

## 课后思考题

# 非竞争性抑制剂与变构抑制剂的区别

李佳佳同学

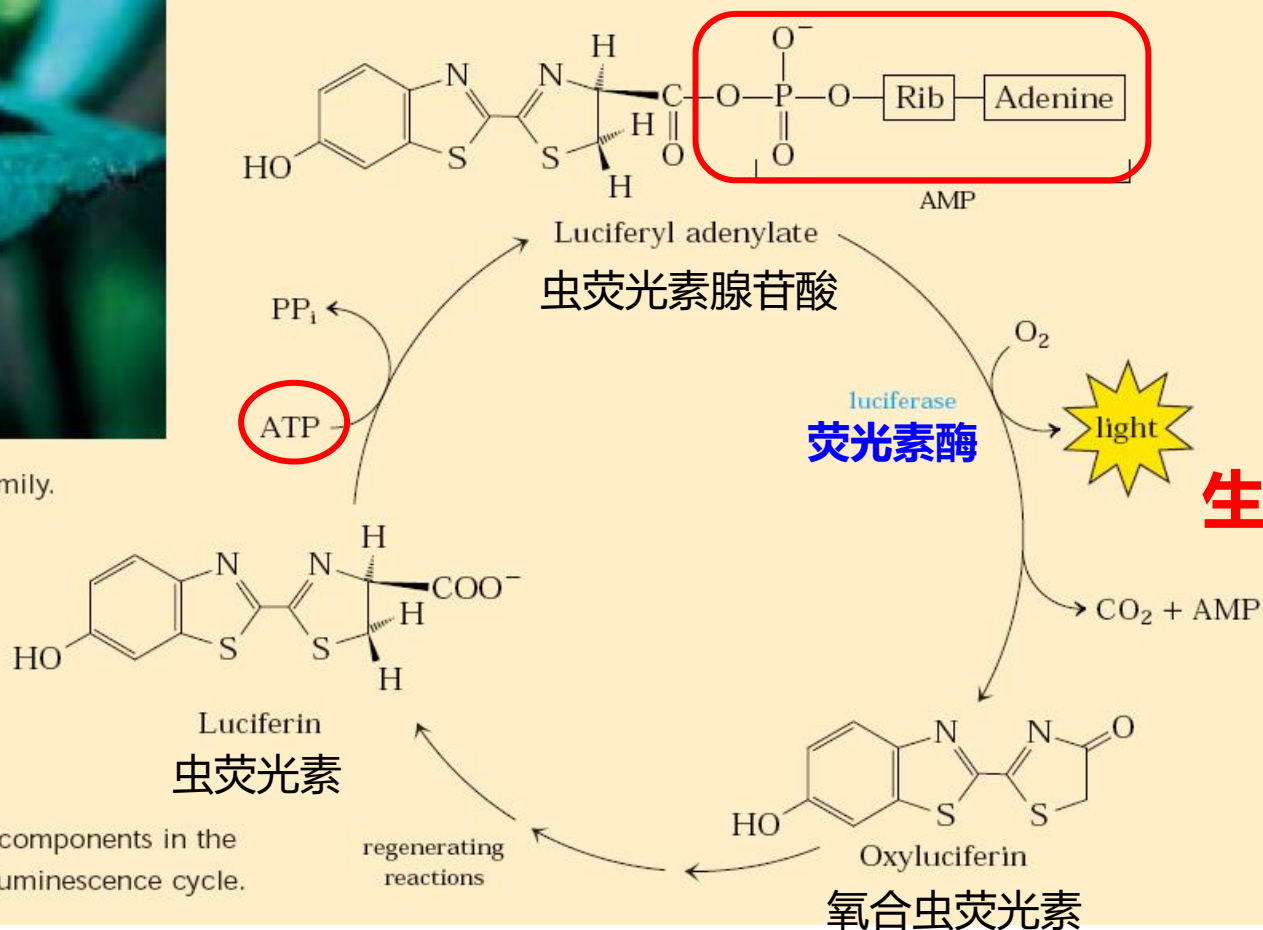
# 第六章 生物氧化和生物能

## *Biological Oxidation and Bioenergy*



The firefly, a beetle of the Lampyridae family.

