

运动机能的 生物化学评定

YUNDONGJINENGDESHENGWUHUAXUEPINGDING

邱忠平 刘源月 和 虹 编著



科学出版社

内 容 简 介

本书首先概述了运动员机能评定的生物化学基础,为运动机能的生物化学评定提供理论指导。然后重点阐述了运动机能评定常用生物化学指标的生物学意义、经典测定方法及近年来所发展起来的部分指标改良测试方法,并对各项指标在运动机能评价中的应用进行了较为详细的分析。最后阐述了生化标本的采集与处理和动物实验的基本技术与研究方法,并对运动机能的生物化学研究常用的动物实验模型进行了简单介绍。

作为教材,本书可供高等体育院校的学生使用;作为专业读物,本书可供体能教练和健身与运动爱好者学习和参考。

图书在版编目(CIP)数据

运动机能的生物化学评定 / 邱忠平, 刘源月, 和虹编著. —北京: 科学出版社, 2012.7

ISBN 978-7-03-035355-9

I. 运… II. ①邱…②刘…③和… III. ①运动员-运动生物化学-身体素质-评定 IV. ①G804.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 189984 号

责任编辑: 杨 岭 冯 铂 郑述方 / 封面设计: 陈思思

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

成都创新包装印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2012年7月第一版 开本: 787×1092 1/16

2012年7月第一次印刷 印张: 14.75

字数: 330千字

定价: 48.00元

前 言

体育科学发展日新月异,运动机能评定内容广泛。生物化学指标可客观反映机体对运动的适应与调节,揭示机体在运动过程中生物学特征的变化规律,被广泛应用于运动机能的评定。在运用体育科学相关理论的基础上,适时监控并合理应用生物化学指标对人体运动机能进行评定,对于指导科学的运动员选材与运动训练、促进大众健康等,均具有十分重要的理论和实践意义。

迄今,我国运动员机能评定的生物化学研究方法尚未标准化,系统阐述人体运动机能生物化学评定的专门书籍也不多见。基于此,作者运用运动生理学、运动生物化学与临床生物化学等学科的相关知识与理论,遵循运动过程中物质能量代谢与调节的规律,在总结国内外相关研究成果的基础上,构建了运动机能生物化学的评定体系,并围绕该评定体系展开论述,撰写了本书。内容主要包括:运动机能评定的生物化学基础,常用生物化学指标的测试方法,指标在运动机能评定中的应用价值,动物实验的基本技术与运动动物模型,运动机能生物化学评定质量控制等,在撰写过程中,力求内容全面,概念准确,尽量反映出运动机能的生物化学评定领域的全貌。

本书由西南交通大学、美国德克萨斯大学等单位合作撰写,各章的分工为:绪论、第一、三、四、五章:邱忠平;第二章:邱忠平,余天,唐建;第六、七章:刘源月;第八章:和虹,刘源月,海维燕;第九章:江南屏,和虹,唐建;第十章:海维燕,邱忠平,童霏;第十一章:邱忠平,海维燕。全书由邱忠平统稿,刘志刚、周丽萍、廖禧、江海涛、付春霞、陈帝霖等参与了部分章节资料的查阅与整理工作。

在撰写过程中本书引用和参考了许多专家学者的研究成果,得到中央高校基本科研业务费专项基金科技创新项目(SWJTU12CX052)的资助,还得到科学出版社的大力支持和帮助,在此一并表示感谢!

本书可作为相关专业高年级本科生与研究生的教材或参考书,也可为相关专业人员提供研究参考。限于作者知识水平,书中不足和疏漏之处在所难免,恳请同行专家和广大读者批评指正。

作 者

2012年3月

目 录

绪论	1
第一节 运动的物质代谢基础	1
第二节 运动机能评定的意义	23
第三节 运动机能生化评定的常用指标	30
第一章 运动与免疫功能	41
第一节 免疫细胞	41
第二节 免疫球蛋白	48
第二章 运动与内分泌功能	52
第一节 睾酮	52
第二节 皮质醇	57
第三节 儿茶酚胺	60
第三章 运动与氧转运系统	69
第一节 血红蛋白	69
第二节 红细胞系	72
第三节 血细胞分析仪检测全血细胞	77
第四章 运动与糖代谢	79
第一节 血糖	79
第二节 血乳酸	83
第五章 运动与脂肪代谢	90
第一节 甘油三酯	90
第二节 胆固醇	95
第六章 运动与蛋白质代谢	104
第一节 血氨	104
第二节 尿素	109
第三节 肌酐	114
第七章 运动与组织损伤	120
第一节 肌酸激酶	120

第二节	乳酸脱氢酶	126
第三节	天门冬氨酸转移酶	130
第八章	运动与自由基代谢	135
第一节	超氧化物歧化酶	135
第二节	过氧化氢酶	140
第三节	一氧化氮	142
第四节	丙二醛	146
第九章	运动与尿液理化性质	155
第一节	尿液比密	155
第二节	尿蛋白	157
第三节	尿血红蛋白	161
第四节	尿糖	162
第五节	尿酮体	164
第六节	尿胆红素和尿胆原	166
第七节	尿液分析仪检测尿液理化性质	169
第十章	动物实验	171
第一节	动物实验基本技术	171
第二节	运动动物模型	179
第十一章	运动机能生化评定的质量控制	188
第一节	标本的规范采集与处理	188
第二节	实验方法质量控制	196
第三节	实验室质量控制	202
参考文献	208
附录一	常用自动化仪器简介	215
附录二	常用英文缩写术语	223

绪 论

运动时机体对能量的需求增加，导致机体内物质代谢增强，使得机体神经系统、内分泌系统、免疫系统、运动系统等功能系统出现一系列变化。相应生理生化指标的变化规律可客观反映机体对运动刺激的应激能力，反映运动过程中物质代谢的适应性，揭示机体在运动过程中的生物学特征，为人体运动机能的评定提供科学的依据。这在运动员的选材、科学的运动训练、合理的膳食营养、运动能力的提高与普通人群的健康促进等方面均具有十分重要的现实意义。

第一节 运动的物质代谢基础

生命活动的本质是物质代谢的过程，物质代谢是机体生长发育、组织更新与修复等各项生命活动的重要基础。核酸、蛋白质、糖类、脂类、水、无机盐、维生素、酶、激素等是维持生命活动的物质基础。其中，糖类、脂肪和蛋白质是人体运动过程中的主要能源物质。在运动过程中，通过相应的分解代谢，这些物质中储存的化学能释放出来，补给机体所消耗的能量。

