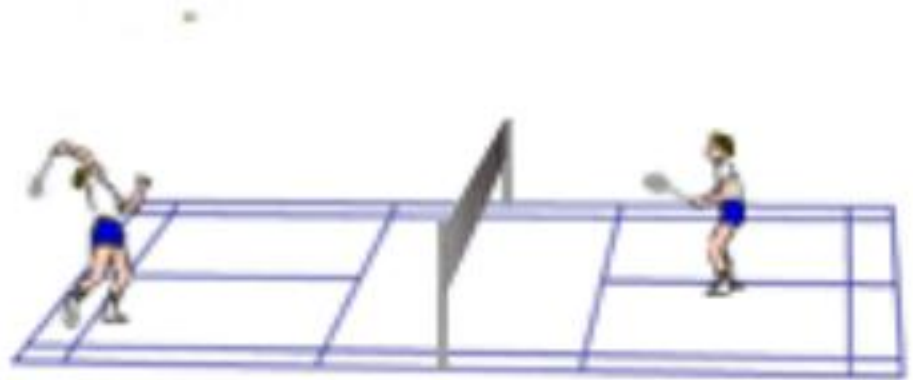


第二章 能量代谢

主讲：郝选明教授

华南师范大学



本章主要内容



人体能量的供给

.....●



人体能量代谢的测定

.....●



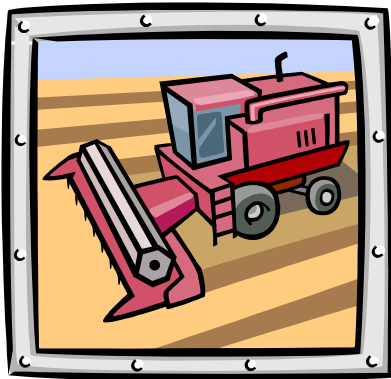
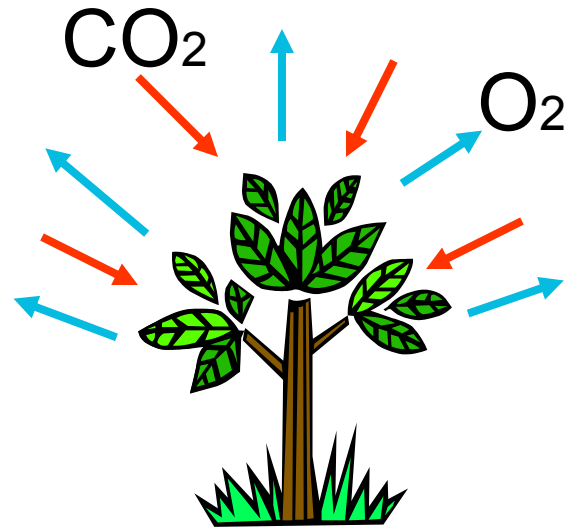
运动状态下的能量代谢

.....●

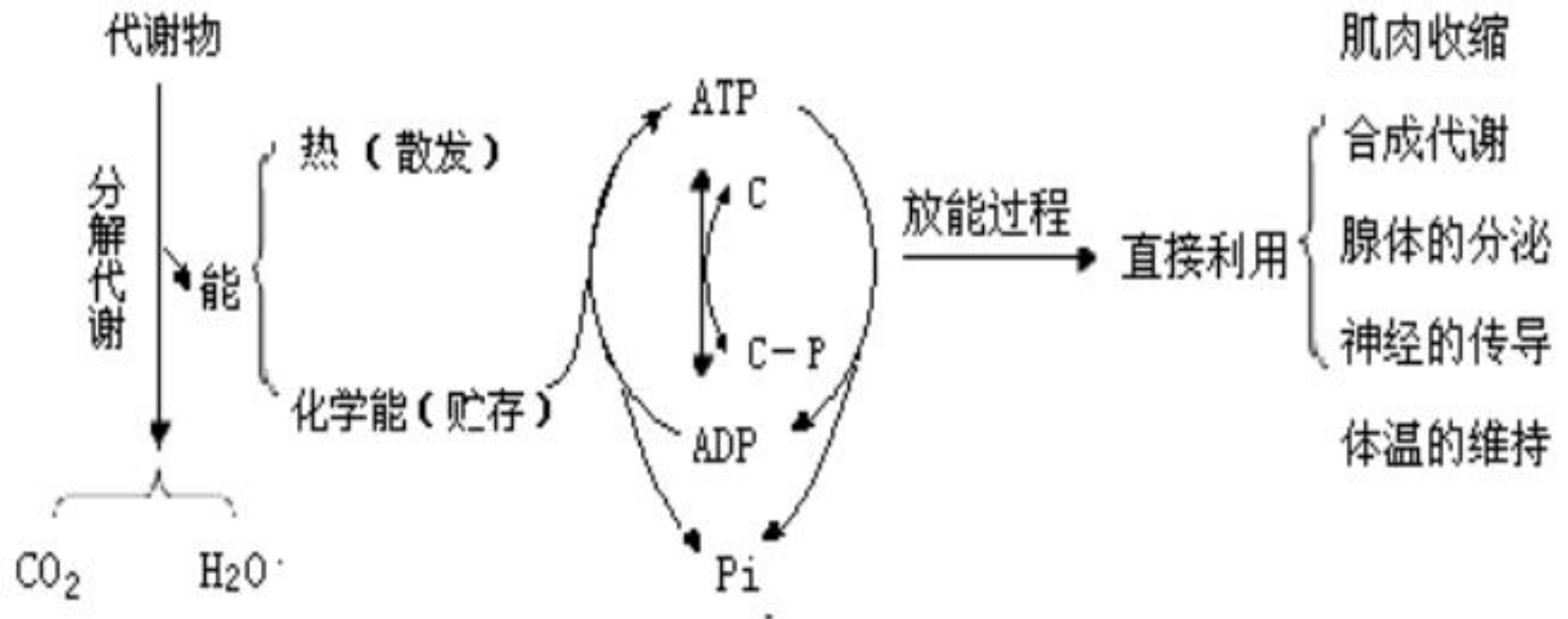
第一节 人体能量的供给

何为能量代谢？

在生命的运转过程中，机体通过合成代谢将从外界摄取的营养物质转化为自身物质并储存能量，通过分解代谢将自身物质分解并释放能量，完成各种生命活动。因此，生命活动总是伴随着能量的储存、释放、转移和利用。一般将生物体内物质代谢过程中所伴随的能量储存、释放、转移和利用，称为**能量代谢**。



