

第六章 生物氧化



新陈代谢 (物质代谢和能量代谢)

物质 代谢	分解代谢	大分子分解为小分子	释放能量	能量 代谢
	合成代谢	小分子合成为大分子	需要能量	

食物中的化学能

生命活动的能量

生物氧化

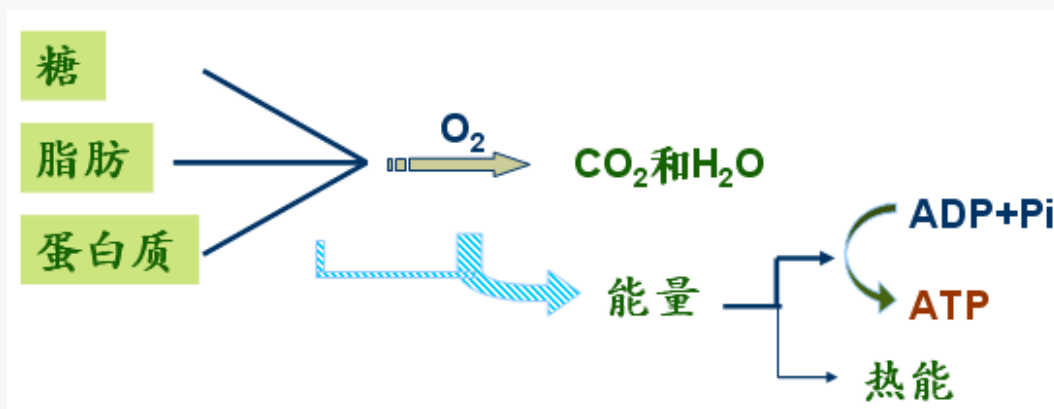
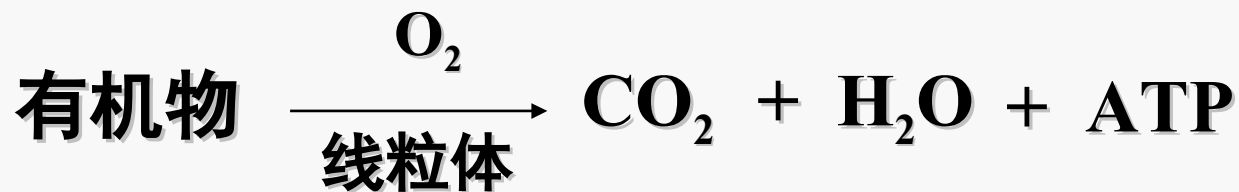


The diagram illustrates the process of energy conversion. A blue curved arrow points from the box '食物中的化学能' (Chemical energy in food) on the left to the box '生命活动的能量' (Energy for life activities) on the right. Below this arrow, centered, is a yellow box with the text '生物氧化' (Biological oxidation) in red.

第一节 概述

一、概念：

营养物质在生物体内**彻底氧化**生成**二氧化碳和水**，并逐步释放能量的过程，称为**生物氧化** (Biological Oxidation)。

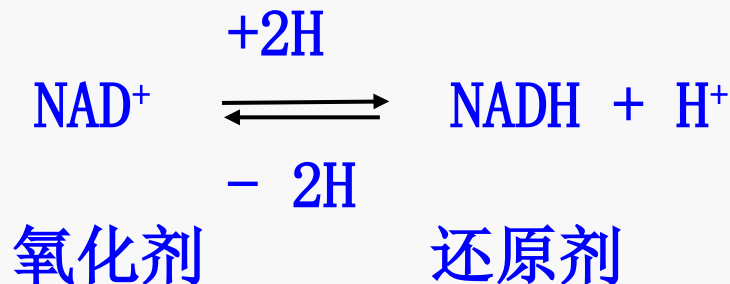
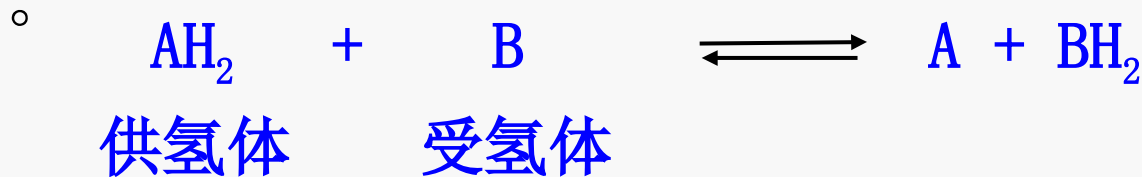


✓ 生物氧化实质：氧化 — 还原反应。

➤ 物质氧化还原的方式：

氧化：脱氢、加 O_2 、失电子

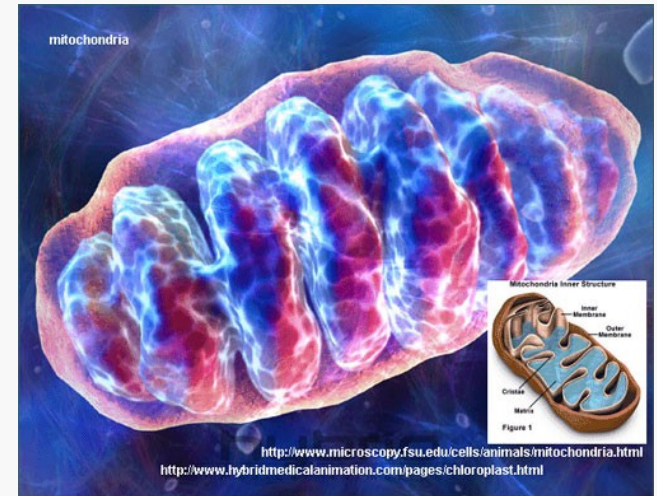
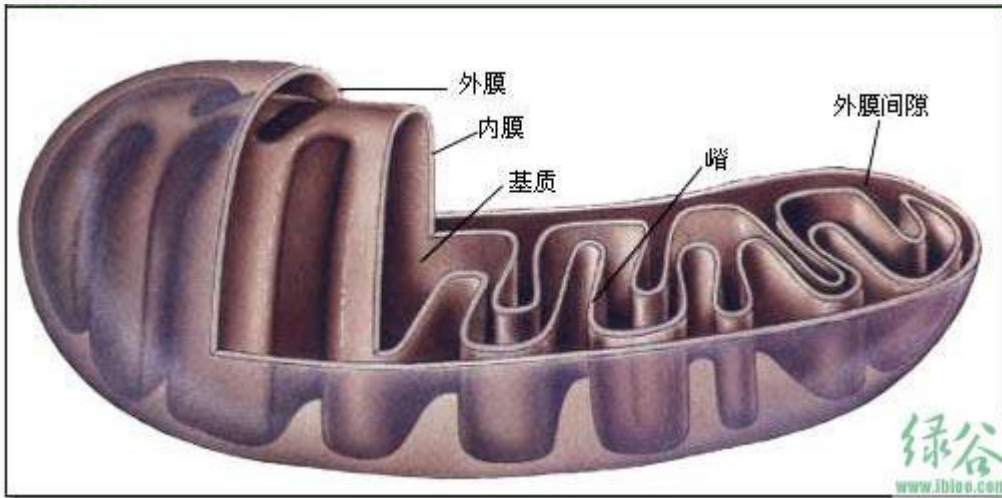
➤ 生物氧化多是电子或氢转移的氧化还原反应