一、运动的物质基础

人体是由不同物质按照严格的规律和方式组合而成的生命体。蛋白质、核酸、糖类、脂类、水、无机盐及各种活性有机物等，是组成人体的基本物质，在生命活动中起着十分重要的作用。蛋白质和核酸是生命的重要物质基础和存在形式，核酸是遗传的物质基础，蛋白质是含量最为丰富的高分子物质，是生物体的基本组成成分之一。糖类和脂类是组成生物体的重要化学物质，是机体能量供给的重要物质基础。酶、激素与神经递质是生物体内的重要功能物质，在人体新陈代谢中起着重要的调节作用。维生素和微量元素对酶的催化活性起重要的辅助作用。水和无机盐是机体的重要组成成分，构成了人体内环境，对于维持人体正常的生理功能起着十分重要的作用。

(一) 蛋白质与核酸

1. 蛋白质

蛋白质是以氨基酸为单位的生物大分子物质，是生命活动的重要物质基础。人体内蛋白质由 20 种 α -氨基酸按照不同的排列方式组合而成，其结构复杂，分布广泛，占固体成分的 45% 左右。蛋白质不仅是构成细胞的基本物质，还是多种生物活性物质的基本成

分,对于机体代谢与机能的调节起着关键性的作用。

人体内蛋白质种类繁多,功能各异,其主要功能包括以下几个方面:参与细胞或组织器官的构成,是机体重要的机械支架;参与体内物质代谢的催化过程,绝大多数酶是蛋白质;参与机体生命活动的调节过程,是多种激素与神经递质的重要组成成分;参与机体转运与保护过程,是组成血红蛋白(hemoglobin, Hb)、载脂蛋白(apolipoprotein, Apo)、铁蛋白、凝血酶等的重要成分;参与机体的免疫防御,识别外来异物,排出外来物质对机体的损伤;此外,在饥饿、长期低糖膳食或长时间高强度运动时,蛋白质还可参与机体能量供应。

2. 核酸

核酸是以核苷酸为基本组成单位的一类生物大分子物质,由核苷酸或脱氧核苷酸通过3', 5'-磷酸二酯键连接而成,是生物遗传信息的载体,具有储存与传递遗传信息的生理功能。根据所含戊糖的差异将核酸分为脱氧核糖核酸(deoxyribonucleic acid, DNA)和核糖核酸(ribonucleic acid, RNA)。

DNA分子是由两条多聚核苷酸长链盘旋而成的规则双螺旋结构,主要存在于细胞核内,与蛋白质组成染色质,是储存遗传信息的分子,决定生物体的遗传功能。RNA分子较DNA分子小得多,且一般都是单条核苷酸链,主要存在于细胞质中,少量存在于细胞核内,参与遗传信息的传递和表达,在蛋白质的生物合成中起着重要作用。核酸可作为遗传因素选材的重要依据,而探索运动对核酸的影响,可从分子水平上了解运动训练对身体机能的影响,科学地指导运动训练。

(二)糖类

糖类是机体能量代谢中的最重要的化合物,其化学本质是多羟基醛或多羟基酮及其缩合物和衍生物,在生命活动中的主要作用是提供能源和组成机体的组织结构。根据糖类物质能否被水解及水解后的产物,将糖分成单糖、低聚糖和多糖。食物中的淀粉、糖原、麦芽糖、蔗糖、乳糖等,都必须在消化道经水解类酶水解为单糖后,才能被吸收与利用。吸收进入体内的葡萄糖经血液运送到全身各组织器官;供细胞利用或合成糖原。糖在生命活动中具有重要的生理功能,主要体现在以下几个方面。

①生命活动的主要能源物质。为生物体的生命活动提供能量是糖的主要功能,人体所需能量的50%~70%来自于糖的氧化分解。人体内作为能源的糖主要是葡萄糖和糖原,每克葡萄糖在体内完全氧化分解,可释放16.7 kJ的能量供机体所需,糖可通过血脑屏障为神经细胞提供能量。糖原是体内重要的储能物质,在肝脏和肌肉中含量最高,可满足机体不同的能量需要。糖类物质在调节脂肪与蛋白质代谢方面起着十分重要的作用,不仅可加速脂肪代谢,还有抵抗脂肪不完全氧化的产物——酮体生成的作用,运动过程中,机体内糖被优先利用,这样可减少蛋白质分解供能,对蛋白质具有保护作用。

②生物体合成其他物质的重要原料。人体各组织、器官均含有糖类物质,某些糖及其中间代谢产物可为生物体合成其他生物分子提供碳骨架原料,如核糖和脱氧核糖是细胞中核酸的成分;糖与脂类所形成的糖脂,是神经组织与细胞膜的重要成分;糖与蛋白质结合所生成的糖蛋白,是构成结缔组织、软骨及骨的重要基质,是黏液、眼球玻璃体

中发挥着十分重要的作用，与人的运动能力密切相关。维生素是食物营养素之一，主要由食物供给，需量极少，有的以组成辅酶或辅基的形式参与体内的物质能量代谢，有的是合成激素的前体物质。维生素的种类很多，化学结构各异，根据溶解性质的不同通常将其分为脂溶性维生素和水溶性维生素两类。脂溶性维生素包括维生素 A、维生素 D、维生素 E、维生素 K；水溶性维生素包括维生素 C 和维生素 B。若机体内某种维生素缺乏，将会导致相应的疾病发生，而脂溶性维生素摄入过量则会导致蓄积性中毒。各类维生素的生理功能各异，其分类及主要生理功能见表 0-1-1。