能量的来源和去路

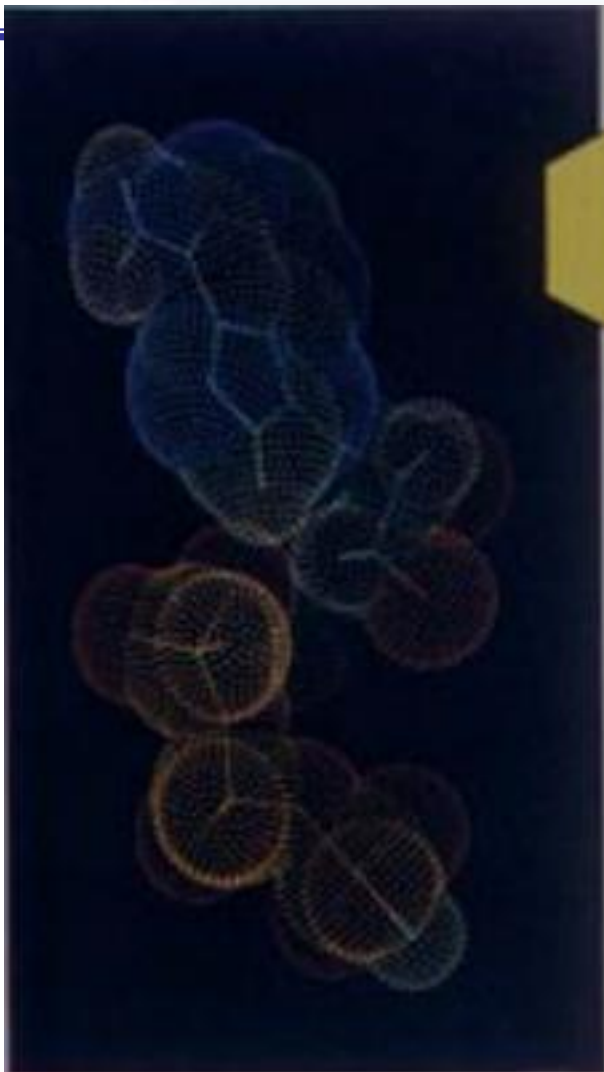
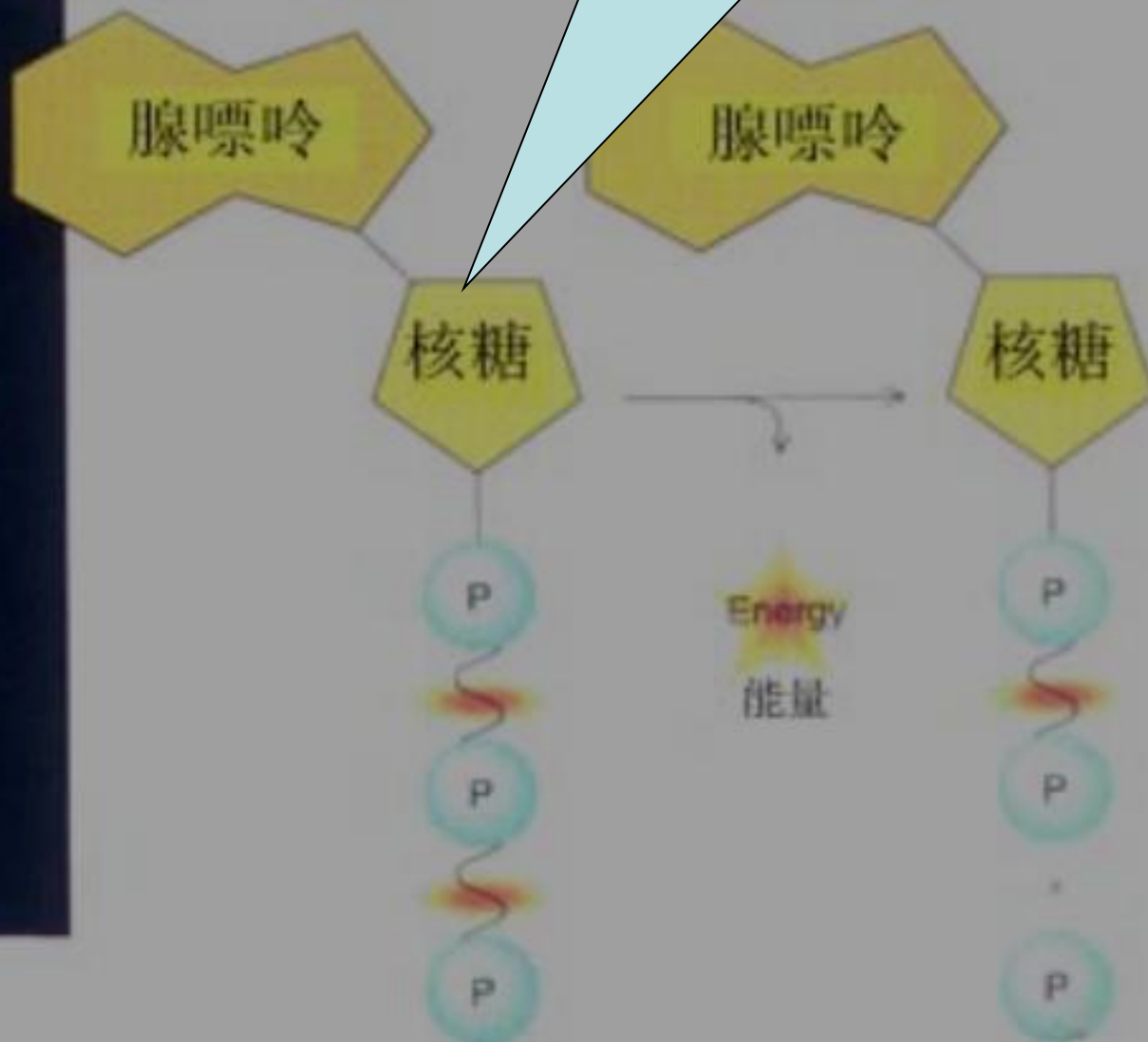


