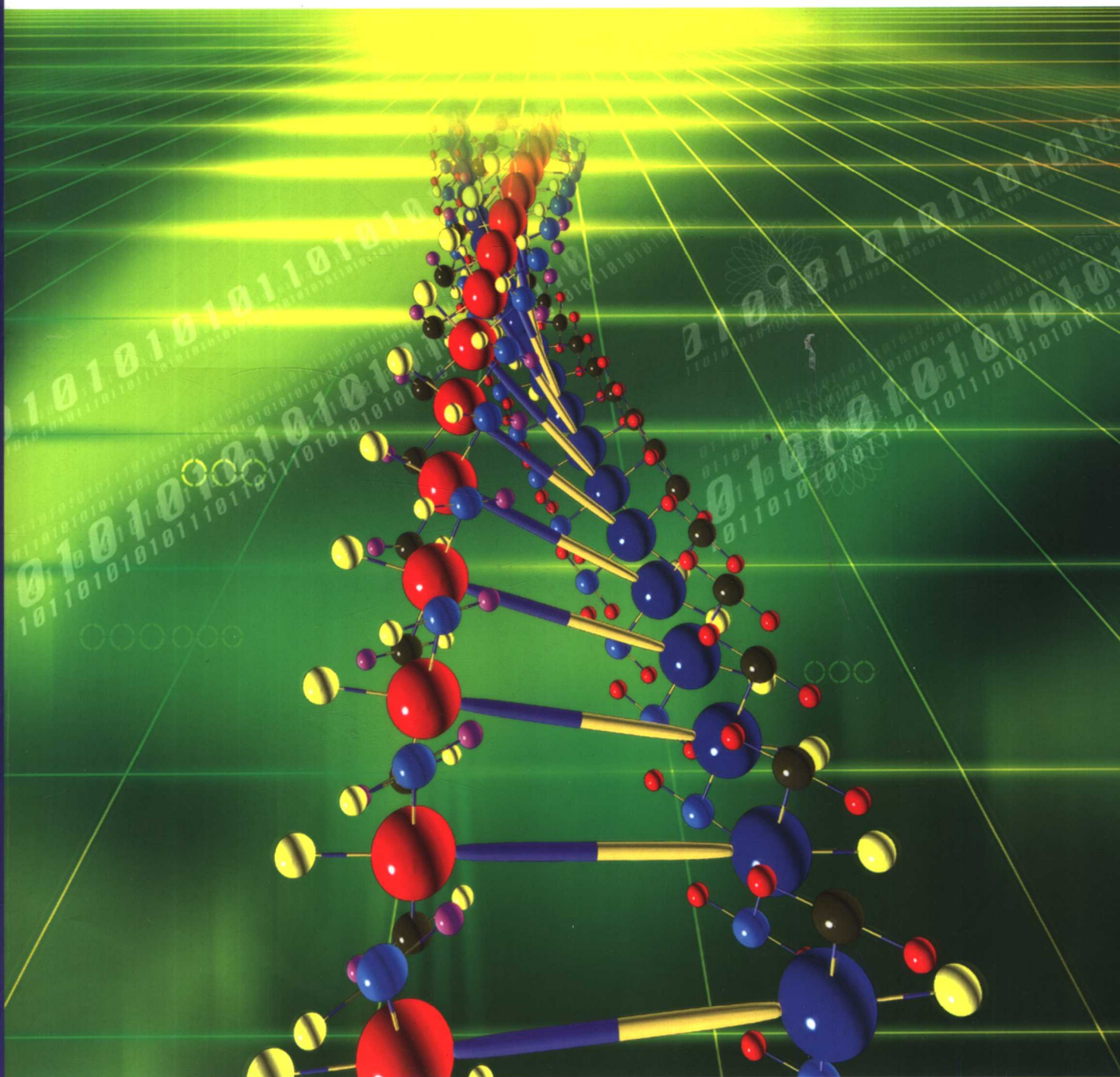


实用运动生物化学

◎ 张爱芳 主编



北京体育大学出版社

实用运动生物化学

张爱芳 主编

北京体育大学出版社

责任编辑 秦德斌
审稿编辑 鲁 牧
责任校对 黄 强 王力娟
绘 图 叶 莱
责任印制 陈 莎

图书在版编目(CIP)数据

实用运动生物化学/张爱芳主编. - 北京:北京体育大学出版社,2005.6
ISBN 7-81100-333-3

I. 实… II. 张… III. 运动生物化学-高等学校-教材 IV. G804.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 045060 号

实用运动生物化学 张爱芳 主编

出 版 北京体育大学出版社
地 址 北京海淀区中关村北大街
邮 编 100084
发 行 新华书店总店北京发行所经销
印 刷 北京市昌平阳坊精工印刷厂
开 本 850×1168 毫米 1/16
印 张 26.25

