、主体部分和整理部分三个阶段划分负荷时间; ②在较为精细的分析(如对运动员身体素质训练的分析)报告中, 则有必要按各练习项目划分。

3. 计算总负荷时间

总负荷时间应包括各阶段练习时间和间歇休息时间。但在精细分析报告中, 准备活动和整理活动时间, 一般不计算在总负荷时间内。

(三) 计算和分析各阶段负荷反应特征值

1. 负荷强度特征值

包括各阶段(如稳定工作阶段)和各关键点(如第一拐点)的平均强度值、极大值与极小值, 以及总体负荷强度平均值和最大值。

2. 负荷积分

包括各阶段负荷积分(S_p)和总体运动生理负荷积分量(IT_w), 以及阶段积分指数。

(1) 总运动生理负荷量 (IT_w): 指因运动而产生的生理负荷积分量, 即运动时总生理负荷积分量减去安静水平的积分量。负荷积分量表示单位用“ U_w ”, 当用心率指标计算时, Y 轴的生理指标单位为次/分, X 轴的时间单位为秒, 则 U_w 所包含的实际单位为“次/分·秒”。以下生理负荷量未加说明时, 均指纯运动生理负荷量。

(2) 各阶段运动生理负荷量(S_p): 在各阶段的持续时间内, 生理负荷曲线积分量减去安静水平曲线的积分量。

(3) 负荷积分指数(ID): 指运动生理负荷积分量(S_p)与总运动生理负荷积分量(IT_w)的百分比值。负荷积分指数是研究机能变化规律、机能评定及练习密度的新指标。

$$\text{动员阶段负荷积分指数}(ID_m) = \frac{\text{动员阶段运动生理负荷积分量}(S_p)}{\text{总运动生理负荷积分量}(IT_w)} \times 100\%$$

(四) 分析生理负荷反应基本规律

在一个完整的单项运动训练或体育健身过程中, 由于运动负荷的持续刺激作用, 人体的机体内部发生着一系列的机能变化(参见第十二章), 承受着一定量的运动生理负荷, 并表现出一种特定模式的负荷反应规律。从整体机能反应的角度分析, 运动生理负荷反应的基本规律表现为四个阶段和五个关键点(图 21-5)。

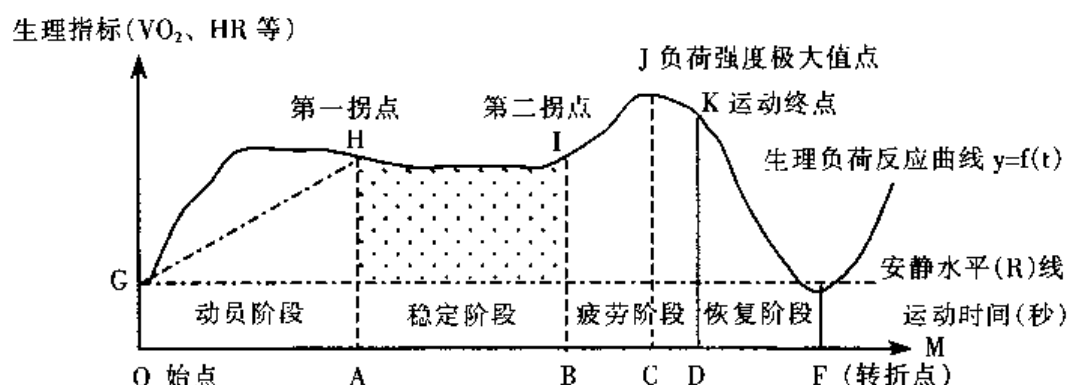


图 21-5 运动过程中生理负荷反应基本规律示意图 (引自孙学川, 1998)

1. 生理负荷反应阶段性

(1) 动员阶段: 在时程上相当于“进入工作状态”阶段, 始点到第一拐点之间(即 OA 段)。该阶段的时程和斜率(G 点至 H 点)是反映受训者的心血管、呼吸系统机能从安静状态迅速过渡到较高工作水平的动员能力的主要指标, 同时也是评价受训者训练程

度的重要指标之一。

在中长跑训练中,人体在此阶段的后半部,要经历一段很难忍受的“极点”综合症的困扰。它是躯体性运动神经机能与植物性神经机能的动态平衡关系在运动初期阶段发生紊乱的表现。当达到曲线上的H点时,运动神经与植物性神经机能的动态平衡关系得到一定程度的恢复,“极点”症状减轻或消失,出现了“第二次呼吸”,从而标志着动员阶段的结束,稳定工作阶段的开始。从机能评定的角度分析,动员阶段的时程越短,生理反应越小,说明运动员的内脏机能动员快,灵活性高。另外,动员阶段的时程长短还与准备活动有关。

(2) 稳定阶段:又称稳定工作阶段,在时程上相当于“稳定工作状态”阶段。该阶段介于第一拐点到第二拐点之间(即AB段)。稳定阶段的时程长短和负荷积分值,是评价人体耐力素质水平和潜力的关键指标之一,在运动员心肺机能评定和选材中经常使用。

稳定阶段的最大特征是:人体的机能水平和负荷反应均处于一种相对动态平衡的“高原平台”状态。20世纪80年代,人们在用该指标进行机能评定和选材时,较多地注意了它的振幅值变化,即认为在此阶段中生理反应值越小机能越好。后来研究发现,在定量负荷条件下,生理负荷反应幅度存在个体差异,就机能潜力而言,反应幅度较大者不一定就比反应幅度较小者差,关键因素是保持稳定工作状态的时间。因此,目前在评价人体机能水平与潜力时,将稳定阶段的负荷时间与负荷反应幅度加以综合考虑。

(3) 疲劳阶段:指从第二拐点到运动终点(即BD段)。疲劳阶段的时程值和积分值是评估人体抗疲劳能力的一项重要指标。一方面,抗疲劳能力与血液缓冲酸的能力、机体重要器官耐受酸性环境刺激的能力、体内糖原的储存量以及肌纤维类型的百分组成等因素紧密相关。另一方面,人体在疲劳状态下坚持运动的时间长短,在很大程度上又受其意志品质的影响。因而,疲劳阶段的时程和积分指标数据,既是运动生理学领域评价运动员耐受疲劳能力的敏感指标之一,同时也是运动心理学评价运动员意志品质的一项新指标。

(4) 恢复阶段:又称恢复期,指从本次单项练习的运动终点到下一组单项练习的始点(即DF段)。从广义上讲,人体的恢复过程在身体运动和相对休息的状态下都存在,只是前者以消耗过程为主,后者以恢复占主导。本文所指的恢复阶段即指运动停止后,人体处于相对休息状态下的恢复。

(5) 运动阶段:即单项运动时间,从运动开始点到运动终点(即OD段)。在时程上是上述四个阶段时间之总和。

$$\text{训练密度(TD)} = \frac{\text{恢复期时间}(T_R)}{\text{总运动时间}(T_t)} \times 100\%$$

(6) 恢复期/运动时间百分比值:反映训练密度的一个重要指标,常用百分比值表示。



2. 生理负荷反应关键点

生理负荷反应(变化)关键点即指在生理负荷反应曲线上的一些重要瞬时点,包括第一拐点(the first inflexion point, FIP)、第二拐点(the second inflexion point, SIP)、负荷强度反应极大值点、运动终点以及转折点(见图 21-5)。在运动生理负荷反应曲线上出现的“拐点”(第一、二拐点),是符合严格数学定义上的“拐点”,它的二阶导数为零($y''=0$)。不同于血乳酸水平变化的“拐点”(个体乳酸阈),后者不是真正数学意义上的拐点,而仅仅是在同一变化方向(趋势)上的一个显著变化点(break point),故称“个体乳酸突破点”更为合适。

(1) 第一拐点:又称“第二次呼吸点”(H点),是机体进入工作状态阶段结束(即生理“极点”综合症的减轻或消除)、稳定工作状态阶段开始(即“第二次呼吸”现象出现)的标志。该点的坐标值是反映机体克服内脏器官惰性、加速生理机能动员能力的重要指标参数。

(2) 第二拐点:又称疲劳始点(I点),是人体运动中生理机能和生化过程变化的一个很重要的瞬时点。它标志着运动过程中机体稳定工作状态阶段的结束和疲劳阶段的开始。

在定量负荷运动中,人体经过一段时间的稳定工作阶段后,输出功率不变,即身体内部所做的有效生理功没有明显增加,但身体内部的总生理功明显增加,表现为体内一系列有关能量供应的指标(如体温、心率、血乳酸值、心输出量等)数据的显著升高,说明机体的整体工作效率开始明显下降。故将机体的整体工作效率不能保持在原有水平上的显著变化点,定义为出现疲劳的始点,即第二拐点。

(3) 负荷强度极大值点:指在本次单项练习中出现的最高生理负荷强度反应点(即J点),是评价训练时(外部)运动负荷强度所产生的生理负荷刺激强度的一个主要参照指标。教练员在制定和实施训练计划时,为了达到一定的训练目标,常通过调控练习中的负荷强度来实现。实时、精细地调控训练中的负荷强度是体能科学化训练的一个重要研究内容。

人体在某次单项练习中出现的最高生理负荷强度反应,表示该次练习中达到的最大反应值,但该最大值并不等于机体能够承受或能够达到的生理负荷反应的极限强度值。换言之,极限值必然是最大值,但最大值不一定就必然是极限值。极限值存在个体差异,且在训练中,因受运动强度、运动者的主观积极性和生理机能状态等因素的制约,一般不容易达到。

(4) 运动终点:运动终点(即K点)或称衰竭点(exhaustion point),指人体再也不能按照既定的运动强度继续进行下去而被迫停止练习的临界点。运动终点也是疲劳发生的终点(即疲劳终点),同时也是机体以恢复过程为主的恢复期始点(严格地讲,人体的恢复过程在运动中也在同时进行)。

运动者的主观动机和意志品质是影响运动终点时程的最主要因素。因此,疲劳时程(从第二拐点到疲劳终点的时间间隔)指标既可作为评价人体生理抗疲劳能力的参考指标,同时也可作为定量评价人体意志品质的一个参考指标。



