



军事劳动与训练生理学

Military Performance and Training Physiology

主编 刘洪涛 霍仲厚
主审 吕永达



军事医学科学出版社

需要全本请访问 www.ertongbook.com

军事劳动与训练生理学

主编　刘洪涛　霍仲厚

主审　吕永达

军事医学科学出版社

·北　京·

内容提要

本书是第一部系统论述军事劳动与训练生理学问题的专著。它汇集了全军50余年来的研究资料，融汇了国内外军事劳动、运动生理等相关学科的最新研究进展，由20余名专家倾力撰写而成。全书的内容可以概括为两个部分，一是阐述了军事劳动与训练的理论基础，如劳动时能量代谢与转移，军人体力劳动类型及劳动能力等，对科学的组织军事劳动和训练有实际指导作用；二是阐述了军事劳动与训练理论的应用，注重了本书的实际应用价值，如军人不同体能素质的训练方案，适宜训练负荷量的确定，不同环境温度下从事不同种类军事劳动的水平衡及水和电解质的需要量等等。有理论和实用价值，是一部有意义的参考书。

本书读者对象主要是从事军事医学、训练医学、环境医学的工作者及广大部队指战员，也可作为军事预防医学等相关学科的本科生、研究生的参考教材。

图书在版编目(CIP)数据

军事劳动与训练生理学/刘洪涛，霍仲厚. -北京：军事医学科学出版社，2007.10
ISBN 978-7-80121-975-6

Ⅰ.军… Ⅱ.①刘… ②霍… Ⅲ.①军队卫生：劳动卫生-人体生理学
②军事训练-人体生理学 Ⅳ.R821

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第097601号

出　版：军事医学科学出版社
地　址：北京市海淀区太平路27号
邮　编：100850
联系电话：**发行部**：(010)63801284
63800294
编辑部：(010)66884418，86702315，86702759
86703183，86702802
传　真：(010)63801284
网　址：http://www.mmsp.cn
印　装：河北天普润印刷厂
发　行：新华书店

开　本：787mm×1092mm 1/16
印　张：15.625
字　数：382千字
版　次：2008年1月第1版
印　次：2008年1月第1次
定　价：45.00元

本社图书凡缺、损、倒、脱页者，本社发行部负责调换

编委会名单

编委会主任 霍仲厚

编委会委员 范　明　刘洪涛　李良寿　肖华军
曾宪英

编　　者 （以姓氏笔画为序）

马　强　王　静　王先远　尹昭云
吕永达　刘洪涛　李　晋　李良寿
苏文娜　杨　征　肖华军　张　娜
范　明　范正平　金　宏　洪　欣
耿喜臣　贾宏博　郭　华　郭长江
曾宪英　温泉法　霍仲厚

作者通讯地址

（以姓氏笔画为序）

马　强（Ma Qiang）军事医学科学院卫生学环境医学研究所，天津　300050
（Institute of Health and Environmental Medicine, Academy of Military Medical Sciences, Tianjin 300050）

王　静（Wang Jing）军事医学科学院卫生学环境医学研究所，天津　300050
（Institute of Health and Environmental Medicine, Academy of Military Medical Sciences, Tianjin 300050）

王先远（Wang Xianyuan）军事医学科学院卫生学环境医学研究所，天津　300050
（Institute of Health and Environmental Medicine, Academy of Military Medical Sciences, Tianjin, 300050）

尹昭云（Yin Zhaoyun）军事医学科学院卫生学环境医学研究所，天津　300050
（Institute of Health and Environmental Medicine, Academy of Military Medical Sciences, Tianjin 300050）

吕永达（Lu Yongda）军事医学科学院，北京　100850
（Academy of Military Medical Sciences, Beijing 100850）

刘洪涛（Liu Hongtao）军事医学科学院卫生学环境医学研究所，天津　300050
（Institute of Health and Environmental Medicine, Academy of Military Medical Sciences, Tianjin 300050）

李　晋（Li Jin）军事医学科学院基础医学研究所，北京　100850
（Institute of Basic Medical Sciences, Academy of Military Medical Sciences, Beijing 100850）

李良寿（Li Liangshou）第四军医大学　陕西西安　710032
（University of 4th Military Medicine, Shanxi, Xi′an 710032）

苏文娜（Su Wenna）军事医学科学院基础医学研究所，北京　100850
（Institute of Basic Medical Sciences, Academy of Military Medical Sciences, Beijing 100850）

杨　征（Yang Zheng）军事医学科学院基础医学研究所，北京　100850
（Institute of Basic Medical Sciences, Academy of Military Medical Sciences, Beijing 100850）

肖华军（Xiao Huajun）航空医学研究所　北京　100036
（Institute of Aviation Medicine, Beijing 100036）

需要全本请访问 www.ertongbook.com

张　娜　(Zhang Na)军事医学科学院卫生学环境医学研究所,天津　300050
(Institute of Health and Environmental Medicine, Academy of Military Medical Sciences, Tianjin 300050)