表 0-1-1 维生素的分类与主要功能

分类	名称	主要功能
脂溶性维生素	维生素 A	又称抗干眼病维生素，是构成视网膜杆状细胞、视紫红质和细胞膜表面糖蛋白合成的重要物质，肝脏是其储存的主要场所。具有保护角膜上皮、维持上皮组织结构完整、促进生长发育等重要的生理功能，还具有预防某些肿瘤尤其是皮肤组织的肿瘤及心血管疾病发生的作用，直接影响要求视力集中运动项目的运动能力
	维生素 D	又称抗佝偻病维生素，维生素 D ₃ 是体内的储存形式，可调节钙和磷代谢、促进钙和磷吸收与储存，并作用于许多器官参与细胞代谢或分化的调节，具有促进骨质形成、预防佝偻病与骨质疏松的重要作用
	维生素 E	又称生育酚，不仅与维持动物正常的生殖功能密切相关，还具有重要的抗氧化作用，可消除体内脂质过氧化物的危害，保护细胞免受自由基的攻击，具有维持生物膜的完整性、抵抗衰老、促进 Hb 的代谢、降低血浆胆固醇水平、抑制肿瘤细胞生长、提高肌肉力量等多种重要的生理功能，维生素 E 直接影响肌肉组织的收缩能力与耐力，还对预防肌肉损伤有积极作用
	维生素 K	又称凝血维生素，是具有异戊烯类侧链的萘醌化合物，可由肠道细菌合成。具有促进血液凝固与骨骼生长、参与肝内合成凝血因子、活化凝血酶原、增加肠道的蠕动和分泌功能、延缓糖皮质激素在肝内的分解、调节骨骼钙沉淀等重要功能
	维生素 C	又称抗坏血酸，是很强的还原剂，参与体内氧化还原反应。具有促进钙、铁和叶酸的吸收，促进胶原蛋白合成、胆固醇转化的作用；能防止或延缓维生素 A、维生素 E 的氧化及脂质过氧化，阻止某些氧化物的形成，清除体内自由基；可降低血浆胆固醇水平，减少心血管疾病与白内障的发生，还能抑制肿瘤细胞的生长及抗病毒感染，促进肌肉组织正常生长发育。过度训练可致机体中维生素 C 与白细胞的吞噬功能下降，适时补充维生素 C 对于提高肌肉力量、增强免疫功能、降低肌肉酸痛、消除机体疲劳和促进创伤愈合具有重要作用
水溶性维生素	维生素 B ₁	又称硫胺素，是糖的三羧酸循环和磷酸戊糖代谢途径的重要辅酶，可抑制胆碱酯酶活性，对于维持神经肌肉的正常传导功能具有重要作用。其缺乏会导致肌肉萎缩、心肌无力、中枢神经易于疲劳等。维生素 B ₁ 可促进丙酮酸的氧化脱羧，加速运动后血乳酸清除，避免组织内丙酮酸堆积，对于延缓运动性疲劳的发生，提高运动员的耐力具有积极的作用
	维生素 B ₂	又称核黄素，是构成体内多种呼吸酶的重要辅酶，作为重要的氢传递体，参与体内生物氧化与能量代谢。参与体内铁的吸收与储存，参与体内抗氧化防御系统，促进正常的生长发育等。其缺乏可导致骨骼肌有氧代谢能力降低，引起肌肉收缩无力，耐力下降，易于疲劳，从而影响机体的运动能力
	维生素 PP	又称抗癞皮病维生素，是具有烟酸生物学活性的吡啶-3-羧酸衍生物的总称，包括尼克酸和尼克酰胺，是构成体内许多脱氢酶的重要辅酶，参与生物氧化过程，影响体内糖类、脂类和蛋白质的代谢。与 DNA 复制与修复和细胞分化有关，具有增强胰岛素效能的作用，可改善心血管系统的功能。与运动员的有氧与无氧耐力有关，直接影响运动性疲劳的恢复

(续表)

分类	名称	主要功能
水溶性维生素	维生素 B ₅	又称泛酸或遍多酸, 在体内以辅酶 A(coenzyme A, CoA)和酰基载体蛋白的形式发挥生化功能, 在代谢过程中作为酰基的载体, 广泛参与体内糖、脂类、蛋白质的酰基转移, 其中乙酰 CoA 还参与 FA 的合成代谢、胆碱的乙酰化及抗体的合成等
	维生素 B ₆	又称抗皮炎维生素, 在体内的活性形式为磷酸吡哆醛和磷酸吡哆胺, 作为氨基酸转氨酶与脱羧酶的辅酶, 参与蛋白质与氨基酸代谢的多种酶促反应, 与 Hb 的合成、肌肉及肝脏中的糖原转化、花生四烯酸及胆固醇的合成与转运、人体神经系统与免疫系统功能等密切相关。直接影响运动员的耐力, 尤其对力量素质具有重要影响, 在节食加运动的过程中应高度重视维生素 B ₆ 的补充
	生物素	是多种羧化酶的辅酶, 主要催化体内 CO ₂ 的固定与羧化反应, 在脂质与糖代谢、蛋白质与核酸合成等方面具有重要作用
	叶酸	在细胞的分裂生长中起着重要的作用, 又称抗巨幼红细胞贫血维生素, 是含有蝶酰谷氨酸结构的一类化合物的总称。叶酸以四氢叶酸的形式参与氨基酸、蛋白质、核酸合成, 通过核苷酸影响 DNA 和 RNA 的合成, 还可通过蛋氨酸代谢影响磷脂、肌酸、神经介质的合成, 并与红细胞(erythrocyte or red blood cell, RBC)、白细胞(leucocyte or white blood cell, WBC)分化成熟有关。其缺乏直接影响运动员的运动能力
	维生素 B ₁₂	又称钴胺素, 可由肠道细菌合成, 是几种变位酶的辅酶, 参与一碳基团的转移与核酸、蛋白质的合成。具有促进 RBC 的发育与成熟及皮肤新陈代谢的功能。维生素 B ₁₂ 与叶酸关系密切, 可增加叶酸的利用率, 当维生素 B ₁₂ 缺乏时也会引起恶性贫血及其他疾病
	α -硫辛酸	与维生素 B ₁ 同时存在, 是酮酸氧化脱羧酶系的辅酶之一, 参与体内丙酮酸、 α -酮戊二酸的氧化脱羧反应, 对于物质代谢具有重要意义

维生素与运动能力密切相关, 其缺乏可导致运动能力降低。在体育运动中, 机体能量消耗增加, 物质代谢速度加快, 导致维生素的消耗或排泄增加, 体内充足的维生素对于消除运动性疲劳、减轻组织损伤、延缓疲劳发生、提高运动能力等方面均具有十分重要的意义。但应注意过量补充脂溶性维生素可导致中毒, 过多的水溶性维生素会破坏机体的营养平衡, 从食物中摄取充足的维生素是最佳的维生素补充方式, 因此, 不主张大量补充维生素。

