

高级速滑教练员岗位培训

教材之三

速滑运动员

机能状态的生化评定

李宝泰 编



全国速滑教练员岗位培训领导小组

沈 阳 体 育 学 院

一 九 九 〇 年 四 月

目 录

第一章 运动时能量供应的代谢过程

第一节	高能化合物	1
第二节	CP分解合成 ATP	5
第三节	糖酵解合成 ATP	7
第四节	有氧代谢合成 ATP	11
第五节	运动时燃料利用的相互关系	18
第六节	运动时供能途径和燃料利用的 代谢调节	22

第二章 运动员机能状态的生化评定

第一节	运动员和非运动员身体机能状 态的生化评定	28
第二节	运动员训练水平的生化评定	32
第三节	血糖和运动能力	36
第四节	无氧代谢能力的评定	36
第五节	有氧代谢能力的评定	37
第六节	血清肌酸激酶、血液非蛋白氮	40
第七节	尿蛋白 尿肌酐 尿胆元	49
第八节	尿酸	59
第九节	心肌功能的评定	62

第三章 速滑训练的生化原理

第一节	运动训练的生化基本原理	67
第二节	无氧代谢能力的训练	69
第三节	无氧代谢的训练方法	72
第四节	无氧代谢能力训练	76
第五节	力量训练	80
第六节	适宜运动量的生化分析	82

第四章 影响运动能力的生化因素

第一节	人体运动的限力因素	92
第二节	运动性疲劳的生化	94
第三节	药物、兴奋剂与运动	96

第一章 运动时能量供应的代谢过程

体育科学是一门综合性科学，在自然科学中，除了传统的生物科学之外，近几年又增加了深受广大教练员、运动员、体育科技工作者重视的运动生物化学等新兴学科。

运动生物化学是体育科学的一门基础学科，它对于认识、研究运动对人体物质组成的影响，机体内物质的化学变化规律及其特点，都作了定量的、科学的回答。它对于教练员制定训练计划、发展运动员的专项素质、都提供了丰富的令人信服的科学理论与数据。此外，它对于评价运动员身体素质的改善、疲劳的消除，都提出新的论述。

我们大家都认识到，当代体育运动的竞争，首先是科学技术的竞争；而科学技术的竞争，又是高科技高速度应用于体育上的竞争。为了提高我们国家速度滑冰的运动成绩，所以我们不仅要研究技术、战术、从形态上、遗传上心理上选材、观察、评价运动员的形态变化、速度的变化、精神状态的变化，而且还需要从微观世界、从细胞水平、分子水平来认识、观察、判断、分析运动员机体内的化学变化，也就是要研究化学变化的速度。长时期以来，训练方法一般凭目测、秒表来观察确定运动员速度的变化。那么决定这种速度变化的本质问题是什么呢？生物化学就是回答这一问题的最有力武器。它从能源物质的储备、酶的活性，产生的能量，就能予测出各项速度滑冰的运动成绩。

第一节 高能化合物

俗话说：火车跑的快、全靠车头带，这话言之有理，但是还没有说到实处，因为火车头是一个能量转换装置，它能把化学能转变为机械能。而人体的肌肉也可看作是一种效力非常高的能量转换装置，它也能将化学能转变成机械能，而且这种转变速度之快，力量之大也是惊人的。如果把人体内60亿条肌纤维同时收缩、可产生25吨力量；而腿的踢力可达半吨。

近年来，通过许多学科的综合研究，已经掌握了肌肉的微细结构与化学组成，以及肌肉收缩和松弛的分子机理。它好像一部复杂的机器，或者一架舰天飞机的发动机、我们重点研究它们的燃料→化学变化→效能。因为，在肌肉运动时能量供应的研究是现代科学训练中，设计训练方法和选择训练手段的重要理论依据。从生化角度来看，运动训练的重要任务之一，就是提高专项运动所要求肌肉产生或释放能量的能力。所以研究肌肉中能源物质的性质、利用，就必然成为当代运动生物化学专家，教练员、运动员、以及各级科研人员共同关心、注目的尖端重大科研课题。