范　明　(Fan Ming)军事医学科学院基础医学研究所,北京　100850
(Institute of Basic Medical Sciences, Academy of Military Medical Sciences, Beijing 100850)

范正平　(Fan Zhengping)海军医学研究所,上海　200433
(Institute of Navy Medicine, Shanghai 200433)

金　宏　(Jin Hong)军事医学科学院卫生学环境医学研究所,天津　300050
(Institute of Health and Environmental Medicine, Academy of Military Medical Sciences, Tianjin 300050)

洪　欣　(Hong Xin)军事医学科学院卫生学环境医学研究所,天津　300050
(Institute of Health and Environmental Medicine, Academy of Military Medical Sciences, Tianjin 300050)

耿喜臣　(Geng Xichen)航空医学研究所,北京　100036
(Institute of Aviation Medicine, Beijing, 100036)

贾宏博　(Jia Hongbo)航空医学研究所,北京　100036
(Institute of Aviation Medicine, Beijing, 100036)

郭　华　(Guo Hua)航空医学研究所,北京　100036
(Institute of Aviation Medicine, Beijing 100036)

郭长江　(Guo Changjiang)军事医学科学院卫生学环境医学研究所,天津　300050
(Institute of Health and Environmental Medicine, Academy of Military Medical Sciences, Tianjin 300050)

曾宪英　(Zeng Xianying)海军医学研究所,上海　200433
(Institute of Navy Medicine, Shanghai 200433)

温泉法　(Wen Quanfa)海军医学研究所,上海　200433
(Institute of Navy Medicine, Shanghai 200433)

霍仲厚　(Huo Zhonghou)总后勤部卫生部,北京　100842
(Health Department of General Logistics Department, Beijing 100842)

序

新军事变革正在世界范围兴起，促使战争模式不断发生变化。这种变化对军人的能力和素质提出了异乎寻常的要求，军人的能力和素质已经成为取得现代战争胜利的决定性因素之一。因此，如何提高军人适应和驾驭现代战争的能力和素质已经成为世界军事医学面临的焦点问题之一。军事劳动与训练生理学是指导部队科学组织军事劳动和训练的基础理论和实践规则，对部队通过科学训练，提高军人适应和驾驭现代战争的能力和素质具有很强的针对性和实用性。

据我所知，《军事劳动与训练生理学》的问世，是迄今为止第一部系统论述军事劳动与训练生理学问题的专著。它汇集了全军50余年来的研究资料，融汇了国内外军事劳动、运动训练等相关学科的最新研究进展，由20余名专家倾力撰写而成。全书的内容可以概括为两个部分，一是阐述了军事劳动与训练的理论基础，如劳动时能量代谢与转移，军人体力作业类型及作业能力等，对科学地组织军事劳动和训练有实际指导作用；二是阐述了军事作业与训练理论的应用，注重了本书的实际应用价值，如在运动与训练中，阐述了军人不同体能素质的训练方案，适宜训练负荷量的确定等；在水平衡和军事作业水需要量中，阐述了不同环境温度下从事不同种类军事作业的水平衡及水和电解质的需要量等等。既有理论意义，又有实用价值，反映了作者对提高部队能力和素质，提高部队实际作战效能的创新立意和良苦用心，值得肯定。

《军事劳动和训练生理学》的问世，可为从事军事医学教学、科研的广大读者提供借鉴，也将对提高部队指挥员军事劳动和训练的理论认识，科学指导部队的军事劳动与训练，提高部队军事作业效率和训练水平，适应未来战争对军人能力和素质的需要起到重要作用。

故在此书问世之际，特为本书作序，并对作者们的勤奋工作和不懈努力表示衷心感谢和鼓励。

总后勤部卫生部部长　李继耐

前　言

军事劳动与训练生理学是军事医学的组成部分，是主要涉及军事劳动、训练时机体的生理反应、适应及其机制，劳动环境对军人劳动能力的影响，促进军人生理功能恢复、增强体质和提高劳动能力和训练效果的学科。科学技术的迅速发展，使军事劳动模式不断变化，对军人劳动能力要求越来越高，促使人们不断探索新的科学的理论，以发展人体的能力和潜力，适应现代军事劳动的需求。与基础生理学相比，本书更注重应用，力求对提高军事劳动能力和训练效果有实际参考作用。

