

专升本

教育部师范教育司组织编写
中学教师进修高等师范本科(专科起点)教材

运动生理学

邓树勋 王 健 黄玉山 主编



高等教育出版社

教育部师范教育司组织编写
中学教师进修高等师范本科(专科起点)教材

运动生理学

邓树勋 王健 黄玉山 主编

高等教育出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

运动生理学/邓树勋等主编. —北京:高等教育出版社,
2001.7 (2004 重印)
ISBN 7-04-009701-X

I. 运… II. 邓… III. 运动生理—生理学 IV. G804.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 025838 号

运动生理学

邓树勋 王健 黄玉山 主编

出版发行	高等教育出版社	购书热线	010-64054588
社 址	北京市西城区德外大街 4 号	免费咨询	800-810-0598
邮政编码	100011	网 址	http://www.hep.edu.cn
总 机	010-82028899		http://www.hep.com.cn

经 销 新华书店北京发行所
印 刷 化学工业出版社印刷厂

开 本	850×1168 1/32	版 次	2001 年 7 月第 1 版
印 张	11.5	印 次	2004 年 3 月第 2 次印刷
字 数	290 000	定 价	12.30 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

编者名单

主 编：邓树勋 教授 华南师范大学
王 健 副教授 浙江大学
黄玉山 教授 华南师范大学

编写成员（按姓氏笔划排名）：

王 恬 副教授 浙江师范大学
王维群 副教授 苏州大学
汤长发 副教授 湖南师范大学
李志清 副教授 广西师范大学
肖国强 教授 华南师范大学
林 华 副教授 辽宁师范大学
郭 红 讲 师 华南师范大学
徐晓阳 副教授 华南师范大学
崔丽萍 讲 师 华南师范大学

编写说明

根据原国家教委制定的《中学教师进修高等师范本科（专科起点）教学计划》的要求，《运动生理学》课程是专业必修课，教材编写由华南师范大学作为召集单位。2000年1月，在华南师范大学体育科学学院召开专升本《运动生理学》教材编写工作会议，开始教材的编写工作。

本教材是在职中学教师进修高等师范本科（专科起点）教材，注重体现知识更新的特点，力求给在职中学体育教师提供科学发展的新讯息，新进展及新应用；贯彻“健康第一”指导思想；突出时代性、科学性、可读性及实用性。全书体系新颖、内容有不少更新、增加了科学进展的新内容及实用性知识。

本教材由全国7所高等学校12位教师参加编写。由华南师范大学邓树勋教授、浙江大学王健副教授、华南师范大学黄玉山教授任主编。参加编写的有：徐晓阳（第1、14章）、肖国强（第2、8章）、汤长发（第3、18章）、王健（第4、5、12章）、王维群（第6章）、王恬（第7、10章）、李志清（第9章）、邓树勋（第11章）、崔丽萍（第13、16章）、黄玉山（第15章）、郭红（第17章）、林华（第19章）。

本教材不仅适用于在职中学教师进修高等师范本科（专科起点）使用，也可作为各级学校在职体育教师学习参考，实现知识更新，同时也可供教练员、运动员、体育工作者阅读参考。

本教材的编写时间匆促，同时限于我们编写人员的业务水平，不足之处在所难免，敬请批评指正。

邓树勋、王健、黄玉山

2001年春于广州

目 录

第一章 人体运动能量学	1
第一节 有关生物能学的一些基本概念	2
第二节 人体运动的能量来源	7
第三节 人体运动时能量消耗的规律和特点	22
第二章 人体能量消耗的测定	27
第一节 人体能量消耗的测定原理	27
第二节 安静和运动时人体能量消耗的测定	31
第三章 骨骼肌的收缩	38
第一节 骨骼肌的收缩机制	38
第二节 肌肉收缩的形式与力学特征	49
第三节 肌肉结缔组织和运动	61
第四章 骨骼肌纤维类型与运动	66
第一节 不同类型骨骼肌纤维的形态结构和功能特征	66
第二节 骨骼肌纤维类型与运动的关系	78
第五章 骨骼肌功能评价与应用	87
第一节 肌肉力量测量与评价	87
第二节 肌电图测量及其在体育科研中的应用	94
第三节 人体无氧工作能力测量与评价	101
第六章 呼吸与运动	113
第一节 肺通气	114
第二节 气体交换	120
第三节 运动时呼吸的变化和调节	127
第七章 血液循环与运动	132
第一节 血液循环概述	132
第二节 运动中血流动力学的变化	140
第三节 血液循环功能的调节与整合	145