二、生物氧化分类

。 { 线粒体氧化体系：物质氧化分解成 H_2O 、 CO_2 和 ATP

非线粒体氧化体系：催化代谢物和药物的转化，不产生 ATP。



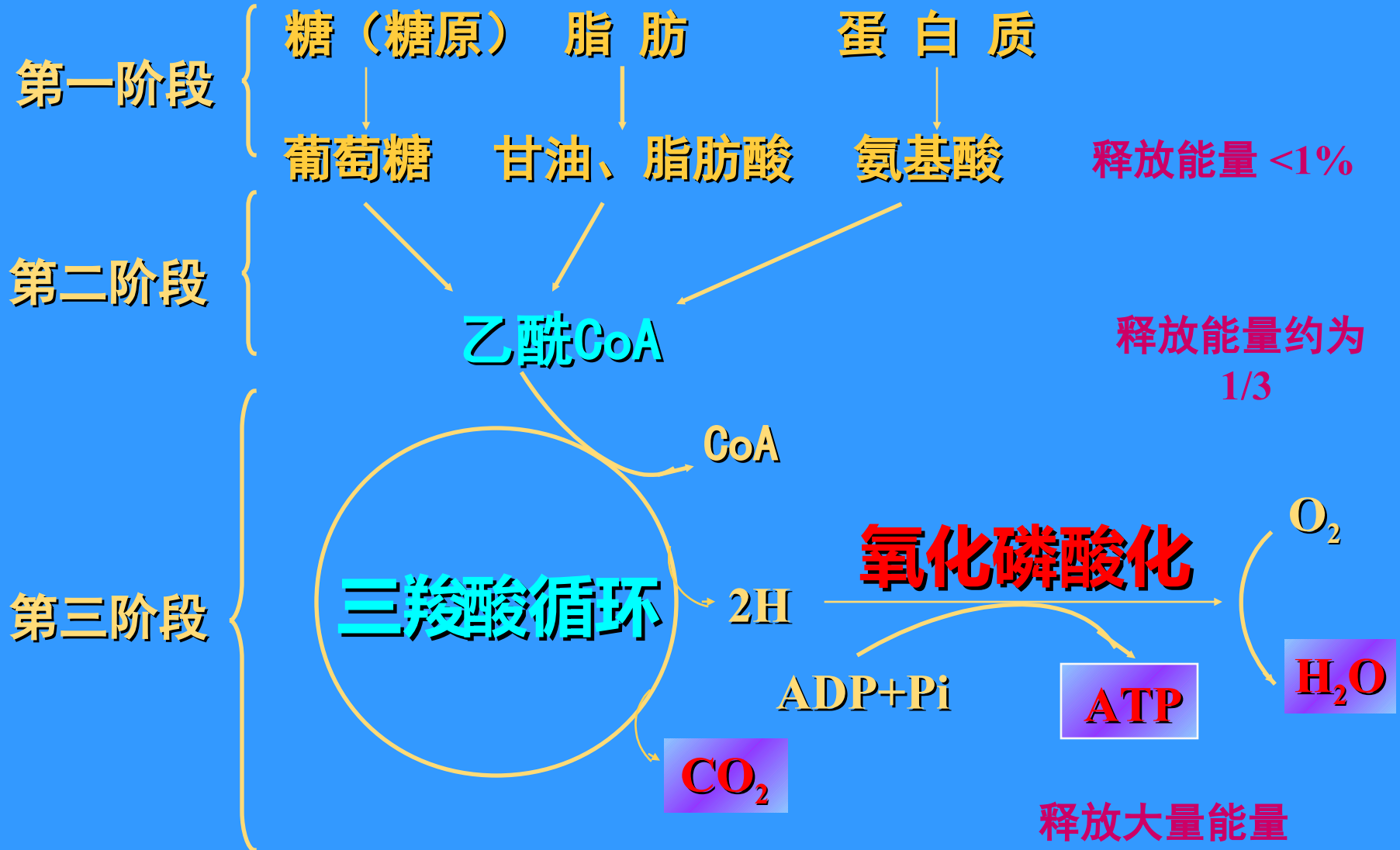
线粒体是生物氧化的主要场所

三、生物氧化的特点

生物氧化	体外氧化（燃烧）
细胞内、温和条件	高温或高压、干燥
条件	
一系列酶促反应	无机催化剂
逐步氧化放能	能量爆发释放
能量转化成 ATP 被利用 转换为光和热，	
散失 CO_2 ：脱羧	C与
O化合 H_2O ：呼吸链	H与
O化合	受细胞调节控制

第二节 线粒体氧化体系

一、生物氧化的三个阶段



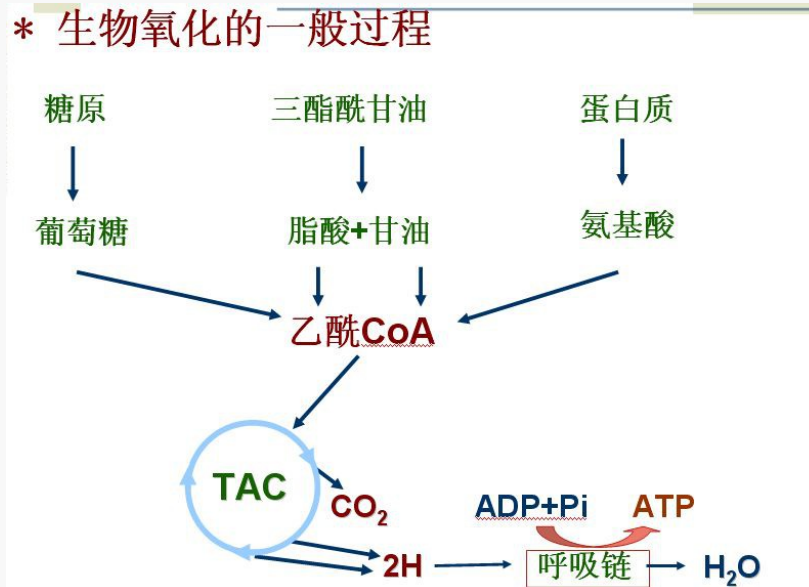
2、线粒体生物氧化主要包括三方面的内容：

★生物氧化的终产物是 CO_2 、 H_2O 和 ATP 。

(1) CO_2 的形成——脱羧反应 ($\text{COOH} \rightarrow \text{CO}_2$)