一、高能键

生物化学，就是研究生命的化学。而能量供应是人体的各种肢体运动，内脏器官的活动、如心脏的跳动、血管舒缩的物质基础。

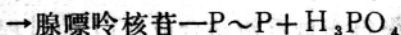
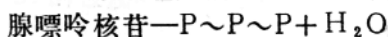
人们已经发现和合成了几百万种物质，为什么仅仅壹佰零几种元素的原子能够构成这么多的物质呢？原子是怎样结

合成分子的，为什么性质差别又很大，这些我们在中学化学里已经学过。为了使大家理解，我们还是对其中的一个重要概念再重温一下。原子可以结合成分子，所以原子之间必然存在着相互作用，有了这种作用，原子之间才联结成分子。所以我们就把这种相邻的两个或多个原子之间强烈的相互作用叫做化学键。

所谓高能键，我们知道，物质在分解时，所释放的能量，决定于该物质的化学本质，也就是决定于该物质分解时断裂的化学键的键能。不同的化学键，所贮备的能量不同；有的化学键水解时、释放的能量少（低于5千卡/克分子）一般叫低能键；反之，释放的能量多，（5—16千卡/克分子），这种键叫高能键。在运动生物化学中，我们常讲的高能键，指的就是含高能键的高能化合物——三磷酸腺苷（ATP）。

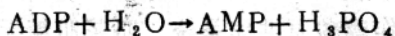
二、收缩肌的直接供能物质——ATP

ATP分子由腺嘌呤，核糖和三个磷酸残基组成。从结构式可见，ATP中有两个高能键，当在体外条件下时（PH = 7）：



+10千卡/克分子

再进一步反应时：



+6.5千卡/克分子

催化ATP水解成ADP的酶叫ATP酶： $\text{ATP} \rightleftharpoons$

ADP+Pi+能量

在激烈运动时，肌细胞内ATP消耗增多，故ADP浓度升高，肌激酶反应可以使2分子ADP产生1分子ATP，补充ATP和供能。

三、ATP的贮存量、代谢途径

大多数组织的细胞内存有ATP，不同组织的细胞内，ATP的含量相差很大。生理条件、年令、生长速度、药物和营养等因素也会影响细胞内ATP的含量。

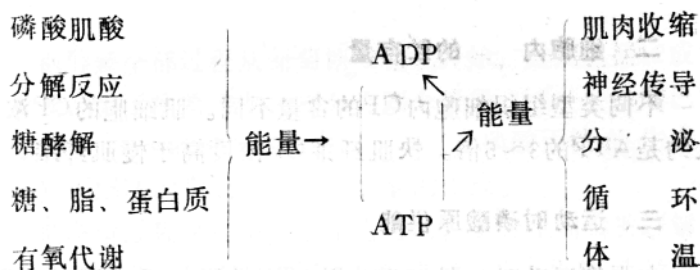
肌细胞内ATP贮量较少，运动训练不能明显促进贮量增加，肌细胞不能直接吸收血液或者其它组织的ATP。当肌肉收缩时，ATP的消耗必须得到迅速补充，才能维持正常的能量平衡。从能量观点看，ATP的消耗与恢复速度是影响肌肉运动能力的最重要因素。

ATP是生物体内瞬时能量的供体，不是能量的贮存形式，所以有人称呼ATP是能量流通的：货币：。

在生命过程中，细胞内ATP分子不断地消耗和合成，贮量虽小，但转换率非常高。如在安静状态条件下，成人24小时内约消耗40公斤ATP，在激烈运动时，ATP的利用率可高达0.5公斤/分。

ADP和Pi获得能量重新结合成ATP的过程叫磷酸化。细胞内可以提供能量合成ATP的代谢途径主要有三条，它们构成运动时的能量供应体系：磷酸肌酸（CP）分解释放能量合成ATP，一般称作磷酸原供能系统。肌浆肌糖无和葡萄糖无氧分解生成乳酸的过程中，释放能量合成ATP，称作糖酵解供能系统。在有氧条件下，糖、脂、蛋白质氧化分解生