第八章 有氧工作能力评价与应用	153
第一节 最大吸氧量与维持有氧水平的能力	153
第二节 氧亏与运动后过量氧耗	157
第三节 乳酸阈与通气阈	159
第九章 神经系统与运动	166
第一节 神经系统概述	166
第二节 人体运动的神经控制	172
第三节 运动技能学习的神经机制	182
第十章 激素与运动	189
第一节 激素概述	189
第二节 人体运动的激素调控	201
第十一章 运动训练的生理学原理	206
第一节 身体素质的生理学分析	206
第二节 训练方法的生理学分析	221
第十二章 酸碱平衡与运动	228
第一节 体内酸碱物质的来源	228
第二节 体内酸碱平衡的调节	230
第三节 运动时体内酸碱平衡的调节	234
第十三章 运动性疲劳与恢复过程	243
第一节 运动性疲劳	243
第二节 恢复过程	252
第十四章 辅助训练手段	257
第一节 营养学手段	257
第二节 药物手段	268
第十五章 环境因素与训练	275
第一节 冷热环境与训练	275
第二节 高原环境与训练	286
第三节 水环境与训练	291
第十六章 体组成与体重控制	294
第一节 体组成	294
第二节 体组成测定方法和评价	297

第三节	体重控制	299
第四节	体组成与运动	303
第十七章	健身锻炼生理学分析	307
第一节	体适能检测与评价	307
第二节	健身锻炼的生理学原理	316
第三节	健身锻炼方法	321
第十八章	运动与免疫	327
第一节	免疫系统概述	327
第二节	运动对人体免疫功能的影响	333
第十九章	不同人群的健身生理学基础	338
第一节	幼儿健身生理基础	338
第二节	老年人的健身生理基础	342
第三节	女子健身生理基础	347
第四节	残疾人群的健身生理基础	352

第一章 人体运动能量学

【提要】本章介绍人体运动时的能量供应问题。内容包括：热力学第一、第二定律等有关生物能学的一些基本概念，细胞内的高能磷酸化合物；骨骼肌收缩的能量来源，人体运动的三大供能代谢系统；以及骨骼肌中能源物质的储量，运动时能源物质动用的顺序和有氧代谢及无氧代谢供能关系等。

自然界存在的多种能量形式都可为人体所利用（表 1-1），因此，人体是最重要的生物能学体系。人体的所有生理过程都离不开能量的参与，不少还需多种能量共同作用才能完成，如视觉和肌肉收缩都涉及了多种能量的共同作用。视觉的产生是辐射能转变成电能的结果，而肌肉收缩这一机械过程则是从电能转化为化学能，再从化学能转化为机械能才完成的。可以说，生命的存在就是以不同形式能量间的相互转换为基础的。

表 1-1 人体内的能量及其利用

能量形式	需能的生理过程
太阳能(辐射能)	视觉、维生素 D 的生成
电能	神经活动、视觉、听觉、触觉、味觉、思维、骨骼肌的应激
化学能	能量代谢、细胞生长和修复、消化、肌肉收缩
热能	维持体温
机械能	肌肉收缩、骨功能的完成、心脏收缩和循环的完成、腺体的分泌