2005 年 6 月第 1 版第 1 次印刷 印数 2000 册
定 价 60.00 元

(本书因装订质量不合格本社发行部负责调换)

编 写 组

主 编：张爱芳

副主编：曹建民

编写人员（按姓氏笔划为序）

刘丽萍 河北体育学院

杨则宜 国家体育总局运动医学研究所

张爱芳 北京体育大学

张 纓 北京体育大学

时庆德 北京体育大学

邱俊强 北京体育大学

胡 杨 北京体育大学

赵杰修 国家体育总局体育科学研究所

曹建民 北京体育大学

黄 园 广东省体育科学研究所

谢敏豪 北京体育大学

前 言

近年来运动人体科学迅猛发展,各体育院校相继招收运动人体科学专业学生。本教材是在参考有关资料和教材的基础上,根据多年教学经验,为体育高等院校运动人体科学专业必修运动生物化学课的需要而编写的。

本书分为上、下两篇。要求学生在学习了无机化学、有机化学和普通生物化学的基础上学习本教材。上篇是以运动时物质代谢、能量代谢以及代谢调节特点为中心,重点阐述提高运动能力的生物化学原理和措施。另外还考虑到运动生物化学有关内容研究的不断深入,以及与其它学科的相互渗透;下篇中编写了若干运动生物化学专题。

本书上篇为运动生物化学的基本内容,主要包括:运动与高能磷酸化合物、运动与糖代谢、运动与脂肪代谢、运动与蛋白质代谢、运动与维生素代谢、运动与水盐和酸碱平衡、体能训练生物化学原理、运动性疲劳的生化机制、运动员身体机能的生物化学评定、年龄性别的生化特点与运动以及运动员合理膳食营养;下篇为运动生物化学专题篇,内容包括:运动分子生物学概述、运动与血睾酮、运动与自由基、运动性贫血、肥胖与运动减肥、高血脂与运动、糖尿病与运动、一氧化氮与运动、红细胞免疫功能与运动、运动与细胞凋亡的生物化学研究进展、运动与咖啡因补充、运动免疫学研究进展。上篇为运动人体科学专业本科生教学和学习的基本内容;下篇为阅读参考内容,以拓宽学生的知识面。

本书在编写内容上力求科学性、时代性、启发性、可读性和实践性,尽量吸收国内外本学科的最新研究成果和理论,力求做到图文并茂。本书涵盖了当前运动生物化学研究的基本内容和发展趋势,适用于运动人体科学专业本科生,也可作为研究生的参考教材和体育科研人员、运动医学工作者、教练员、运动员在科学训练中的重要参考书。

参加本书编写的人员有(按姓氏笔划为序):刘丽萍教授(专题十),杨则宜研究员(第十一章),张爱芳副教授(绪论、第一章、第二章、第三章、第五章、专题三、专题五、专题七、专题八、专题十一),张缨副教授(专题六、专题九),时庆德副教授(第八章),邱俊强讲师(第四章、第六章),胡杨教授(专题一),赵杰修博士(第十章),曹建民副教授(第七章、第九章、专题四),黄园研究员(专题十二),谢敏豪教授(专题二)。