(5) 转折点: 转折点(即 M 点)也称为“恢复点”(recovery point), 是上、下两个单项练习阶段的交界点。两点之间即为恢复期。恢复点水平既可是安静状态水平, 也可是某一既定水平。因此, 调控恢复点的生理水平, 既是持续训练法与间歇训练法的主要区别, 同时也是间歇训练法的关键环节之一。

(五) 生理负荷反应的计算方法(参考内容)

1. 单项运动生理负荷反应变化趋势数学模型的建立

根据单项运动训练过程中, 生理负荷反应变化的实际数据轨迹和生理负荷量数据形成的机理, 采用四阶代数广义多项式数学模型, 拟合人体在练习中的生理负荷反应数据的变化趋势, 即

$$y = \beta_0 + \beta_1 t + \beta_2 t^2 + \beta_3 t^3 + \beta_4 t^4 + \varepsilon = \beta_0 + \sum_{i=1}^4 \beta_i t^i + \varepsilon$$

式中, y 为回归因变量, 表示训练过程中的生理负荷量各具体指标(如吸氧量、氧脉搏、心率及呼吸频率等); t 为回归自变量, 表示运动负荷时间; ε 是非随机变量。

2. 第一拐点和第二拐点的计算方法

生理机能第一拐点和第二拐点瞬时时刻值的确定, 是在运动生理负荷反应曲线的拟合模型基础上, 求取该方程的连续二阶导数: $Y'' = f''(\beta_0 + \sum_{i=1}^4 \beta_i x^i + \varepsilon)$ 。令 $y'' = 0$, 解出 X_1 和 X_2 , 即分别为第一、二拐点在负荷时间 X 轴上的数值。再将 X_1 和 X_2 的值代入同一模型中, 即可分别求出第一、二拐点在 Y 轴上相对应的瞬时数值(即负荷反应强度值)。

3. 生理负荷积分量的计算方法

纯总生理负荷积分量(ITw): 纯总生理负荷积分量=总生理负荷积分量减去安静水平的积分量。以心率指标为例, 其计算公式为: $IT_w = \int_0^D [f(t) - rHR] dt$ 。其中, 安静水平心率负荷积分量为: $S_R = rHR$; O, D 表示运动负荷起止时刻, 即构成的运动时间区间; 负荷积分量表示单位: “ U_{wHR} ”或“次/分·秒”(Y轴的生理指标单位为次/分, X轴的时间单位为秒)。

各阶段纯运动负荷量(Sp): 阶段运动负荷(积分)量=负荷反应曲线积分量-安静水平曲线积分量。如以心率指标为例, 则某运动阶段的生理负荷积分量为: $Sp = \int_a^b [f(t) - rHR] dt$ 式中, Sp 表示该阶段在 $[a, b]$ 运动时间区间内的纯运动负荷积分面积。

(六) 绘制生理负荷反应特征图

绘制生理负荷反应特征图包括绘制各种能直观、形象表达负荷变化特征、负荷指标间关系及负荷变化规律的曲线和图形等。如描述或比较各阶段特征值, 可运用直方图、百分比图等; 描述两项指标变化规律与相互关系, 可运用二维曲线图等; 描述多项指标动态变化规律及相互数理关系, 可运用三维曲面拟合图、空间变化轨迹图等。



(七) 绘制和填写实时分析报告表

设计和绘制《运动生理负荷实时分析报告》，将生成的曲线图和计算数据整理后，编排在《运动生理负荷实时分析报告》中。如条件允许，可以编制专题计算机应用程序，自动生成、填写和打印报告，以便节省操作、计算时间，尽快将报告送到教练员手中。

(八) 送达《运动生理负荷实时分析报告》

将《运动生理负荷实时分析报告》送达教练员、运动员手中签收，既是实时分析的最后步骤，同时也是生理负荷实时分析工作发挥作用的开始。数据分析完成后，在现场及时将报告送出，这是实时分析的关键和突出特点。

【小结】

1. 运动生理负荷是特指机体在一定强度和持续时间的运动负荷刺激作用下，机体内部器官和系统为发挥本身所具有的生物学功能，克服加载的内、外阻力（负荷），保持一定生理机能活动水平的过程中所承受的生理负荷。运动生理负荷或负荷量的基本要素包括运动生理负荷强度、负荷时间和负荷积分。生理负荷积分是指生理负荷强度随负荷时间变化的函数关系，其本质是负荷强度与负荷时间的积分，在数学上表现为一个面积值。

2. 运动生理负荷实时监测必须遵循不干扰、简便、可靠、无创和连续性等基本原则；监测的基本内容包括负荷强度、负荷积分和变化趋势与特征三大方面。实时负荷监测方法有现场生理负荷信息采集与实时监测两大类，前者主要是表集、记录负荷反应数据，待训练结束后再进行分析处理；后者主要是应用计算机和遥测等技术，将实时检测到的数据进行实时分析和处理，并及时反馈给教练员。

3. 运动生理负荷实时调控是在实时监测的基础上，根据训练计划的要求和被监测者的生理机能变化，及时进行调整训练计划的过程。调控方法分为人工实时调控和计算机智能调控。

4. 实时分析应遵循实用性、可靠性、简练性、直观性和及时性原则。分析步骤和方法包括：确定指标体系、划分和计算各负荷反应阶段的时间和负荷反应特征值、分析生理负荷反应基本规律、绘制生理负荷反应特征图和呈送《运动生理负荷实时分析报告》等。

【思考题】

1. 运动生理负荷的基本概念和基本要素。
2. 影响生理负荷的决定因素有哪些？这些因素间的关系如何？
3. 阐述进行运动生理负荷监测的基本原则。
4. 简述运动生理负荷实时监测和调控的基本内容、主要方法及主要特点。
5. 论述对生理负荷监测数据进行实时分析的基本要求。
6. 简述生理负荷数据分析的基本步骤与方法。



7.阐述运动过程中人体生理负荷反应的基本规律。

【主要参考文献】

- 1.孙学川、陈槐卿:《建立耐力性运动员心肺功能某些指标动态数学模型的方法学初步研究》,《体育科学》,Vol.1, No.1, 1998。
- 2.Moon-LK; Butte-NF. Combined heart rate and activity improve estimates of oxygen consumption and carbon dioxide production rates. J. Appl. Physiol. 1996 Oct: 81 (4) 1754~61.
- 3.Soucie-LP; Carey-C; Woodend-AK; Tang-AS. Correlation of the heart rate-minute ventilation relationship with clinical data: relevance to rate-adaptive pacing. Pacing Clin-Electrophysiology. 1997 Aug: 20(8 pt 1): 1913~1918.
- 4.Sietsema, Kathy E. et al. Early dynamics of O_2 uptake and heart rate as effected by exercise work rate. J. Appl. Physiol. 67(6): 1989, 2535~2541.
- 5.Bunc-V; Hofmann-P; Leitner-H; Gaisl-G. Verification of the heart rate threshold. Eur-J-Appl-Physiol. 1995: 70(3): 263~269.
- 6.孙学川、陈槐卿:《人体心肺机能第二拐点与某些生理生化指标的关系》,《成都体育学院学报》,Vol.23, No.4, 1997, 67~70。
- 7.Alzy, 周京生译:《男运动员的肌肉做功功率输出量与吸氧量及心率的关系》,《国外体育科技》,Vol.17, No.1, 1995, 23~25。
- 8.郭军、陆绍中:《外呼吸功能对 VO_{2max} 影响的初步探讨》,《中国运动医学杂志》,14(4), 1995, 245~247。
- 9.丁海曙、容观澳、王广志:《人体运动信息检测与处理》,北京,宇航出版社,1992。
- 10.孙学川、陈槐卿:《我国优秀耐力性运动员心肺功能某些指标的三维动态数学模型及其数理关系的初步研究》,《体育学刊》,No.1, 1998。
- 11.Sanders,W.J., R.G.Mark, and C.Zeelenberg, et al. Computers in Cardiology. Los Alamitos, IEEE Computer Society Press, 1991,333~345.
- 12.郎佳麟、傅远扬、范云生等:《中长跑运动员的机能评定及其在训练、竞赛和选材中的验证及应用》,《体育科学》,Vol.10, No.1, 1990, 22~27。
13. Bannister, E.W., J. R. Fitz-Clarke. Plasticity of response to equal quantities of endurance training separated by non-training in humans. J. Therm. Biol. 18:. 1993, 587~597.
14. Fitz-Clarke. J.R, R.H. Morton, and E.W. Bannister. Optimizing athletic performance by influence curves. J. Appl. Physiol. 71:, 1991, 1151~1158.
- 15.Bannister, E.W. Physiological testing of Elite Athletes. Edited by H.J.Green, J.D. McDougla and H.Wenger. Champaign. 1991.
- 16.Thierry B., Christian D., Regis B., et al. Modeling of adaptations to physical training by using a recursive least squares algorithm. J. Appl. Physiol.82(5):1997, 1685~1693.