引自：Robergs, 1996

第一节 有关生物能学的一些基本概念

为了了解生物能学，有必要先了解一些有关热力学和能的基本概念。

一、热力学定律

(一) 内能和焓的概念

内能是体系内部质点能量的总和，常用符号 U (或 E) 表示。内能的绝对值是无法测定的，它是由分子的平动能、转动能、振动能、电子能、电子与核的相对静止质量能、分子间相互作用势能等所组成。但一个体系的状态发生变化时，其内能的改变量却是可以测定的。焓也是表示体系能量状态的一个函数。体系内能与该体系的压力 (P)、体积 (V) 乘积之和称为热焓，简称焓，用 H 表示。焓的公式可表示如下：

$$H = U + PV$$

(二) 热力学第一定律

热力学第一定律就是能量守恒定律，它指出在一个孤立体系中的能量可以变换其形式，但其总能量不变。这一定律说明能的形式只能互相转变而不能消灭。

热力学第一定律可用数学表达式以热和功的关系表示如下：

$$\Delta U = Q - W$$

式中 ΔU 代表内能的变化， Q 代表在过程中吸收的热能， W 代表体系所作的功。生物体系是一个开放体系，这种体系的特点是体系和周围环境既有物质交换又有能量交换，在生物体内，绝大多数生物化学过程都是在压力近似不变的条件下发生的，所以在这些过程中，体系吸收或释放的热能就是该体系的焓变；而且绝大多数生物化学过程都是在液体或固体中进行的，所以体积变化很小。因此可把生物化学过程近似的看成恒压恒容过程。即：

$\Delta U \approx \Delta H$ 。在生物化学中往往忽略期间的差别，而简称与某一反应伴随的“能量变化”。

实际上人体作为一个体系有内部的能量交换外，还有与其周围环境能量交换。这些能量变化都是以热力学第一定律为基础的，如以体重的变化为例，将体重看成是一定量的化学能，当摄入和消耗相等时，它就保持不变，而当消耗超过摄入时，体重就会减轻。

(三) 化学能的转化

在生命活动中，生物体所利用的能量主要来源于光能。光合作用将光能转变为化学能并贮存于缩合成的化学物质中。其他生物通过分解代谢将化学物质中贮存的能量释放出来，用以满足自身生命活动的需要。生物体又将未被利用的能量转化为热能、含低能的化合物和热。

不同化学物质含有不同的化学能，在完全氧化（燃烧）时，化学能大量转变为热能，称为燃烧热。氧化作用释放的能量等于这一物质所含的化学键能与其氧化产物所含化学能之差。放出总能量的多少与该物质氧化的途径无关，只要在氧化后所生成的产物相同，放出的总能量相等。

例如，葡萄糖在体外燃烧所放出的能量为 2869kJ/mol ，在生物体内温度的条件下氧化为水和二氧化碳时仍释放同样的能量。当然，葡萄糖在体内的氧化不是一次完成的，而是分为许多阶段进行的，其所蕴藏的能量也是逐步地释放出来的。

(四) 热力学第二定律和熵的概念

热力学第二定律指出：热的传导只能由高温物体传至低温物体，热的自发逆向传导是不可能的。第二定律的实质是说明热力学体系的过程有一定的方向性，自高温流向低温。

当热自高温物体传给低温环境时，即把原来集中于高温物体的能量分散到与它相联系的环境中，这表明，能量分散的程度增大，相反的过程是不可能自发发生的。自发过程的共同特征就是

所有这些过程都向着能量分散程度增大的方向进行。一个体系分散程度可以用熵（ S ）这个概念来表示。熵值也可以说是代表一个体系混乱无序的程度。一个体系当变为更加混乱时，它的熵值增加。熵的变化用 ΔS 表示。则该值为正值。因此，还可将第二定律表述为：在隔离体系中，一个过程只有当其体系和周围环境的熵值总和增加时，才能自发进行。水蒸发和肌肉收缩就是两个熵增加的例子。