本书在编写过程中曾多次讨论和试用。敬请各位同行指教。

目 录

上篇 基础运动生物化学

第一章 绪 论	(3)
第一节 运动生物化学的涵义和主要研究任务	(3)
第二节 运动生物化学的发展概况	(4)
第三节 运动生物化学的学习方法	(4)
第二章 运动与高能磷酸化合物	(6)
第一节 高能磷酸化合物概述	(6)
第二节 三磷酸腺苷(ATP)	(8)
第三节 磷酸肌酸	(18)
第四节 补充肌酸与运动	(22)
第三章 运动与糖代谢	(27)
第一节 运动时糖供能概述	(27)
第二节 肌糖原与运动	(29)
第三节 血糖与运动	(35)
第四节 肝脏释放葡萄糖与运动	(43)
第五节 运动时糖代谢途径的调节	(45)
第六节 补糖与运动	(50)
第七节 运动与乳酸代谢	(54)
第四章 运动与脂肪代谢	(66)
第一节 运动时脂肪的生物学功能	(66)
第二节 运动时脂肪供能	(67)
第三节 运动时脂肪供能的调节	(75)
第四节 影响运动时脂肪供能的因素	(78)
第五节 运动与肉碱代谢	(80)
第六节 运动与酮体代谢	(85)
第五章 运动与蛋白质代谢	(92)
第一节 蛋白质的生物学作用	(92)
第二节 运动对蛋白质代谢的影响	(93)
第三节 运动与氨基酸代谢	(96)

第四节 运动与氮代谢	(99)
第五节 运动员的蛋白质补充	(102)

第六章 运动与水盐代谢及酸碱平衡	(107)
第一节 体 液	(107)
第二节 运动与水代谢	(113)
第三节 运动与无机盐代谢	(119)
第四节 运动与酸碱平衡	(130)

第七章 维生素与运动	(140)
第一节 维生素概述	(140)
第二节 水溶性维生素与运动	(140)
第三节 脂溶性维生素与运动	(144)
第三节 运动员的维生素补充	(147)

第八章 体能训练的生物化学分析	(150)
第一节 体能训练的生物化学基本原理	(150)
第二节 提高代谢能力的训练方法	(153)
第三节 训练效果的生物化学	(162)

第九章 运动性疲劳的生物化学	(169)
第一节 运动性疲劳概述	(169)
第二节 运动性疲劳的生物化学机制	(170)
第三节 传统中医对运动性疲劳的认识	(176)
第四节 运动性疲劳的生物化学指标诊断	(177)
第五节 营养促力手段抗疲劳研究进展	(179)

2

第十章 运动员身体机能的生物化学评定	(187)
第一节 运动员身体机能评定的基本理论与意义	(187)
第二节 运动员代谢能力的评定	(191)
第三节 运动员身体机能状态生化指标评定	(202)

第十一章 儿童少年、女子和老年人的生物化学特点与运动	(218)
第一节 儿童少年的生物化学特点与运动	(218)
第二节 女子的生物化学特点与运动	(225)
第三节 老年人的生物化学特点与运动	(230)

第十二章 运动与膳食营养	(240)
第一节 膳食营养状况的调查	(240)
第二节 运动员的营养需要	(242)
第三节 不同项目运动员营养需要特点	(250)

第四节	减控体重期的膳食营养措施	(252)
第五节	运动员大强度训练期的膳食安排	(255)
第六节	运动员比赛期的膳食	(255)
第七节	为最佳运动能力而设计的一般膳食指导原则	(257)

下篇 运动生物化学专题

专题一 运动分子生物学概述	(267)
第一节 运动分子生物学	(267)
第二节 运动分子生物学的研究基础	(268)
第三节 运动分子生物学的基本研究内容	(272)
第四节 运动分子生物学的基本研究方法	(276)
专题二 运动与血睾酮	(279)
第一节 运动引起血睾酮变化的特点	(279)
第二节 血睾酮及相关指标的测定及其意义	(279)
第三节 防治运动性低血睾酮的方法	(282)
专题三 运动自由基生物学概述	(284)
第一节 概 况	(284)
第二节 自由基的概念、产生及化学性质	(285)
第三节 活性氧	(287)
第四节 自由基消除系统	(290)
第五节 运动与自由基代谢	(292)
专题四 运动性贫血研究进展	(296)
第一节 运动性贫血的概况	(296)
第二节 运动性贫血发生机制	(297)
第三节 运动性贫血动物模型的建立	(308)
第四节 运动性贫血的防治	(310)
专题五 肥胖与运动减肥	(316)
第一节 肥胖的一般概况	(316)
第二节 肥胖的危害	(320)
第三节 减肥方法	(322)
第四节 运动减肥的生物化学分析	(323)
第五节 减肥运动处方	(323)
专题六 糖尿病与运动	(326)
第一节 概 述	(326)

