

## 第三章 物质代谢 生物氧化

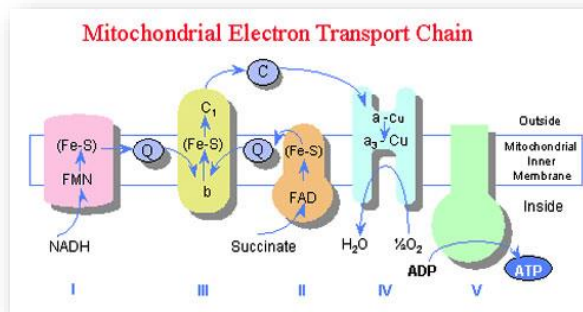
孔宇 教授

西安交通大学生命科学与技术学院

2021年10月4日



### 内容简介-生物氧化



1. 生物氧化特点

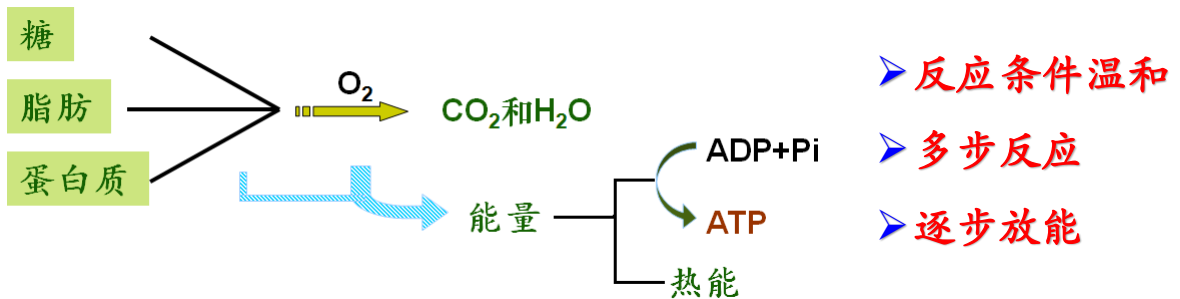
2. 生物氧化过程

3. 其他



## 生物氧化的定义及特点

❖ 糖类、脂肪、蛋白质等有机物在细胞中氧化分解生成 $\text{CO}_2$ 和 $\text{H}_2\text{O}$ 并释放出能量的过程称为**生物氧化 (biological oxidation)**，由一系列**氧化还原反应**组成。又称细胞呼吸 (cellular respiration)；



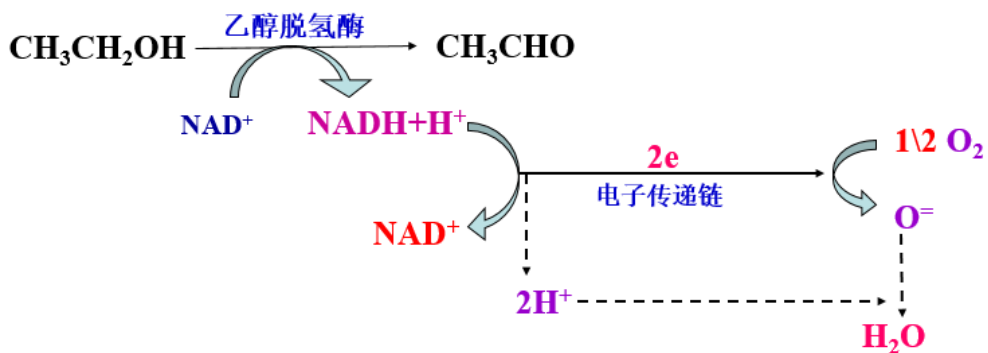
生命科学基础1

3



## 脱氢

❖ 脱下的氢由相应的氢载体 ( $\text{NAD}^+$ 、 $\text{NADP}^+$ 、 $\text{FAD}$ 、 $\text{FMN}$ 等) 所接受，再通过一系列递氢体或递电子体传递给氧而生成 $\text{H}_2\text{O}$ 。