成 $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$ 的过程，释放能量合成ATP，称作有氧代谢供能系统。



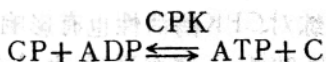
细胞内ATP合成利用略图

第二节 分解合成

任何运动开始时，ATP为直接供能物质，随着ATP的利用，贮量减少，新合成ATP的任务就由CP分解来完成。

1. CP的性质

CP是肌酸的磷酸化形式，分子内含有高能磷酸键，是高能磷酸化合物。高能磷酸键贮存的能量（10.3千卡/克分子）比ATP的末端高能磷酸键高。当前者高能键裂解时，释放的能量可以直接用以ADP磷酸化，生成ATP。



肌肉的收缩过程不能直接从磷酸肌酸摄取能量，所以CP不是肌肉收缩的直接能源。通常将CP称为高能磷酸基团的贮存库。

二、细胞内的贮存量

不同类型组织细胞内CP的含量不同。肌细胞的CP浓度大约是ATP的3~5倍。快肌纤维CP浓度高于慢肌纤维，

三、运动时磷酸原供能

大强度运动时，肌细胞动用ATP供能，几乎同时，CP分解释放能量。所以在研究能量供应系统时，我们把ATP—CP—和其它少量高能磷酸化合物合并，称作磷酸原系统。在三个供能系统中，该系统输出功率最大。

运动时，该系统的供能量与运动强度有关，在极限强度运动中，CP的下降速率比ATP快得多，运动至力竭时，CP的含量低于安静值的3%，接近耗尽。但是，ATP的含量从不低于安静值的60%。当以75% V_{O_2max} 强度运动时，CP的含量下降到安静值的20%左右，ATP的含量只是稍低于安静值。以低于60% V_{O_2max} 强度运动时，CP的含量几乎不变，需要的能量基本上由有氧代谢供能。所以，磷酸原系统在短时间，最大强度运动的能量供应中起着重要作用。例如，短跑、举重、冰球的快速进攻等。

短跑训练中，快肌纤维首先动用，所以，使用，合成和贮存CP的能力得到适应性改善。速度、力量性训练能使肌肉内CP的含量增加，训练对CPK酶活性也有影响。速度训练后的动物，酶活性提高20%。高水平运动员在100米开

始，消耗ATP—CP的效率比一般人高得多，因而跑得快。

第三节 糖酵解合成 ATP

糖酵解全部过程从葡萄糖或糖无开始，分别包括12或13个步骤，为了简要说明，划分为四个阶段：（一）磷酸己糖的生成、6—磷酸果糖的生成、（二）磷酸丙糖的生成，（三）丙酮酸的生成，（四）乳酸的生成。

糖酵解过程是在细胞液中进行的。1分子葡萄糖酵解产生2分子乳酸，生成2分子ATP。酵解虽然产生的能量少，但它是激烈运时能量的重要来源。

一、运动时乳酸的生成

正常时，肌肉靠有氧代谢合成ATP，只有少数组织在有氧情况下从糖酵解获得能量，如皮肤、视网膜、红细胞等。这些组织产生的乳酸能迅速扩散入血，一般血乳酸安静值在1 mM/L左右，

当运动时，乳酸的生成与代谢速率有关，激烈运动时，肌肉能量需要增多，糖分解速率加快。以下三种情况也导致肌乳酸生成增多：① 运动强度超过运动肌最大有氧代谢供能速率，② 收缩肌肉局部性缺血，造成氧的供应不足。③ 收缩肌细胞内线粒体的最大氧化能力被激活之前。

研究证明，血乳酸升高的运动强度，非训练者在50%， $V_{O_2\max}$ ，耐力运动员在60~70% $V_{O_2\max}$ ，这种低强度活动时乳酸生成的原因比较复杂。可见，运动时乳酸生成增多，并不一定意味着肌肉内缺氧，但是，当肌肉缺氧时，增