第二节	糖尿病研究的动物模型	(328)
第三节	运动与糖尿病控制	(330)
专题七	高血脂与运动	(334)
第一节	血脂的一般概况	(334)
第二节	高脂血症与运动	(337)
专题八	运动与一氧化氮研究进展	(341)
第一节	NO 概述	(341)
第二节	NO 的代谢	(343)
第三节	NO 的生理功能	(343)
第四节	NO 与运动	(343)
第五节	问题与展望	(345)
专题九	红细胞免疫功能与运动	(347)
第一节	免疫系统的组成与功能	(347)
第二节	红细胞免疫功能及影响因素	(348)
专题十	运动与细胞凋亡的生物化学研究进展	(353)
第一节	与细胞凋亡相关的基本概念	(353)
第二节	细胞凋亡的研究历史	(355)
第三节	运动时细胞凋亡的诱导因素及基因调控	(358)
第四节	运动时细胞凋亡的识别和吞噬	(361)
第五节	细胞凋亡的生物学意义与运动训练问题的展望	(364)
第六节	运动性细胞凋亡的检测	(366)
专题十一	咖啡因与运动	(370)
第一节	咖啡因的化学结构、分布和代谢	(370)
第二节	咖啡因的生物学作用	(370)
第三节	运动员的咖啡因补充	(371)
专题十二	运动免疫学研究进展	(374)
第一节	运动免疫学研究概况	(374)
第二节	运动训练对免疫功能的影响与机制	(378)
第三节	运动员免疫功能的监测	(388)
第四节	运动员免疫功能的营养调理	(396)
	运动生物化学常用词中英文对照	(401)

上 篇

基础运动生物化学

运动生物化学是在生物化学和生理学的基础上发展起来的。这门学科起始于20世纪20年代,60年代逐渐成熟,80年代进入蓬勃发展期。特别是近20年来,运动生物化学的发展突飞猛进,其内容体系基本形成,主要内容有:运动时供能系统及其调节;体内重要生物分子与运动能力的关系;体能训练的生物化学基础;运动性疲劳的特点和规律;运动员身体机能的生物化学特点和评定;年龄、性别的生化特点与运动;运动员合理营养等内容。本篇就上述有关运动生物化学的基本内容进行分章论述,为运动训练科学化提供生物化学理论基础。

第一章 绪论

第一节 运动生物化学的涵义 和主要研究任务

运动生物化学是生物化学的分支,是生物化学在体育科学中的应用。它是用生物化学的理论和方法作为主要手段研究体育运动对机体的化学影响,从而揭示运动人体科学的奥秘。其任务主要包括以下几个方面:

一、研究运动对人体化学组成成分影响的特点和规律

体育运动对人体化学组成成分的影响主要表现为相适应,其本质是要符合提高运动能力和促进健康的要求。主要体现在两个方面:一方面对基本化学组成成分的影响。另一方面对调节物质的影响。其影响程度与训练方法、训练强度、运动类型等因素有关。运动对基本化学组成成分产生普遍的影响。例如力量训练促使肌肉壮大的本质是肌肉蛋白的增加;耐力运动减肥是体脂下降的结果;长时间大强度运动中引起糖原的消耗、脱水、无机盐丢失等。对调节物质影响主要表现在酶和激素方面。力量、速度训练可使骨骼肌 CK 活性提高;耐力训练可使有氧代谢酶活性提高;不同训练引起胰岛素、肾上腺素、睾酮、皮质醇等相应激素的改变。因此,掌握人体对运动的适应性变化特点和规律,对于合理安排训练、营养有重要意义。

二、研究运动对物质代谢和能量代谢影响的特点和规律

体内物质代谢的同时伴随能量代谢,其速率

与生理状况有关。譬如人在进行 1~2 分钟达力竭运动时,肌肉能量消耗比安静时增加约 100 多倍,因此,释放能量的分解代谢占主要地位。目前生物化学研究已经阐明,运动时人体内的能量供应是一个完整的体系,它由有氧代谢和无氧代谢两种代谢类型构成,这两种代谢类型包括三个供能系统:磷酸原系统、糖酵解系统、有氧氧化系统。运动专项、训练方法、负荷强度、训练水平等均可影响各供能系统供能的速率和比例。因此,只有了解各供能系统的能量储备、消耗及恢复特点和规律,有针对性训练,才能以最有效的方法快速提高运动能力。

三、研究提高运动能力的方法和措施

人体的运动能力是身体机能的综合表现,与先天遗传和后天运动训练有关。就后天训练而言,从运动生物化学的观点分析,人体的运动能力主要取决于人体各供能系统的供能能力。因此,应根据不同运动项目运动时的供能特点制定训练计划、选择训练方法。