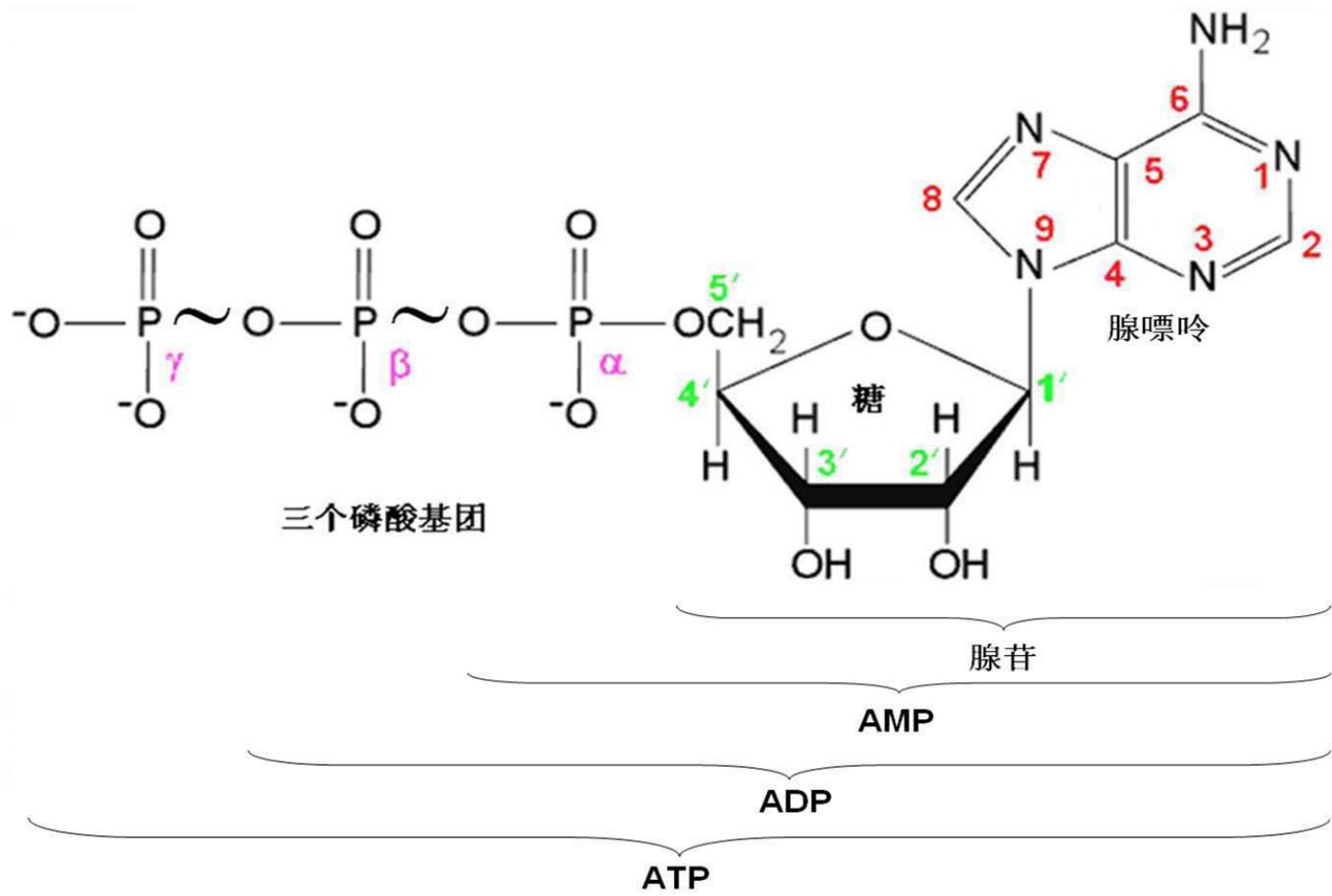
能量的直接来源：ATP

- (一) ATP的分解放能
- (二) ATP的再合成—吸能
- (三) ATP的分解与再合成的关系



ATP的化学结构





ATP的分解放能

ATP的分解放能，就是被酶断开末端高能磷酸键，即：



肌肉收缩就是利用肌细胞内ATP分解释放的能量供肌肉收缩克服阻力来做功，以实现化学能向机械能的转化。

ATP的再合成

1. ATP的无氧生成——底物水平磷酸化

在胞浆中进行的无氧过程，其基质是CP、G和Gn。

2. ATP的有氧生成——氧化磷酸化

是糖、脂肪在线粒体中进行的，通过三羧酸循环。脱下的 H^+ 经过呼吸链传递最终生成 CO_2 和 H_2O ，此过程多次放能。

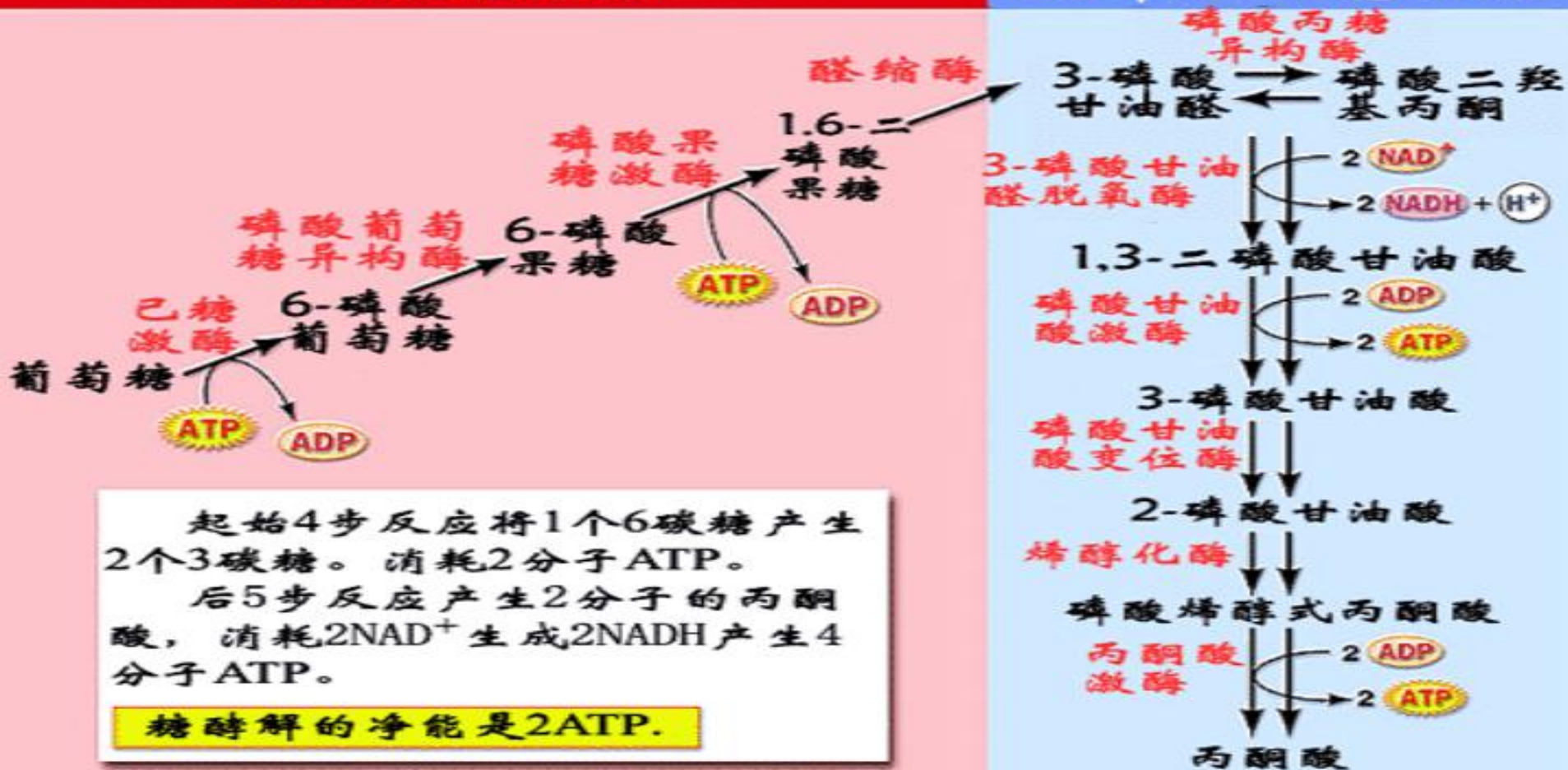
糖有氧氧化过程

第一阶段：糖酵解途径

糖酵解

大量吸能反应

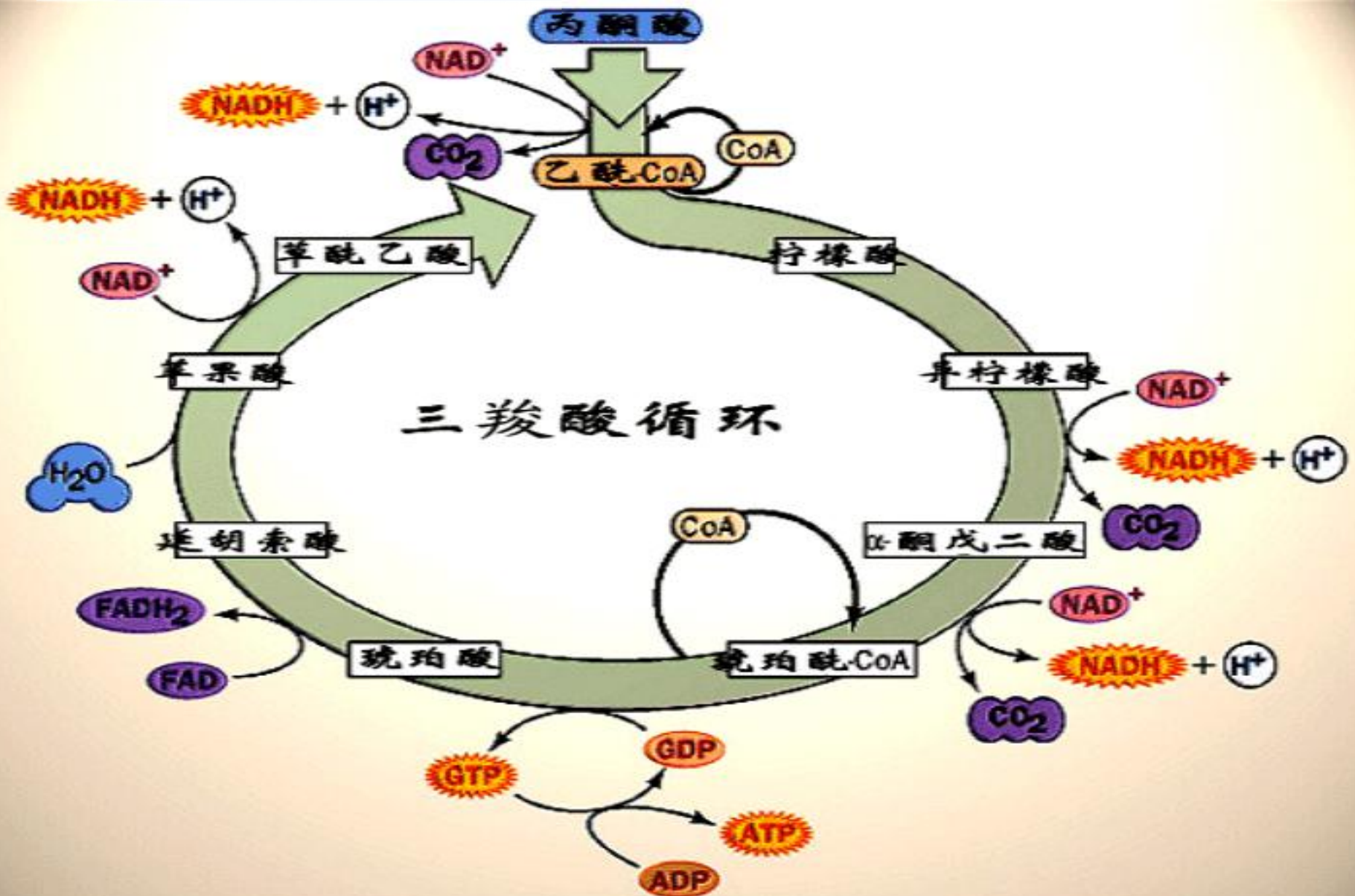
大部分放能反应

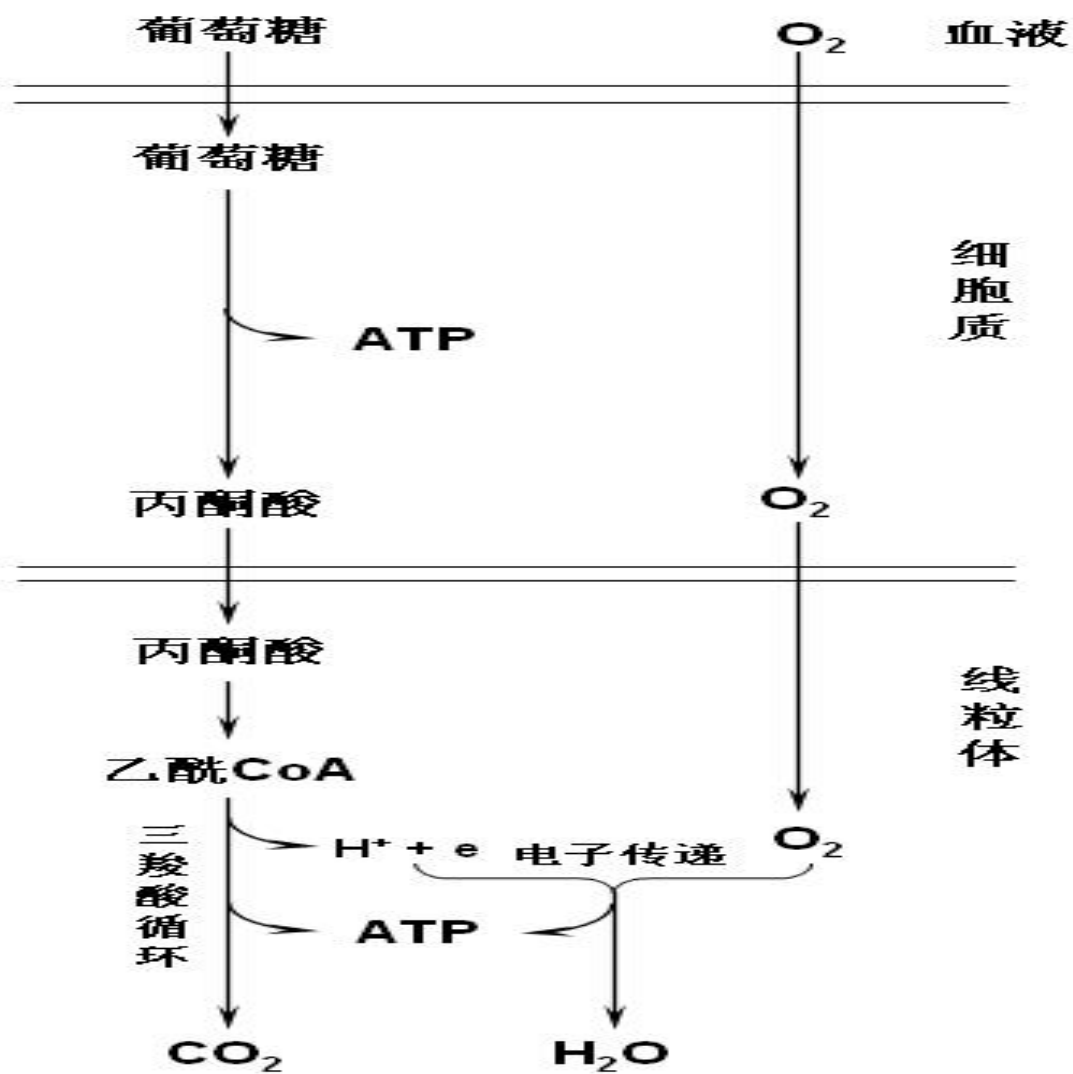