强肌肉活动，一定会促进乳酸的生成。

糖酵解中ATP的合成量，仅仅是完全氧化时的5%左右，但是它在激烈运动时ATP合成方面具有特殊的地位。

二、肌乳酸和血乳酸

(一) 二者的相互关系

肌肉是产生乳酸的主要场所，生成后通过细胞膜的转运系统进入血液成为血乳酸。它们之间的平衡过程大约是4~10分钟。

乳酸在体内不是均匀分布的，如在3分钟的力竭性运动后5分钟，脑脊液为 1.7mM/L 。

人体运动时肌乳酸和血乳酸的最高浓度报导不一。在一次或多次最大强度运动时，肌乳酸超过 25mM/公斤湿肌 ，血乳酸可超过 20mM/L ，间歇性动力运动时，血乳酸可达 $30\sim 32\text{mM/L}$ 。持续肌收缩后血乳酸也达到相似值。推测，肌乳酸浓度必然会更高，可达 40mM/公斤湿肌 。前几年，一位专家断言，速滑运动员在最大负荷训练之后，血液乳酸达到 $230\sim 250$ 毫克%（及其它条件），他在国际比赛中才可望进入500米、1000米、1500米速度滑冰前三名。

(二) 血乳酸

在运动实践中，测定血乳酸，已经在游泳、田径、速度滑冰等国家队中展开，并取得良好成绩。但是对血乳酸的动态变化等一系列基础理论，我们还需深入研究。

作为调整训练负荷量的依据，血乳酸浓度上升或下降，是由肌肉乳酸的生成速率和体内消失速率之间的平衡来决定的。运动时乳酸的生成速率依赖于收缩肌糖酵解供能的速

率，向乳酸的消失速率与肝糖异生作用和心肌、骨骼肌等外周组织氧化乳酸的速率有关。当生成速率与消失速率相等时，血乳酸保持稳态水平；当提高运动负荷使乳酸的生成速率超过消失速率时，则血乳酸水平持续上升；反之，血乳酸水平逐渐下降。

当然，影响血乳酸水平的因素还有以下几种：

1、运动强度和运动持续时间：以 $50\sim 60\% V_{O_2max}$ 强度运动时，通常只能使不适应运动的人血乳酸水平升高。在一般运动员，尤其是耐力性运动员、肌肉糖酵解供能少，肌红蛋白贮存氧和循环系统供应氧能够随时满足有氧代谢供能的需要。在中等强度运动时，5~10分钟内，血乳酸水平缓慢上升，然后保持不变或者逐渐下降并维持在稍高于安静值水平上。原因是循环系统供氧能力、细胞利用氧的能力对运动作出适应性对应，表现在血压升高和心输出量增大，使血液更好地充盈运动肌，有氧代谢能力增强。肌纤维的募集方式有改变，红肌纤维征用的相对比例增大，它的氧化能力比白肌强。外周组织利用乳酸的加强，主要是肝内以乳酸作基质的糖异生作用和心肌、非活动肌氧化乳酸的加强。

在大强度运动中：血乳酸浓度持续上升，直到表现为疲劳而停止运动。这是因为，在整体达到最大吸氧量以前，运动肌肉能量需要已超过有氧代谢的供能的极限量。局部血流阻塞引起收缩肌肉供氧不足。

运动时间影响血乳酸浓度：在短时间剧烈运动后，血乳酸达到最大值，肌乳酸与血乳酸之间的平衡在运动后恢复期内完成。

在8分钟左右达到力竭的运动时，运动后即刻，肌乳酸

与血乳酸浓度已经相当接近，基本上达到平衡，血乳酸浓度已经是最高值。在长达1—2小时运动中，最高血乳酸浓度出现在运动初期，随着时间延长逐渐下降，运动结束时，达到安静时水平。