(2) H_2O 的形成——脱氢，与氧结合 ($2\text{H} + \text{O} \rightarrow$

H_2O)
(3) ATP 的产生——释放能量转化成 ATP

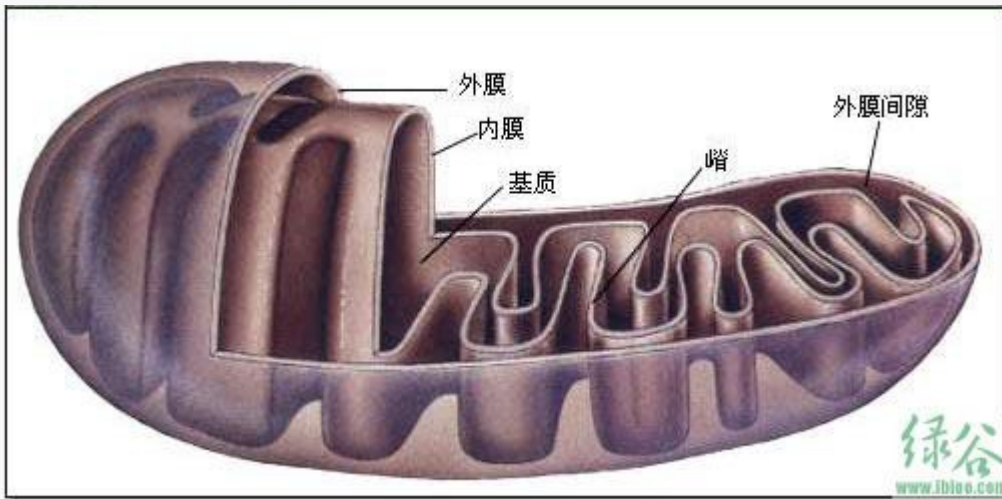


线粒体结构和功能

- （一）结构

- 线粒体有两层膜：外膜、内膜。

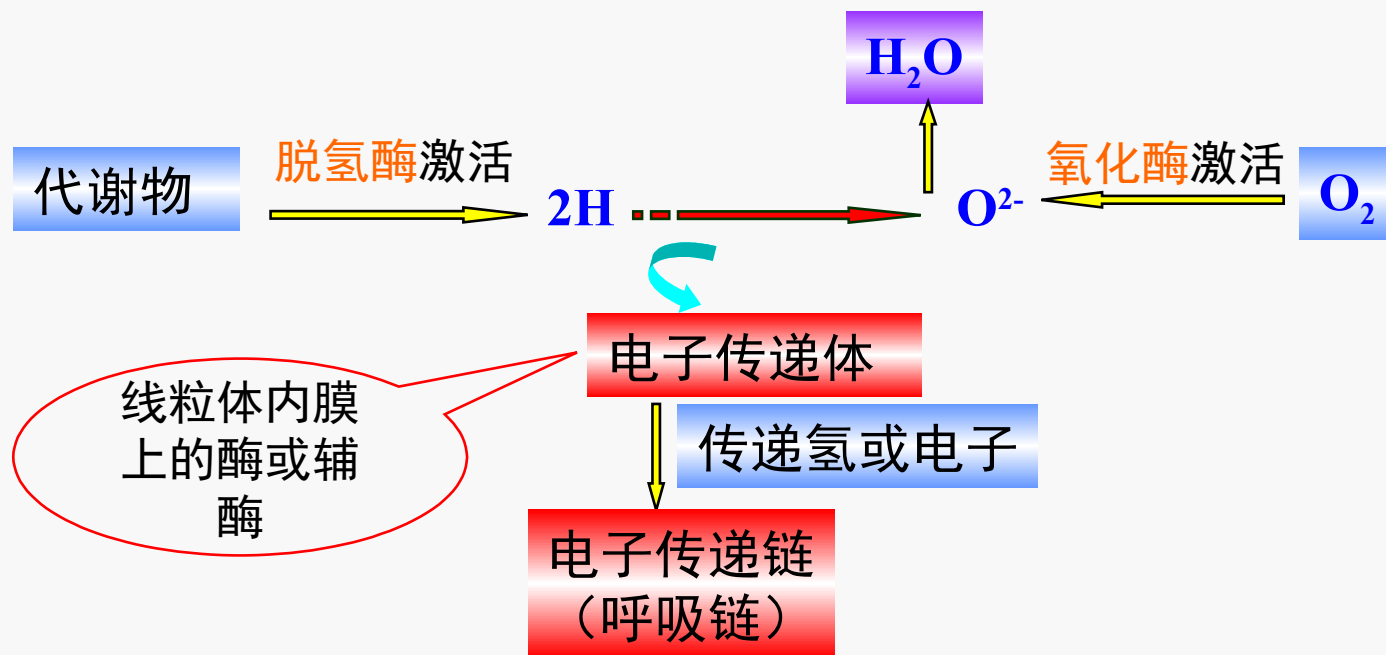
- 内膜折叠成嵴
- 内外膜之间为膜间腔



- (二) 功能

- 外膜对大多数小分子和离子可自由透过；内膜不能自由通透，需特殊的酶与载体。内膜为脂双层结构，上含有呼吸链和 **ATP** 合成酶
- 线粒体基质含有 **TCA 循环酶系**、脂肪酸- β -氧化酶系和谷氨酸脱氢酶等。
- 线粒体内膜上存在多种酶与辅酶组成的电子传递链（呼吸链），将代谢物脱下的氢传递到氧生成水。
- 线粒体内膜上的 **ATP 合成酶**，利用电子传递过程释放的能量，使 **ADP** 磷酸化生成 **ATP**，其余能量以热能形式释放。

二、生物氧化中水的生成



电子传递链（呼吸链）：传递氢（或电子）的酶或辅酶称为电子传递体，它们按一定的顺序排列在线粒体内膜上，组成递氢或递电子体系。

(一) 呼吸链的主要成分及其作用

1、 NAD^+ 、 NADP (烟酰胺脱氢酶的辅酶)

2、 FAD 、 FMN (黄素蛋白类的辅酶)

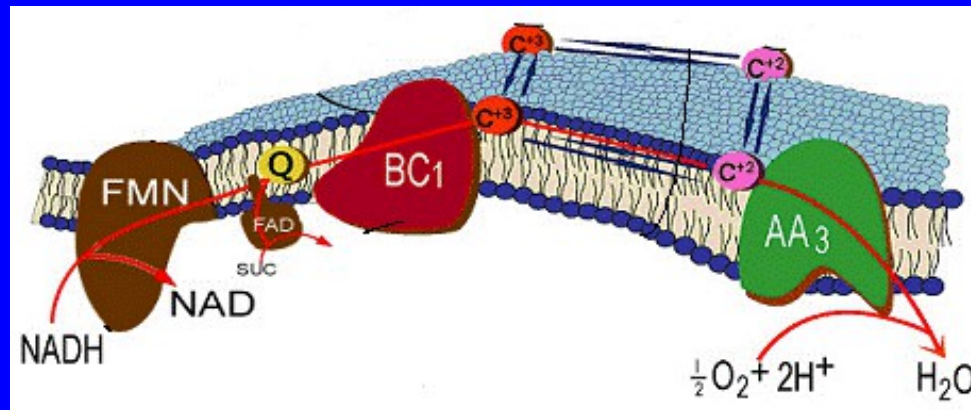
3、 CoQ : $2\text{H} \rightarrow 2\text{H}^+ + 2\text{e}^-$

4、 Fe-S 蛋白: 与其它传递体结合成复合物

5、 细胞色素类 (Cyt-b 、 c_1 、 c 、 aa_3)

递氢体
(可逆地加氢、脱氢)