运动训练提高运动能力不仅体现在训练中,恢复过程同等重要。根据人体对运动的适应规律,训练必须达到一定疲劳,没有疲劳就没有训练,但恢复不好就不能继续训练,甚至会导致过度训练。因此,科学安排训练方法、合理营养、适时进行身体机能的生物化学评定等内容是提高运动能力的关键。

四、为全民健身提供理论依据

国家体育总局的“奥运争光计划”和“全民健身计划”为体育工作者指明了工作的重点和方

向适宜的体育锻炼,能促进健康,增强体质。但是,如果锻炼的方法、强度、持续时间安排不当,不仅不能达到预期的目的,反而有害于身体健康。因此,应根据不同年龄、性别的生理生化特点、身体状况制定相应的身体锻炼计划,达到最佳锻炼效果。

第二节 运动生物化学的发展概况

运动生物化学是在生物化学的基础上发展起来的。现代生物化学的发展可以从拉瓦锡研究燃烧和呼吸说起,那大约是18世纪的下半叶,在这一时期研究了生物体的呼吸氧化作用;发现了柠檬酸、苹果酸等生物代谢的中间产物。进入19世纪后生物化学有了很大发展。1842年德国化学家李比希首次提出新陈代谢这个学术名词;1877年德国医生霍佩-塞勒首次提出生物化学这个名词,使生物化学成为了一门独立的学科。20世纪后发展迅速,这一时期研究的主要成果有:肌肉收缩的生化机理;肌肉代谢的糖原-乳酸循环;证明酶是蛋白质;发现维生素和蛋白质的营养价值,建立了现代营养学概念;发现了三羧酸循环(1937);证明DNA是细胞的基本遗传物质,建立了DNA双螺旋结构模式;确定了牛胰岛素结构(1955);1965年我国科学家用化学方法成功合成了具有生物活性的结晶牛胰岛素。

运动生物化学伴随着生物化学的发展而不断发展,它始于20世纪20~30年代,40~50年代运动生化理论有较大发展,60年代成为一门独立的学科,80年代以后突出理论与实际的结合。早期在研究肌肉工作过程中,就涉及肌肉收缩的能量来源问题,但正式研究运动对机体化学变化的影响则始于20世纪20~30年代。目前见到的研究成果有:恩伯登(G. Enderby)等报道运动能提高骨骼肌糖原和磷酸肌酸含量;舒伯(Suppor)报道运动对血、尿、汗化学成分的影响。第二次世界大战以后,生物化学理论和方法的极大进步推动了运动生物化学发展。前苏联雅科夫列夫等进行了较为系统的研究,于1955年出版了第一本运动生物化学专著《运动生物化学概论》,初步建立了运动生物化学的学科体系。这一时期欧美通过血液分析,研究运动对机体物质

代谢影响的特点和规律,积累了丰富的资料。1962年伯格斯特龙(Begerstrom)将临床中应用的肌肉活检法引入对运动肌肉的研究,使研究更加直接。这种研究方法的进步造就有价值的研究成果不断涌现,对运动时肌肉能源储备、消耗、供能、代谢物的转变等内容有了更深入的了解,使运动生物化学这门学科更趋成熟。

在联合国教科文组织的国际运动和体育联合会的倡议下,1968年成立了《国际运动生物化学研究组织》,并在比利时布鲁塞尔举行了第一届国际运动生物化学科学报告会,以后基本每3年举行一次,至今已举行12次。在此期间还举行了4次专题讨论会,对运动训练中的实际问题从生物化学的角度提供具体指导。1988年普特曼(JR Poortmans)主编出版了《运动生物化学原理》。由此可见,运动生物化学学术活动频繁,在科学训练中的地位日益重要,学科体系已基本建立,成为体育科学中一门重要的专业基础理论学科。

我国运动生物化学的教学和研究始于20世纪50年代,当时主要是引进前苏联的研究结果和理论,如运动时物质代谢的特点、规律和调节;超量恢复理论的提出和应用;运动素质的生物化学基础等。20世纪60年代,北京体育学院最早开设了运动生物化学课程。1979年体育科学学会成立后,在运动医学会中设有运动生化和营养学组。在历届全国体育科学大会、运动医学学术会议及运动生理、生化学术会议中,运动生物化学都作为专门的学科组活动。1980年起,北京体育学院开办了运动生物化学专业,现为运动人体科学学院的一个专业方向。目前,运动生物化学课是全国体育院校本科、研究生的重要课程,大多数体育科学研究所都有运动生化实验室和专门研究人员,在国家队的各个项目中心活跃着一大批运动生化专业科研人员,承担着运动员的身体机能评定、营养恢复等重要工作。随着体育科学的发展,运动生物化学的任务日益加重,它的重要性也日显突出。