生命科学基础1

5



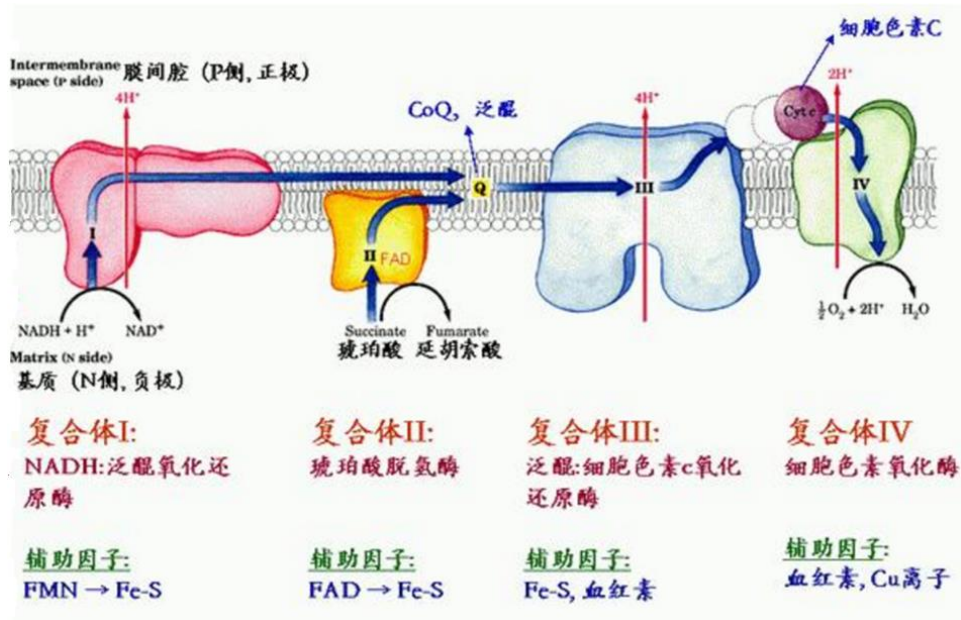
## (一) 电子传递链概念

- ❖ 生物氧化过程中，代谢物脱下的**氢**经过一系列电子传递体，最终交给氧分子生成水。此电子传递体系又称为**电子传递链** (electron transfer chain)。
- ❖ 由于电子传递过程与细胞呼吸有关，又称**呼吸链** (respiratory chain)。

6



## 电子呼吸链



8



# 呼吸链的组成

## 人线粒体呼吸链复合体(complex)

复合体	酶名称	多肽链数	辅基
复合体 I	NADH-泛醌还原酶	39	FMN, Fe-S
复合体 II	琥珀酸-泛醌还原酶	4	FAD, Fe-S
复合体 III	泛醌-细胞色素C还原酶	10	铁卟啉, Fe-S
复合体 IV	细胞色素c氧化酶	13	铁卟啉, Cu