军事劳动和训练生理学是随着军队的形成和发展而逐步建立起来的。在长期的军事劳动和训练实践中，人们逐渐积累了适宜训练、适量睡眠和充分给养与军事劳动能力关系等方面的经验。17 世纪，血流动力学、生物氧化和能量代谢的发展，进一步为军事劳动和训练生理学的形成奠定了理论基础。1786 年，俄国军队卫生学家 A. G. 巴赫拉赫特撰写的《良好生活秩序》一书，阐述了军事劳动时休息、劳动强度、睡眠等军事劳动和训练的生理学问题对维护部队战斗力的作用。第二次世界大战以后，科学技术的迅速发展，其他相关学科的建立，使军事劳动和训练生理学理论体系不断完善。美国、前苏联、英国和加拿大军队等相继开展了大量的以增强军人作战能力和工作效率为目的的军事劳动和训练生理学研究。1957 年，中国人民解放军在军事医学科学院成立了军事劳动生理研究系，专门从事航空、航天和航海作业时的生理学问题研究。以后，有关医学科研机构和各军医大学等相继建立了与军事劳动和训练生理学相关的研究室和教研室，进行了大量的卓有成效的工作，积累了丰富资料，取得了可喜的成果，为我国的国防建设做出了贡献。遗憾的是迄今在我国尚没有军事劳动和训练生理学方面的专著。因此，在总后勤部领导下，我们组织我军 20 余名专家编写了这部《军事劳动和训练生理学》专著。全书共分十三章，主要包括三部分内容：①军事劳动与训练生理学。重点介绍了劳动与训练时能量的代谢与转移，军事劳动与训练的生理反应与

适应，体能训练的生理学基础和训练方法，军人体力劳动类型和劳动能力的评价，军事脑力劳动的特点和增强脑力劳动能力的措施等内容。②特殊环境和不同军兵种的军事劳动和训练生理学。考虑到特殊环境和不同军兵种劳动和训练的特点，增加了高原、高温环境军事劳动与训练生理学，空军和海军军事劳动与训练生理学，分别阐述了特殊环境下及空、海军军事劳动和训练的生理学机制。③军事劳动与训练的损伤与防护。由于军事劳动和训练所致的损伤发生率较高，对军人健康和劳动能力影响较大，在第十三章重点阐述了军事劳动与训练的损伤特点与防护和救治措施。

在本书的编写过程中，我们坚持自己的研究资料与国内外最新研究资料相结合，基础理论研究进展与应用研究成果相结合的原则，力求做到内容优化，科学实用。但在撰写过程中，作者也深深感到，难于把握基础理论和实际应用综合阐述的力度，在内容编排上有许多不尽人意之处，加之作者水平有限，时间仓促，缺憾之处在所难免，肯望读者和同志们指正。希望本书能对军事医学工作者在训练和科研工作中有所帮助，也希望本书能为我军军事劳动及训练水平的提高和军事医学的发展起到促进作用。

在本书编著过程中，中国人民解放军总后勤部卫生部领导给予了大力支持和热情的鼓励，同时也得到军事医学科学院科技部、卫生学环境医学研究所、基础医学研究所等单位的大力协助，在此一并表示诚挚的感谢！

刘洪涛　霍仲厚

于 2007 年 2 月

目　录

第一章　劳动时能量代谢与转移 …… (1)
第一节　概述 …… (1)
第二节　机体劳动时能量代谢与转移过程 …… (3)
第三节　劳动时能量代谢与转移的影响因素 …… (12)
第四节　劳动时能量代谢测定方法 …… (13)
第五节　能量代谢与转移研究在军事劳动与训练中的应用 …… (15)
第二章　军人体力劳动类型及劳动能力 …… (19)
第一节　概述 …… (19)
第二节　有氧代谢与有氧劳动能力 …… (21)
第三节　无氧代谢与无氧劳动能力 …… (25)
第四节　影响劳动作业能力的因素 …… (26)
第三章　军事作业与训练中的脑力疲劳及防护策略 …… (29)
第一节　概述 …… (29)
第二节　脑力疲劳的评价 …… (30)
第三节　军事作业与训练中脑力疲劳的影响因素 …… (33)
第四节　延缓脑力疲劳的主要措施 …… (39)
第四章　军事劳动与营养 …… (44)
第一节　概述 …… (44)
第二节　军事劳动的营养需要 …… (45)
第三节　特殊军事作业条件下劳动的营养需要 …… (52)
第四节　特殊环境条件下军事劳动的营养需要 …… (64)
第五章　水平衡和军事作业水需要量 …… (75)
第一节　体内的水 …… (75)
第二节　水的摄入及内生水 …… (76)
第三节　水的丢失 …… (78)
第四节　不同环境温度军事作业时水需要量 …… (80)
第六章　运动与训练 …… (84)
第一节　概述 …… (84)
第二节　体能训练方法 …… (85)
第三节　适宜训练负荷的确定 …… (91)
第四节　体能训练的科学化 …… (95)