递电子体



(二) 呼吸链的类型

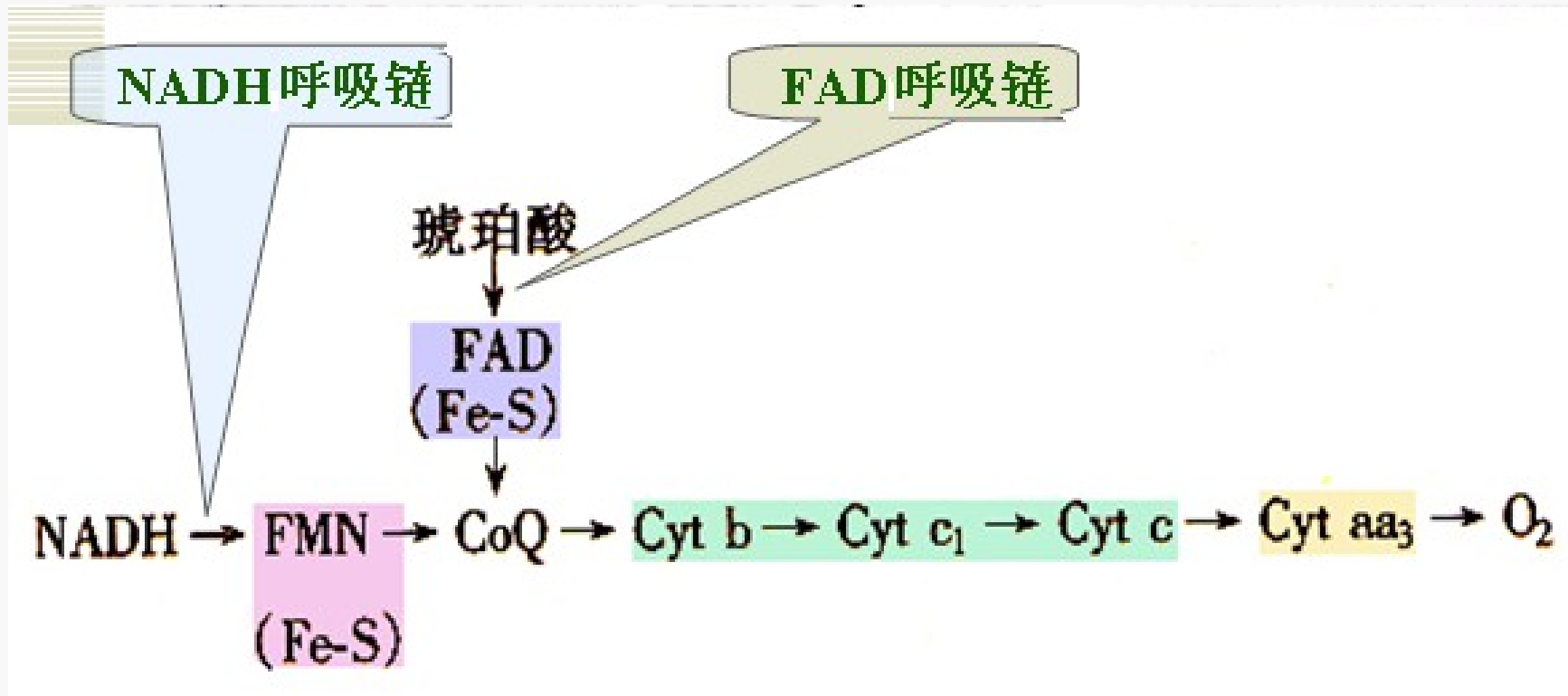
- 1、**NADH** 呼吸链：以 **NAD⁺** 为辅酶的脱氢酶催化的物质氧化
- 2、^化**FAD** 呼吸链：以 **FAD** 为辅基的脱氢酶催化的物质氧化