(五) 酶

酶是机体内一类具有高效催化活性和特定空间构象的生物大分子物质。在已知的 2000 余种酶中, 绝大多数是由细胞合成的对特异性底物起高效催化作用的蛋白质, 少数为核酸。酶促反应具有高效性、专一性和特异性等特性。根据各种酶催化的生物化学反应的类型, 分为水解酶、氧化还原酶、转移酶、裂合酶、异构酶、连接酶等。体内多种酶共同作用, 催化机体的物质能量代谢过程顺利进行, 维持机体正常的生理活动。

酶活性的大小直接影响酶促反应的速度, 从而影响运动时的能量供给。运动时由于所需能量增加, 导致机体内物质能量代谢的许多酶如肌酸激酶(creatine kinase, CK)、乳酸脱氢酶(lactate dehydrogenase, LDH)、苹果酸脱氢酶(malate dehydrogenase, MDH)、三磷酸腺苷酶等活性增高。急性剧烈运动可使血清中许多酶的活性升高, 经过一段时间的休息后, 逐步下降恢复至正常水平; 长时间系统的运动训练可能会导致安静时某些酶活性增加, 故机体内酶活性可评定运动员对运动负荷的适应性, 指导运动训练。

体内的能量供大于求时, CK 可催化 ATP 将其所含有的高能磷酸键转移给肌酸合成 CrP, 后者作为肌肉和脑组织中能量的一种储存形式。当机体消耗 ATP 过多而致 ADP 增多时, CrP 再将高能磷酸键转移给 ADP, 生成 ATP, 以供生理活动之需。

ATP 可将储备能用于肌肉收缩而转变为机械能输出, 也可转变为化学能、电能和热能。体内 ATP 生成的主要方式是氧化磷酸化, 是在生物氧化过程中生成的 ATP, 生物体内 95% 的 ATP 来自这种方式。底物水平磷酸化, 即在物质分解代谢过程中, 代谢物脱氢后, 能量在分子内部重新分布, 形成高能磷酸化合物, 然后将高能磷酸基团转移到 ADP 形成 ATP 的过程, 也能产生部分 ATP。

CrP 是肌肉和其他兴奋性组织(如脑和神经)中的一种高能磷酸化合物, 是高能磷酸基的暂时储存形式, 是维持短时间能量平衡的主要物质。CrP 水解时释放能量为 43.1 kJ/mol。肌肉细胞的 CrP 含量是 ATP 含量的 3~4 倍, 骨骼肌不能直接利用 CrP 的能量, CrP 将能量转移到 ATP 中供肌肉细胞利用。在肌肉活动时, CrP 能很快供给 ADP 磷酸基, 从而恢复正常的 ATP 水平以供肌肉活动所利用。在活动后的恢复期, 积累的肌酸又可被 ATP 磷酸化, 重新生成 CrP。此外, 由于 CrP 与磷酸可以在线粒体膜上穿梭, 将能量带到胞浆中, 可使胞浆中 ATP 保持高浓度。

3. 糖酵解供能系统

糖酵解是机体在缺氧或无氧条件下获得能量的有效方式, 是指葡萄糖或糖原在氧气不足的条件下分解生成乳酸, 并合成 ATP 的过程, 又称为糖的无氧代谢。

糖酵解过程的全部反应在细胞质中进行, 不需要氧气, 由 12 步连续的生物化学反应组成, 反应非常迅速, 反应中生成 $\text{NADH} + \text{H}^+$, 只能将 2 分子 H 交给丙酮酸, 使之还原成乳酸; 整个反应中 1 分子葡萄糖活化为 2 分子丙酮酸, 净生成 2 分子 ATP, 若从糖原开始, 则净生成 3 分子 ATP; 糖酵解反应过程中, 每个反应步骤基本由特异的酶催化, 己糖激酶、6-磷酸果糖激酶、丙酮酸激酶所催化的反应是不可逆的, 故此三种酶是该反应的关键酶。骨骼肌内 ATP 含量较低, 当机体剧烈运动使肌肉局部血流相对不足时, 通过糖酵解可迅速获得能量, 使骨骼肌在缺氧状态下保持正常功能。

糖酵解的主要生理意义是在于为机体缺氧时快速供能。由于肌肉中 ATP 含量很低, 仅为 5~7 $\mu\text{mol/g}$ 新鲜组织, 葡萄糖进行有氧氧化反应过程较长, 机体在缺氧或剧烈运动导致肌肉局部血流不足时, 糖酵解可迅速为其提供能量以满足肌肉收缩的需要。在摔跤、柔道、拳击、武术等体能要求高的项目中, 糖酵解供能是良好运动技能发挥的重要条件。

三、运动与物质代谢

人体生命活动所需的能量, 来自食物中的糖类、脂肪和蛋白质。在运动过程中, 骨骼肌能量消耗大大增加, 极量运动时可高达安静时的 200 倍。机体内的糖、脂肪和蛋白质三大细胞燃料均能通过相应的分解代谢, 将分子内储存的能量释放出来, 并转换成人体生命活动的直接能源 ATP, 不断补充 ATP, 以维持运动的持续进行, 保证 ATP 供能的连续性。

中的生物转化；NADPH 还可维持谷胱甘肽的还原状态，保护巯基酶和巯基蛋白免受氧化剂的损坏，RBC 中还原态的谷胱甘肽对于保护 RBC 膜的完整性具有重要意义。

(3)糖异生

糖异生是指由乳酸、丙酮酸、甘油及生糖氨基酸等非糖化合物转化为葡萄糖或糖原的代谢过程，具有重要的生理意义。肝脏是糖异生的主要器官，长期饥饿时，肾脏糖异生也起重要作用。糖异生途径不完全是糖酵解的逆过程，糖酵解过程中的三个不可逆反应，在糖异生途径中有另外的四个关键酶代替：丙酮酸羧化酶和磷酸烯醇式丙酮酸羧激酶催化丙酮酸通过丙酮酸羧化支路转化为磷酸烯醇式丙酮酸，果糖二磷酸酶催化 1,6-二磷酸果糖转化为 6-磷酸果糖，最后由葡萄糖-6-磷酸酶催化 6-磷酸葡萄糖生成葡萄糖。