荧光素酶  
报告基因系统



生物发光

# 本章主要内容（4节课）

---

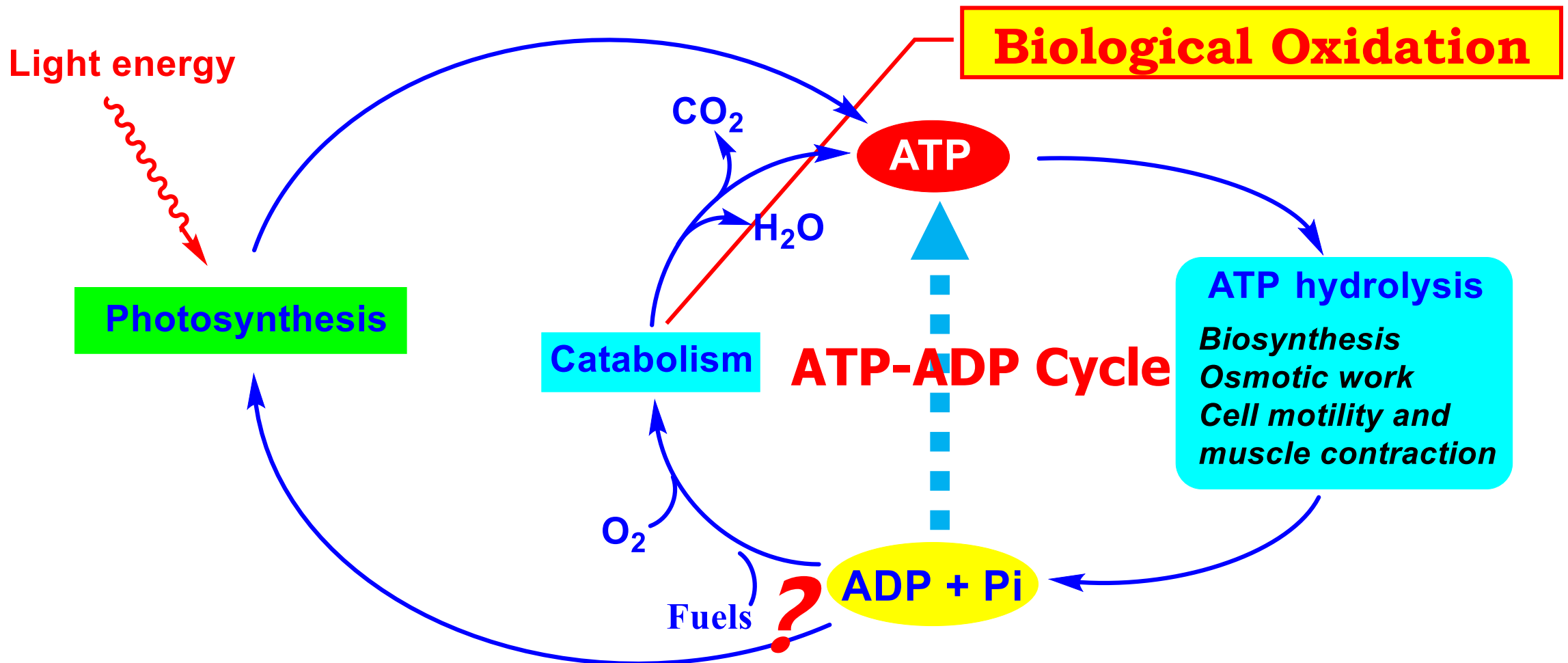
- 一．生物氧化的方式和特点（重点）
- 二．生物能及其存在形式（重点）
- 三．线粒体呼吸链（重点）
- 四．ATP的合成（重点）

# Where is the bioenergy come from?

---

- 维持生命活动的能量，主要有两个来源：
- 光能（太阳能）：植物和某些藻类，通过光合作用将光能转变成生物能。
- 化学能：动物和大多数的微生物，通过生物氧化作用将有机物质存储的化学能释放出来，并转变成生物能。

# Where is the bioenergy come from?



# Biological Oxidation

---

- **定义**：指有机物质在生物体内氧化分解成 $\text{CO}_2$ 和 $\text{H}_2\text{O}$ ，并释放出能量形成ATP的过程。
- 生物氧化通常需要消耗氧，故又称为呼吸作用(respiration)。
- 有机物质  $\xrightarrow[\text{生物氧化}]{\text{O}_2}$   $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{energy (ATP)}$
- 线粒体是真核细胞生物氧化主要场所。