NADH 呼吸链分布最广，糖、脂肪和蛋白质分解代谢中的脱氢氧化反应，绝大部分是通过 **NADH** 呼吸链完成的

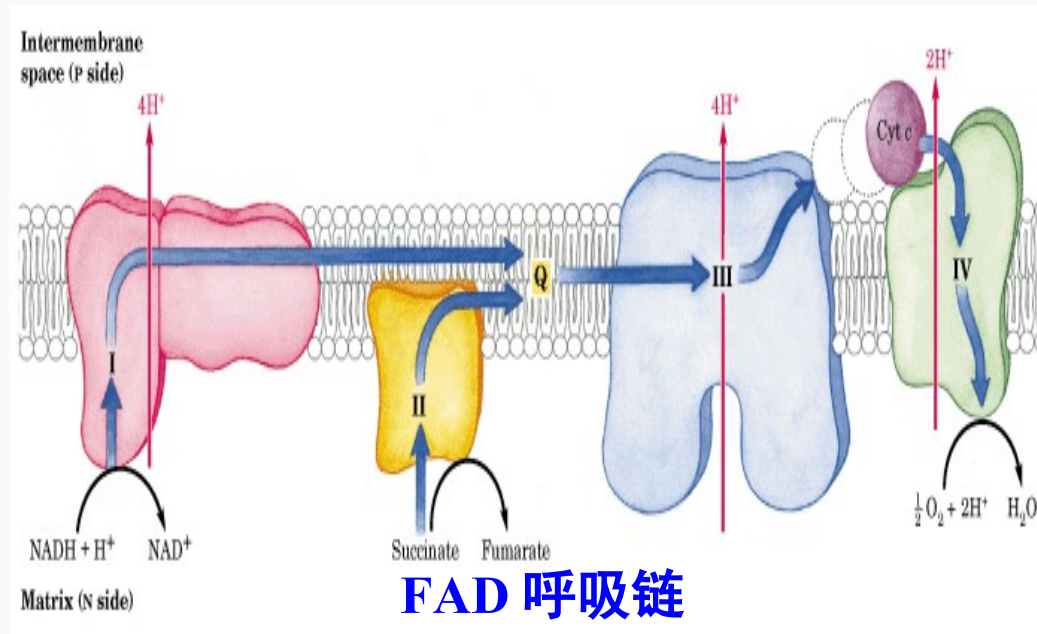
。

FAD 呼吸链脂催化少数代谢物（琥珀酸、脂酰 CoA、 α -磷酸甘油）脱氢。

- 各递氢体按其**对电子亲和力逐渐升高**的顺序排列。
- 容易**失电子**的排**在前**；容易**得电子**的排**在后**。

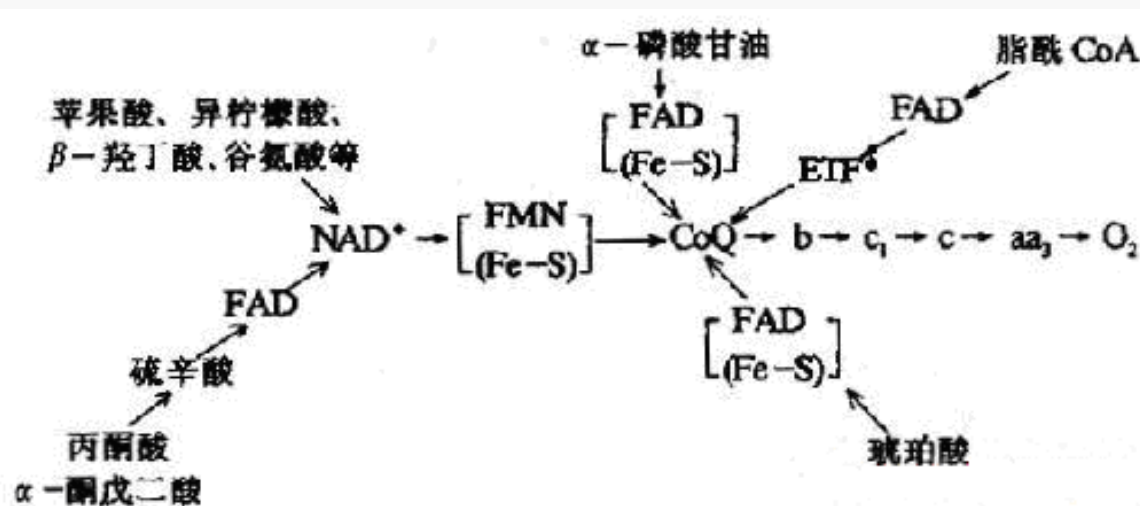


线粒体呼吸链



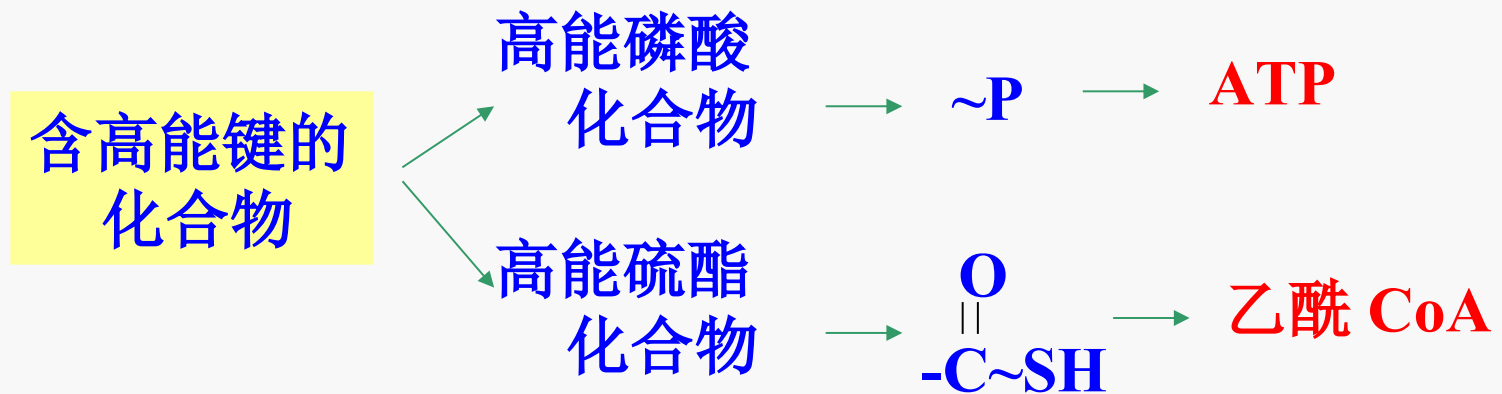
NADH 呼吸链

FAD 呼吸链

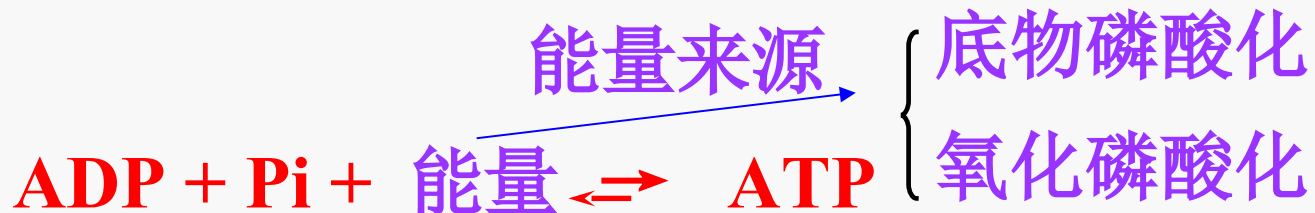


三、能量的生成

(一) 高能化合物

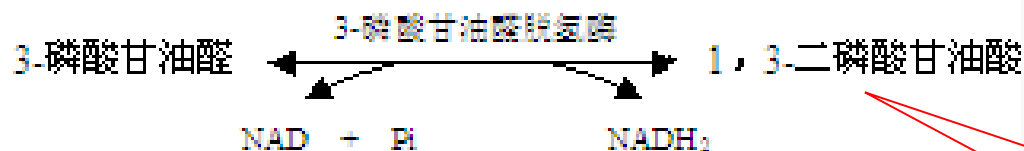


(二) ATP 的生成

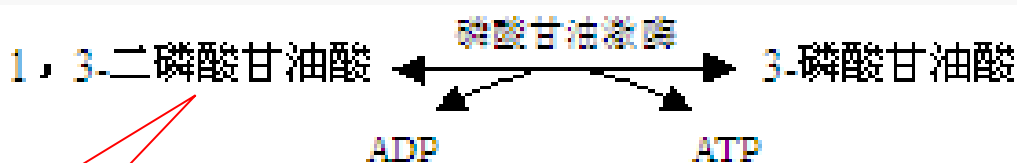


(二) **ATP** 的生成 ---- 底物磷酸化:

- 代谢时，通过脱氢、脱水等作用，在底物中形成一个高能键，然后转移给 ADP 形成 ATP。



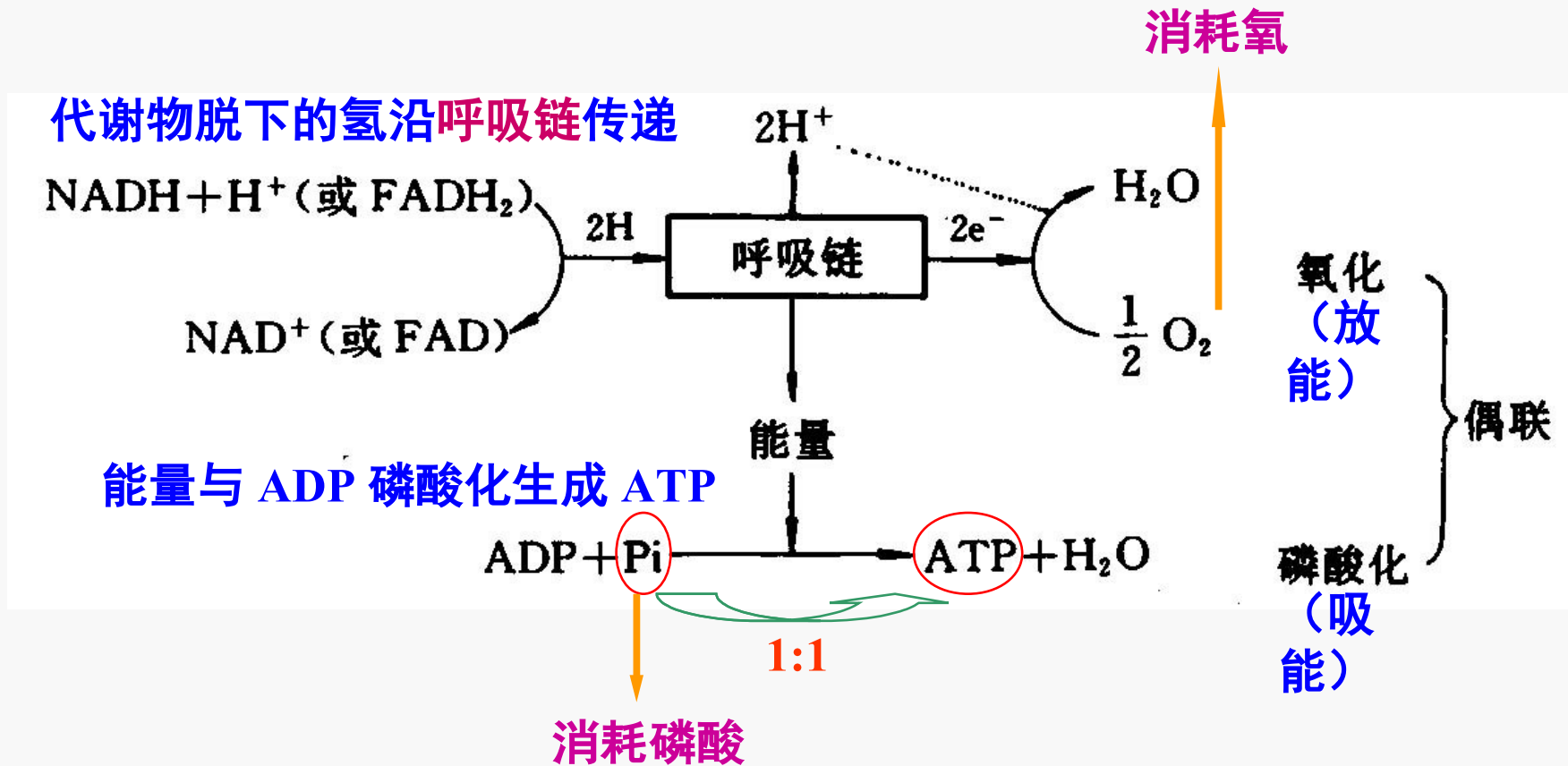
高能磷酸化合物



高能磷酸键
断裂



(二) **ATP** 的生成 ----- 氧化磷酸化



(三) 呼吸链中 **ATP** 的生成数量



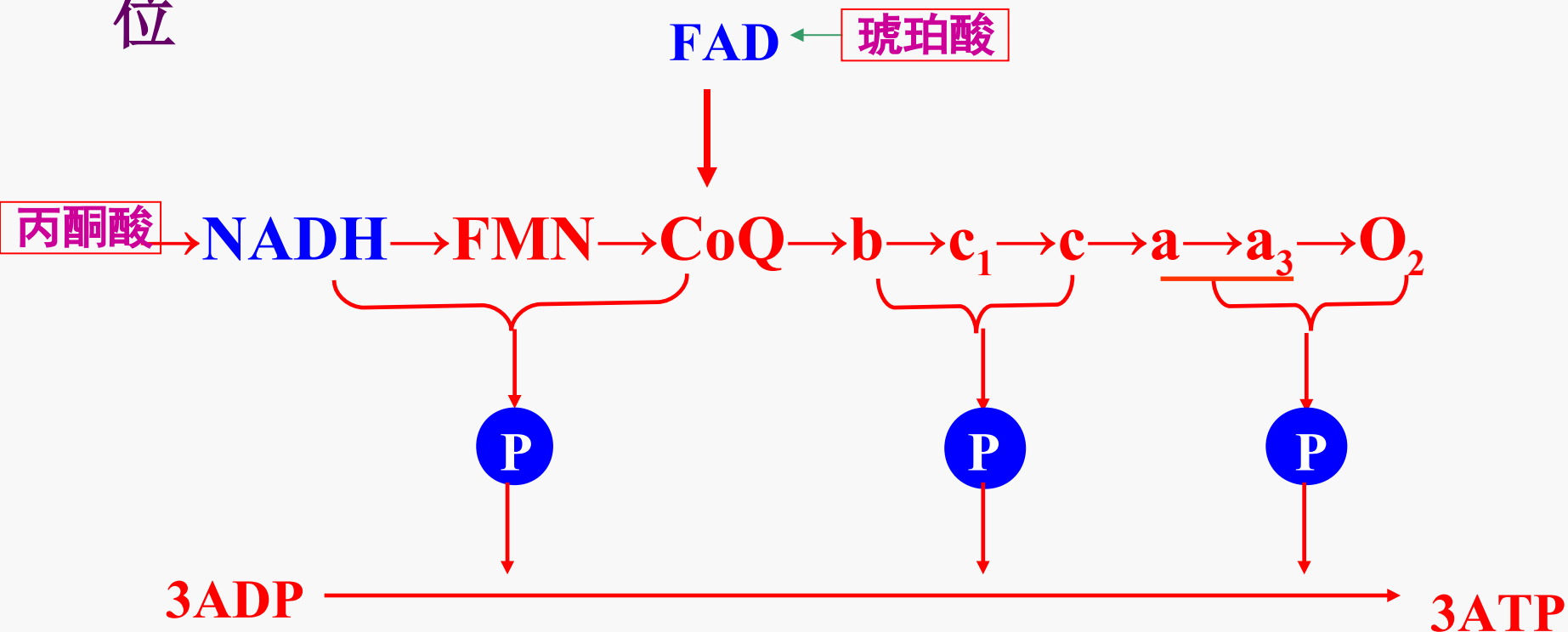
➤ **P/O 比值** --- 一定时间内，每消耗 1mol 氢原子所消耗磷酸的 mol 数（生成 ATP 的 mol 数）。

一次呼吸链
传递过程

✓ **P/O 比值**表示一次呼吸链传递过程所生成的 ATP 的数量。

NADH 呼吸链：	P/O	→ 生成 3 个 ATP
	=3	→ 生成 2 个 ATP
FAD 呼吸链：	P/O	
	=2	

(四) 呼吸链中 ATP 的形成部位



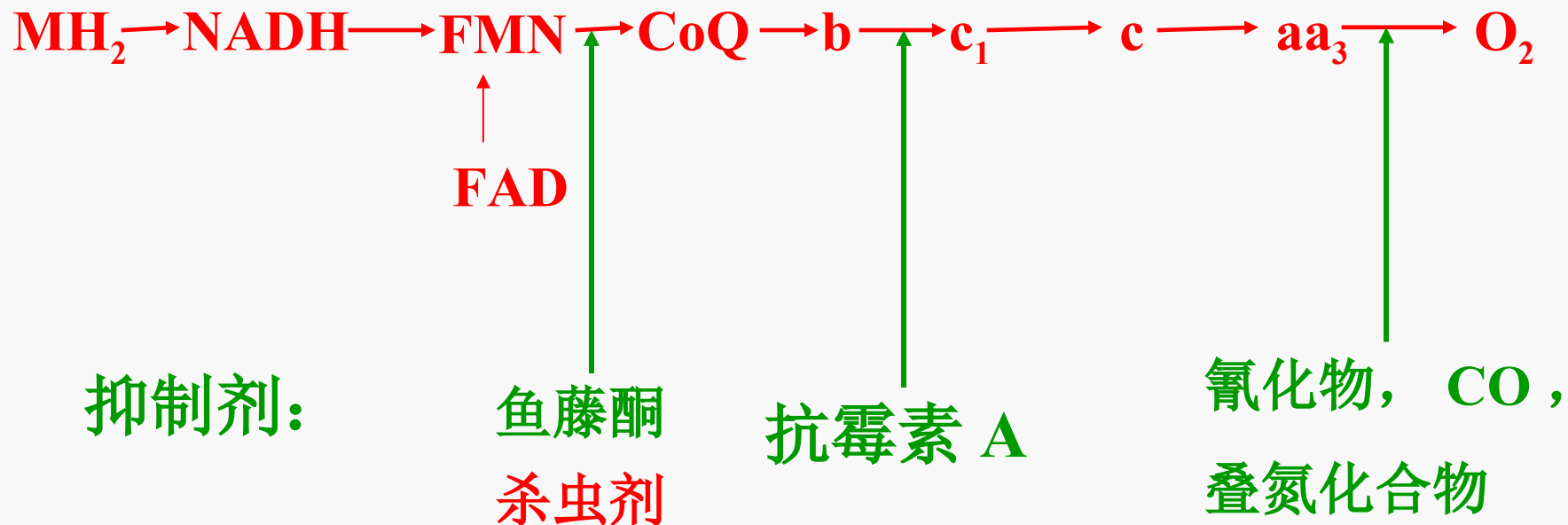
➤ $\text{NADH} \rightarrow 3\text{ATP}$, $\text{FADH}_2 \rightarrow 2\text{ATP}$

➤ 比较不同底物氧化后产生的 ATP 数，如**丙酮酸**、**琥珀酸**

(五) 氧化磷酸化作用的抑制

- 1、呼吸链抑制剂：阻断呼吸链中某一部位的电子传递。
- 2、解偶联剂：e⁻传递能正常进行，但磷酸化受抑制，不能形成 ATP。

2.4- 二硝基苯酚



解偶联剂

- 解偶联剂为离子载体或通道，能增大线粒体内膜对 H^+ 的通透性，消除 H^+ 梯度，因而无 **ATP** 生成。
- 氧化释放出来的能量全部以热的形式散发。
- 解偶联剂对底物磷酸化不影响。
- 常见的解偶联剂 **2,4-二硝基苯酚 (DNP)**、双香豆素。
- 例 1：动物冬眠时，依靠此作用来维持恒定体温，以度过寒冷的冬季。
- 例 2：感冒发烧，就是由于细菌或病毒在人体内产生某种解偶联剂，使体温升高。