第二阶段：丙酮酸 \longrightarrow 乙酰辅酶A

- ∞ **供氧不足时**，糖酵解途径生成的NADH不能进入线粒体氧化，使丙酮酸留在胞浆作为氢受体转变成乳酸；
- ∞ **氧气充足时**，NADH进入线粒体，丙酮酸也进入线粒体通过脱羧、脱氢反应氧化生成乙酰辅酶A。

第三阶段：三羧酸循环





ATP的分解与再合成

- ① ATP是生物体内能量供应的通用货币；
- ② ATP的含量少，必须边分解边合成；
- ③ 运动中ATP合成速率下降标志着能量代谢受阻，疲劳将发生。



能量的间接（最终）来源

∞ 糖：(50%--70%)

主要能源物质。脑组织所需能量则完全来源于糖的有氧氧化。缺氧和血糖水平过低，均可导致意识障碍、昏迷以及抽搐。

∞ 脂肪：次之(30%)

∞ 蛋白质：很少(长期饥饿或极度消耗时，才成为主要能量来源)。

糖代谢

1. 糖在体内的存在形式：

肝糖元、肌糖元和血糖。

- ∞ **肌糖**：含量为350—400g，是肌肉活动的重要能量来源，优秀运动员可达700g。
- ∞ **肝糖原**：为100g左右，可调节血糖的恒定。
- ∞ **血糖**：血液中的葡萄糖，浓度为80—120mg/100ml。

2. 糖的分解代谢:

无氧酵解: 无氧 \longrightarrow HL + 能量

有氧氧化: 有氧 \longrightarrow $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{能量}$

3. 糖与运动能力

肌糖、肝糖、血糖与运动能力的关系

肌糖耗竭是运动性疲劳产生的原因; 运动后可获得肌糖的超量恢复。

剧烈运动时, 肝糖浓度有特殊作用, 进而使肌糖浓度稳定有重要作用。

血糖水平对运动能力有重要影响



脂肪代谢

1. 脂肪的储存与动员:

甘油三脂 \rightleftharpoons 游离脂肪酸 + 甘油

2. 脂肪的分解代谢:

脂肪 \longrightarrow 脂肪酸 $\xrightarrow{\beta\text{-氧化}}$ 乙酰辅酶A \longrightarrow 三羧酸循环
 $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{能量}$



蛋白质代谢

1. 蛋白质的组成

蛋白质 \longleftrightarrow 氨基酸

2. 蛋白质的分解代谢:

蛋白质 \longrightarrow 氨基酸 \longrightarrow 脱氨基变成酸（氨基合成尿素） \longrightarrow 分别在不同位置进入三羧酸循环:

$\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{能量}$

各种代谢途径供能总量与效率

	肌肉组织ATP供应量 ($\text{mmol}\cdot\text{kg}^{-1}$)	ATP最大合成效率 ($\text{mmol}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$)
$\text{CP} \rightarrow \text{ATP} + \text{C}$	15-20	1.6-3.0
糖原 (葡萄糖) \rightarrow 乳酸	240	1.0
糖原 (葡萄糖) $\rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$	3 000	0.5
脂肪酸 $\rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$	不受限制	0.24

第二节 人体能量代谢的测定

人体通过能量代谢所释放的自由能在体内可以转化为机械能（肌肉收缩）、化学能（合成代谢）、渗透能（吸收、分泌）、电能（神经传导、生物电）和热能（维持体温）等。从能量转换的角度考虑，这些能除骨骼肌活动时完成的机械功外，在体内完成各种生理活动所消耗的能量最终也能转变为热能。

机械功也可将其折算为热量（1 kg · m的功相当于0.0024 kcal的热量，1kcal = 4.1868kJ）。

能量代谢测定原理

机体代谢过程中，由营养物质氧化所释放的能量，应等于它最终转化在的热能和所做的机械功之和。

在能量代谢的实际测定中，如果机体处于静息状态，而未做外功，所释放的能量应全部转化成热能散发，测定单位时间内机体所产生的热量就可测算出机体的能量代谢。

如果机体在运动或劳动时，则在测定其发散热量的同时，应再加上机体在该时间内用于完成外功（机械功）所折算的热量，就会得出运动或劳动情况下为机体所消耗的总能量。

测定人体运动时的能量代谢通常通过气体代谢的方法进行。其原理是根据营养物质在体内氧化分解时，必须消耗 O_2 ，同时将代谢终产物 CO_2 呼出体外。

由于机体的耗氧量和 CO_2 的排出量与释放的热量之间呈一定的比例关系（即定比定律），因此可测定机体在一定时间内的耗氧量和 CO_2 产生量，然后根据食物的热价和氧热价、呼吸商等数据，就可以间接推算出该时间内机体的产热量。

能量代谢测定方法

物质在机体内氧化分解和在体外氧化分解（燃烧）都服从能量守恒定律。

根据这一原理，计算一定时间内人体中氧化分解的糖、脂肪和蛋白质各有多少，就可计算出整个机体单位时间内释放的热量。

食物热价

1g食物氧化时产生的热量称为食物热价 (thermal equivalent of food) 或卡价 (caloric value of food)。

食物的热价分为物理热价和生物热价。前者为食物在体外燃烧时释放的热量，后者指食物在体内完全氧化时所产生的热量。由于蛋白质在体内不能完全氧化分解，一部分以尿素的形式排出体外，故蛋白质的生物热价小于它的物理热价。

氧热价

某种食物氧化时消耗1升氧所产生的热量，即氧热价（thermal equivalent of oxygen）。

氧热价应用于整个机体，就可以根据机体单位时间内的耗氧量来推算出它的能量代谢。

呼吸商

要计算总热量，还需要知道三种营养物质各氧化了多少。由于各种营养物质氧化时的耗氧量和 CO_2 产量均呈一定比例，所以计算单位时间内机体的 CO_2 产量与耗氧量的比值理论上就可较为精确地推算出三种营养物质氧化分解的比例。

同一时间内机体 CO_2 的生成量和耗氧量的比值称为呼吸商（respiratory quotient, RQ）

日常生活中，进食的是糖、脂肪和蛋白质的混合膳食，机体几种食物同时分解氧化，呼吸商常变动于0.71~1.00之间，具体值取决于机体内三种营养物质氧化分解的比例。一般情况下，混合膳食的呼吸商约在0.85左右。

剧烈运动时呼吸商会出现 < 1 的情况。

糖、脂肪和蛋白质的氧化生热指标

•营养物质	产热量 (kJ/g)		耗氧量 (L/g)	CO ₂ 产量 (L/g)	氧热价 (kJ/L)	呼吸商 (RQ)
	物理热价	生物热价				
糖	17	17	0.83	0.83	21	1.00
脂肪	39.8	39.8	2.03	1.43	19.7	0.71
蛋白质	23.5	18	0.95	0.76	18.8	0.80

能量代谢影响因素

- ∞ 肌肉活动
- ∞ 环境温度
- ∞ 食物的特殊动力效应
- ∞ 精神与情绪活动
- ∞ 其他因素（种族、年龄、性别、身体成分等）

活动类型	能耗量	
	kcal·h ⁻¹ ·m ⁻²	kJ·h ⁻¹ ·m ⁻²
醒 卧	40	167
坐	50	209
书 写	60	251
站 立	85	356
洗 衣	100	412
家 务	140	586
散 步	140	586
骑自行车	250	1047
游 泳	350	1465
伐 木	350	1465
滑 雪	500	2094
跑 步	600	2512

基础代谢与基础代谢率

∞ 基础代谢 (basal metabolism)：是指人体在清晨极端安静状态下，不受精神紧张、肌肉活动、食物和环境温度等因素影响时的能量代谢。

∞ 基础代谢率 (basal metabolic rate, BMR)：单位时间内的基础代谢，称为基础代谢率通常以每小时、每平方米体表面积的热量 (kJ/m² · h) 来表示。

基础条件

- ① 清晨空腹，餐后12小时以上，前次进餐为素食，且不宜过饱，以排除食物特殊动力作用的影响；
- ② 室温保持在20-25℃，排除环境温度的影响；
- ③ 测定前避免剧烈活动，休息30分钟左右。测定时平卧，全身肌肉放松，尽量排除肌肉活动的影响；
- ④ 受试者消除紧张、焦虑、恐惧等，排除精神紧张的影响；
- ⑤ 受试者体温正常。

中国人正常的基础代谢率平均值 (kJ/m²·h)

年龄 (岁)	11~15	16~17	18~19	20~30	31~40	41~50	51以上
男性	195.5	193.4	166.2	157.8	158.7	154.1	149.1
女性	172.5	181.7	154.1	146.4	142.4	142.4	138.6