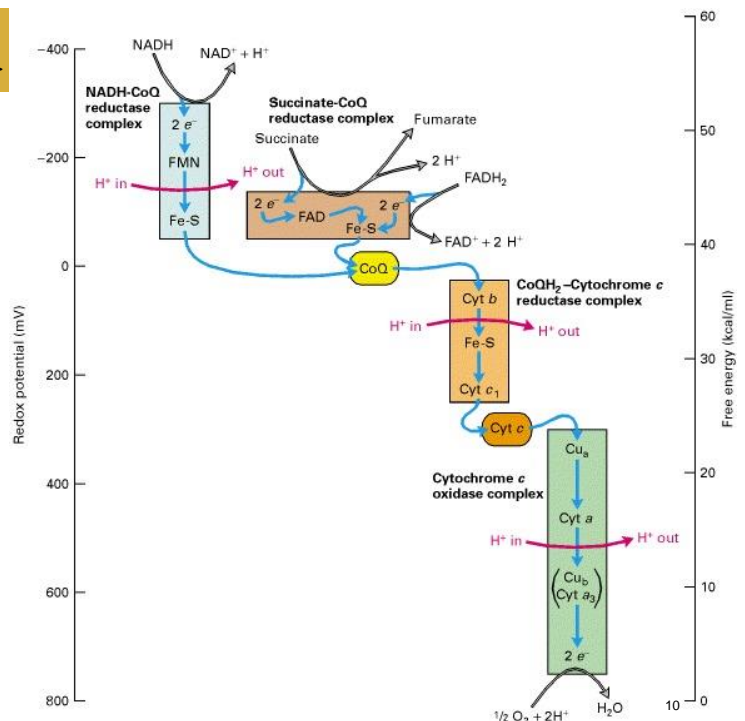
\* 泛醌 和 Cyt c 均不包含在上述四种复合体中。

9



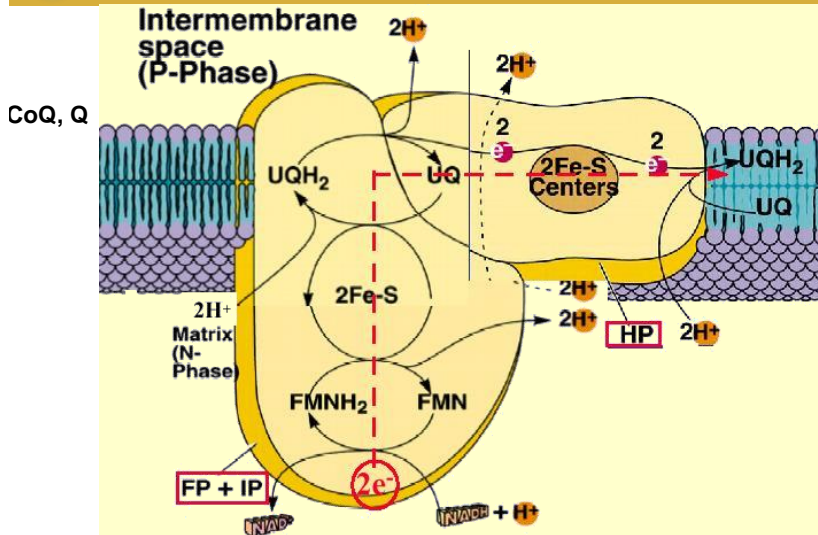
## 电子传递链和氧化呼吸链

- 按照 $\Delta E$ 从**负**→**正**依次排列
- 电子按上述顺序流动

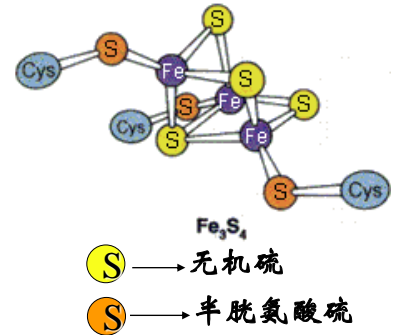




# 1. 复合体 I (NADH-泛醌还原酶)



NADH还原酶 + 4 × (Fe-S)



4个H<sup>+</sup>

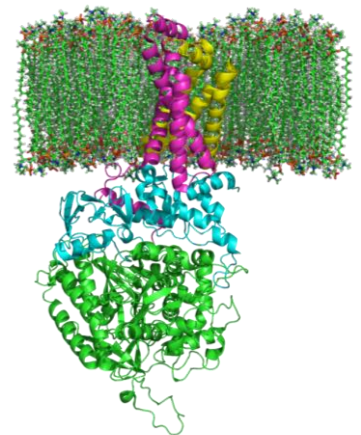
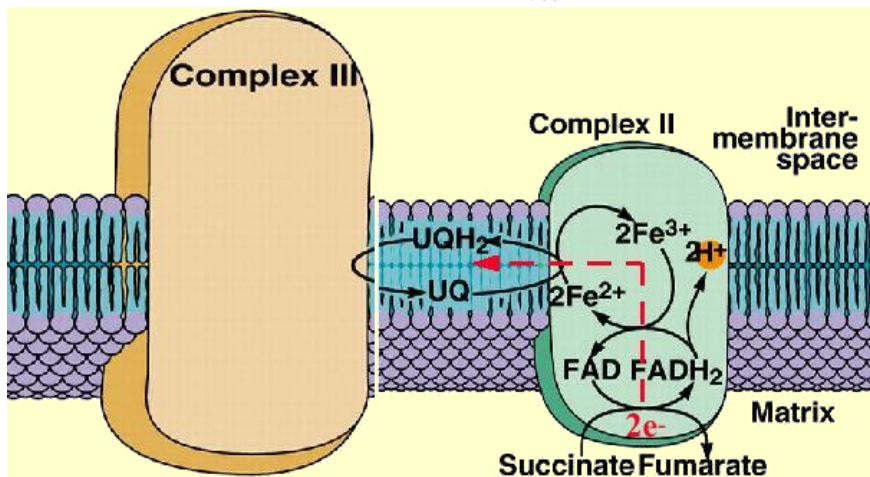
NADH → FMN; Fe-S<sub>N-1a/b</sub>; Fe-S<sub>N-2</sub>; Fe-S<sub>N-3</sub>; Fe-S<sub>N-4</sub> → CoQ

11



# 2. 复合体 II (琥珀酸-泛醌还原酶)

琥珀酸脱氢酶 + 3 × (Fe-S) + Cyt b<sub>560</sub>



无H<sup>+</sup>

琥珀酸 → FAD; Fe-S<sub>1</sub>; b<sub>560</sub>; Fe-S<sub>2</sub>; Fe-S<sub>3</sub> → CoQ