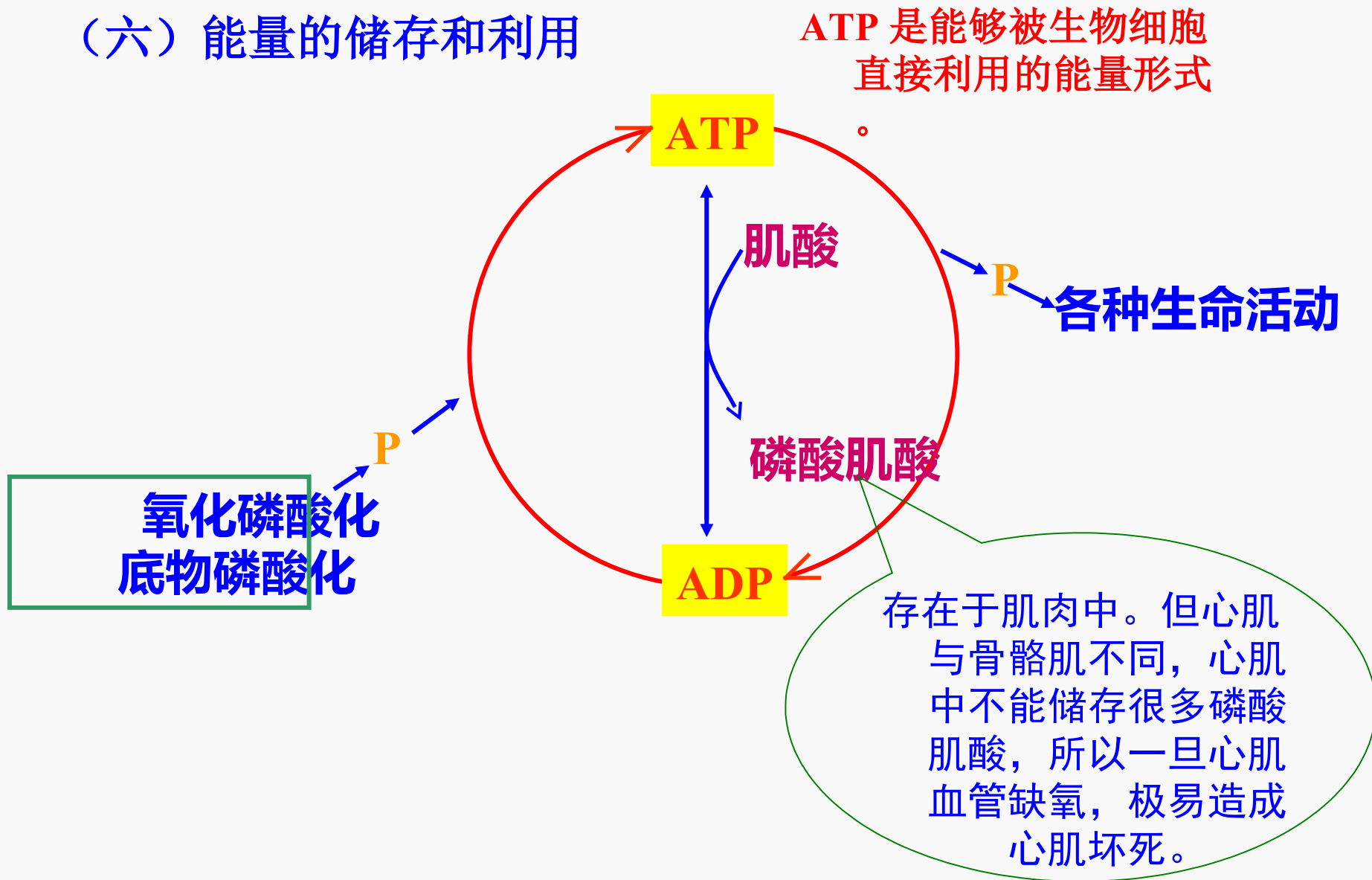
1、氰化物中毒：

- 吸入含氰化物的蒸汽或粉末
- 或误食大量的苦杏仁、桃仁、白果（银杏）、木薯等

2、解除氰化物的毒性：

- 立即注射美蓝或亚硝酸钠：可与氰化物快速结合，使细胞色素氧化酶恢复其传递电子功能。
- 使用硫代硫酸钠：使氰化物变成无毒的硫氰酸盐排出体外，使细胞色素恢复其功能。

(六) 能量的储存和利用



四、 生物氧化中 CO_2 的生成

根据是否
伴随氧化
作用

直接脱羧

氧化脱羧

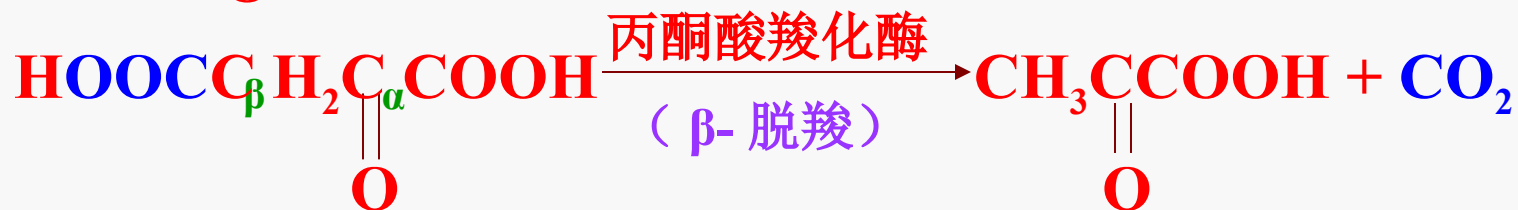
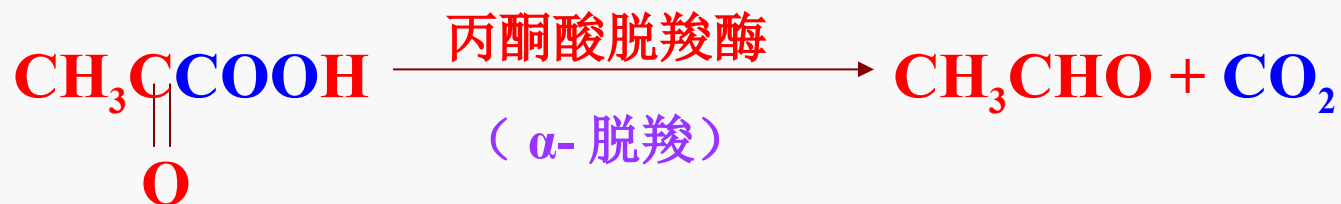
有机酸脱羧