第三节 运动状态下的能量代谢

三大供能系统

- ◆ ATP-CP系统（磷酸原系统）
- ◆ 无氧糖酵解系统（乳酸能系统）
- ◆ 有氧氧化系统

ATP-CP供能系统

- ∞ **概念：**通常是指ATP和磷酸肌酸（CP）组成的系统，由于二者的化学结构都属于高能磷酸化合物，故称为磷酸原系统（ATP—CP系统）。
- ∞ **供能时间：**ATP：2S； CP： 3—5S。
- ∞ **输出功率：**56J/kg. s
- ∞ **供能特点：**供能总量少，持续时间短，功率输出最快，不需要氧，不产生乳酸等类中间产物。
- ∞ **主要供能的运动项目：**高功率输出项目，如短跑、投掷、跳跃、举重等运动项目。

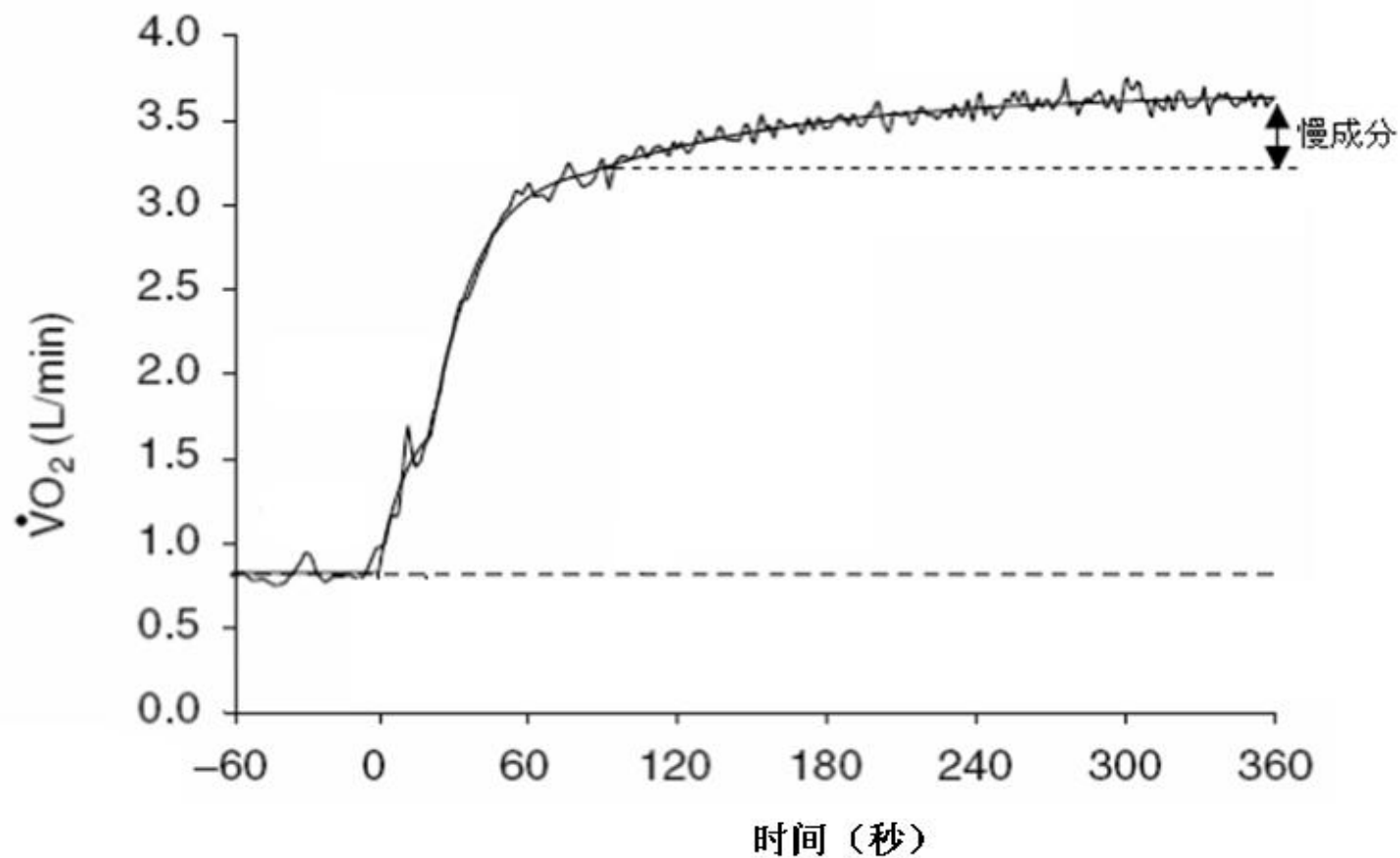
无氧糖酵解供能系统

- ☞ 概念：乳酸能系统是指糖原或葡萄糖在细胞浆内无氧分解生成乳酸过程中（又称酵解），再合成ATP的能量系统。
- ☞ 供能时间：33S
- ☞ 输出功率：29.3J/kg. s
- ☞ 供能特点：供能总量较磷酸原系统多，持续时间较短，功率输出次之，不需要氧，终产物是导致疲劳的物质——乳酸。血乳酸常用来衡量乳酸能系统供能能力。
- ☞ 主要供能的运动项目：1分钟高功率输出项目，如400米跑、100米游泳等。