第七章　军人体力劳动能力评价 …… (102)
第一节　体力劳动能力评价指标 …… (102)
第二节　劳动负荷的评价 …… (107)
第八章　军事劳动与训练中的疲劳 …… (109)
第一节　概述 …… (109)
第二节　疲劳分类 …… (110)
第三节　疲劳发生发展的机制 …… (110)
第四节　延缓疲劳的措施 …… (114)
第五节　军事劳动与训练疲劳 …… (115)
第六节　战争疲劳综合征 …… (116)
第九章　热环境军事劳动和训练生理 …… (120)
第一节　热环境与热平衡 …… (120)
第二节　热适应与热习服 …… (125)
第三节　热环境劳动和训练与热损伤 …… (127)
第十章　高原环境军事劳动与训练生理 …… (129)
第一节　概述 …… (129)
第二节　高原环境对人体生理功能的影响 …… (131)
第三节　高原军事劳动生理 …… (135)
第四节　高原劳动能力分级 …… (137)
第五节　高原士兵体能分级 …… (139)
第六节　高原劳动保护 …… (141)
第七节　高原病及其防治措施 …… (147)
第十一章　军事飞行劳动特点与训练生理 …… (156)
第一节　概述 …… (156)
第二节　高空飞行与训练生理 …… (157)
第三节　过载飞行与训练生理 …… (182)
第四节　军事飞行劳动特点与体能训练生理 …… (187)
第十二章　海军军事劳动与训练生理 …… (194)
第一节　水面舰艇部队 …… (194)
第二节　潜艇部队 …… (201)
第三节　潜水部队 …… (204)
第四节　海军作战训练 …… (208)
第五节　晕船 …… (211)
第六节　冷海水浸泡对机体的影响 …… (214)
第十三章　军事劳动与训练损伤和防护 …… (219)
第一节　军事训练损伤 …… (219)
第二节　军事劳动损伤 …… (226)
第三节　军事训练伤与军事劳动伤的防护与救治 …… (234)

需要全本请访问 www.ertongbook.com

第一章　劳动时能量代谢与转移

随着科学技术的发展，“劳动”一词的概念在不断扩充。脑力劳动在职业工作中日显重要，尤其在高技术条件下，武器装备的现代化，要求军人付出更多的智力活动，不同的工作岗位上依据工作需要，脑-体劳动各有侧重。“劳动”一词既包括体力劳动，也包括脑力劳动；既包括军事训练，也包括各种体育锻炼。由于体育运动中的能量代谢问题研究得较为透彻，因而本章以运动时的能量代谢为主加以介绍。

第一节　概　　述

劳动时，如体育锻炼、军事训练等，机体处于较高的运动状态，如肌肉频繁收缩、舒张，大脑高度活跃的思维活动等等，从生物化学角度讲，这些生命活动需要细胞能量代谢的支持。机体能量的产生、储存、转移和释出过程是这些劳动得以实现的物质基础。明确劳动时能量代谢和转移的过程及特点，用劳动时物质代谢和能量代谢理论指导劳动与训练，有利于提高劳动时能量的利用效率，提高劳动者的劳动能力，从而提高劳动效率。劳动时物质代谢和能量代谢目前仍是劳动生理和训练学中基本而又重要的问题。

一、能量代谢的概念

新陈代谢，也称物质代谢，是机体生命活动的基本特征，是生物体内进行的各种生物化学反应过程的总称，也是表达各种生命现象和实现各种生理功能的化学基础。机体消化吸收糖、蛋白质、脂肪后，在体内发生分解代谢或合成代谢，以保证机体各种生命活动的正常进行。在分解代谢过程中，营养物质蕴藏的化学能被释放出来，是放能反应。这些化学能经过转化，成为机体各种生命活动的能源。而合成代谢过程需要供给能量，是吸能反应。因而，在物质代谢过程中，物质的变化与能量的代谢是紧密联系着的。伴随物质代谢过程发生的能量吸收、储存、释放、转移和利用的过程等，称为能量代谢。能量代谢的核心物质是三磷酸腺苷（adenosine triphosphate，ATP）。

机体生命活动中，通过分解代谢将化学物质（糖、蛋白质、脂肪）中贮存的能量释放出来，转移至 ATP。ATP 作为机体生命活动的直接能源，水解后释放出能量，供离子转运、肌肉收缩和其他合成反应等。通过以上过程实现了能量在机体不同物质间的转移，以及由化学能向其他形式能的转化，如机械能、电化学势能等。

二、自由能的概念和意义

一切化学反应都伴有能量的变化。生命体中，化学能可转化成热能、电能、辐射能或机械能。在介绍机体能量代谢时，需要引入一个词，即自由能，它是生物化学中最有用的热力学函数。自由能的变化（ΔG）是指某一反应系统总能量中用于做功的那一部分能量，即可利用能量的变化。一个反应系统自由能的变化取决于产物的自由能与反应物的自由能之差，与反应转

变过程无关。当 ΔG <0 时,反应自发进行并伴随失去自由能,此反应为放能反应。ΔG >0 时,只有获得自由能反应才能进行,此反应属吸能反应。在生物体内吸能反应所需能量常由 ATP 提供,而物质分解代谢释放的能量也多通过合成 ATP 贮存起来。因此,有关能量代谢与转移的能量变化多是围绕 ATP 的生成与分解过程进行的。ΔG°′代表标准状态下某反应中自由能的变化,所谓生物化学反应中的标准状态即反应物浓度为 1.0 mol/L,pH 为 7.0 的状态。生物体内的反应中,实际的自由能变化 ΔG 还与各种反应物,如溶剂、各种离子、蛋白质等的浓度有关,实际的 ΔG 可能大于或小于 ΔG°′。