13

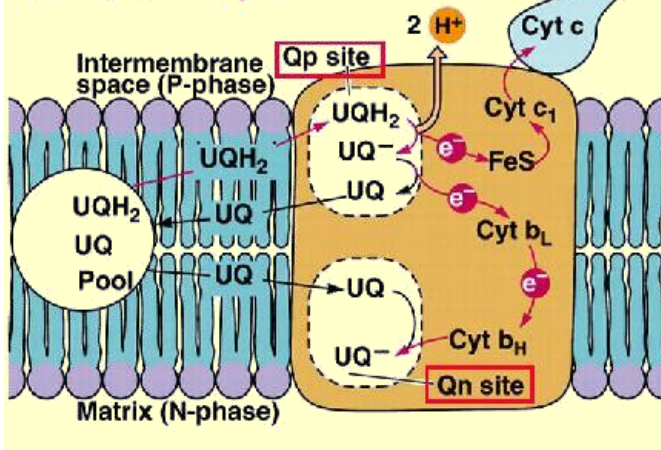




### 3. 复合体III（泛醌-细胞色素c还原酶）：

$2 \times \text{Cyt } b + \text{Cyt } c_1 + (\text{Fe-S})$

First half of the cycle



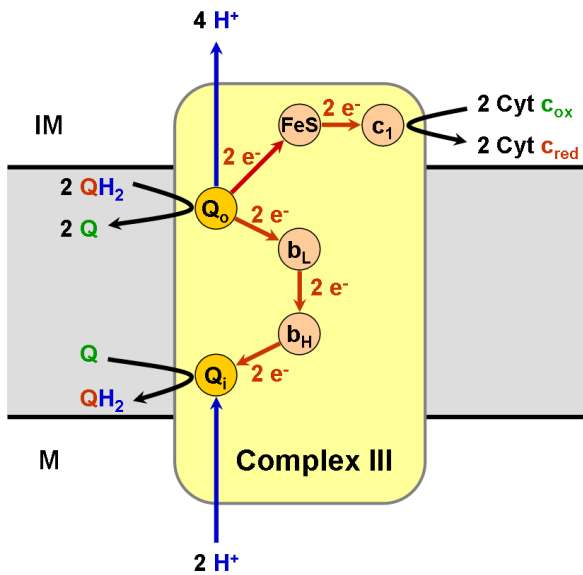
$\text{QH}_2 \rightarrow \text{b}_{562}; \text{b}_{566}; \text{Fe-S}; \text{c}_1 \rightarrow \text{Cyt } c$

2个H<sup>+</sup>/次

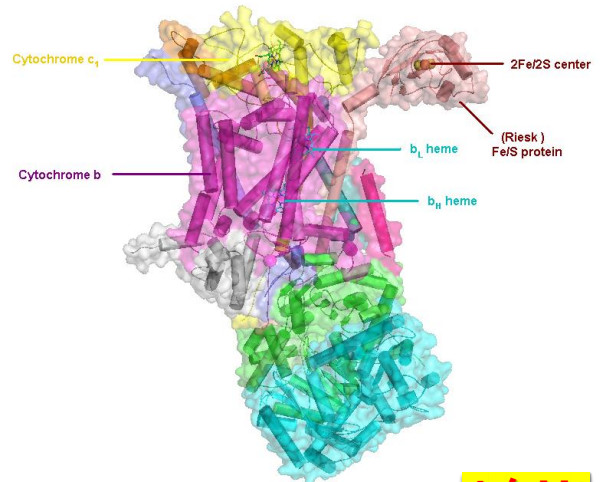
14



### 总结-4质子



schematic illustration of complex III reactions



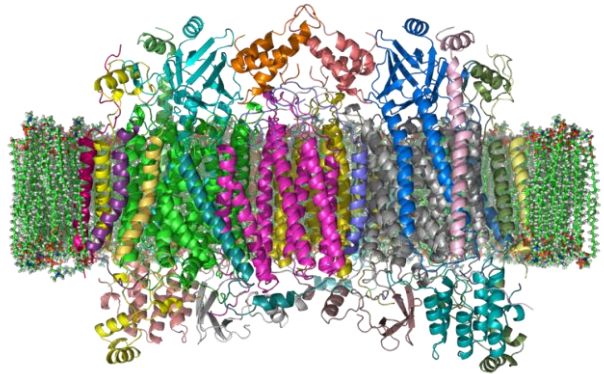
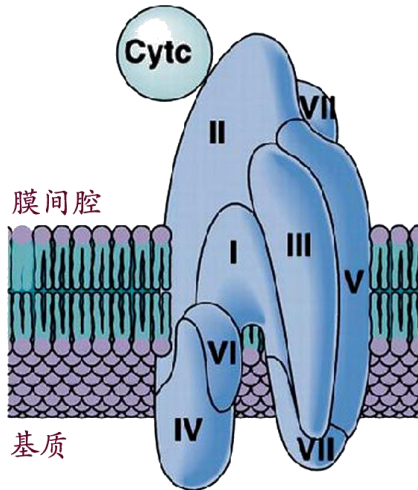
4个H<sup>+</sup>