糖异生在补充或恢复肝糖原储备、维持机体血糖浓度稳定等方面意义重大，主要表现为以下三个方面：首先，维持空腹或饥饿状态下血糖浓度的相对稳定。空腹或饥饿状态下，肝脏的糖异生作用加强，氨基酸、甘油等在肝脏异生成葡萄糖，以维持血糖水平恒定，对于依赖葡萄糖供能的脑组织和 RBC 尤为重要。其次，有利于乳酸的利用。肌肉组织通过糖酵解产生乳酸，从细胞扩散到血液后运输至肝脏，在肝脏内经丙酮酸异生成葡萄糖，葡萄糖又可被组织利用，对于更新肝糖原、防止乳酸堆积而导致的酸中毒均具有重要作用。最后，调节机体内酸碱平衡。长期饥饿或剧烈运动时，肾脏的糖异生作用加强，使得肾脏中的 α -酮戊二酸因糖异生而减少，由此促进谷氨酸和谷氨酰胺的脱氨反应，肾小管细胞分泌的氨与尿管中的 H^+ 结合生成 NH_4^+ ，有利于肾脏排 H^+ 和 Na^+ ，维持体液的正常 pH 值，防止酸中毒现象的发生。

2. 血糖浓度的调节

在正常的生理状态下，机体在多种调节因素的相互作用下，以维持血糖浓度恒定。机体内血糖主要来源包括从食物中吸收、肝糖原分解及肝内糖异生作用生成的葡萄糖；去路则是在各组织器官中氧化分解供能，合成糖原、转化成 TG 或转变为某些氨基酸、糖的衍生物等。运动过程中，通过以下因素的共同调节以维持体内血糖浓度的平衡。

(1)神经系统调节

神经系统对血糖水平的调节属于整体调节。神经系统通过对各种激素分泌的调节，影响各种代谢中酶活性而完成对血糖的调节作用。迷走神经兴奋能使胰岛素分泌增加，促进糖原的合成，抑制糖异生，降低血糖浓度。运动导致交感神经兴奋可使肾上腺素分泌增加，促进肝糖原分解，加强糖异生作用，具有升高血糖的作用。

(2)激素调节

激素对机体血糖浓度调节起着重要作用，参与血糖浓度调节的激素有多种。而胰岛素是体内唯一降低血糖浓度的激素，升高血糖的激素则有胰高血糖素、肾上腺素、糖皮质激素和生长激素等。

胰岛素可促进葡萄糖转运到细胞内，通过诱导糖酵解三个关键酶的合成，加速葡萄糖的有氧氧化；通过降低环一磷酸腺苷(cyclic adenosine monophosphate, cAMP)的水平使糖原合成酶活性增加，磷酸化酶活性降低，促进糖原合成，抑制糖原分解；通过抑制糖异生的四个关键酶活性而抑制糖异生和糖原的分解；促进糖转化为脂肪，减少脂肪的

动员。

胰高血糖素可促进肝糖原的分解,抑制糖酵解,促进糖异生,加速脂肪动员;肾上腺素通过细胞膜受体激活依赖 cAMP 的蛋白激酶 A,抑制肌细胞吸收利用葡萄糖,促进肌糖原分解代谢与肌肉 FA 氧化,激活胰高血糖素,抑制胰岛素释放,促进糖酵解与糖异生;糖皮质激素可抑制肌肉与脂肪组织摄取葡萄糖,促进肝外组织分解蛋白质,使升糖氨基酸从血液转移到肝脏进行糖异生,促进脂肪动员,对长时间运动中、后期维持血糖浓度作用重大;生长激素能抑制组织细胞利用血糖,具有抵抗胰岛素的作用。

降低血糖与升高血糖的两类激素通过相互协调、相互制约,以改变体内糖代谢方向以调节血糖浓度,共同实现对血糖的调节。运动时上述几种激素的变化,有利于机体内能量的动员,激活肝糖原分解,促进肝脏吸收糖异生基质和增强糖异生作用,使肝脏中葡萄糖的释放量增加,对于维持机体血糖的正常水平,保证机体的能量供给有着重要的意义。

(3) 组织器官的调节

血糖的组织器官调节包括肝脏、肾脏、骨骼肌的调节。肝脏是调节血糖浓度的主要器官,其中具有多种参与糖代谢的酶,通过肝糖原的合成及分解和糖异生作用,维持血糖浓度恒定。运动过程中血糖浓度降低时,糖异生作用加强,肝糖原分解成葡萄糖维持血糖稳定;血糖浓度升高时,葡萄糖以糖原的方式储存在肝脏中,也可转换成脂肪、蛋白质。在运动的初始阶段,肝糖原分解是提供葡萄糖的主要来源,但在长时间运动的后期,糖异生作用则是肝释放葡萄糖的主要来源,同时,肾脏的糖异生作用也大大增强。

骨骼肌等外周组织通过对血糖的摄取利用调节血糖浓度。肌肉组织是储存糖原的重要组织,可利用血糖合成肌糖原,但肌糖原不能直接在肌肉内分解为葡萄糖以补充血糖。肌肉剧烈运动时,肌糖原分解产生大量乳酸,通过乳酸循环将乳酸异生为葡萄糖或肝糖原供组织利用。

3. 糖代谢与运动能力

糖的能量生成效率高,无论是在氧供充足还是不足的情况下,体内的糖均可通过不同的代谢方式为机体提供能量,同时,糖的代谢产物易于转化与排出,对身体的毒副作用最小,是运动时消耗最多的供能物质,且机体内糖的储量是影响运动能力的重要因素,故糖与机体的运动能力密切相关。

(1) 糖原与运动能力

糖原是肝脏和骨骼肌中容易动员的能量储存物质,肝糖原的主要生理意义在于维持血液中葡萄糖的稳定,肌糖原则主要是供给肌肉连续收缩时能量的需要。

肝脏释放的葡萄糖由肝糖原分解和糖异生途径提供,在耐力性运动中对于稳定血糖水平具有积极的作用。机体进行高强度运动的前阶段,肝葡萄糖释放主要以肝糖原分解为主,占肝葡萄糖释放总量的 90%,随着运动的进行,糖异生底物的逐渐增加,糖异生在肝葡萄糖释放中的比率也会升高。运动后期,两种途径释放的葡萄糖若不能与骨骼肌利用的葡萄糖保持平衡,则会导致血糖水平降低而影响运动能力。

人体内肌糖原的初始储备量与肌纤维类型和训练水平等因素有关。中、高强度持续

性耐力运动与初始糖原储备状况直接相关,肌糖原储量丰富的肌肉组织收缩时,肌肉对血糖的吸收与利用较少;肌糖原不足的肌肉收缩时,糖原分解供能相对较低,肌肉依赖血糖供能提高,肌肉对血糖的吸收和利用增多,肌糖原储量过低可抑制乳酸生成,并降低无氧代谢能力。运动前充足的糖原储备,对于维持运动过程中血糖浓度的稳定,延缓运动性低血糖出现,推迟运动性疲劳的发生具有积极作用。训练有素的运动员,肌肉中一般有较高的肌糖原储备,并能维持较长的运动时间。