三、三磷酸腺苷与高能磷酸键

三磷酸腺苷(ATP)由腺嘌呤、核糖和 3 分子磷酸构成,3 分子磷酸之间构成 2 个磷酸酐键。在生理条件下,体内 ATP 的磷酸酐键水解时的 ΔG 为 -51.6 kJ/mol,即释放出 51.6 kJ/mol 的能量。生物化学中把磷酸化合物水解时释出的能量 >20 kJ/mol 者,其所含磷酸键称为高能磷酸键,以 ~P 表示之。

在生命活动中,ATP 水解为二磷酸腺苷(adenosine diphosphate,ADP)及磷酸(Pi),释出的能量供离子转运、肌肉收缩、神经冲动传导等。ATP 消耗后,在物质代谢过程中,ADP 通过底物水平磷酸化或氧化磷酸化(有关概念详见第二节)合成 ATP。可见,生物体内能量的储存和利用都以 ATP 为中心(图 1-1)。

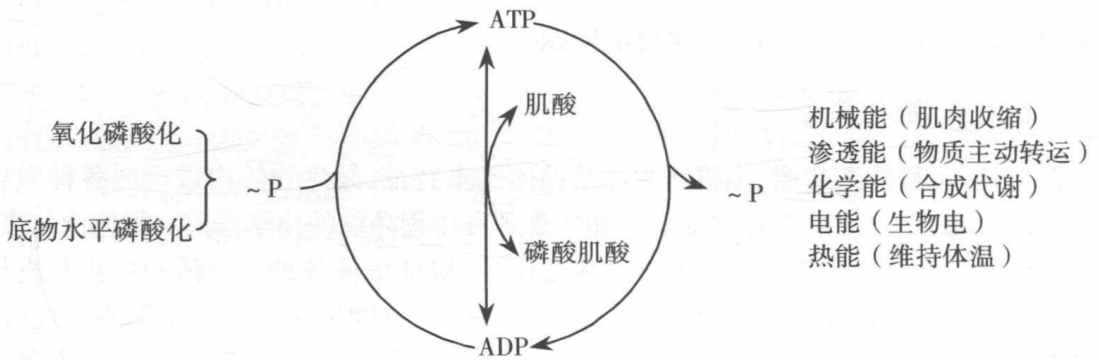


图 1-1　ATP 的生成和利用

(引自:周爱儒. 生物化学. 北京:人民卫生出版社, 2004:152)

四、劳动时的能量来源

劳动时最直接、最迅速的能量来源是 ATP。无论是体力劳动还是脑力劳动,主要能源物质是 ATP。机体有氧代谢和无氧代谢均产生 ATP。ATP 作为能量载体物质,根据机体需要将能量转移至其他载体,用于肌肉收缩、神经冲动传导、离子转运等,实现化学能向机械能或电化学势能等的转化。ATP 是肌肉收缩时能利用的唯一直接能源,骨骼肌 ATP 的储备量很小,每千克湿肌肉 4.6 ~6.0 mmol,能维持 0.5 s 最大强度肌肉收缩所需的能量。

磷酸肌酸(phosphocreatine,CP)则是高能磷酸键的一种储存形式,是肌肉内可以迅速动用的能源储备。骨骼肌中 CP 的浓度最高,含 15 ~20 mmol/kg,为 ATP 浓度的 3 ~5 倍。脑中含少量 CP。CP 分子内所含的高能磷酸键不能直接供应各种生理过程和生化反应所需的能量,

而是在需要时通过肌酸激酶(creatine kinase,CK)将 CP 的高能磷酸基转移到 ADP 分子上形成 ATP,CP 则形成肌酸(creatine,Cr)。

运动中 ATP 消耗后需要不断再合成,以补充持续高强度运动需要。脂肪和糖提供运动中 ATP 再合成所需要的绝大部分能量。

糖是机体的重要能源。食物中的糖,即碳水化合物,其消化产物葡萄糖等被吸收后,有一部分以糖原的形式贮存于肝脏和肌肉中。肌糖原是骨骼肌中随时可以动用的贮备能源,用来满足骨骼肌在紧急情况下的需要。糖也是脑组织主要能源物质。

脂肪是体内各种能源物质贮存的主要形式,其特点是氧化时释放的能量多。正常情况下,人体所消耗的能源物质中有 40% ~50% 来自体内的脂肪。

食物中的蛋白质被消化为氨基酸吸收入体内,氨基酸在体内经过脱氨基作用或转氨基作用,可分解为非氮成分和氨基,其非氨基成分可以氧化供能。有些氨基酸可转变为肝糖原和贮存脂肪,用于机体需要时提供能量。