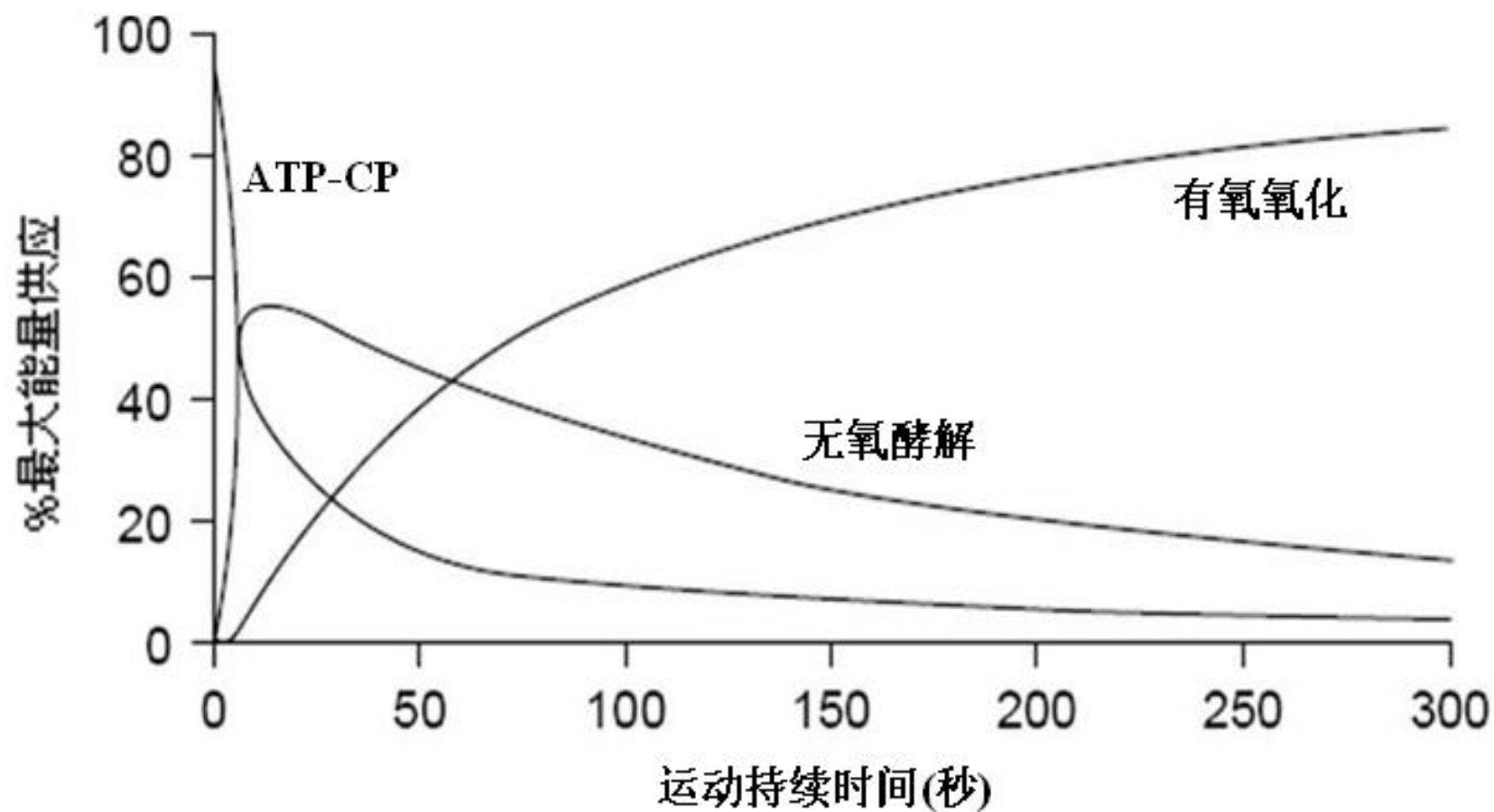
有氧氧化供能系统

- ∞ 概念：指糖、脂肪和蛋白质在细胞内彻底氧化成 H_2O 和 CO_2 的过程中，再合成ATP的能量系统。
- ∞ 能量容量：几乎无限大。
- ∞ 输出功率：15J/kg. s
- ∞ 供能特点：ATP生成总量很大，但速率很低，持续时间很长，需要氧的参与，终产物是 H_2O 和 CO_2 ，不产生乳酸类的副产品。为长跑等耐力性项目供能。
- ∞ 评定有氧工作能力的指标：最大摄氧量和无氧阈等。

大强度运动时摄氧动力学变化



运动时过程中各供能系统供能情况变化



不同运动时间有氧、无氧供能比例

大强度运动的持续时间 (s)	无氧 (%)	有氧 (%)
0~10	94	6
0~15	88	12
0~20	82	18
0~30	73	27
0~45	63	37
0~60	55	45
0~75	49	51
0~90	44	56
0~120	37	63
0~180	27	73
0~240	21	79

肌肉活动时能量供应的代谢特征

(一) ATP供能的连续性

在肌肉完成任何形式的运动时，能量应必须是连续的，否则肌肉工作会因能量供应中断而无法实现。即ATP的消耗与其再合成之间必须是连续性的。



(二) 耗能与产能之间的匹配

肌肉活动随着运动强度的变化而对能量需求有所不同，强度越大，耗能也越大，这要求产能速率必须与耗能强度相匹配。否则，运动就不能以该强度持续运动，这是由ATP供能的连续性决定的。



(三) 供能途径与强度的对应性

肌肉在完成不同强度运动时，优先启动不同的供能系统与运动强度的对应性是由产能和耗能速率的匹配关系决定的。



(四) 无氧供能的暂时性

根据能量统一体理论，ATP再合成的无氧方式与有氧方式是一个统一体。启动哪一种方式供能取决于运动强度的变化，当运动强度耗能速率大于有氧产能最大速率时，必然动用产能更快的无氧方式，以满足该状态的代谢需要。



(五) 有氧代谢的基础性

从细胞的结构和功能来看，有氧供能是机体生命活动最基本的代谢方式。它具备完善的代谢场所、途径、方式和调节系统。另外，运动时无氧代谢产物的清除及疲劳和能源物质的恢复等必须依赖于有氧代谢来完成。



步态运动状态下供能系统供能特征

(一) 最大强度的短时间运动

最大强度的运动必须启动能量输出功率最快的磷酸原系统。

(二) 中低强度的长时间运动

运动的前期以启动糖有氧氧化供能为主，后期随着糖的消耗程度增加而逐渐过渡到以脂肪氧化供能为主。



(三) 递增速度的力竭性运动

- ∞ 运动开始阶段：有氧氧化系统供能为主；
- ∞ 运动负荷逐渐增大：无氧供能比例随之增加。



(四) 强度变换的持续性运动

以有氧供能为基础的混合性一类运动。其特点是：以CP供能快速完成技战术的配合，间歇时靠有氧能力及时恢复的持续性运动，运动中乳酸能参与的比例较小。



A misty mountain landscape with pine trees in the foreground and the text '谢谢大家!' overlaid. The scene is dominated by a thick layer of white mist or fog that partially obscures the jagged, rocky peaks of the mountains in the background. In the foreground, several dark green pine trees are silhouetted against the lighter background. The overall atmosphere is serene and somewhat ethereal.

谢谢大家!