(2) 血糖与运动能力

血浆葡萄糖在持续性耐力运动供能中占有十分重要的地位。高强度运动的前期,肌糖原分解产生的葡萄糖是运动中的主要代谢底物,随着耐力运动时间的延长,血糖的作用较肌糖原更重要。运动过程中,机体利用糖供能与运动强度、运动时间、训练水平等因素有关。静息状态或低强度运动时,血浆葡萄糖氧化供能比例较少,在20%~30%最大摄氧量(maximal oxygen uptake, VO_{2max})的低强度运动时,主要供能来源于脂肪;短时间高强度运动时由于神经体液的调节作用,引起肝糖原分解加强,甚至可导致血糖水平明显升高;以65%~85% VO_{2max} 的亚极量运动,血浆葡萄糖供能比例占总能量消耗的20%~50%,运动能力的限制因素与运动前肌糖元的储备量有密切关系,肌糖原储量充足时,血糖供能占总消耗能的7%,当肌糖原储量不足时,血糖供能占总消耗的50%。

血浆葡萄糖是长时间运动能力的限制性因素,其浓度下降首先影响中枢神经系统的能量供给,导致生理功能障碍,当肝脏释放葡萄糖的速率低于骨骼肌吸收与利用血糖速率时,RBC运输氧气的能力下降,导致运动能力随之降低。通过科学地增加糖的摄入量,对于维持运动中血糖水平的稳定,提高运动能力具有重要意义。在经常运动者的饮食中,糖类应该至少占总能量的55%~70%;对持续性耐力运动来说,运动前至少需进食200g糖,才能有效提高运动能力;进食低纤维糖类食物应该在运动前2~3h;果糖不适合作为运动员的糖补充资源;运动后6h是糖原的快速恢复期,运动后尽快进食大量高糖食物十分必要,可按每2h每kg体重补充0.7~1.5g糖。

(二) 运动与脂肪代谢

脂肪广泛存在于人体内,是维持生命活动所必需的营养物质和结构物质。人体脂肪来源于食物和机体自身合成两个途径。食物中的脂肪经过一系列的生物化学反应,最终水解为甘油、FA及少量的甘油一酯等,在十二指肠下段及空肠上段被肠黏膜细胞吸收后,甘油、中链脂肪酸与短链脂肪酸直接经门静脉进入肝脏或进入外周血液进一步代谢;长链脂肪酸、甘油一酯、游离胆固醇酯则在肠黏膜细胞中重新酯化为TG和胆固醇酯,与磷脂、Apo一起组成乳糜微粒(chylomicron, CM),被吸收进入淋巴系统,经胸导管进入血液循环,运送到身体各个组织中。

1. 脂肪代谢

脂肪作为体内ATP潜在来源的能量储存形式,具有重要的供能地位,是多种器官和组织的供能物质。尤其是长时间耐力运动导致肌糖原储量下降时的主要供能物质,其分解代谢能够提供运动所需的大部分能量。

(1) 脂肪的动员

脂肪动员是指储存在脂肪细胞的 TG，被脂肪酶逐步水解为游离脂肪酸(free fatty acid, FFA)和甘油并释放入血液，供全身各组织器官氧化利用的过程。脂肪的动员过程受多种因素的调控，运动或其他原因导致交感神经兴奋时，肾上腺素、去甲肾上腺素、胰高血糖素等分泌增加，脂肪细胞膜上的激素受体与这些激素结合，并激活细胞内的激素敏感性甘油三酯脂肪酶(hormone-sensitive triglyceride lipase, HSL)，引起脂肪动员生成甘油和 FA。所生成的甘油溶于水，进入血液后直接被运送至肝脏、肾脏、肠道等组织，主要在肝细胞中由甘油激酶(glycerol kinase, GK)催化甘油磷酸化，转变为 3-磷酸甘油，再脱氢生成磷酸二羟丙酮，最后进入糖代谢途径进行分解或异生成糖。FA 只有三分之一被释放入血液，三分之二在脂肪细胞内经再酯化作用生成 TG，FA 不溶于水，需和血液中的 Apo 结合才能由血液运送至其他组织，最终被心肌、肝、骨骼肌等组织摄取利用。

(2) 脂肪酸的氧化

在氧供应充足的条件下，FA 经氧化后生成大量的乙酰 CoA，然后通过 TAC 彻底氧化成 CO_2 和 H_2O ，并释放大能量供生命活动所需。该过程在线粒体中进行，其碳链的断裂多发生在 β 位的碳原子处，故 FA 的 β -氧化是体内 FA 分解的重要途径。

人体除脑组织外，大多数组织均能氧化 FA，但以肝脏与肌肉组织最为活跃。FA 的 β -氧化分为以下四个阶段：第一，FA 在细胞质中首先被活化为脂酰 CoA；第二，中、短链 FA 可直接进入线粒体，长链脂酰 CoA 则需经 L-肉碱为载体转运进入线粒体基质；第三，经脱氢、加水、再脱氢、硫解四步连续反应生成乙酰 CoA；第四，乙酰 CoA 进入 TAC 彻底氧化生成 CO_2 和 H_2O ，同时释放大能量用以合成 ATP。此外，FA 的 β -氧化也是 FA 改造的过程，可将长链脂肪酸改造成中、短链脂肪酸。

(3) 酮体的生成与利用

机体在缺氧或糖供应不足的情况下，FA 动员加强以补充糖供能的不足，供生命活动所需，而 FA 代谢会产生大量的中间产物。在骨骼肌、心肌等肝外组织的线粒体中，FA 的 β -氧化所产生的乙酰 CoA 直接进入 TAC 被彻底氧化供能。而 FA 在肝脏氧化分解时除产生大量乙酰 CoA 外，还形成一些正常的中间代谢产物，包括乙酰乙酸、丙酮和 β -羟丁酸，后者虽不属酮类，但经常与前两者伴随出现，三者统称为酮体。