17. Marco E.C. and Howard J.C. On the existence of a lactate threshold during incremental exercise: a systems analysis. *Journal of Applied Physiology*, 80(5): 1819~1828, 1996.
18. 刘丹、何加才、马元安等:《中国女子足球队速度、速度耐力训练及训练负荷强度的研究》,《体育科学》, Vol.16, No.1, 1996, 37~42。
19. 阎晓霞、沈羨云、孙亚志等:《提高人体立位耐力训练方法的研究》,《航天医学与医学工程》, Vol.9, No.3, 1996, 167~172。
20. 王德汉、孙洪元:《应激条件下心血管调节功能的模糊聚类和分析》,《中国应用生理学杂志》, Vol.4, No.3, 1988, 206~212。
21. Janice M.F., J. B. Charles, M.M. Jones, et al. Microgravity decreases heart rate and arterial pressure in human. *J. Appl. Physiol.* 80(3):, 1996, 910~914.
22. Yoshiharu Y., Yoshihiro H., and Mitsunasa M. Effects of acute exposure to simulated altitude on heart rate variability during exercise. *J. Appl. Physiol.* 81(3):, 1996, 1223~1229.
23. 那兰、刘波、陈玉宝:《渐增负荷运动中心率与心搏量、心输出量变化关系》,《中国运动医学杂志》, Vol.14, No.2, 1995, 114~116。
24. 王庆君、王云德、卢德明等:《赛艇多参数遥测分析系统的研制》,《体育科学》, Vol.13, No.4, 1993, 53~55。
25. 缪素坤、王淑云、许帆等:《我国优秀自行车运动员有氧和无氧能力的评定》,《中国应用生理学杂志》, Vol.3, No.3, 1987, 198~204。
26. 张立:《运动时目标心率与 RPE 在监测运动强度时的功能和应用》,《武汉体育学院学报》, No.3, 1995, 67~69。
27. Whipp-BJ; Higgenbotham-MB; Cobb-FC. Estimating exercise stroke volume from asymptotic oxygen pulse in humans. *J. Appl. Physiol.* 1996 Dec: 81(6):2674~2679.
28. 李建良、蒋勇、杨泰敏等:《体育数据拟合分析的几个问题》,《体育科学》, Vol.13, No.1, 1993, 64~66。

(中国人民解放军体育学院 孙学川)



第二十二章

免疫机能与运动能力

【提要】本章在介绍人体免疫学基本理论的基础上，重点讨论了运动对免疫机能的影响以及运动性免疫模式，分析了产生运动性免疫抑制现象的可能机理和生理意义，介绍了运动性免疫抑制的调理措施。

免疫机能是人体重要的防御机能，也是人体体质的代表性指标之一。不同运动负荷对人体的免疫系统机能会产生不同的影响。因此，了解运动对免疫机能的影响，对更好地推广、宣传和实施全民健身计划，科学安排训练与比赛，使运动员在承受最大负荷的同时保持身体健康，挖掘运动员的最大潜能，延长运动员的运动寿命都具有非常重要的意义。自 20 世纪 80 年代起，运动免疫研究已经成为运动生物学中最活跃的研究领域之一。

第一节 免疫系统概述

一、免疫的概念

(一) 免疫

免疫(immunity)的原意即为“免除瘟疫”之意。人类对免疫的认识是从研究机体对传染病的抵抗力开始的。人们早就发现，在某些传染病(如天花等)流行的过程中患病后幸免于死的人，往往会获得对该病的抵抗力，当该种传染病再度流行时可以安然无恙。在相当长时间里，人们朴素地认为，免疫就是机体抗感染的能力，并且对机体都是有利的。随着对免疫认识的不断深入，人们发现：免疫不一定是病原因子所引起；免疫功能不仅仅局限于抗感染；免疫反应的后果并不总是对机体有利。

目前对免疫概念比较完整的表述是：免疫指机体接触“抗原性异物”或“异己成分”后所引起的一种特异性生理反应，其作用是识别与排除抗原性异物，以维持机体的生理平衡。这些反应通常对机体有利，但在某些条件下也可能是有害的。



(二) 特异性与特异性免疫

1. 特异性免疫(specific immunity)

个体在生活过程中,因受病原微生物感染或接种疫苗而获得的免疫称为获得性免疫。因这种免疫一般仅针对所感染的病原微生物或疫苗所能预防的疾病,故又称特异性免疫,人们一般概念中的免疫,均指特异性免疫。

2. 非特异性免疫(non-specific immunity)

人体对抗原性异物的抵抗力,有些是天生具有的,即在种系发育进化过程中形成的,经遗传获得的,称为先天性免疫。因其并非针对某一病原微生物,故又称非特异性免疫。非特异性免疫由机体的解剖结构与生理功能所体现,如机体的各种屏障结构(皮肤与粘膜屏障、血脑屏障、血胎屏障)、吞噬细胞(中性粒细胞和单核吞噬细胞)及体液和组织中的抗菌物质等。

(三) 抗原与抗体

1. 抗原

抗原(antigen)即抵抗的原因。抗原特指的是细菌、病毒、微生物等病原体,即能刺激机体产生抗体的物质。随着免疫学研究的进展,人们逐渐认识到,抗原进入人体后,不仅经淋巴细胞中的B淋巴细胞所介导产生体液免疫(产生抗体),而且经T淋巴细胞介导产生细胞免疫。因此,自20世纪80年代以来,对抗原较为全面、确切的定义为:能够与相应的抗原特异性淋巴细胞上独特的抗原受体结合,诱导该淋巴细胞发生免疫反应的物质。

2. 抗体

抗体(antibody)是机体受到抗原刺激而产生的特异性糖蛋白,亦称免疫球蛋白(immunoglobulin, Ig),常用的免疫球蛋白指标为IgA、IgG和IgM。它们能与相应抗原结合形成抗原-抗体复合物,递呈有关细胞排灭。抗体一般由B淋巴细胞产生,分布于细胞表面、血清和其他体液中。

二、免疫系统的组成

人体免疫系统由免疫器官、免疫细胞与免疫分子共同组成。它们是机体免疫功能及发生免疫反应的物质基础。

(一) 免疫器官

免疫器官是免疫细胞分化、增殖与定居的场所,分为中枢免疫器官和外周免疫器官。

1. 中枢免疫器官

骨髓和胸腺能使淋巴干细胞增殖, 进行一定程度的分化, 成为成熟的免疫细胞并输送到外周淋巴组织定居, 因而骨髓与胸腺被称为中枢免疫器官。

2. 外周免疫器官

接受免疫细胞的组织称为外周免疫器官或末梢淋巴组织。包括淋巴结、脾脏和扁桃体等。

(二) 免疫细胞

免疫系统的主要功能是识别并排除体内的非己物质, 执行此功能的细胞均属免疫细胞。换言之, 凡参与免疫反应或与免疫反应有关的细胞统称为免疫细胞。包括淋巴细胞、单核巨噬细胞和粒细胞等。

1. 淋巴细胞

淋巴细胞(lymphocyte)在免疫反应中起核心作用。其中能接受抗原刺激而活化、增殖分化并发生特异性免疫反应的淋巴细胞称为抗原特异性淋巴细胞或免疫活性细胞, 即 T 淋巴细胞和 B 淋巴细胞。此外, 还包括 K 细胞(killer, 杀伤细胞)、NK 细胞(natural killer, 自然杀伤细胞)等。其中 T 淋巴细胞主要介导细胞免疫; B 淋巴细胞主要介导体液免疫; K 细胞能够杀伤被抗体(IgG)覆盖的靶细胞; NK 细胞能够直接杀伤某些肿瘤细胞或受病毒感染的细胞。

T 淋巴细胞的许多功能是通过其亚群发挥的, 如 T_H 细胞(helper T cell, 辅助性 T 淋巴细胞)在介导细胞免疫和体液免疫过程中充当着关键角色; T_C (cytotoxic T cell, 细胞毒性 T 淋巴细胞)和 T_D (delayed type T cell, 迟发型 T 淋巴细胞)两者在细胞免疫反应过程中起重要作用(图 22-1、2)。

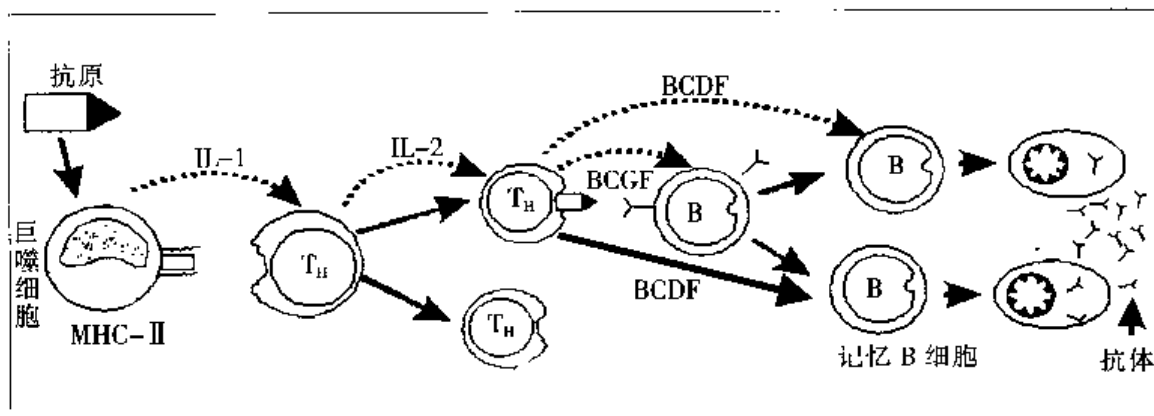


图 22-1 体液免疫应答过程示意图



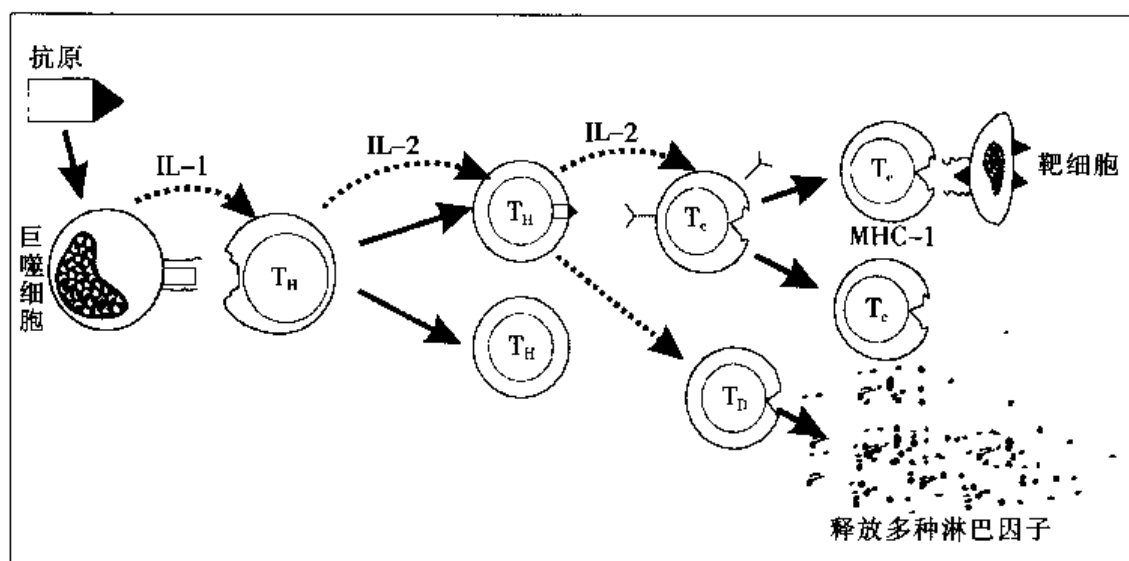


图 22-2 细胞免疫应答过程示意图

2. 单核吞噬细胞

单核吞噬细胞(mononuclear phagocyte)指血液中的单核细胞(monocyte)和各种组织中的巨噬细胞(macrophage)。这类细胞具有多种免疫机能,包括吞噬和杀伤作用、递呈抗原作用以及分泌作用。