15



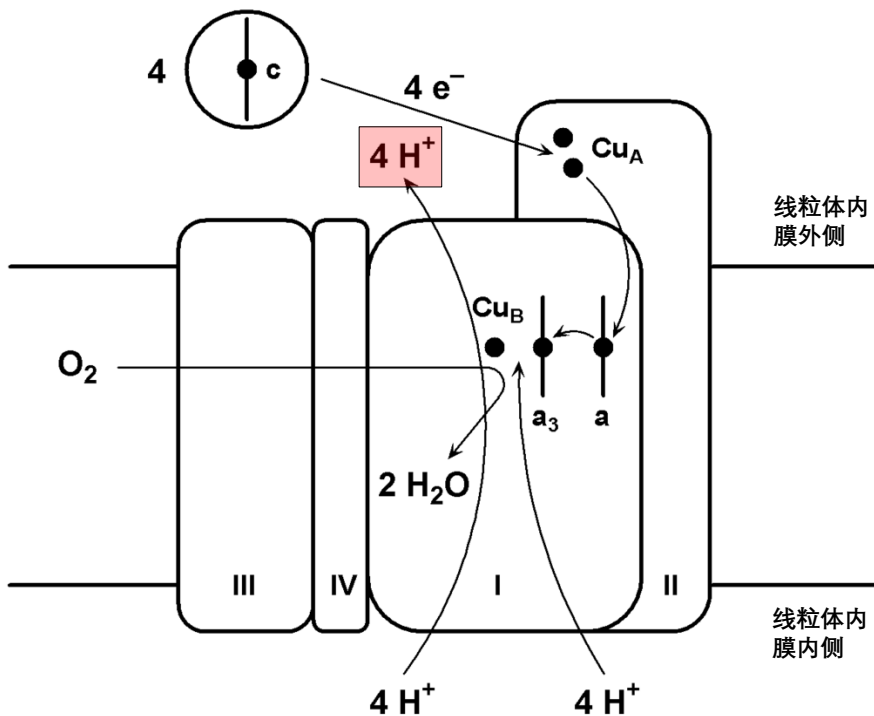
## 4. 复合体IV（细胞色素c氧化酶）：

Cyt a + Cyt a<sub>3</sub>



还原型Cyt c →  $\text{Cu}_A \rightarrow a \rightarrow a_3 \rightarrow \text{Cu}_B \rightarrow \text{O}_2$

16



17



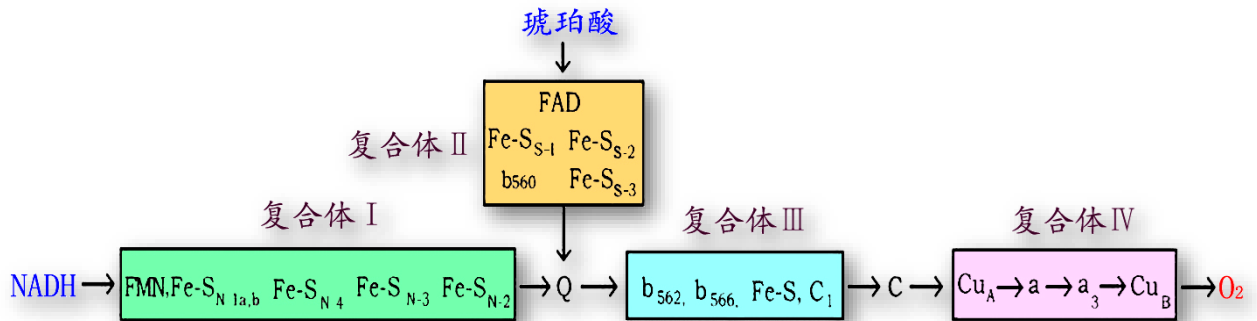
## 两条电子传递链的关系

### 1、NADH氧化呼吸链

$\text{NADH} \rightarrow \text{复合体 I} \rightarrow \text{Q} \rightarrow \text{复合体 III} \rightarrow \text{Cyt c} \rightarrow \text{复合体 IV} \rightarrow \text{O}_2$