在研究耐力性运动负荷方面，经常用血乳酸的浓度变化说明体内糖酵解代谢情况，作为训练中掌握运动强度的依据，一般认为，血乳酸低于18毫克%（即2 mM/L）时，体内以有氧代谢供能为主；血乳酸18毫克%称为有氧代谢阈。当血乳酸高于18毫克%，而低于36毫克%（即4 mM/L）时，为有氧代谢向无氧代谢转换。超过36毫克%时，则无氧代谢供能占明显优势，而且随着运动强度加大，血乳酸水平急剧上升。所以，把36毫克%乳酸值称为无氧代谢阈值，这时心率一般在170次/分左右。

2 肌糖原浓度：当执行相同运动负荷的肌肉内，糖原水平低的运动肌乳酸浓度低于糖原水平高的运动肌，这说明肌糖原含量多时糖酵解的燃料充足，所以乳酸生成多。

3、训练水平：在相同负荷亚极量强度运动时，耐力训练的人与非训练者比较，肌乳酸和血乳酸水平的升高相对较少。在超过 $\dot{V}O_2\text{max}$ 强度运动时，训练水平高者，体内产生乳酸和耐受乳酸的能力都比非训练者高，故血乳酸水平更高。

4、其它因素：年令、性别、肌纤维类型等。同等条件强度下，男性产生乳酸要高15~25毫克%。白肌纤维内酵解酶活性高、所以生成的乳酸多。

三、乳酸代谢

(一) 乳酸氧化成 CO_2 和 H_2O

在氧充足的条件下，骨各肌、心肌或其它组织细胞内，乳酸 \rightarrow 丙酮酸，参加三羧酸循环，生成 CO_2 和 H_2O 。

(二) 乳酸转变成葡萄糖或糖原：乳酸进入肝脏，经糖异生反应合成肝糖原。

(三) 运动后血乳酸的消失速率

恢复期血乳酸的消失半时反应为10~15分钟。运动后血乳酸消失速率与恢复期活动状态有关，运动后整理活动是消除乳酸的有效方法。但是，恢复期以中等强度(63%最大吸氧量)运动，能使血乳酸消失速度提高3倍，最大值为8毫克/100毫升血液分。如果继续提高恢复期运动强度，血乳酸消失速率下降。如果慢收缩肌纤维的百分含量高，乳酸消失速率也高。

第四节 有氧代谢合成 ATP

在无氧条件下，从已糖分解到乳酸，仅释放有限的能。在有氧条件下，糖的代谢从丙酮酸生成以后，产生乙酰辅酶A，进入三羧酸循环。该反应发生在细胞的线粒体内，1克分子葡萄糖完全氧化成 CO_2 和 H_2O 时，可生成38克分子ATP。

一、运动训练对线粒体的影响

运动训练会使骨骼肌细胞内线粒体发生改变，尤其是耐

力性运动训练，引起线粒体的形态、数目、组成发生明显变化。如耐力训练后，肌纤维的线粒体数目增多，体积增大，形态改变，表现为往圆形方向膨胀。线粒体内蛋白质、磷脂含量明显增多，细胞耗氧量明显增加，有氧代谢合成 ATP 的能力提高。

不同强度有氧代谢运动训练，对快、慢肌纤维线粒体的有氧代谢酶活性影响不一样。最大吸氧量强度的间歇训练，琥珀酸脱氢酶活性最大程度增高，仅发生在快肌纤维。当以 $80\% \dot{V}O_2 \max$ 强度的间歇训练时，细胞色素氧化酶活性增高，发生在慢收缩肌纤维。

二、运动时糖有氧代谢供能

(一) 肌糖原的动用：占人体糖贮量 70% 的肌糖原，是大强度运动期间和运动最初几分钟氧供应不足时的主要能量。在 3 小时稳态速率跑台运动中，最初几分钟内，腓肠肌糖原快速下降，在 90 分钟内肌糖原利用的速率最大，而后，肌糖原利用的速率也减慢。肌糖原利用的速率依赖于多方面因素，如运动强度，持续时间、训练水平、运动模式、环境温度，运动前饮食。

1、运动强度：运动强度增大时，肌糖元动用速率相应增大，在超过 $90 \sim 95\% \dot{V}O_2 \max$ 强度运动时，几乎全部动用糖作燃料，当以 $20 \sim 30\% \dot{V}O_2 \max$ 强度步行时，肌糖元很少被分解。