值得注意的是，一个体系的过程在自发进行时，其熵是可能降低的，但其周围环境的熵必然增加，因此，它们的总和依然是正值。

根据热力学第二定律，可以了解在机体内哪些过程可能发生，推测哪些因素是某一过程发生的条件。例如，形成一个高度有序的生物结构之所以可能，是因为形成有序结构本身的熵降，完全可以由周围环境总熵的增加所抵消。又如，生物体内部所有不可逆过程都在不断地产生正熵，这可能给机体带来接近极大熵的危险性。极大熵值意味着生命过程停止，机体死亡，但机体能够巧妙地不断从周围环境吸取负熵维持生存。新陈代谢过程使机体成功地向周围环境释放其生命活动不得不产生的全部正熵。

恒温恒压下焓的变化（ ΔH ）、熵的变化（ ΔS ）和温度（ T ）之间有以下关系：

$$\Delta H - T\Delta S < 0$$

该式成立时，这就是一释能反应，就能自发进行。在人体细胞内，一个需能过程利用另一反应所释放的能量，就构成了代谢的基础。这一关系还意味着一个反应的进行，必然有能量的改变，以用来完成反应所需要的工作，这种能量就是自由能。一个自由能变化（ ΔG ）为负的反应称为放能反应，自由能变化为正的称为吸能反应，而自由能变化为零的反应称为平衡反应。

二、细胞内能量的携带者——高能磷酸化合物

人体细胞内必须不断地消耗能量，以完成各种复杂的功能活动。这些能量主要来源于食物，经过复杂的生物化学反应，细胞可将贮存在食物中的化学能转变为能用于生命活动的自由能，贮存在特殊的载体之中，这些载体就是高能磷酸化合物。

(一) 高能磷酸化合物的概念

磷酸化合物在生物机体的换能过程中占有重要地位。机体内许多磷酸化合物，其磷酸基团水解时可释放出大量的自由能，这类化合物称为高能磷酸化合物。腺苷三磷酸（ATP）就是这类化合物的典型代表，ATP是由1个腺嘌呤核苷酸和3个磷酸构成，其结构中的两个磷酸基团（ β 、 γ ）可从 γ 端（远离腺嘌呤核苷酸的一端）依次移去而生成腺苷二磷酸（ADP）和腺苷一磷酸（AMP）。ATP在细胞的产能和需能过程中起着重要的桥梁作用，机体在物质氧化的某些过程释放出的大量自由能往往先形成高能磷酸化合物ATP，再由ATP水解为ADP和无机磷酸而释放出大量自由能供给需能反应。ATP磷酸酐键水解时，释放出30.54 kJ/mol能量，一般将水解时释放20.92 kJ以上自由能的化合物称为高能化合物。高能化合物与低能化合物是相对而言的。化学家认为键能是断裂一个键所需要的能量，而生物化学家所说的高能化合物，是指水解时反应的 ΔG° ，而不是指断裂该键所需要的能量。

(二) ATP的特殊作用

ATP在一切生物的生命活动中都起着重要作用，它是一切需能过程的直接能量来源，在细胞的细胞核、细胞质和线粒体中都有ATP存在。前面已经提及，细胞中的磷酸化合物根据其水解时释放自由能的多少可分为高能磷酸化合物和低能磷酸化合物。但在不同的磷酸化合物之间 ΔG° 的大小并没有高能和低能的明显界限。它们的 G° 值是逐步下降的。ATP所释放的自由能值正

处在中间的位置。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。例如，ADP 能接受在 ATP 上的磷酸基团。而 ATP 则倾向于将其磷酸基团转移给在它以下的受体，因而决定了它能量中间体的特殊地位。在物质的分解代谢中，形成一些富含高能的磷酸化合物。例如，烯醇丙酮酸磷酸和甘油酸 - 3 - 磷酸（即 1,3 - 二磷酸甘油酸），都是葡萄糖分解的中间产物，葡萄糖降解为乳酸时所放出的大部分自由能都保留在这两个化合物中。在细胞内这两个化合物不直接水解，而是通过特殊激酶的作用，以转移磷酸基团的形式将捕获的自由能传递给 ADP 从而形成 ATP。ATP 通过磷酸基团转移，使酸酐键的大部分自由能传递给磷酸基团的受体分子，如葡萄糖、甘油，而形成葡萄糖 - 6 - 磷酸，甘油 - 3 - 磷酸。葡萄糖 - 6 - 磷酸和甘油 - 3 - 磷酸比 D - 葡萄糖和甘油都含有较高的能量，从而起到活化分子的作用，这种活化有利于酶促反应的进行。ATP 起着能量转运站的作用。它是能量的携带者和转运者，但并不是能量的贮存者。有贮能作用的物质是磷酸肌酸。