第三节 运动生物化学的学习方法

运动生物化学与生物化学密切相关,全面了

解生物化学的基本内容是学习运动生物化学的基础,但性质毕竟有所不同,主要区别是生物化学研究人体一般情况下的代谢规律,而运动生物化学研究的特定对象是运动员,要掌握运动对人体化学组成及运动时物质代谢和能量代谢的特点与规律,在此基础上研究运动训练和体育锻炼的科学方法与效果评定。有时运动时的代谢往往表现出正常情况下的“异常反应”,如运动引起尿蛋白含量增多、血清酶活性升高等。因此,学习运动生物化学要牢牢记住“运动”这一先决条件。

学习运动生物化学时,应对教师指定的教材内容作全面了解,分析比较,明确概念;以运动时

能量代谢为主线,了解体内能源物质的种类和储备,掌握不同运动状态下物质代谢和能量代谢的特点与规律以及各供能系统之间的联系性和主次性;根据不同运动项目的能量代谢特点制定运动训练、体育锻炼计划,选择训练方法。学习中不应机械地、静止地、孤立地对待某个问题,必须特别注意它们的相互联系、相互制约以及发展变化,自觉地运用辩证的观点来学习和分析问题。

在学习过程中应与先修(如普通生物化学、人体生理学等)和并修课程(如运动生理学)相联系,以促进理解,加强记忆。对每章的重点内容要深入钻研,弄懂,记熟。还需重视实验工作,提高动手能力及分析问题和解决问题能力。

第二章

运动与高能磷酸化合物

【内容提要和学习指导】

本章主要介绍高能磷酸化合物的概念、类型及运动时高能磷酸化合物供能的变化特点、规律和影响因素。学习本章时应注意:以 ATP 为中心,明确 ATP 的直接供能作用。重点掌握 ATP 合成途径,线粒体 ATP 合成后的转运,不同运动情况下磷酸肌酸分解、糖酵解、有氧氧化三条途径再合成 ATP 的速率、供能时间、相互关系及调节,了解补充相应营养对磷酸原供能作用的影响。

生物体必须持续不断的消耗能量,以维持各种复杂的生命活动。运动时,骨骼肌内能量消耗大大增加,机体以释放能量的分解代谢为主。运动时,因无法或很少食物补充,只能靠体内储存的糖、脂肪、蛋白质和一些高能磷酸化合物(ATP、CP 等)等能源物质提供能量,这些能源物质中能够直接被机体利用的是 ATP。CP、糖、脂肪、蛋白质需经一系列的生物化学反应将能量释放出来用于 ATP 的再合成。因此,高能磷酸化合物在体内能量的产生、利用和调节过程中具有重要作用。

第一节 高能磷酸化合物概述

一、高能磷酸化合物的概念

磷酸化合物在生物体能量代谢中占有重要地位。生物体内有许多磷酸化合物,其磷酸基因

水解时释放出自由能(free energy)。自由能是指一个反映体系中能够作功的那一部分能量。任何化学反应都伴有自由能的变化(ΔG)。物理化学中,在 25℃、1 个大气压、反应物和产物浓度都为 1mol/L、PH = 0.0 时作为标准自由能变化,用 ΔG° 表示。因为生物化学反应在细胞内进行,细胞内的 PH 接近于 7,因此,在 PH 为 7.0 的条件下所测得的标准自由能变化用 $\Delta G'$ 表示。 $\Delta G'$ 可能是正值、负值或等于零。当 $\Delta G'$ 为负值($\Delta G' < 0$)时,自由能降低,这个反应可以自发进行,属于放能反应;当 $\Delta G' = 0$ 时,表示反应达到平衡;当 $\Delta G'$ 为正值($\Delta G' > 0$)时,自由能升高,反应不能自发进行,属于吸能反应,需输入能量。应当指出的是: $\Delta G'$ 值用于生物化学能量学是假设每个反应物和产物都能解离。它们解离的标准状态是未解离形式和解离形式的混合状态,两种状态的存在正是 PH = 7.0 的环境。因此 $\Delta G'$ 是以 PH = 7.0 为基础的,如果 PH 不等于 7.0,就不能用 $\Delta G'$ 值。因为一种或一种以上组分的解离程度都可能改变 PH 值。PH 值的变化可导致反应中对 H^+ 和 OH^- 离子结合或释放的差异,从而影响化学反应的进行。因此,同一种高能磷酸化合物在不同组织细胞分解释放的自由能有很大差异。生物化学系统的标准自由能变化在过去以卡(Calorie, Cal)或千卡(Kilocalorie, Kcal)·摩尔⁻¹表示,根据国际生化委员会建议,现在用焦耳(Joules)或千焦耳(Kilojoules)·摩尔⁻¹表示。1 卡相当于 4.184 焦耳(J,简称焦),1 千卡相当于 4.184 千焦耳(KJ,简称千焦)。