### 2、琥珀酸氧化呼吸链

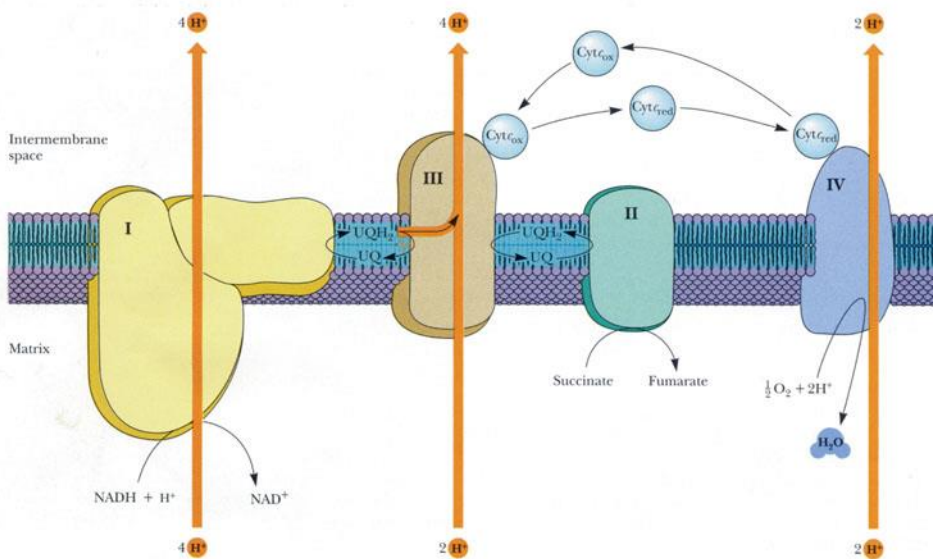
$\text{琥珀酸} \rightarrow \text{复合体 II} \rightarrow \text{Q} \rightarrow \text{复合体 III} \rightarrow \text{Cyt c} \rightarrow \text{复合体 IV} \rightarrow \text{O}_2$



18



## NADH/FADH<sub>2</sub> 的电子传递对应的质子泵出数



**NADH: 10个质子**  
**FADH<sub>2</sub>: 6个质子**

20





## 氧化磷酸化

❖ 线粒体中，底物分子脱下的氢原子经**递氢体系**传递给氧：过程中释放能量使ADP磷酸化生成ATP，这种能量的生成方式称为**氧化磷酸化**(oxidative phosphorylation)