3. 粒细胞

粒细胞(granulocyte)包括中性粒细胞(neutrophil)、嗜酸性粒细胞(eosinophil)以及嗜碱性粒细胞(basophil),其中起免疫作用的主要是中性粒细胞。它占白细胞总数的 50%~70%,是机体非特异性免疫系统的重要组成部分,具有高度的移动性与吞噬功能。中性粒细胞被认为是体内最有效的吞噬细胞,而且在入侵病原体的早期控制中起着关键作用。

(三) 免疫分子

免疫分子包括抗体、补体与细胞因子等。

1. 补体

补体(complement,C)指人与动物血清中正常存在的、与免疫有关的、并可具有酶活性的一组球蛋白。补体并非单一物质,而是包含多种成分的血浆蛋白,故又称补体系统。其中包括了补体激活的成分,也包括调控补体系统的各种灭活因子和抑制因子。主要补体有 C_3 和 C_4 等。补体系统的生物学作用是溶菌、杀菌及细胞毒性作用、调理作用、免疫粘附作用、中和及溶解病毒以及炎症介质作用。

2. 细胞因子

细胞因子(cytokine)主要由淋巴细胞与单核-巨噬细胞所产生,习惯上称前者为淋巴

因子(lymphokine),后者为单核因子(monokine)。实际上其他免疫细胞与非免疫细胞也可以产生,故统称为细胞因子。主要的细胞因子有白细胞介素(interleukin, IL)、B 淋巴细胞刺激因子、淋巴毒素、肿瘤坏死因子、干扰素、集落刺激因子和转移因子等。

机体在对“非己”物质(即抗原)进行免疫反应并加以排除的过程中,主要通过细胞因子在免疫细胞之间传递信息。从这个意义上讲,细胞因子对于免疫系统,正如激素对于内分泌系统、神经递质对于神经系统一样重要。此外,在神经——内分泌——免疫调节网络中,细胞因子也起着非常重要的介导作用。

三、免疫反应

抗原性物质进入机体后所激发的免疫细胞活化、分化和效应的过程称做免疫应答,也称为免疫反应。免疫反应包括由 B 淋巴细胞介导的体液免疫反应和由 T 淋巴细胞介导的细胞免疫反应。

(一) 体液免疫

体液免疫(humoral immunity)主要指由 B 淋巴细胞介导的免疫反应。体液免疫反应过程可分为三个阶段(参见图 22-1)。

1. 感应阶段

在感应阶段,进入体内的抗原被巨嗜细胞捕获,进行吞噬加工处理后,递呈给 T_H 细胞, T_H 细胞受该抗原(处理过的)和白细胞介素 1(IL-1)诱导而活化。这是一个抗原递呈过程。这个过程需要 MHC-II (major histocompatibility complex, 主要组织相容性复合体)参与。

2. 增殖和分化阶段

T_H 细胞被活化后,发生增殖并释放出白细胞介素 2(IL-2)、B 淋巴细胞分化因子(BCDF)和 B 淋巴细胞生长因子(BCGF)。其中 B 淋巴细胞分化因子和 B 淋巴细胞生长因子能够使 B 淋巴细胞成熟、增殖并分化成浆细胞。

3. 效应阶段

在效应阶段进行着两个反应过程。第一,多数 B 淋巴细胞能够成为浆细胞,合成和分泌免疫球蛋白(抗体),然后由抗体直接或间接发挥免疫效应,杀灭进入人体的抗原物质。第二,部分 B 淋巴细胞变为记忆性 B 淋巴细胞,以后若遇相同抗原刺激时可以很快产生相同抗体,并在相当长时间内维持较高的抗体浓度,这样就对该病原体产生了抵抗力。

(二) 细胞免疫

细胞免疫(cellular immunity)通常是指由 T 淋巴细胞所引发的免疫应答反应,其反应过程也可分为三个阶段(参见图 22-2)。



1. 感应阶段

T 淋巴细胞介导的细胞免疫反应的感应阶段, 基本类似于 B 淋巴细胞介导的体液免疫反应过程的感应阶段。

2. 增殖和分化阶段

活化的 T_H 细胞开始大量增殖, 最终导致激活相应的 T_D 细胞和 T_C 细胞, 进入效应阶段。同时, 部分 T 淋巴细胞分化为记忆性 T 淋巴细胞。

3. 效应阶段

激活的 T_C 细胞发挥特异性的细胞毒性作用, 攻击靶细胞(病原体)。一个 T_C 细胞在数小时内可杀伤数十个靶细胞。 T_D 细胞则释放出多种淋巴因子, 参与对抗病原体感染的炎性反应等。

第二节 运动性免疫机能

运动性免疫机能是指在不同运动负荷作用下, 人体免疫机能所发生的动态变化过程和状态。主要表现为免疫机能的抑制、亢奋和相对稳定。

一、运动负荷与免疫机能

运动与免疫机能的关系十分复杂, 并非只要运动必然有益于免疫机能。研究已经表明, 不同运动负荷对免疫机能会产生不同的影响。适中运动负荷可提高免疫机能, 降低感染性疾病的风险, 而大强度运动训练则对免疫机能有抑制作用。

(一) 中等运动负荷对免疫机能的影响

流行病学调研结果显示, 经常从事适中负荷的运动者比静坐工作者上呼吸道感染的发病率低。Nieman DC 等入让女性受试者每天快走 35~45 分钟, 每周快走 5 天, 在冬春季或秋季走 12~15 周, 而对照组不做任何体育活动。研究发现, 运动组受试者患感冒的天数只占到对照组一半左右。

适中负荷运动期间, 免疫系统会发生数种有益的变化: 如抑制免疫功能的应激激素和亲炎性、抗炎性细胞因子未见升高。研究认为, 每一次适中负荷运动对人体的免疫监视功能都起一定的促进作用, 并且似乎会在较长时间内降低机体感染的危险。

总之, 每日进行适中运动, 可增强免疫功能, 降低患病风险。这些研究结果对于指导全民健身有一定实用意义。

(二) 大负荷运动对免疫机能的影响

人体实验和动物实验证实, 长期大负荷运动后对免疫机能有负性影响。主要表现在

下列方面。

1. 淋巴细胞数量减少, 增殖能力明显降低, 表明细胞免疫功能受到损伤。
 2. 主要免疫球蛋白 IgA、IgG 以及重要补体 C₃ 和 C₄ 含量显著降低。
 3. 运动后血浆儿茶酚胺和可的松浓度(应激激素、属于免疫抑制激素)明显升高, 并由此导致免疫细胞数量减少以及活性降低等免疫机能负性变化。
 4. 鼻腔中性粒细胞吞噬作用降低, 以及血液粒细胞氧化活性降低。
 5. NK 细胞的细胞毒性(反映机体抗病毒能力的重要指标)降低, 丝裂原诱发的淋巴细胞增殖作用(衡量 T 淋巴细胞功能)降低。
 6. 延迟性过敏反应(delayed-type hypersensitivity, DTH)降低。延迟性过敏反应是一个复杂的免疫过程, 涉及数种不同的细胞类型(包括 T 淋巴细胞)以及化学介导物质, 表现为皮肤出现红疹等。
 7. 持续时间较长、强度较大的运动训练会导致肌肉细胞受损, 并继发性释放出亲炎性和抗炎性细胞因子。
 8. 在离体发生的对丝裂原和内毒素的反应过程中, 所生成的细胞因子减少。表明在大负荷运动之后, 机体免疫系统产生细胞因子的能力降低。
 9. 鼻腔和唾液中的 IgA 浓度降低, 鼻腔黏液清除作用降低。这表明上呼吸道清除外部病原体的能力受损。
 10. MHC-II 的表达以及巨噬细胞的抗原提呈作用降低。表明大负荷运动会降低巨噬细胞对于 MHC-II 的表达, 从而负性地影响着向 T 淋巴细胞的抗原提呈过程。因此, 也负性地影响着细胞免疫和体液免疫的反应过程。
- 上述结果表明, 大强度运动训练会产生比较强烈的免疫抑制现象, 对免疫机能有明显的负性影响。

二、运动性免疫模式

目前, 较为成熟的运动性免疫模式(exercise-induced immunity models)有两种, 即“开窗”(open window)理论模式和“J”型曲线模式。前者主要与运动训练引起的免疫抑制有关, 后者则形象地反映不同运动负荷对免疫机能的影响。

(一) “开窗”理论模式

“开窗”理论认为, 大强度急性运动时, 应激激素的急剧升高以及血流动力学发生的急剧变化, 导致淋巴细胞等免疫细胞快速动员入血, 使得淋巴细胞的数量在运动期间急剧升高, 淋巴细胞亚群比例发生明显改变。大强度运动后, 淋巴细胞浓度下降, 增殖分化能力及活性降低, 免疫球蛋白含量及功能也受到影响, 出现免疫低下期, 表现为对疾病的易感率升高。据研究, 受一次性急性运动影响, 免疫低下期可持续 3~72 小时不等。在这一免疫低下期, 各种细菌、病毒等病原体极易侵入人体并导致疾病发生。故一般形象地将这段免疫低下期称为“开窗”期, 意为“免疫系统被打开了窗户, 病原体可较自由地进入”。因为这时机体的“窗户”未像平常那样“关闭”着将病原体拒之门外, 而是