因而,ATP 是机体劳动时的直接能源,CP 提供肌肉瞬时的 ATP 供应,ATP 的最终来源是食物中的碳水化合物、脂肪和蛋白质三大能源物质。三大能源物质经消化、吸收后,终以葡萄糖无氧酵解或有氧氧化、脂肪酸有氧氧化的方式,产生 ATP 供机体劳动时利用。

第二节　机体劳动时能量代谢与转移过程

人体在劳动时,全身及工作肌代谢水平较安静时提高更为明显,因而对氧及各种营养物质的需要量增加,各种代谢产物如二氧化碳、乳酸等增多,产热量增多。此外,为保持工作肌及全身环境相对稳定,人体各系统和器官,如神经、内分泌、呼吸、循环、泌尿等系统及皮肤的功能均不同程度进行了动员。因此劳动时机体对能量的需要大为增加,使得提供能量的过程加快。从整体来说,机体摄入碳水化合物、脂肪、蛋白质等能源物质后,在体内分解为葡萄糖、脂肪酸、氨基酸等小分子物质,作为体内能量的主要来源,通过有氧代谢、无氧代谢等途径,发生化学能的转移,产生可以供给组织和细胞能量的高能化合物,如 ATP、肌酸磷酸等,通过化学能转换为机械能、电化学势能或直接以化学能的方式维持肌肉、脑等组织的活动。因此,劳动时机体的能量代谢主要有三种供能系统:磷酸原供能系统、糖酵解供能系统以及有氧供能系统。

一、能量代谢的三个供能系统

(一)磷酸原供能系统

ATP 和 CP 分子中都含有高能磷酸基,能以最快速度提供能量给工作肌利用,从功能上称为 ATP-CP 系统(磷酸原供能系统)。磷酸原系统的能量代谢具有运动开始时最早启动、最快利用、供能快速和输出功率最大的特点。

机体剧烈运动时,肌肉急剧收缩,消耗的 ATP 可高达 6 mmol/(kg·s),远远超过营养物质氧化生成 ATP 的速度,这时 ATP 的消耗便是由 CP 通过水解释放高能磷酸键补充的。运动时 CP 能以最快的无氧方式再合成 ATP,使 ATP 的浓度不至于过快降低,维持细胞内足够的 ATP 浓度及 ATP/ADP 比值。CP 的消耗主要发生于大强度或极大强度的运动中,因此 CP 对于防止运动时过早出现疲劳,保持运动能力十分重要。依靠这种瞬时能量,仅能保持工作肌进行最大强度工作 5 ~6 s 之所需,更长时间的运动必须依靠其他供能系统再合成 ATP,其合成速率

比 CP 慢。

静息状态时，由葡萄糖、脂肪酸等氧化生成的 ATP 可与肌酸在肌酸激酶（creatine kinase，CK）催化下合成磷酸肌酸，而肌肉收缩时磷酸肌酸的～P 又可转移给 ADP，使 ADP 重新生成 ATP。

$$CP + ADP \overset{CK}{\rightleftharpoons} ATP + Cr$$

（二）糖酵解供能系统

无氧时葡萄糖生成乳酸的过程称为糖酵解。糖酵解的代谢反应可分为两个阶段：第一阶段是葡萄糖分解成丙酮酸的过程，称之为糖酵解途径，这个过程是葡萄糖的有氧氧化和无氧酵解过程共有的；第二个阶段是丙酮酸转变为乳酸的过程（图 1-2）。糖酵解的全部反应在胞浆中进行。