❖ 化学渗透假说-1978年Nobel

- 跨膜pH梯度和跨膜电位差：这种形式的“势能”被存在于线粒体内膜上的ATP合酶利用，生成高能磷酸基团，并与ADP结合而合成ATP。



Peter D. Mitchell

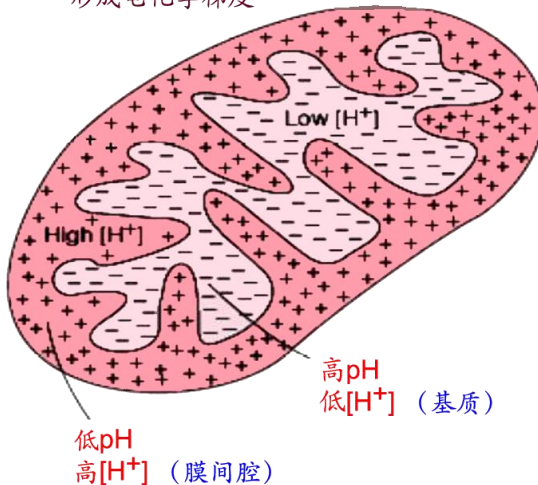
21

生命科学基础1



## 1.3 质子梯度的形成

电子传递驱动质子外流  
形成电化学梯度



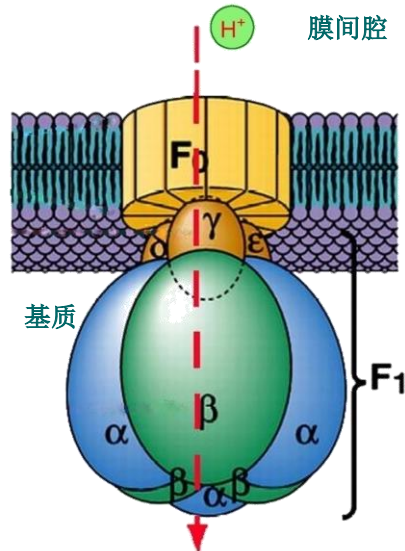
22



# 偶联的实现 - ATP合酶

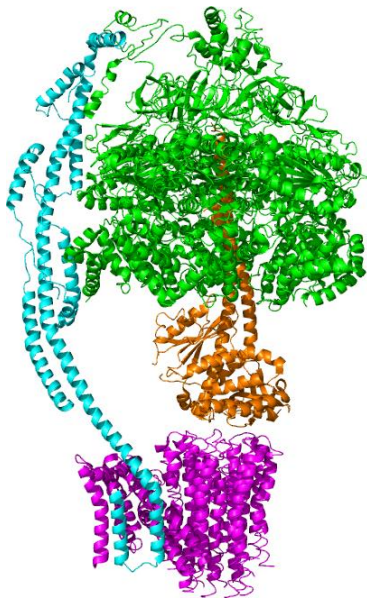


水轮发电机

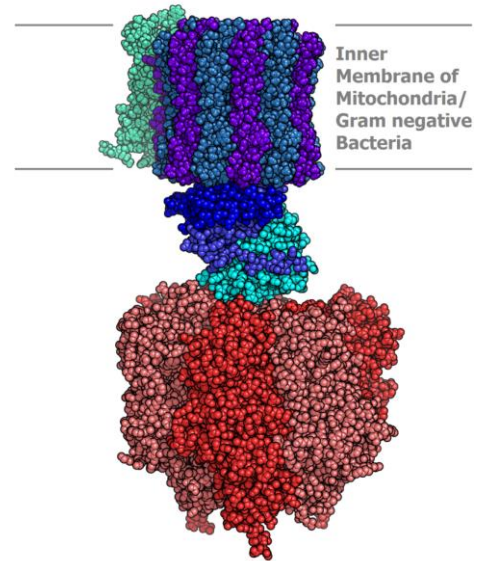


❖ 嵌于线粒体内膜，  
头部呈颗粒状，  
突出于线粒体内  
膜的基质侧。

23



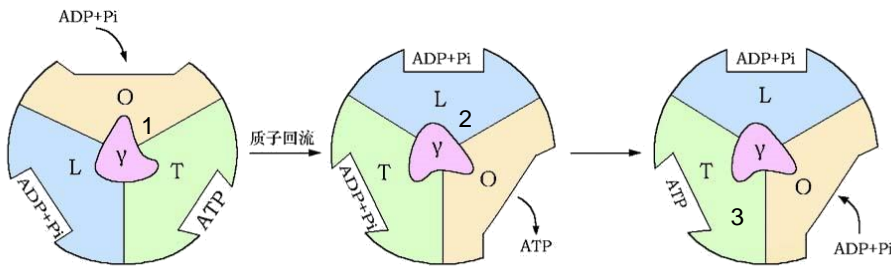
Bovine mitochondrial ATP synthase. The FO, F1, axle, and stator regions are color coded **magenta**, **green**, **orange**, and **cyan** respectively.



24



当 $H^+$ 顺浓度梯度经 $F_0$ 中a亚基和c亚基之间回流时，  
 **$\gamma$ 亚基发生旋转，3个 $\beta$ 亚基的构象发生改变。**



**ATP合酶的工作机制**

ADP and  $P_i$  (pink) shown being combined into ATP (red), and the rotating  $\gamma$  (gamma) subunit in black causing conformation

25



## 1对电子传递所能产生的ATP数目

➤ 形成1个分子的ATP需要4个质子回流

□ 每合成1个ATP需要3个质子通过ATP合酶。

□ ATP、ADP和无机磷酸通过线粒体内膜的转运是由ATP-ADP载体和磷酸转位酶催化的。把一个ATP分子从线粒体基质转运到胞液需要消耗1个质子。

➤ 一对电子通过NADH电子传递链可泵出10个质子，则可形成2.5个ATP分子；

➤ 如果一对电子通过FADH<sub>2</sub>电子传递链有6个质子泵出，则可形成1.5个ATP分子。

26



## 胞浆中NADH的利用-苹果酸穿梭系统

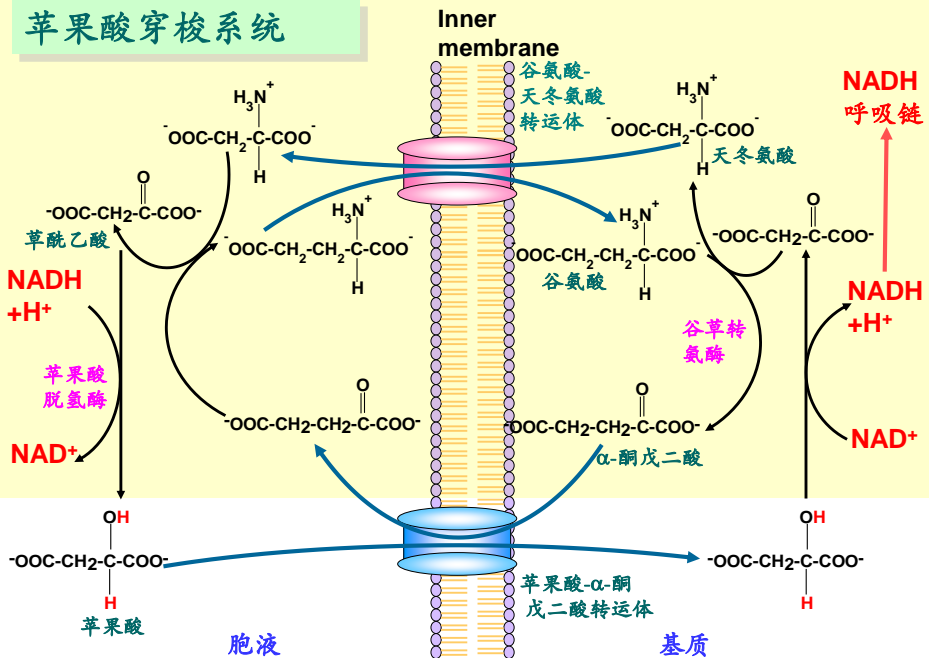
❖ 主要存在于肝和心肌中。

❖ 胞液中  $\text{NADH} + \text{H}^+$  的一对氢原子经此穿梭系统  
 带入一对氢原子，由于经NADH氧化呼吸链进  
 行氧化磷酸化，故可生成 **2.5 分子ATP**。