将其“打开”放任它们进入人体，故此段期间运动员易感率明显上升，如图 22-3 所示。

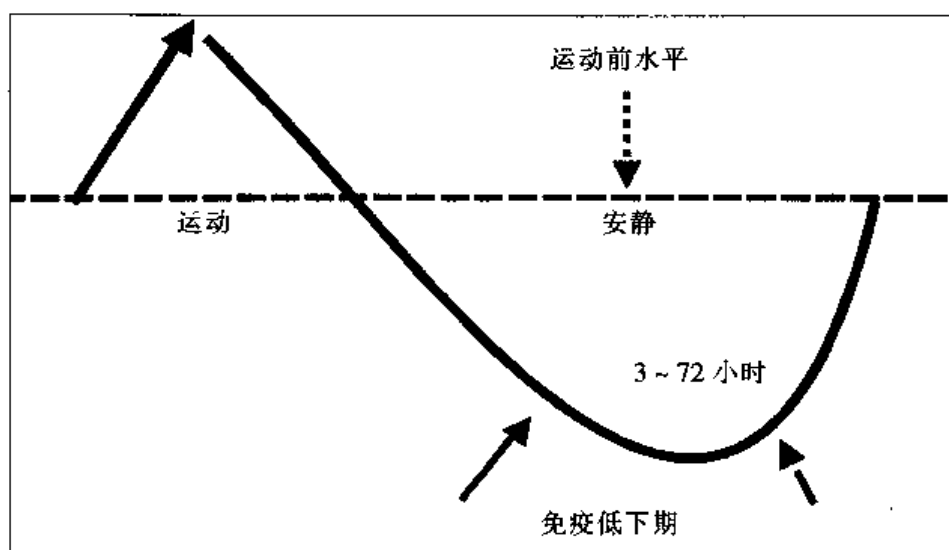


图 22-3 运动性免疫的“开窗”理论模式示意图

(二) “J”型曲线模式

研究证明，人体的免疫功能与运动量、运动负荷和持续时间等有密切关系。不运动者呈一种自然免疫状态，而大负荷、大运动量、较长持续时间且频度较高的运动训练，会抑制免疫机能。在这两极之间，有一适中的运动负荷、运动频度、运动量和持续时间的组合方式，既能有效地提高身体运动能力，又能有效地提高免疫机能。在研究了运动强度与上呼吸道感染率之间的关系后发现，若以正常不运动者的上呼吸道感染率作为参照，适宜中等负荷的经常性身体运动可明显降低上呼吸道感染率，而大强度运动训练则会使之明显升高。三者相比，形成一条类似“J”字形的曲线。如图 22-4 所示。

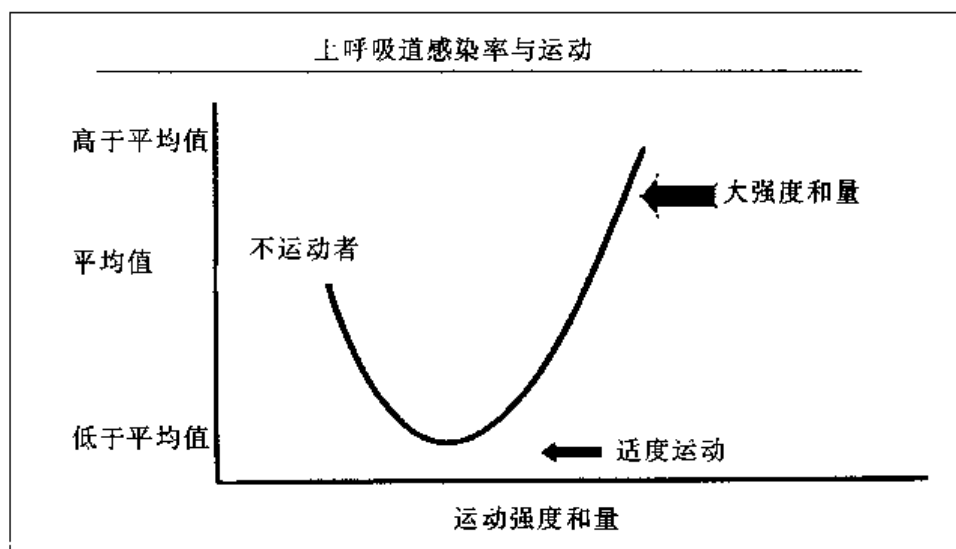


图 22-4 运动性免疫的“J”型曲线模式

第三节 运动性免疫抑制

运动性免疫抑制(exercise-induced immunosuppression)是指大负荷运动后,由于过度负荷导致机体免疫机能下降的现象。

流行病学调研结果显示,过度训练会降低身体对上呼吸道感染疾病的抵抗力。尤其是在大运动量训练期间,以及参加过竞技性耐力比赛后 1~2 周期间,患上呼吸道感染病的风险明显升高。当优秀运动员感觉到训练量超过了自我感觉的训练阈值(最大耐受限度)之后,患病率会升高。

动物和人体实验结果也表明,剧烈运动会降低免疫机能。若长期进行此种运动,免疫机能会逐渐降低,发生越来越严重的免疫抑制现象。表现在免疫细胞数量减少,淋巴细胞转化能力降低,分泌型 IgA 明显减少(标志着抗感染能力降低),细胞因子的生成受到影响,对毒素引起的免疫反应降低等。

一、运动性免疫抑制的可能机理

引起运动性免疫抑制的原因非常复杂,据研究,与下列因素的作用有密切关系。

(一) 植物性神经系统的作用

中枢淋巴器官与外周淋巴器官接受交感神经、副交感神经的双重支配。植物性神经系统发挥免疫调控效应主要是通过神经末梢释放的神经递质等作用于靶细胞膜上的相应受体。影响作用主要包括:影响淋巴组织与器官血流调控,淋巴细胞的分化、发育、成熟、移行与再循环,细胞因子和其他免疫因子的生成与分泌,以及免疫反应的强弱和维持的时间。

研究证实,交感神经兴奋一般引起抑制免疫效应,而副交感神经兴奋一般引起免疫增强效应。运动时交感神经兴奋而副交感神经受到抑制,放免疫机能受到抑制。

(二) 激素、神经递质等的作用

激素、神经递质、神经肽与细胞因子是对免疫机能具有最重要调控作用的调节物质。从对免疫机能调控作用的角度,可将这些调节物质划分为两大类:免疫增强类调节物质与免疫抑制类调节物质。免疫增强类调节物质主要包括生长激素、促甲状腺素、甲状腺素、催乳素、乙酰胆碱、 β -内啡肽、P 物质和褪黑激素等;免疫抑制类调节物质主要包括促肾上腺皮质激素释放激素、促肾上腺皮质激素、糖皮质激素、生长抑素和儿茶酚胺等。一般情况下,这两类调节物质在体内相互作用,维持机体正常的免疫反应与免疫适应。

运动时,这两类调节物质相互作用的力量会发生根本性变化。凡是与运动有关的应激激素等调节物质明显增加,而非应激激素等调节物质则处于相对抑制状态。应激激素



等调节物质绝大部分为免疫抑制类调节物质，可对免疫系统产生强烈的抑制作用。尽管运动过程中生长激素等个别免疫增强性物质分泌量也有所增加，但其免疫增强效应远远小于免疫抑制效应，所以总效应表现出免疫抑制。

（三）低血糖的作用

血糖是运动时骨骼肌的主要能源。耐力性运动中糖作为主要的能源底物，消耗速率极快，并时常导致血糖浓度降低。血糖浓度降低后，会从以下两个方面对免疫机能形成抑制性效应。

1. 加强糖皮质激素的分泌

位于脑和肝脏中的葡萄糖感受器可以调节垂体-肾上腺皮质系统的机能，若血糖降低，会加强下丘脑——垂体——肾上腺轴(HPA 轴)的激活程度，促进糖皮质激素的分泌。糖皮质激素是强烈的免疫抑制剂，会引起机体的免疫抑制。

2. 淋巴细胞能源不足

运动时，血糖不仅是骨骼肌收缩的重要能源，而且也是免疫细胞的重要能源物质。所以运动引起血糖浓度下降，会直接影响淋巴细胞和巨噬细胞等免疫细胞的能源供应，继而使免疫机能下降。

（四）氧自由基的作用

研究显示，急性运动中，体内氧自由基上升，上升幅度因运动负荷、运动量及持续时间不同而有所差别。而且这种升高现象在运动后仍然会持续相当长时间。体内氧自由基维持于较高水平，不仅是机体重要的致疲劳因素，而且会通过攻击免疫细胞膜等途径，造成免疫抑制。因此，大负荷运动后恢复期内所发生的较长时间的免疫抑制现象，可能与此阶段氧自由基水平较高有关。

（五）谷氨酰胺浓度降低的作用

谷氨酰胺也是淋巴细胞和巨噬细胞的重要能源物质。肌肉释放谷氨酰胺是免疫细胞利用谷氨酰胺的限速因素，控制着免疫细胞利用谷氨酰胺的速率。当骨骼肌释放谷氨酰胺速率降低时，血浆中谷氨酰胺的浓度降低，免疫细胞利用谷氨酰胺的速率下降，进而影响到免疫细胞的免疫机能。

研究表明，从事持续时间较长、强度较大的耐力性运动时，血浆谷氨酰胺会发生显著降低，尤其是过度训练运动员其血浆谷氨酰胺下降更明显，而且时常伴有易感率上升、伤病难以恢复等免疫机能低下症状。这提示：运动过程中肌肉释放谷氨酰胺减少、血浆谷氨酰胺浓度下降是导致运动性免疫抑制的重要因素之一。

（六）免疫抑素、免疫抑制因子的作用

免疫抑素(或称抑制素)由垂体前叶合成，是分子量为 63KD 的蛋白质，具有较强的

免疫抑制效应。它由促肾上腺皮质激素和生长激素等刺激细胞而生成，故可以认为是应激性激素，参与对免疫机能的抑制性调控。研究表明，应激过程中，免疫抑素升高对免疫机能有抑制作用。在应激情况下，血清中也会出现多种免疫抑制因子。它们可抑制淋巴细胞生成 IL-2 的过程和淋巴细胞的增殖作用，因此对免疫机能也有抑制作用。

二、运动性免疫抑制的生理意义

从保护身体健康及维护机体安全的角度，运动性免疫抑制现象具有非常重要的生理意义。

第一，运动过程中，免疫抑制现象作为对运动应激活动的反作用，使机体不能将全部能量与机能能力动员出来从事运动，以免应激反应程度过高，影响机体安全。所以，在运动应激过程中，免疫机能充当着必不可少的保护性抑制角色。运动应激反应越激烈，持续时间越长，机体动员程度越大，免疫抑制程度相应越深，持续时间越长。免疫系统以此保持反应适度，保护机体安全。