磷酸基团水解时释放的自由能各不相同。一般将磷酸化合物水解释放出的能量 $> 20KJ/$

mol(或 > 5Kcal/mol)者,称为高能磷酸化合物。高能磷酸化合物中含有高能磷酸键(energy - rich phosphate bond),以“~P”表示。实际上高能磷酸键这样的名称是不恰当的。一个化合物水解时释放出多少自由能取决于这个化合物整个分子的结构以及反应体系的情况,并不存在哪一种化

学键其键能特别高。但是由于用高能磷酸键来解释一些生化反应非常方便,所以仍被生物化学界广泛采用。有些学者主张用“基团转移势能”(一般用无方向的正值表示)代替高能磷酸键。某些磷酸化合物水解的标准自由能变化列于(表 2-1)。

表 2-1 某些磷酸化合物水解时标准自由能的变化

化合物	ΔG°		磷酸基团转移势能	
	千卡/摩尔	千焦耳/摩尔	ΔG° (千卡/摩尔)	ΔG° (千焦耳/摩尔)
磷酸烯醇式丙酮酸	-14.80	-61.9	14.80	61.9
1,3-二磷酸甘油酸	-11.80	-49.3	11.80	49.3
磷酸肌酸	-10.30	-43.1	10.30	43.1
乙酰磷酸	-10.10	-42.3	10.10	42.3
磷酸精氨酸	-7.70	-32.2	7.70	32.2
ATP→(ADP + Pi)	-7.30	-30.5	7.30	30.5
ADP→(AMP + Pi)	-7.30	-30.5	7.30	30.5
AMP→腺苷 + Pi	-3.40	-14.2	3.40	14.2
葡萄糖-1-磷酸	-5.00	-20.9	5.00	20.9
果糖-6-磷酸	-3.80	-15.9	3.80	15.9
葡萄糖-6-磷酸	-3.30	-13.8	3.30	13.8
甘油-1-磷酸	-2.20	-9.2	2.20	9.2

(引自沈同,1995)

从(表 2-1)中可以看出 ΔG° 由上至下逐渐下降。ATP的 ΔG° 处在中间位置,在ATP以上的任何一种磷酸化合物都倾向于将磷酸基团转移给它以下的磷酸受体分子,而ATP则倾向于将其磷酸基团转移给它以下的受体。

二、高能磷酸化合物的类型

体内重要的高能磷酸化合物主要包括ATP、ADP、CP以及其它一些核苷多磷酸,如UTP、GTP、CTP等。这些高能磷酸化合物在物质代谢、能量转换中均发挥重要作用。根据其键型特点,可将高能磷酸键分为4种类型:

1. 磷酸酐

在磷酸与磷酸之间形成高能键。包括ATP、ADP、GTP、UTP等。

2 烯醇磷酸

是烯醇化合物中的烯醇基与磷酸反应生成。

例如糖酵解中生成的磷酸烯醇式丙酮酸。

3. 酰基磷酸(混合酐)

由磷酸与羧酸构成的酸酐。如1,3-二磷酸甘油酸等。

4. 磷酸胍类

由磷酸与胍类化合物构成,哺乳动物中最重要的为磷酸肌酸。常见的高能磷酸键归纳于(表 2-2)。

机体内也存在其它种类的高能化合物,如乙酰CoA、脂酰CoA、琥珀酰CoA分子中含有高能硫脂键,高能硫脂键水解时 ΔG° 约为-34.3KJ/mol,参与许多CoA转移反应。在运动生物化学中提及最多的高能磷酸化合物是ATP、ADP、CP等。