由于肝脏缺乏氧化利用酮体的酶，故其所产生的酮体需透过肝细胞膜，进入血液运输到肝外组织进一步氧化分解利用。在骨骼肌、心肌、肾脏和脑等肝外组织中，乙酰乙酸在乙酰乙酸硫激酶或琥珀酸 CoA 转硫酶的催化下，活化成乙酰乙酰 CoA，然后在硫解酶作用下，分解成 2 分子乙酰 CoA，进入 TAC； β -羟丁酸需在 β -羟丁酸脱氢酶的催化下，脱氢生成乙酰乙酸，然后按上述途径被氧化；丙酮主要随尿或从肺排出，在代谢中不占重要地位。

酮体是肝脏输出能源的一种形式，分子很小，易溶于水，能通过肌肉内毛细血管壁和血脑屏障，经血液循环运送至肝外组织如心肌、骨骼肌、肾脏和脑组织等得到分解利用，是肌肉组织尤其是脑组织的重要能源物质。在长期饥饿、长时间运动、糖供给不足或糖尿病时，脂肪动员加强，FA 氧化加强，酮体替代葡萄糖成为脑组织与肌肉组织的主

谢相关酶的活性,使FA的生成增加;肾上腺素和去甲肾上腺素还可通过抑制胰岛素分泌,减弱其抗脂解作用,增加脂肪的动员;长时间运动导致胰高血糖素等脂解激素分泌增多,使酯化作用减少,FA动员加强而直接进入线粒体进行 β 氧化为机体供能。

②FA分解对脂肪代谢的调节。机体内脂肪动员与酯化过程同时进行,这种TG-FA循环的意义在于提高脂肪动员反馈调节的敏感性。长时间运动导致胰高血糖素等脂解激素分泌增多,FA动员加强,酯化作用减弱,运动肌对FA的吸收增多,血浆FFA维持相对稳定的水平。同时,FA不完全氧化的产物酮体生成增多,超过肝外组织利用的能力时,会导致机体内酮体升高,高水平的酮体可直接抑制脂肪动员,促进胰岛素的分泌,使血浆胰岛素水平升高,酯化作用加强,进一步抑制脂解作用的发生,FA的分解供能受限,导致运动能力下降。

③乳酸对脂肪代谢的影响。糖酵解在运动中具有重要的供能意义,长时间剧烈运动导致骨骼肌细胞中的乳酸产量增加,可阻断或抑制肾上腺素与去甲肾上腺素加速脂肪代谢的作用。长期规律的运动训练可增加骨骼肌细胞内线粒体的体积和数量,提高有氧代谢酶的活性,增强骨骼肌细胞的有氧代谢能力,消除乳酸对脂肪动员的抑制作用,提高机体对乳酸的耐受能力与脂肪动员的能力。

④糖与FA利用对脂肪代谢的调节。糖和脂肪均是骨骼肌细胞的供能物质,当体内糖储量丰富时,骨骼肌细胞会更多地利用糖类供能,减少脂肪的分解利用。但由于体内糖储备量有限,当糖贮备消耗过多时,可导致血糖浓度降低,中枢神经系统供能不足,出现中枢性疲劳,限制运动水平的发挥。为获得最大耐力的运动能力,机体内糖和脂肪必须合理利用,应尽可能多的利用FA供能,以减少体内糖的消耗,使有限的糖储备维持较长时间,延缓运动性疲劳的出现,提高速度耐力。优秀马拉松运动员可全程保持在 $85\%VO_{2max}$ 运动强度的跑速上就是科学利用糖和脂肪供能的结果。

(2)脂肪酸与运动能力

长时间耐力运动出现脂肪大量动员而又没有及时被利用时,可导致血浆脂蛋白复合体生成增加而抑制许多酶的活性,并使血液黏滞性增加,血流速度减慢,使血小板(plaquet, Plt)凝集速率增加,导致机体氧供不足,运动能力下降。此外,血浆FFA浓度过高,还可对骨骼肌、心肌、肝脏等的细胞机能带来不良影响,使人体机能状态下降,运动能力降低,出现运动性疲劳。

(3)脂肪代谢物的补充与运动能力

某些脂肪代谢产物具有调节脂肪代谢,保护生物膜的完整性,增加机体的抵抗能力,提高人体的运动机能等多方面的作用。因此,合理补充脂肪代谢产物对于提高运动员的运动能力具有积极的作用。

①补充肉碱。肉碱具有促进FA氧化代谢、保护生物膜和推迟疲劳发生的作用,安静状态下肌肉中总肉碱浓度约为 $20\mu\text{mol/g}$ 。剧烈运动可导致机体内肉碱储量显著减少,进而影响细胞氧化利用FA的能力,适时补充肉碱可使训练有素的运动员 VO_{2max} 增加,有利于运动时FA在呼吸链中被彻底氧化供能,对于减少糖原供能,提高运动能力,推迟运动性疲劳的出现具有重要意义。

②补充不饱和脂肪酸。不饱和脂肪酸具有减少胆固醇的吸收、降低血浆TG浓度与

血黏度、促进神经系统的发育、保护心肌细胞、提高机体免疫功能、抗氧化等多种重要的生理功能,对运动能力具有明显的影响。其中,多不饱和脂肪酸(polyunsaturated fatty acid, PUFA)具有多种重要的功能,不仅是细胞膜和线粒体的重要组成成分,还具有降低血液中的胆固醇浓度,提高 RBC 的变形能力和降低血液黏度、激活神经递质等功能,因此,科学地补充 PUFA 可防治运动训练所致的“超微结构损伤”,保护生物膜的完整性,促进机体内 O_2 和营养物质的运输,对于提高运动中的反应速度,提高有氧运动能力,加速体力与机能恢复等方面均具有重要意义。但由于 PUFA 在机体内易被人体正常组织新陈代谢产生的自由基或活性氧所氧化,因此,在补充 PUFA 时可适当补充抗氧化剂以降低其副作用。

(三)运动与蛋白质代谢

食物中的蛋白质经胃蛋白酶作用初步水解成多肽和少量氨基酸,然后在小肠中经多种消化酶及寡肽酶的协同作用,被彻底水解为氨基酸和短肽而被吸收。吸收后的氨基酸沿着肝门静脉进入肝脏,一部分在肝脏内进行分解或合成代谢,另一部分则继续随血液循环运送到各组织器官供组织器官所利用,合成各种特异性的组织蛋白质。