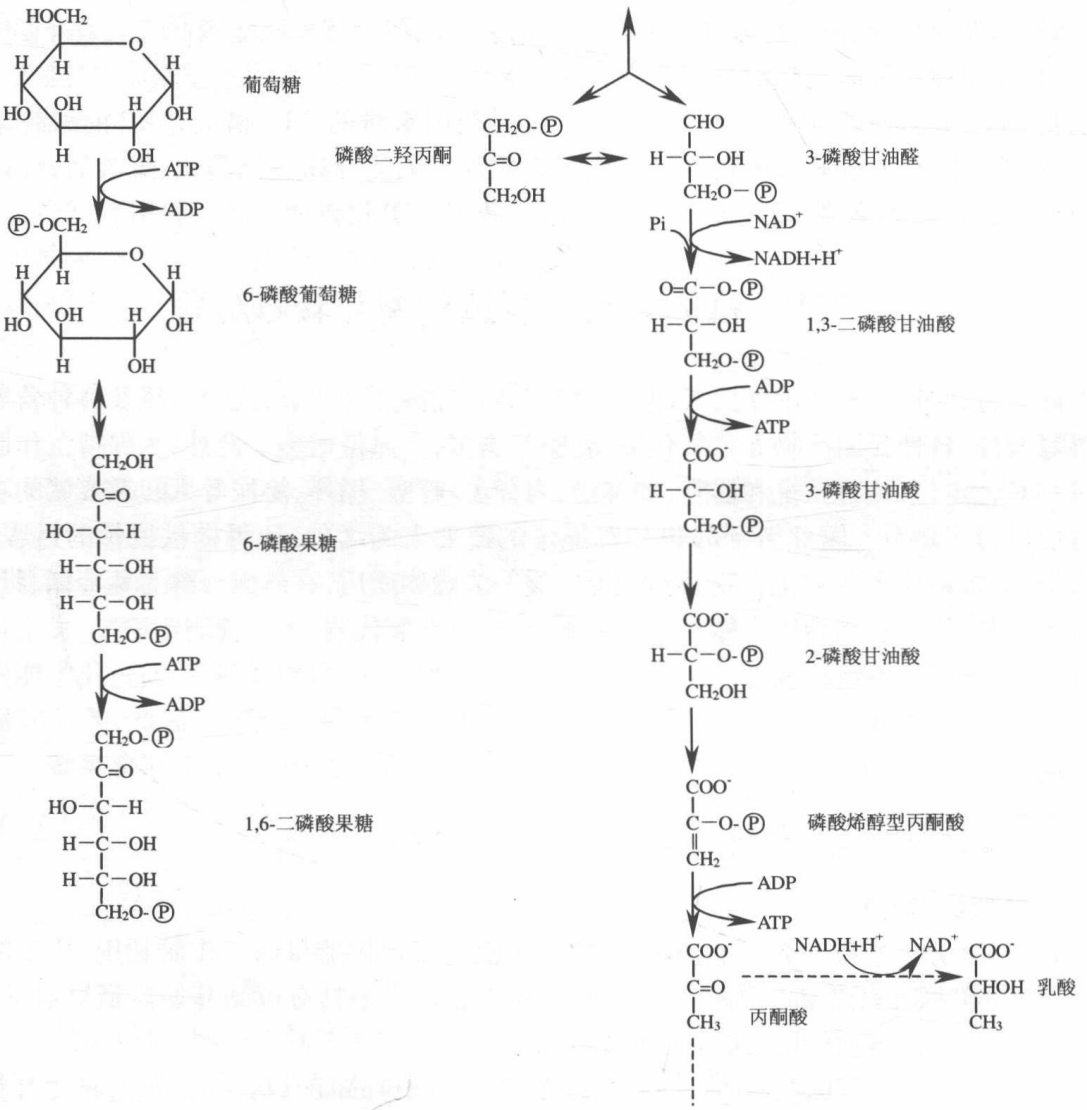


图 1-2　糖酵解的反应过程

（引自：周爱儒. 生物化学. 北京：人民卫生出版社，2004：80）

1. 糖酵解的反应过程　该过程产生少量的 ATP 供机体使用。该过程中 1 mol 葡萄糖分解为 2 mol 乳酸，共产生 4 mol ATP。

3-磷酸甘油醛的醛基脱氢氧化生成 1，3-二磷酸甘油酸时释放的能量保存于羧酸与磷酸构

成的混合酸酐内，形成一个高能磷酸键。这个高能磷酸键水解时 $\Delta G^{\circ\prime} = -61.9$ kJ/mol，可转移给 ADP 产生 ATP。磷酸烯醇型丙酮酸的磷酸与烯醇基相连，水解时 $\Delta G^{\circ\prime} = -12.6$ kJ/mol，但烯醇型丙酮酸立即转变成酮式的丙酮酸，转变过程的 $\Delta G^{\circ\prime} = -40$ kJ/mol，二者合计共 -52.6 kJ/mol，足以供给 ADP 磷酸化成为 ATP。

糖酵解途径也是糖、脂肪和氨基酸代谢相联系的途径。糖酵解途径的中间产物可转变成甘油，以合成脂肪，反之，由脂肪分解而来的甘油也进入糖酵解途径氧化。丙酮酸可与丙氨酸相互转变。

2. *底物水平磷酸化*　从糖酵解途径的过程可以看出，ADP 的磷酸化是与代谢物的氧化反应（1,3-二磷酸甘油酸的水解以及磷酸烯醇型丙酮酸的水解）偶联的，这种与代谢物氧化反应偶联的 ADP 磷酸化称为底物水平磷酸化。以上两个产生 ATP 的过程是糖酵解途径中的两个底物水平磷酸化反应。

3. *糖酵解的生理意义*　其生理意义在于迅速提供能量，这对肌肉收缩更为重要。激烈运动或剧烈的体力劳动时，肌肉收缩，局部血流不足，组织呈缺氧状态，能量主要通过糖酵解获得。

糖酵解时，1 mol 葡萄糖生成乳酸净产生 2 mol ATP。1 mol 葡萄糖糖酵解成乳酸时 $\Delta G = -196$ kJ/mol，而以 ATP 形式储存能量 103.2 kJ/mol，效率 >50%。