第二，运动过程中，若运动量过大、持续时间过长时，运动系统动员程度过大、过强，必然会对身体造成严重危害。这时，机体利用免疫降低容易患病等提示机体已无法再坚持训练，并强制性地要求机体休息，至少要求强制性地减量、减强度，以此保护机体安全。

第三，运动后免疫抑制程度与运动量、运动强度直接有关，尤其与运动量关系更为密切。所以，机体承受的运动量越大，疲劳程度越深，所需恢复时间越长，相应的免疫抑制程度越深，抑制解除所需时间越长。在这种情况下，机体急需一个“恢复期”来保护内环境遭受急剧破坏后的身体安全，正如患病时需要卧床休息一样。此段时间免疫功能低下正是为了让运动员得到充分的恢复。

三、运动性免疫抑制的调理

目前，对运动性免疫调理措施的研究日益深入，以期在训练过程中尽可能保护免疫机能，在训练后促进免疫机能的尽快恢复。常用调理措施主要有营养调理措施、中医药调理措施和自我保护调理措施等。

（一）营养调理

营养调理主要是针对影响免疫机能的重要营养因素来进行。

1. 补糖

补糖是目前国内外应用较为广泛的免疫调理手段。在补糖时要注意以下几个问题：①训练前补糖时间不宜距离开始训练的时间过近，以免引起胰岛素效应反而导致运动时血糖浓度降低；②运动中补糖要少量多次，浓度不宜过高；③运动后补糖应在训练后抓紧进行，以便既有利于维持血糖水平，促进免疫机能恢复，又有利于糖原的再合成。



2. 补充谷氨酰胺

补充谷氨酰胺主要应用药物制剂，多在运动后补充。

3. 补充抗氧化物

服用一些抗氧化物(如维生素 C、维生素 E、胡萝卜素及乙酰半胱氨酸等)来提高机体的抗氧化能力。自由基不仅可以抑制免疫机能，而且是重要的致疲劳物质。因此，补充抗氧化物可谓“一箭双雕”，不仅有利于调理免疫机能，而且有助于促进疲劳的消除和身体机能的恢复。

4. 补充微量元素

微量元素硒、铁、锌、铜等，具有保护细胞膜(包括免疫细胞)、并促进身体机能恢复的作用。

(二) 中医药调理

中医理论认为，免疫功能降低主要归因于正不压邪、阴阳失调所致。因此，对免疫机能进行调理的基本思路是扶正祛邪，调整阴阳。利用补益法从补气、补血和补阳入手，扶持正气，提高免疫机能。有学者以优秀赛艇运动员作为免疫调理对象，在运动员完成正常训练的同时，服用中药(补气、补血、补肾中药)进行免疫调理。结果发现，与调理前免疫指标相比，白细胞总数上升了 31%，中性粒细胞上升了 18%，淋巴细胞上升了 59%；IgA 上升了 5.1%，IgG 上升了 13.95%，C₃ 上升了 15.4%。

(三) 自我保护调理

运动员自我保护调理措施包括：①将训练之外的生活和精神压力降低到最低限度；②进食多样化的平衡膳食；③避免过度训练和慢性疲劳；④生活要有规律，保证睡眠充足；⑤降体重的速度不宜过快；⑥重大比赛之前，尽可能避免与病人接触，尽可能不到人多之处，减少感染机会；⑦运动员到异地参加比赛，尤其是冬季比赛时，有条件时建议接种流感疫苗；⑧如果患轻微感冒，待症状消失后再进行大强度训练比较安全；⑨感冒较重，兼有发烧、极端疲乏、肌肉疼痛以及淋巴结肿大等症状，应待彻底痊愈后再恢复大强度训练。

【小结】

1. 免疫机能属于人体的防御机能，包括特异性免疫与非特异性免疫。免疫系统由免疫器官、免疫细胞和免疫分子组成。免疫器官分为中枢免疫器官和外周免疫器官，前者包括骨髓与胸腺，后者主要包括淋巴结、脾脏和扁桃体等。

2. 免疫细胞包括淋巴细胞、单核巨噬细胞以及粒细胞。在免疫反应中起核心作用的是淋巴细胞，包括 T 淋巴细胞、B 淋巴细胞、K 细胞以及 NK 细胞等。免疫分子包括抗体、补体和细胞因子等。

3.免疫应答反应包括由B淋巴细胞所介导的体液免疫反应及T淋巴细胞所介导的细胞免疫反应。免疫应答反应过程可人为地分为三步:感应阶段、增殖和分化阶段以及效应阶段。

4.不同运动负荷对免疫机能具有不同的影响。流行病学以及实验性研究均显示,适中运动负荷可提高人体的免疫机能,降低对感染性疾病的易感率,而长期大强度训练则对免疫机能有抑制作用。

5.引起运动性免疫抑制的原因包括交感神经兴奋、应激激素升高、血糖和谷氨酰胺浓度下降、氧自由基升高以及免疫抑制素增加等因素。

6.运动性免疫抑制现象有其积极的生理意义。它可作为机能状态的信号,充当保护性抑制的角色,在运动过程中和运动后,利用免疫抑制程度的变化提示机体对负荷的承受情况,保护机体安全。目前主要通过营养补充措施和中医中药两种手段对运动性免疫抑制进行调理。

【思考题】

- 1.免疫的基本概念。
- 2.非特异性免疫与特异性免疫的差异。
- 3.抗原和抗体的概念。
- 4.主要的免疫细胞及其主要作用。
- 5.简述体液免疫应答反应的过程。
- 6.简述细胞免疫应答反应的过程。
- 7.简述适中运动对免疫机能的主要影响。
- 8.大强度运动训练引起的免疫指标的主要变化。
- 9.简述运动性免疫的“开窗”理论模式和“J”型曲线模式。
- 10.试述导致运动性免疫抑制现象的可能机理。
- 11.简述对运动性免疫抑制调理的方法。

【主要参考文献】

- 1.Laurel T Mackinnon:Advance in exercise immunology(1st edition),Human kinetics. 1999.
- 2.Bente Klarlund Pedersen: Exercise immunology, Springer,1997.
- 3.Ronald R Watson: Exercise and disease, Watson Eisinger. 1992.
- 4.Pramod M et al: Signal transduction in leukocytes, CRC Press, 1996.
- 5.Laurel T Mackinnon: Exercise and immunology, Human kinetics.1992.
- 6.R Sanders Williams: Biological effects of physical activity, Human kinetics.1989.
- 7.Atko Viru: Adaptation in sports training, CRC Press,1995.
- 8.谢启文主编:《现代神经内分泌学》,上海,上海医科大学出版社,1999.
- 9.金伯泉主编:《细胞和分子免疫学》,北京,世界图书出版公司,1998.
- 10.毕爱华主编:《医学免疫学》,北京,人民军医出版社,1994.



- 11.龙振洲主编:《医学免疫学》,北京,人民卫生出版社,1995。
- 12.赵武述主编:《现代临床免疫学》,北京,人民军医出版社,1994。
- 13.曲绵域主编:《实用运动医学》,北京,北京科学技术出版社,1996。
- 14.林学颜、张玲主编:《现代细胞与免疫学》,北京,科技出版社,1999。
- 15.万文君等:《中药“扶正升白合剂”对运动员免疫功能低下调理作用的实验研究》,《第六届全国体育科学大会论文摘要汇编(一)》,2000,676~677。
- 16.郝选明等:《运动生理学进展》,北京,北京体育大学出版社,2000。
- 17.陈佩杰:《运动生理学进展》,北京,北京体育大学出版社,2000。

(西安体育学院 郝选明)



附录:

运动生理学常用词汇对照

A

氨基甲酸血红蛋白	carbaminohemoglobin
暗视觉	scotopic vision
暗适应	dark adaptation

B

靶器官	target organ
靶细胞	target cell
白细胞	leukocyte, or white blood cell, WBC
白细胞介素	interleukin, IL
抱负水平	level of aspiration, LOA
背侧呼吸组	dorsal respiratory group
被动运转	passive transport
本体感觉	proprioception; proprioceptive sense
边缘系统	limbic system
编码	encoding
标志节律	mark rhythm, MR
搏功	stroke work
补呼气量	expiratory reserve volume, ERV
补体	complement
补吸气量	inspiratory reserve volume, IRV
不感蒸发 (不显汗)	insensible perspiration
不完全强直收缩	incomplete tetanus

C

产热	production of heat
长度-张力曲线	length-tension curve
长时程增强	long-term potentiation
长时性记忆	long term memory



肠-胃反射	entero gastric reflex
肠抑胃素	enterogastrone
肠致活酶	enterokinase
超常期	supranormal period
超负荷	overload
超负荷原则	overload principle
超极化	hyperpolarization
超量补偿	overcompensation
超量恢复	over-recovery
超日节律	ultradian rhythm, UR
超射	over shoot
潮气量	tidal volume
迟发型 T 淋巴细胞	delayed type T cell, TD
重吸收	reabsorption
充盈期	filling period
充盈压	filling pressure
出胞	exocytosis
出血时间	bleeding time
初长度	initial length
传导	conduction
传递蛋白	transducin
传入侧支性抑制	afferent collateral inhibition
窗孔结构	fenestration
雌二醇	estradiol, E2
雌激素	estrogen
刺激	stimulus
促阿片-黑素细胞皮质素原	pro-opiomelanocortin, POMC
促黑细胞激素	melanocyte-stimulating hormone, MSH
促红细胞生成素	erythropoietin, EPO
促甲状腺激素	thyroid stimulating hormone, TSH
促甲状腺激素释放激素	thyrotropin-releasing hormone, TRH
促甲状腺素	thyroid-stimulating hormone, TSH
促卵泡激素	follicle stimulating hormone, FSH
促肾上腺皮质激素	adrenocorticotrophic hormone, ACTH
促肾上腺皮质激素释放激素	corticotropin-releasing hormone, CRH
促性腺激素	gonadotrophic hormone, GTH
促性腺激素释放激素	gonadotropin-releasing hormone, GRH
促胰液素	secretin