（三）磷酸肌酸的贮能作用

磷酸肌酸又称肌酸磷酸（CP）是易兴奋组织，如肌肉、脑、神经等唯一能起暂时贮能作用的物质。磷酸肌酸水解的 ΔG° 为 -43.059 kJ/mol 。略高于 ATP 水解的 ΔG° ，能将所贮存的能量随磷酸基团迅速转移给 ADP，以形成 ATP。磷酸肌酸转移其磷酸基团的唯一途径就是 ADP - ATP 途径，因此可以认为磷酸肌酸是高能物质 ATP 的能量贮存库。当 ATP 合成迅速时，肌酸激酶即催化由 ATP 和肌酸的磷酸基团转移，从而使 ATP 处于相对稳定态，即一定的浓度水平。肌肉中磷酸肌酸的含量比 ATP 约高 3 ~ 4 倍，足以维持 ATP 的恒定水平。我们通常把肌肉中的 CP 称为磷酸原，而把 ATP、CP 共同参与的供能系统称为磷酸原供能系统。

（四）ATP 系统的动态平衡

活细胞在生活活动中无时无刻不需要能量供应，可以理解 ATP 的消耗是可观的。ATP 依靠 ATP、ADP 系统传递磷酸基团并提供能量，也靠它不断补充自己。定量测定表明，细胞内 ATP 的含量是比较平稳的，这种相对稳定的浓度如何能满足某些细胞，如处于强烈运动的肌纤维对 ATP 的大量需要？这就要求 ATP 和 ADP 转换速度能够随细胞活动的需要而不断变化。细胞合成 ATP 的速度受消耗 ATP 速度的调控，ADP 的含量对 ATP 的合成速度起直接的调控作用。细胞内有一系列的调节系统，一方面提供细胞所需的 ATP，另一方面使 ATP 仍能维护相对恒定的水平，这就是动态平衡。

细胞内 ATP 维持动态平衡的事实，可用³²P 标记的无机磷酸作为“探针”予以证明。用标记的无机磷酸培育细胞，短时间内分离出细胞的 ATP 可以发现，ATP 的浓度虽然没有改变，但其末端磷酸基团却迅速带上放射性标记。动物细胞内 ATP γ -磷酸基团的半寿期为 1~2min，细菌中只有几秒钟。这意味着 ATP 的 γ -磷酸基团在迅速地脱去，新的 γ -磷酸基团又迅速地由无机磷予以补充。这类实验有力地证明了 ATP 在体内确实处在动态平衡之中。ATP 以及其他许多物质在机体内的动态平衡，构成机体维持正常生活活动所需要的相对稳定内环境。

第二节 人体运动的能量来源

人体运动的进行是由完成一系列动作组成的，而这些动作的完成无一不需要肌肉的收缩。这一过程的完成需要有能量供应，这些能量就是贮存在食物中的化学能经过一系列反应释放出来的。

一、骨骼肌收缩的能量来源

与其他生命活动一样，骨骼肌收缩所需的能量同样只能从每

天进食的食物中来，即从糖、脂肪和蛋白质中来。

(一) 骨骼肌收缩的直接能量来源——ATP

骨骼肌收缩不能直接利用食物中的能量，而是以 ATP 分解作为它的直接能量来源。ATP 是高能磷酸化合物的一种，机体细胞可自行合成 ATP，被合成的 ATP 游离存在于细胞内，它是细胞可迅速直接利用的化学能形式。其放能反应简式如下：