根据羧基
在有机酸
中的位置

α - 脱羧
 β - 脱羧

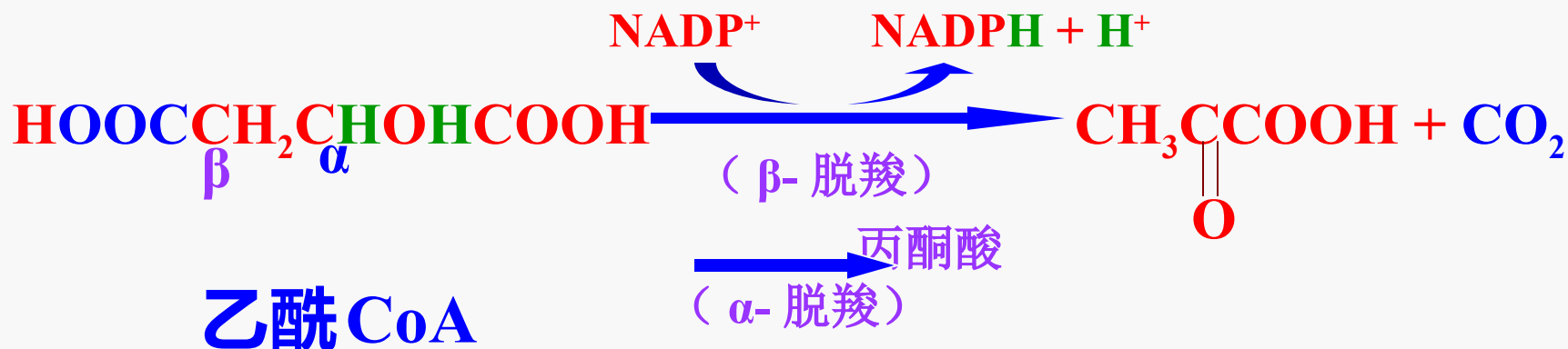
四、生物氧化中 CO₂ 的生成

1、直接脱羧



2、氧化脱羧

在脱羧过程中伴随着氧化（脱氢）。



第三节 非线粒体氧化体系

微粒体氧化体系：催化某些毒物和药物的转化及

清除反应。

过氧化体氧化体系：过氧化氢的生成与分解

共同特点：耗氧量少，都没有 ATP 的产生

一、微粒体氧化体系

- 微粒体氧化体系存在于细胞光面内质网上
- 主要功能：
 - ① 参与体内正常的物质代谢
(如肾上腺皮质类固醇的羟化、类固醇激素的合成、维生素 D3 的羟化以及胆汁酸、胆色素的形成)
 - ② 参与某些毒物（如苯胺）和药物（如吗啡等）解毒转化和代谢清除反应
(通过氧化增强其水溶性，以利于进一步随胆汁或尿排出)
- 微粒体氧化是机体排除废物的重要过程，在肝脏中最强，肠、肾、肺中也可进行。

二、过氧化体氧化体系

功能：能生成 H_2O_2 ，也能分解 H_2O_2 ；

也能氧化氨基酸、脂肪酸等。

(一) H_2O_2 的合成

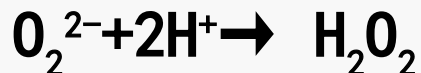
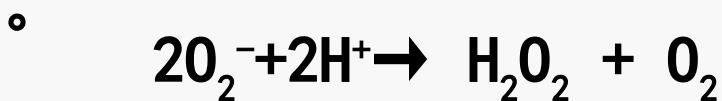
➤ 在生物氧化中： $\text{O}_2 + 4\text{e}^- \rightarrow 2\text{O}^{2-}$ ， $2\text{O}^{2-} + 4\text{H}^+ \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$

➤ 如还原时得到的电子不足： $\text{O}_2 + \text{e}^- \rightarrow \text{O}_2^-$

超氧负
离子

过氧化
离子

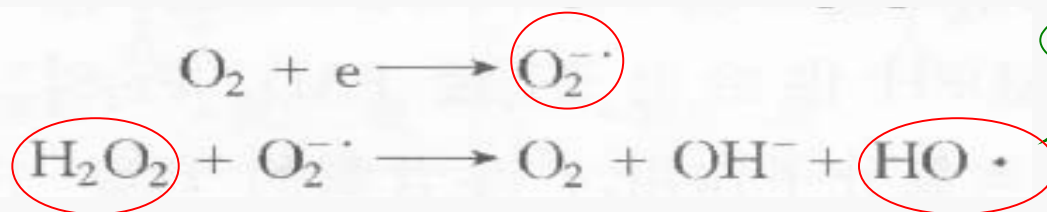
➤ 超氧负离子、过氧化离子与 H^+ 反应生成过氧化氢



(二) H_2O_2 的作用

- 杀菌 (H_2O_2 常用作发炎伤口消毒剂)
- 甲状腺激素的合成
- 过多的 H_2O_2 积累, 对细胞有毒害作用

(三) 自由基的产生



羟基自由基

- 超氧负离子、 H_2O_2 、羟基自由基通称活性氧, 也叫氧自由基。
- 自由基具有不配对电子, 它必须夺取一个电子才能稳定, 这就叫“氧化”。所以化学性质很活泼。
- 在生理条件下, 96% 99%的氧通过呼吸链还原成水, 约 1%~4%的氧产生自由基。

（四）自由基的毒性

- 1、氧化巯基（-SH），使酶及蛋白质失活；
- 2、氧化不饱和脂肪酸形成过氧化脂质，损伤细胞膜

功能；过氧脂质和蛋白质结合的复合物进入溶酶

体，可形成脂褐素，与组织老化有关；

- 3、使DNA氧化、断裂，改变DNA结构，引起肿瘤；
- 4、胶原蛋白的多肽链发生交联，使皮肤变硬失去柔软性。

（五）环境中的自由基

- 阳光辐射、X 射线、 γ 射线、空气污染、吸烟、炒菜、农药等都会使人体产生自由基。
- 长时间在纯氧中呼吸或吸入的氧过多，可引起呼吸紊乱乃至死亡。
- 汽车尾气、工业生产废气等环境污染产生大量自由基。

(六) 自由基的清除：

过氧化氢酶： $\text{H}_2\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O}_2 \longrightarrow 2\text{H}_2\text{O} + \text{O}_2$

过氧化物酶： $\text{RO} \xrightarrow{2\text{H}_2\text{O}_2} 2\text{H}_2\text{O} + \text{R}$

$\text{R} \xrightarrow{\text{H}_2\text{O}_2} \text{H}_2\text{O} + \text{RO}$

超氧化物歧化酶（SOD）：

谷胱甘肽过氧化物酶

维生素 E

维生素 C

谷胱甘肽

β - 胡萝卜素

抗氧化剂

还有一些食物中含有抗氧化物质：

乙酰辅酶 A

- 辅酶 A 的乙酰化形式。
- 基团 **CH₃CO-** (乙酰基) 与辅酶 A 的半胱氨酸残基的 **SH-** 基团相连。
- 是丙酮酸氧化脱羧，脂酸的 β - 氧化的产物。
- 是能源物质代谢的重要中间代谢产物。糖、脂肪、蛋白质三大营养物质通过乙酰辅酶 A 汇聚成一条共同的代谢通路——三羧酸循环和氧化磷酸化，经过这条通路彻底氧化生成二氧化碳和水，释放能量用以 **ATP** 的合成。
- 乙酰辅酶 A 是合成脂肪酸、酮体等能源物质的前体物质，也是合成胆固醇及其衍生物等生理活性物质的前体物质。



三羧酸循环 (tricarboxylic acid cycle)

- 体内物质糖类、脂肪或氨基酸有氧氧化的主要过程。
- 通过生成的乙酰辅酶 A 与草酰乙酸缩合生成柠檬酸 (三羧酸) 开始, 再通过一系列氧化步骤产生 CO_2 、 NADH 及 FADH_2 , 最后仍生成草酰乙酸, 进行再循环, 从而为细胞提供了降解乙酰基而提供产生能量的基础。
- 由克雷布斯 (Krebs) 于 20 世纪 30 年代最先提出。

乙酰辅酶 A