1. 氨基酸代谢

成人每日丢失氮 5~7 g,为保持健康状态每天至少需摄入 30~60 g 蛋白质才能维持机体氮平衡。人体内没有专门的组织器官储备氨基酸,从食物中摄取的蛋白质经消化吸收的氨基酸(外源性氨基酸)与体内组织蛋白质降解所产生的氨基酸(内源性氨基酸)共同组成氨基酸代谢库(metabolic pool),分布于体内各处,参与机体的新陈代谢。其中,肌肉中的氨基酸占总代谢库的 50%以上,肝脏约占 10%,肾脏约占 4%,血浆约占 1%~6%。机体内的氨基酸在肝脏、肌肉、肾脏等组织中,通过转氨、氧化脱氨、联合脱氨等形式,脱去 α -氨基,生成相应的 α -酮酸及氨,前者可转化为酮体、合成糖与脂肪,进行代谢转化,后者转化为尿素后主要从尿液排出。

蛋白质与氨基酸的代谢过程中所产生的代谢产物,可作为其代谢的特征性指标,如血液和尿液中的氨、尿素和肌酐常用于判断蛋白质和氨基酸分解代谢情况与肾脏功能;肌肉收缩引起肌纤维蛋白分解时释放出 3-甲基组氨酸(3-methylhistidine, 3-MH),尿液中 3-MH 总排泄量可作为人体骨骼肌收缩蛋白分解代谢强度的重要指标,在利用 3-MH 评定机体内蛋白质与氨基酸的代谢强度时,常用 3-MH 与肌酐的比值校正肌肉重量差异及肾廓清率的变化。

(1)血液氨基酸的来源与去路

人体在新陈代谢的过程中,不断由氨基酸合成蛋白质,又不断将蛋白质分解为氨基酸,氨基酸的来源与去路必须维持动态平衡才能适应生理需要。氨基酸主要源于食物中的蛋白质经消化吸收的氨基酸、组织蛋白质(包括酶与激素)分解生成的氨基酸、 α -酮酸和氨合成的非必需氨基酸及机体内氨基酸代谢库释放的氨基酸;去路主要为合成组织蛋白质、经脱氨基或脱羧作用转化为 α -酮酸和氨与胺类以及经特殊代谢途径转化为其他含氮化合物等。体内氨基酸的来源与去路如图 0-1-1 所示。

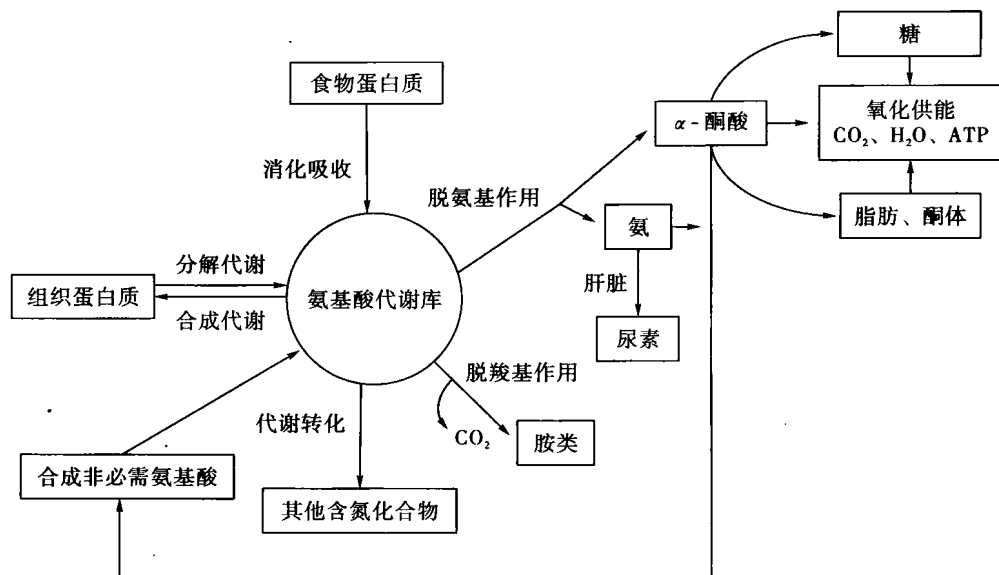


图 0-1-1 氨基酸的来源与去路

(2) 脱氨基与脱羧基作用

脱氨基作用是氨基酸分解代谢的主要途径，氨基酸经脱氨基作用生成相应的 α -酮酸和氨，然后再完成各自的分解代谢以满足机体的需要。该过程在体内大多数组织中均可进行，主要包括转氨基途径、氧化脱氨基途径和联合脱氨基途径。

转氨基作用是指在转氨酶的催化下，氨基酸与 α -酮酸间的氨基转移过程，大多数氨基酸都是在相应转氨酶的作用下发生转氨基作用。机体内最主要的转氨酶有丙氨酸氨基转移酶 (alanine aminotransferase, ALT) 和天门冬氨酸转移酶 (aspartate aminotransferase, AST)，其中 ALT 在肝脏中活性最高，AST 则在心肌内活性最高，二者都是胞内酶，正常人血清中含量甚少，通过检测血液中 ALT 和 AST 的活性可判断肝脏和心脏的损伤情况。氧化脱氨基作用是氨基酸在氨基酸氧化酶的作用下脱氢生成亚氨基酸，再经水解酶作用生成氨和 α -酮酸的过程。联合脱氨基途径是体内氨基酸最主要的脱氨基方式，包括两种反应途径，一种是将转氨基作用和谷氨酸氧化脱氨基偶联起来，使体内大多数氨基酸脱掉氨基，生成氨和 α -酮酸，此过程主要在肝脏和肾脏等组织中进行；另一种是通过嘌呤核苷酸循环途径脱去氨基，此反应在骨骼肌和心肌内比较活跃。通过这两种途径，基本能满足体内氨基酸氧化分解并释出氨的需要。

机体内部分氨基酸在氨基酸脱羧酶的作用下，通过脱羧基作用生成相应的胺类和 CO_2 。脱羧基作用所生成的胺类具有重要的生理功能，如氨基酸经脱羧作用所生成的 γ -氨基丁酸 (γ -aminobutyric acid, GABA) 为重要的抑制性神经递质，5-羟色胺 (5-hydroxytryptamine, 5-HT) 不仅能抑制神经兴奋，还具有重要的收缩血管和兴奋胃肠道平滑肌的作用，多巴胺 (dopamine, DA) 与肌肉紧张的调节和耐力有关，其含量下降会导致运动能力降低。但若胺类产生过多或没被及时代谢而积累下来，则会导致神经系统和心血管系统的功能紊乱。