27



### 苹果酸穿梭系统



28



## 胞浆中NADH的利用-磷酸甘油穿梭系统

自学

❖ 主要存在于脑和骨骼肌中。

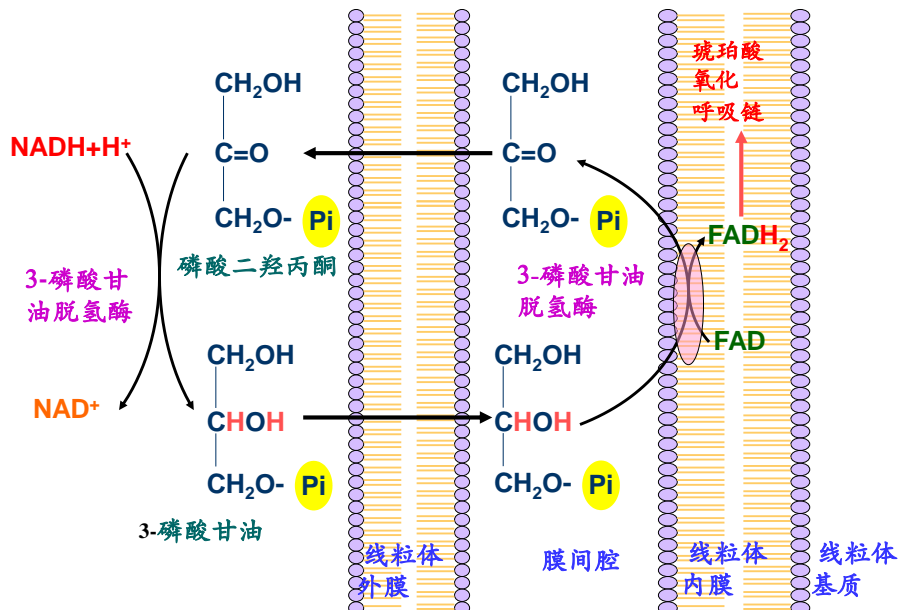
❖ **NADH** 通过此穿梭系统带一对氢原子进入线粒体，由于经琥珀酸氧化呼吸链进行氧化磷酸化，故 **只能产生1.5 分子ATP**。

29



## 磷酸甘油穿梭系统

自学



30





# 能量统计

## 葡萄糖有氧氧化生成的ATP

	反 应	辅 酶	ATP
第一 阶 段	葡萄糖 → 6-磷酸葡萄糖		-1
	6-磷酸果糖 → 1,6-双磷酸果糖		-1
	$2 \times 3$ -磷酸甘油醛 → $2 \times 1,3$ -二磷酸甘油酸	$\text{NAD}^+$	$2 \times 2.5$ 或 $2 \times 1.5^*$
	$2 \times 1,3$ -二磷酸甘油酸 → $2 \times 3$ -磷酸甘油酸		$2 \times 1$
	$2 \times$ 磷酸烯醇式丙酮酸 → $2 \times$ 丙酮酸		$2 \times 1$
第二阶段	$2 \times$ 丙酮酸 → $2 \times$ 乙酰CoA	$\text{NAD}^+$	$2 \times 2.5$
第三 阶 段	$2 \times$ 异柠檬酸 → $2 \times$ $\alpha$ 酮戊二酸	$\text{NAD}^+$	$2 \times 2.5$
	$2 \times$ $\alpha$ 酮戊二酸 → $2 \times$ 琥珀酰CoA	$\text{NAD}^+$	$2 \times 2.5$
	$2 \times$ 琥珀酰CoA → $2 \times$ 琥珀酸		$2 \times 1$
	$2 \times$ 琥珀酸 → $2 \times$ 延胡索酸	$\text{FAD}$	$2 \times 1.5$
	$2 \times$ 苹果酸 → $2 \times$ 草酰乙酸	$\text{NAD}^+$	$2 \times 2.5$

31



## 小结

- ❖ 熟悉化学渗透学说
- ❖ 熟悉电子呼吸链
- ❖ 掌握能量(ATP)的计算:

32



## 作业-合并

❖ 胞浆中甘油彻底有氧氧化产生多少ATP?