催产素

oxytocin, OXT

D

呆小症

cretinism

代偿性间歇

compensatory pause

代谢

metabolism

代谢当量(梅脱)

metabolic equivalent of energy, MET

单纯扩散

simple diffusion

单核吞噬细胞

mononuclear phagocyte

单核细胞

monocyte

单核因子

monokine

单收缩

single twitch

单位平滑肌

single-unit smooth muscle

胆囊收缩素

cholecystokinin, CCK

胆盐

bile salt

胆盐的肠肝循环

enterohepatic circulation of bile salt

蛋白激酶 C

protein kinase C, PKC

氮平衡

nitrogen balance

等长收缩

isometric contraction

等动收缩

isokinetic contraction

等容收缩期

isovolumic systole period

等容舒张期

isovolumic diastole period

等张收缩

isotonic contraction

低常期

subnormal period

第二信使

second messenger

电紧张性扩布

electrotonic propagation

电突触

electric synapse

电压门控通道

voltage-gated channel

调定点

set-point

动机

motivation

动-静脉吻合支

arteriovenous anastomosis

动力定型

dynamic stereotype

动脉脉搏

arterial pulse

动脉血压

arterial blood pressure

动作电位

action potential

动作时

movement time

动作速度

movement speed

堵塞学说

blockage theory



短时性记忆

short term memory

对流

convection

E

二磷酸腺苷

adenosine diphosphate, ADP

二氧化碳解离曲线

carbon dioxide dissociation curve

F

发汗

sweating, perspiration

发育

development

翻正反射

righting reflex

反馈

feedback

反射

reflex

反射弧

reflex arc

反应

response

反应时

reaction time

反应速度

reaction speed

返回抑制

recurrent inhibition

泛化过程

generalization procedure

防御反应区

defense zone

房室延搁

atrioventricular delay

非蛋白呼吸商

non-protein respiratory quotient, NPRQ

非特异投射系统

nonspecific projection system

非特异性免疫

non-specific immunity

非条件反射

unconditioned reflex

非自律细胞

non-rhythmic cell

肺活量

vitalcapacity, VC

肺扩散容量

pulmonary diffusion capacity

肺内压

intrapulmonary pressure

肺泡表面活性物质

alveolar surfactant

肺泡通气量

alveolar ventilation

肺牵张反射

pulmonary stretch reflex

肺通气

pulmonary ventilation

肺循环

pulmonary circulation

肺总容量

total lung capacity, TLC

分化过程

differentiation procedure

分节运动

segmentation contraction

锋电位

spike potential



辅助性 T 淋巴细胞
辐射
负反馈
复极化时相
副性征
腹式呼吸

helper T cell, TH
radiation
negative feedback
repolarization phase
secondary sexual characteristics
abdominal breathing

G

钙调蛋白
肝素
肝糖原
感光细胞
感觉区
感觉失语症
感觉柱
感受器
感受器官
高原
高原服习
高原适应
高原训练
高住低练法
睾酮
隔离法
个体化原则
个体乳酸阈
功能余气量
功能余气量
冠脉循环
光适应
过度疲劳
过度训练

calmodulin
heparin
liver glycogen
visual cell
sensory area
sensory aphasia
sensory column
sensory receptor
sense organ
high altitude
altitude acclimatization
altitude adaptation
altitude training
living high-training low, Hi-Lo
testosterone
isolation technique
individualization principle
individual lactate acid threshold, ILAT
functional residual volume
functional residual capacity, FRC
coronary circulation
light adaptation
over-fatigue
over-training

H

海马环路
耗氧量
横桥
横桥联接

hippocampal circuit
oxygen consumption
cross bridge
cross bridge attachment



横小管系统	transverse tabular system, T-system
红细胞	erythrocyte, red blood cell, RBC
红细胞增多症	polycythemia
后电位	after potential
后负荷	after load
呼气	expiration
呼吸	respiration
呼吸调整中枢	pneumotaxic center
呼吸困难	dyspnea
呼吸热量计	respiration calorimeter
呼吸商	respiratory quotient, RQ
呼吸运动	respiratory movement
壶腹	ampulla
滑行学说	sliding theory
化学感受器	chemoreceptor
化学感受性反射	chemoreceptor reflex
化学门控通道	chemically-gated channel
环一磷酸腺苷	cyclic AMP, cAMP
黄体	corpus luteum
黄体期	luteal phase
黄体生成素	luteinizing hormone, LH
恢复	recovery
恢复原则	recovery principle

J

机能重建	function reconstruction
机制	mechanism
肌电图	electromyogram, EMG
肌动蛋白(肌纤蛋白)	actin
肌钙蛋白	troponin
肌紧张	muscle tonus
肌球蛋白(肌凝蛋白)	myosin
肌梭	muscle spindle
肌糖原	muscle glycogen
肌小节	sarcomere
肌原纤维	myofibril
肌质网	sarcoplasmic reticulum
积分肌电图	integra electromyogram, IEMG



基本电节律	basic electrical rhythm
基础代谢	basal metabolism
基础代谢率	basal metabolic rate, BMR
激素	hormone
极化	polarization
脊休克	spinal shock
甲状旁腺激素	parathyroid hormone, PTH
甲状腺球蛋白	thyroglobulin, TG
甲状腺素	thyroid hormone
甲状腺素结合球蛋白	thyroxine-binding globulin, TBG
间歇训练法	interval training method
简化眼	reduced eye
腱梭	tendon spindle
腱器官	tendon organs
浆细胞	plasma cell
降钙素	calcitonin, CT
交叉配血试验	cross-match test
交互突触	reciprocal synapse
交换血管	exchange vessel
酵解系统	glycolytic system
结构重建	structure reconstruction
解剖年龄	anatomical age
解剖无效腔	anatomical dead space
紧张性运动单位	tonic motor unit
经前期	premenstrual phase
静脉回心血量	venous return
静态生理负荷	rest physiological workload, WRP
静息电位	resting potential
静息心指数	resting cardiac index
静息张力	resting tension
局部回路神经元	local circuit neuron
局部神经元回路	local neuronal circuit
局部兴奋	local excitation
巨核细胞	megakaryocytes
绝对不应期	absolute refractory period
均方根振幅	root-mean-square, RMS



K

K 细胞(杀伤细胞)

抗利尿激素

抗凝物质

抗体

抗原

可感蒸发

空间总和

控制论

快肌纤维

快速射血期

快缩、糖酵解型

快缩、氧化、糖酵解型

快痛

killer cell, K cell

antidiuretic hormone

anticoagulant

antibody

antigen

sensible perspiration

spatial summation

cybernetics

fast-twitch, FT

rapid ejection period

fast glycolytic, FG

fast oxidative glycolytic, FOG

fast pain

L

酪氨酸蛋白激酶受体

类固醇激素

冷敏神经元

冷适应

冷应激

离心收缩

立体视觉

粒细胞

量子释放

淋巴细胞

淋巴液

淋巴因子

磷酸肌酸

磷酸原系统

灵敏

滤过

卵巢

卵泡刺激素

卵泡期

tyrosine kinase receptor

steroid hormone

cold-sensitive neuron

cold adaptation

cold stress

eccentric contraction

stereopsis; stereoscopic vision

granulocyte

quantal release

lymphocyte

lymph

lymphokine

creatine phosphate, CP

phosphagen system

agility

filtration

ovarium

follicle-stimulating hormone, FSH

follicular phase



M

脉搏压	pulse pressure
慢波睡眠	slow wave sleep
慢肌纤维	sow-twitch, ST
慢缩、氧化型	slow oxidative, SO
慢痛	slow pain
毛细血管	blood capillary
毛细血管后阻力	postcapillary resistance
毛细血管前括约肌	precapillary sphincter
毛细血管前阻力	precapillary resistance
每搏输出量	stroke volume
每分输出量	minute volume
每分通气量	minute ventilation volume
镁-三磷酸腺苷酶	Mg-ATPase
免疫	immunity
免疫球蛋白	immunoglobulin, Ig
免疫抑素(或称抑制素)	suppression
膜电位	membrane potential
膜片钳	patch clamp

N

内分泌	endocrine, or internal secretion
内环境	internal environment
内皮舒张因子	endothelium-derived relaxing factor, EDRF
内皮素	endothelin
内皮缩血管因子	endothelium-derived vasoconstrictor factor, EDCF
内因子	intrinsic factor
内脏痛	visceral pain
钠泵	sodium pump
耐力	endurance; endurance capacity
囊斑	macula
脑电图	electroencephalogram, EEG
脑脊液	cerebrospinal fluid
脑缺血反应	brain ischemia response
脑循环	cerebral circulation
能量代谢	energy metabolism
鸟苷酸结合蛋白(G-蛋白)	guanine nucleotide-binding protein (G-protein)



粘液
粘液-碳酸氢盐屏障
粘滞度
凝集素
凝集原
凝血(或血凝)
凝血酶
凝血因子

mucus
mucus-bicarbonate barrier
viscosity
agglutinin
agglutininogen
blood coagulation
thrombin
blood clotting factors

O

呕吐

vomiting

P

排便
排卵
排卵期
排尿
排泄
皮肤温度
皮质醇
皮质类固醇结合球蛋白
疲劳
平静呼吸
平均功率频率
葡萄糖

defecation
ovulation
ovulation phase
micturition
excretion
skin temperature
cortisol
corticosteroid-binding globulin, CBG
fatigue
eupnea
mean power frequency, MPF
glucose

Q

期前收缩(期外收缩)
起搏电流
气体交换
气体扩散速率
气胸
牵张反射
前负荷
前馈
前列腺素
前庭器官
屈肌反射

premature systole, extrasystole
pacemaker current
gas exchange
diffusion rate of gas
pneumothorax
stretch reflex
preload
feed-forward
prostaglandin, PG
vestibular organ
flexor reflex



去大脑僵直
去极化
去甲肾上腺素
去皮层僵直
醛固酮
全或无现象
缺氧训练

decerebrate rigidity
depolarization
norepinephrine, NE
decorticate rigidity
aldosterone
all or none phenomenon
hypoxia training

R

Rh 血型系统
热服习
热价
热痉挛
热敏神经元
热衰竭
热应激
人白细胞抗原
人绒毛膜促性腺激素
人体生理学
日历年龄
绒毛
绒毛收缩素
容量感受器
容量血管
柔韧
蠕动
乳糜微粒
乳酸
乳酸阈
入胞
闰绍细胞