（三）有氧供能系统

能量代谢的有氧过程是在线粒体中进行的。糖酵解途径产生的丙酮酸、脂肪酸经 β-氧化、氨基酸脱氨基之后都进入线粒体参加三羧酸循环，完成氧化过程，同时将能量转移至具有高能磷酸键的 ATP。

1. *葡萄糖有氧氧化过程中的能量转移*　有氧氧化是葡萄糖分解代谢的主要方式，该过程产生大量能量，供给劳动过程中的能量消耗。有氧氧化大致分为三个阶段。第一阶段葡萄糖经糖酵解途径分解成丙酮酸；第二阶段丙酮酸转移入线粒体内氧化成乙酰辅酶 A（乙酰 CoA）；第三阶段为三羧酸循环与氧化磷酸化。

（1）糖酵解途径：见前。

（2）丙酮酸氧化成乙酰 CoA：乙酰 CoA 是非常重要的中间代谢产物，除葡萄糖外，脂肪酸以及大多数氨基酸都经一系列反应生成乙酰 CoA，然后进入三羧酸循环。乙酰 CoA 的简式为 $CH_3CO \sim SCoA$。丙酮酸在丙酮酸脱氢酶复合体的催化下氧化脱羧转变为乙酰 CoA，该反应的 $\Delta G^{\circ\prime} = -39.5$ kJ/mol，总反应为：

$$\text{丙酮酸} + NAD^+ + CoA \longrightarrow \text{乙酰 CoA} + NADH + H^+ + CO_2$$

（3）三羧酸循环和氧化磷酸化：三羧酸循环的反应过程可归纳如图 1-3。反应从 2 个碳原子的乙酰 CoA 与 4 个碳原子的草酰乙酸缩合成 6 个碳原子的柠檬酸开始，反复地脱氢氧化，重新生成草酰乙酸，完成一轮循环。经过一轮循环，乙酰 CoA 的 2 个碳原子被氧化成 CO_2。在循环中有 1 次底物水平磷酸化反应生成高能磷酸键（鸟苷酸三磷酸，GTP）。三羧酸循环本身并不是释放能量、生成 ATP 的主要环节，其作用在于通过 4 次脱氢（即生成 NADH 的反应），为电子传递链提供氢原子。这些氢原子与氧结合时可以释出大量能量，营养物中蕴藏的能量主要是在这个阶段释放出来的。

三羧酸循环的总反应为：

$$\text{乙酰 CoA} + 3NAD^+ + FAD + GDP + Pi + 2H_2O \longrightarrow 2CO_2 + 3NADH + 2H^+ + FAD \cdot H_2 + CoA + GTP$$



图 1-3　三羧酸循环

（引自：周爱儒. 生物化学. 北京：人民卫生出版社，2004：87）

三羧酸循环的脱氢反应中，氢的接受体分别为氧化型烟酰胺腺嘌呤二核苷酸（the oxidized form of nicotinamide-adenine dinucleotide，NAD^+）或黄素腺嘌呤二核苷酸（flavin adenine dinucleotide，FAD）。它们既是三羧酸循环中脱氢酶的辅酶，又是电子传递链的第一个环节。所谓电子传递链，也称呼吸链，是由一系列氧化还原体系组成，其功能是将氢原子（电子）依次传递至氧。这样氢和氧结合成水时产生的能量可以逐步释放出来，不致过多地以热量形式丢失。从能量转移的角度讲，电子传递链中释放出的能量可以通过 ADP 磷酸化成 ATP，从而变成机体可以利用的能量形式。由于 ADP 的磷酸化是与氢和氧结合生成水相联系，即氧化与磷酸化反应是偶联在一起的，所以称为氧化磷酸化。除了三羧酸循环以外，其他代谢途径中生成的 NADH 或 $FADH_2$，也可进行氧化磷酸化。

NADH 的氢传递给氧时，可以生成 3 个 ATP；$FADH_2$ 的氢被氧化时只能生成 2 个 ATP。因此，通过三羧酸循环，1 分子乙酰 CoA 可以生成 12 个 ATP。

（4）胞浆中 NADH 的转运：糖酵解途径生成的 NADH 在胞浆中，其不能自由通过线粒体内膜进行氧化，需要通过两种转运机制进入线粒体内，然后再经电子传递链进行氧化磷酸化过程。

一种是 α-磷酸甘油穿梭，通过该机制 NADH 的氢被转运至线粒体内膜后，FAD 作为受氢体结合氢形成 $FADH_2$，进入电子传递链进行氧化。因此通过该机制胞液的 NADH 转运至线粒体内后仅生成 2 个 ATP。

另一种是苹果酸-天冬氨酸穿梭，简称苹果酸穿梭机制。通过这种机制，NADH 的氢被转运至线粒体内膜后，NAD^+ 作为受氢体结合氢形成 NADH，进入电子传递链进行氧化。因此，通过该机制胞液中的 NADH 转运至线粒体内后生成 3 个 ATP。

需要全本请访问 www.ertongbook.com