表 2-2 高能磷酸键及高能磷酸化合物的类型

类型	通式	举例	ΔG° KJ/mol
磷酸酐	$\begin{array}{c} \text{O} \quad \text{O} \\ \parallel \quad \parallel \\ \text{O}-\text{I}-\text{O} \quad \text{I}-\text{O} \\ \text{O} \quad \text{O} \end{array}$	ATP GTP ADP UTP	-30.5
磷酸/磷酸	$\begin{array}{c} \text{CH} \quad \text{O} \\ \diagdown \quad \diagup \\ \text{R}-\text{C} \quad \text{O} \\ \parallel \\ \text{O} \end{array}$	磷酸烯醇 型丙酮酸	-61.9
混合酐 (羧基磷酸)	$\begin{array}{c} \text{O} \quad \text{O} \\ \parallel \quad \parallel \\ \text{R}-\text{C}-\text{O} \quad \text{I}-\text{O} \\ \text{O} \end{array}$	1,3-二磷酸 甘油酸	-61.9
磷酸肌酸	$\begin{array}{c} \text{H} \quad \text{O} \\ \diagdown \quad \diagup \\ \text{R}-\text{C} \quad \text{O} \\ \parallel \\ \text{H} \end{array}$	磷酸肌酸	-43.9

(引自顾天爵, 1995)

第二节 三磷酸腺苷(ATP)

一、ATP 的分子结构和水解供能

(一) ATP 的分子结构

ATP 分子(图 2-1)是由 1 分子核糖、1 分子腺嘌呤和 3 分子磷酸基团组成的一种核苷酸。其中核糖与腺嘌呤组成核苷,核苷与 3 分子磷酸结合形成三磷酸腺苷(adenosine triphosphate, ATP)。将 ATP 分子中的 γ 磷酸基团除去生成二磷酸腺苷(adenosine diphosphate, ADP),而将 ATP

分子中的 γ 和 β 两个磷酸基团一同除去生成一磷酸腺苷(adenosinemonophosphate, AMP)。

当 $\text{PH} = 7.0$ 时,ATP 的磷酸基团几乎完全解离成多电荷负离子状态: ATP^{4-} (图 2-1),由于 ATP 分子带负电荷,分子上的末端磷酸基团可与镁离子(Mg^{2+})、钾离子(K^+)、氢离子(H^+)等阳离子结合,形成 MgATP^{2-} 、 KATP^{3-} 、 HATP^{3-} 复合物。ADP 和 AMP 分子也带负电荷,也可以与一些阳离子结合。在通常的生理条件下,因细胞内有大量的 Mg^{2+} 离子存在,而使 ATP 和 ADP 结合成为 MgATP^{2-} 和 MgADP^- 复合物形式(图 2-2)。

MgATP^{2-} 和 MgADP^- 复合物是接受有关酶(ATP 酶、肌激酶)催化的必需形式。

在进行大强度以无氧代谢为主要供能方式运动时,骨骼肌产生的乳酸等酸性产物积聚,氢离子浓度升高,使 ATP 与 H^+ 离子结合增多,而与镁离子结合下降,ATP 水解过程受阻,收缩肌纤维获取 ATP 水解提供的能量减少,输出功率下降,这是引起大强度运动性疲劳的重要原因之一。实际上体内氢离子浓度升高时,糖酵解过程中磷酸果糖激酶等限速酶的活性也受到抑制,使糖酵解供能下降,引起疲劳(见第三章糖酵解调节)。

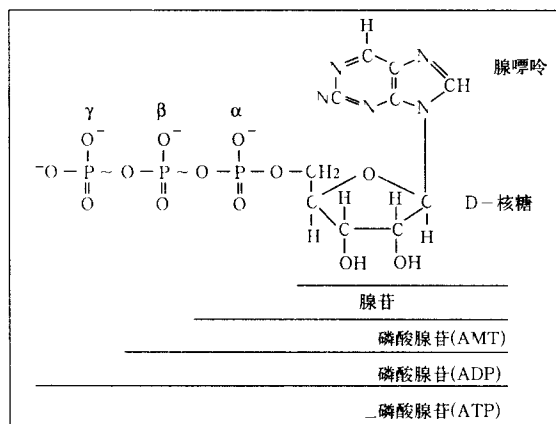


图 2-1 ATP 的分子结构