Rh system
heat acclimatization
thermal equivalent
heat cramp
warm-sensitive neuron
heat exhaustion
heat stress
human leukocyte antigen, HLA
human chorionic gonadotropin, HCG
human physiology
calendar age
villus
villikin
volume receptor
capacitance vessel
flexibility
peristalsis
chylomicron
lactic acid
lactate threshold, LT
endocytosis
renshaw cell

S

赛前状态
三碘甲腺原氨酸
三联管
三磷酸腺苷
三羧酸循环

pre-competition state
3, 5, 3' -triiodothyronine, T3
Triad
adenosine triphosphate, ATP
tricarboxylic acid cycle



散热	thermolysis
射血分数	ejection fraction
射血期	ejection period
摄氧量	oxygen uptake
深吸气量	inspiratory capacity, IC
神经垂体激素运载蛋白	neurophysin
神经递质	neurotransmitter
神经调节	neuroregulation
神经分泌	neurosecretion
神经激素	neurohormone
神经纤维	nervous fiber
神经元	neuron
肾单位	nephron
肾上腺皮质	adrenal cortex
肾上腺素	epinephrine
肾上腺髓质	adrenal medulla
肾素-血管紧张素-醛固酮系统	renin-angiotensin-aldosterone system
肾素-血管紧张素系统	rennin-angiotensin system
肾糖阈	renal glucose threshold
肾小球滤过率	glomerular filtration rate, CFR
肾血浆流量	renal plasma flow
肾血流量	renal blood flow
升调节(上调)	up-regulation
升压素	vasopressin, VP
抗利尿激素	antidiuretic hormone, ADH
生长	growth
生长介素	somatomedin, SM
生长素	growth hormone, GH
生长素释放激素	growth hormone releasing hormone, GHRH
生长抑制素	growth hormone release-inhibiting hormone GHRIH
生理负荷	physiological workload, WP
生理年龄	physiological age
生理无效腔	physiological dead space
生物电	bioelectricity
生物节律	biorhythm
生物年龄	biological age
生殖	reproduction
失活	inactivation



时差调整	jet-lag modulation
时差模拟	time-zone simulation
时间肺活量	timed vital capacity
时间生物学	chronobiology
时间总和	temporal summation
实时分析	on-the-spot analysis
食物的特殊动力作用	specific dynamic action
食物热价	thermal equivalent
视蛋白	opsin
视杆细胞	rod cell
视黄醛	retinal
视觉器官	visual organ
视敏度	visual acuity
视网膜电图	electroretinogram
视野	sight, visual field
视锥细胞	cone cell
视紫红质	rhodopsin
适宜刺激	adequate stimulus
适应	adaptation
适应性	adaptability
嗜碱性粒细胞	basophils
嗜酸性粒细胞	eosinophils
α -受体	α -receptor
β -受体	β -receptor
收缩期	systole
收缩能力	contractility
收缩压	systolic pressure
舒血管纤维	vasodilator fiber
舒张期	diastole
舒张压	diastolic pressure
输血	blood transfusion
衰竭学说	exhaustion theory
衰老	aging
水利尿	water diuresis
水肿	edema
四碘甲腺原氨酸	thyroxine, T ₄
梭内肌纤维	intrafusal muscle fiber
梭外肌纤维	extrafusal muscle fiber



缩血管神经

vasoconstrictor nerve fiber

T

碳酸酐酶

carbonic anhydrase

糖皮质激素

glucocorticoid

糖原

glycogen

特异投射系统

specific projection system

特异性免疫

specific immunity

体表面积

body surface area

体温

body temperature

体液调节

humoral regulation

体液免疫

humoral immunity

条件反射

conditioned reflex

跳跃式传导

saltatory conduction

听觉

sense of hearing

通气/血流比值

ventilation-perfusion ratio

通气阈

ventilatory threshold, VT

通透性

permeability

同化作用

assimilation

突触后抑制

postsynaptic inhibition

突触前抑制

presynaptic inhibition

突触小体

synaptosome, synaptic knob, synaptic bouton

褪黑素

melatonin

吞噬细胞

phagocyte, phagocytic cell

吞饮

pinocytosis

W

外周化学感受器

peripheral chemoreceptor

外周静脉压

peripheral venous pressure

外周阻力

peripheral resistance

完全强直收缩

complete tetanus

网状结构

reticular formation

微胶粒

micelle

微绒毛

microvilli

微循环

microcirculation

微音器电位

microphonic potential

维生素

vitamin

位觉

sense of position



心作功	myocardial work
新陈代谢	metabolism
兴奋	excitation
兴奋剂	doping
兴奋-收缩耦联	excitation-contraction coupling
兴奋性	excitability
兴奋性突触后电位	excitatory postsynaptic potential, EPSP
行波理论	theory of traveling wave
性激素结合球蛋白	sex hormone binding globulin, SHBG
胸膜腔内压	intrapleural pressure
胸式呼吸	thoracic breathing
胸腺素	thymosin
雄激素结合蛋白	androgen-binding protein, ABP
需氧量	oxygen demand, OD
血管升压素	vasopressin
血红蛋白	hemoglobin, Hb
血浆	plasma
血量	blood volume
血流量	blood flow
血流速度	velocity of blood flow
血-脑脊液屏障	blood-cerebrospinal fluid barrier
血-脑屏障	blood-brain barrier
血清	serum
血糖	blood sugar
血小板	platelets, thrombocyte
血型	blood group
血压	blood pressure
血液凝固	blood coagulation
血液兴奋剂(血液回输)	blood doping
训练效果	training effect

Y

压力感受性反射	baroreceptor reflex
亚日节律	infradian rhythm, IR
延迟性过敏反应	delayed-type hypersensitivity, DTH
盐皮质激素	mineralocorticoid
眼震颤	nystagmus
氧饱和度	oxygen saturation



氧含量	oxygen content
氧亏	oxygen deficit
氧离曲线	oxygen dissociation curve
氧脉搏	oxygen pulse
氧热价	thermal equivalent of oxygen
氧容量	oxygen capacity
氧债	oxygen debt
胰蛋白酶原	trypsinogen
胰岛素	insulin
胰淀粉酶	pancreatic amylase
胰高血糖素	glucagon
胰脂肪酶	lipase
异化作用	dissimilation
抑制	inhibition
抑制性突触后电位	inhibitory postsynaptic potential, IPSP
易化扩散	facilitated diffusion
易化区	facilitatory region
应激	stress
应激性	irritability
有效不应期	effective refractory period
有效滤过压	effective filtration pressure
有氧耐力	aerobic endurance
有氧能力	aerobic capacity
有氧氧化	aerobic oxidation
诱发电位	evoked potential
余气量	residual volume, RV
阈下刺激	subthreshold stimulus
阈值	threshold
原肌凝蛋白	tropomyosin
月经	menstruation
月经期	menstrual phase
月经周期	menstrual cycle
孕激素	progestogen
运动处方	physical exercise prescription, exercise prescription
运动单位	motor unit, MU
运动单位动员	motor unit involvement, MUI
运动单位募集	motor unit recruitment, MUR
运动负荷	exercise workload, WE



运动后过量氧耗
运动技能
运动区
 α -运动神经元
 γ -运动神经元
运动神经元池
运动生理负荷
运动生理负荷积分
运动生理负荷强度
运动生理负荷时间
运动时间生物学
运动性蛋白尿
运动性免疫模式
运动性免疫抑制
运动性疲劳
运动性运动单位
运动员月经失调

excess post-exercise oxygen consumption, EPOC
motor skill
motor area
 α -motor neuron
 γ -motor neuron
motor neuron pool
exercise physiological workload, WEP
workload Integral, ITW
workload intensity, IW
workload time, TW
exercise chronobiology
exercise proteinuria, post exercise proteinuria
exercise-induced immunity models
exercise-induced immunosuppression
exercise-induced fatigue, sports fatigue
kinetic motor unit
athletic menstrual irregularity, AMI

Z

载体
造血干细胞
造血生长因子
择时适应性运动
择时运动
张力-速度关系曲线
蒸发
正反馈
直接测热法
质膜
致密斑
滞后分析
中枢化学感受器
中枢延搁
中暑
中心静脉压
中心频率
中性粒细胞
终板电位

carrier
hemopoietic stem cells
hematopoietic growth factor, HGF
chrono-adaptive exercise
chrono-exercise
force velocity relation curve
evaporation
positive feedback
direct calorimetry
plasma membrane
macular densa
delaying analysis
central chemoreceptor
central delay
heat stroke
central venous pressure
frequency center, FC
neutrophil
end-plate potential



终末池	terminal cistern
周期性呼吸	periodic breathing
轴浆运输	axoplasmic transport, axoplasmic flow
轴突反射	axon reflex
昼夜节律	circadian rhythm, CR
主动转运	active transport
主要组织相容性复合体	major histocompatibility complex, MHC II
状态反射	attitudinal reflex
锥体外系	extrapyramidal system
锥体系	pyramidal system
准备活动	warm-up
姿势反射	postural reflex
自动节律性(自律性)	auto-rhythmicity
自动去极化	spontaneous depolarization
自律细胞	rhythmic cell
自身调节	autoregulation
自然杀伤细胞(NK细胞)	natural killer cell, NK cell
总生理负荷	total physical workload, WTP
纵小管系统	longitudinal tubular system
α -阻断	α -block
阻力血管	resistance vessel
组胺	histamine
组织液	interstitial fluid
最大耗氧量	maximal oxygen consumption
最大摄氧量	maximal oxygen uptake, VO_{2max}
最大随意收缩(最大收缩)	maximum voluntary contraction, MVC
最大随意通气量(最大通气量)	maximal voluntary ventilation, MVV
最大心率	maximal heart rate, H_{rmax}
最大氧亏积累	maximal accumulated oxygen deficit, MAOD
最适初长度	optimal length
最适前负荷	optimal preload



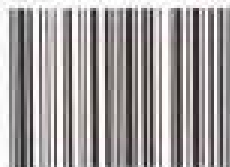


责任编辑：骆勤方 史 勇

封面设计：赵 沛



ISBN 978-7-5009-2309-1



9 787500 923091 >

定价：45.00 元