2、运动时间：在 $60 \sim 85\% \dot{V}O_2 \max$ 强度长时间运动接近力竭时，肌糖原消耗最大，几乎全部耗尽。

3、肌纤维类型：运动肌各种肌纤维内肌糖原的动用量不

是均等的。在低于70% $\dot{V}O_{2\max}$ 长时间运动期间，I型肌纤维内糖原下降最多，证明这类肌纤维最适宜中、低强度运动的能量供应。随着运动强度增大，首先募集II a型肌纤维，在最大强度运动时，全部动用II b型肌纤维肌糖原迅速分解，下降量最多。

4、运动模式：体育项目不同，直接参与收缩的肌肉群不相同，运动时肌肉糖原动用速率也不相同。长跑运动员跑2小时后，腓肠肌和比目鱼肌肉糖原消耗比股外侧肌多。另一方面，以相同强度和进行自行车运动时，自行车运动员股外侧肌糖原的消耗比跑步运动员多，所以，不同的运动方式，可以引起特定肌群内糖原动用，相伴出现局部肌糖原消耗尽和疲劳。

5、训练水平：长时间的耐力训练，可以提高肌肉氧化糖、脂肪的能力。高训练水平的运动员，执行给定负荷运动时，动用脂肪酸氧化供能的能力较大，相应地肌糖原动用速率减慢，所以在运动时，加强脂肪酸氧化起着节省糖动用的作用。

6、饮食：运动前30分钟内或者运动间歇适量吃糖，促进运动肌吸收和利用血糖，抑制脂解作用，降低内源性糖贮备的消耗。此外，运动前动员脂肪酸，升高血液中脂肪酸的浓度。如运动前1小时喝咖啡，可以使肌肉氧化脂肪酸的比例增大，当然也能减少肌糖原的动用速率。

环境温度也影响运动时肌糖原的动用速率，如在气温41℃，湿度15%的热环境条件下，运动75分钟与气温9℃，55%湿度的冷环境条件下，作相同负荷运动，比较结果，前者糖原利用量增高76%。

(二) 运动肌吸收和利用血糖

在有氧运动中，单独由肌糖原氧化合成ATP，只能维持最大有氧代谢运动不到60分钟，所以运动肌必须吸收和利用肌外燃料血糖和血脂肪酸。

血糖是中枢神经系统的基本燃料，也是长时间运动肌肉的重要燃料。安静时，肌肉吸收血糖的量很少，不到肌肉总耗氧量10%。运动时，运动肌肉吸收和利用血糖增多，多少与运动强度，运动时间和运动前肌糖原含量多少有关。

在长时间运动时，运动肌不断吸收血糖，可以缓解肌糖原耗竭。在中等强度自行车运动初期，运动肌吸收血糖急剧上升，在运动40分钟时，净吸收血糖的量是运动前的7~20倍，强度大的吸收量达运动肌能量消耗的40%。在运动90分钟后，运动肌吸收血糖下降，这是肝糖原接近耗竭，血糖水平下降的结果。

运动肌大量吸收和利用血糖，必须与肝糖原分解和糖异生释放葡萄糖相联系，否则引起低血糖。

(三) 肝脏释放葡萄糖

用 ^{14}C 标记葡萄糖，直接测定肝释放葡萄糖的数量，揭示随着运动强度增大和运动时间延长，肝糖原分解和糖异生速率都加快，葡萄糖释放量增多。

正常膳食后安静时，肝葡萄糖释放量较低为 $0.8\sim 1.1\text{ mM}/\text{分}$ ，其中肝糖原分解提供的约占 $2/3$ ，其余由糖异生提供，大强度运动开始后 $10\sim 15$ 分钟，肝葡萄糖释放量增多。低强度运动时，肝葡萄糖的速率较低。已经证明，在中等强度运动4小时，肝糖原贮量可减少75%，同时，乳酸、丙酮酸、甘油、生糖氨基酸的生糖作用增强。运动3小时以