骨骼肌纤维就是利用 ATP 分解释放的能量，使肌丝间相对滑动而完成肌肉收缩的。但细胞内 ATP 的贮量是很有限的，要维持肌肉长时间的收缩，就必须及时补充消耗了的 ATP。机体补充 ATP 的能量就来源于食物中糖、脂肪和蛋白质的分解。

(二) ATP 补充的途径

ATP 补充的直接反应是 ADP 与 P_i 在有能量供应的条件下重新结合，这是一个磷酸化的吸能过程。被吸收的能量就由食物中糖、脂肪和蛋白质的分解提供。

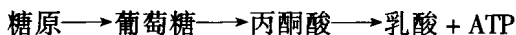
1. 糖的分解供能

糖是人体内最主要的能源物质，主要以血糖和肝糖原的形式存在，机体 60% 的热能都是由糖来提供的。短时间、大强度运动时，机体所需能量的绝大部分是由糖氧化供给的；长时间、低强度运动时，也首先利用糖来供能，然后随时间的延续，逐渐动用脂肪供能。除此而外，细胞中许多结构成分也是由糖构成的。糖还有调节脂肪代谢和节约蛋白质供能的作用。脂肪在体内的完全氧化，必须有糖的参与才能完成。而在糖代谢受阻的情况下，由于脂肪大量分解以保证供能，会引起脂肪分解的中间产物（酮体）的大量堆积，严重时将导致中毒。所以，糖代谢正常时，可减少脂肪的分解。同样道理，糖供应充足时，也可减少蛋白质的分解供能。

人体细胞内糖的分解供能分为无氧酵解和有氧氧化两种

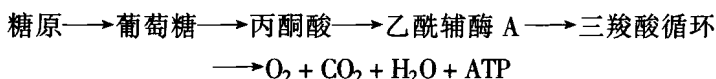
方式。

(1) 糖的无氧酵解：葡萄糖和糖原在不需要氧的情况下分解生成乳酸，并释放能量的过程，称为糖的无氧酵解。其反应在胞浆中进行，反应过程简式如下：



糖无氧酵解时，1 mol 葡萄糖产生 2 mol 的 ATP，即能利用的热能不到葡萄糖分子总热能的 5%，能量利用率很低。人体在从事持续较短的剧烈运动时（大于 90% $\text{VO}_{2\text{max}}$ ），由于氧运输系统的功能惰性的存在以及需氧量远远超过吸氧量，致使机体缺氧，此时肌肉活动所需要的 ATP 的再合成则依赖于糖无氧解能过程。因肌肉中缺乏由乳酸逆行转变为葡萄糖的酶，所以肌肉中的乳酸不能再转变为葡萄糖，而是扩散入血液被运送到肝重新合成肝糖原或葡萄糖。在氧供应充足时，大部分乳酸又可以进行氧化供能。

(2) 糖的有氧氧化：葡萄糖或糖原在有氧条件下，氧化成 CO_2 和 H_2O ，并再合成 ATP 的过程称为糖的有氧氧化，是糖分解供能的主要方式。此反应在胞浆和线粒中进行。糖有氧氧化时，1 mol 葡萄糖生成 38 mol ATP，葡萄糖分子总热能几乎全部被利用，能量利用率很高。其反应过程简式如下：



由葡萄糖或糖原生成丙酮酸是有氧供能和无氧供能的共同途径。在糖无氧酵解时，丙酮酸还原为乳酸；而有氧氧化时，丙酮酸经一系列反应，生成 CO_2 和 H_2O 。

2. 脂肪代谢

脂肪是一种含能量最多的物质。1 g 脂肪在体内氧化产生 37.65 kJ (9kcal) 热能，约为氧化同量糖和蛋白质的 2 倍多。人体内脂肪贮量很大，脂肪最主要的功能就是氧化供能，也是长时间肌肉运动的主要能源。其次，它还是构建细胞的组成成分。脂