# *What is Biological Transformation (or Metabolic Transformation)?*

---

## □ 生物转化或代谢转化

自学内容：教材p288

外源有机物（药物、毒物等）进入机体后，在肝脏**微粒体氧化酶系**的作用下，发生一系列化学变化并形成一些分解产物或衍生物的过程。

主要区别：产物不同，场所不同

# 一、生物氧化的方式和特点

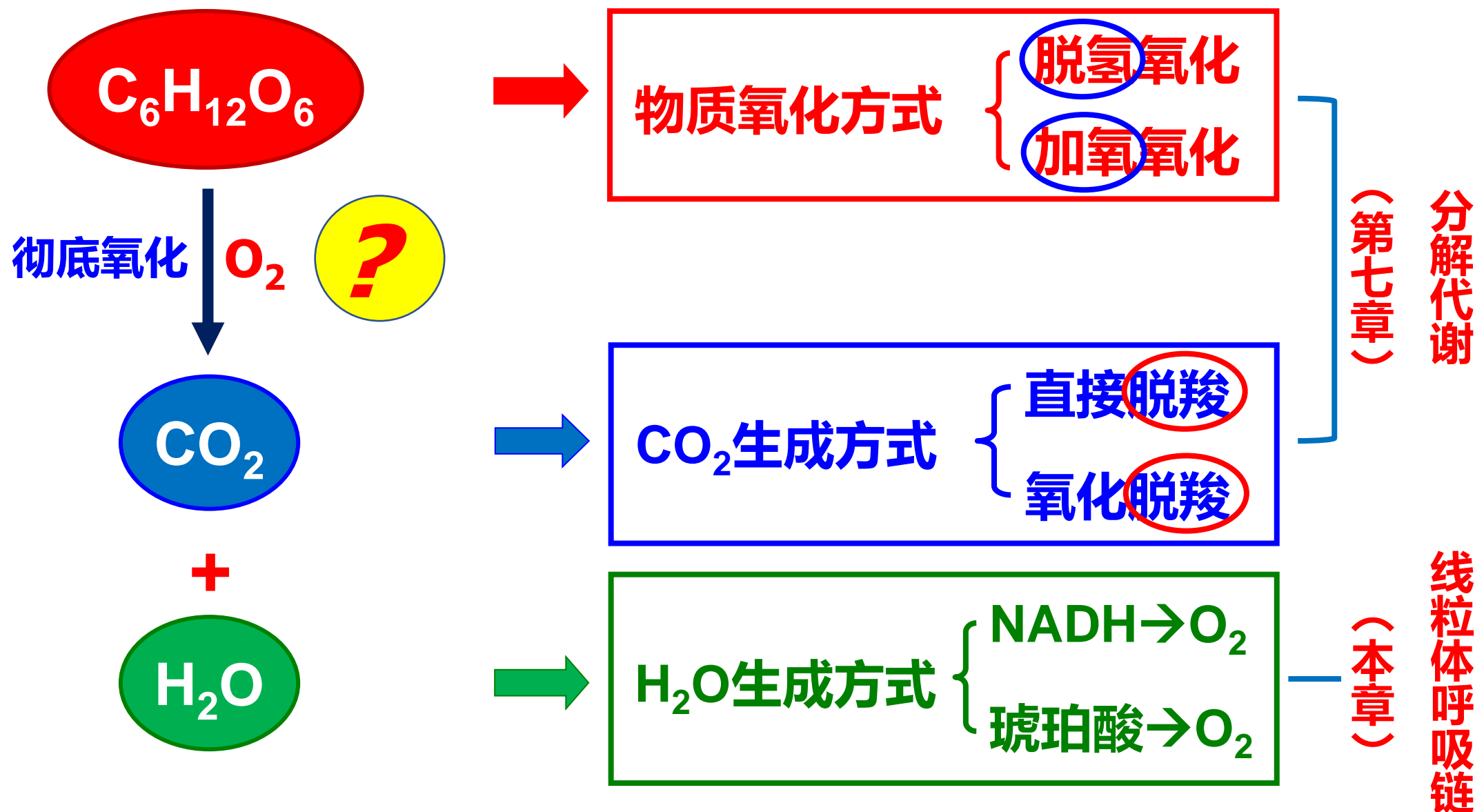
## 1. 生物氧化的方式

---

- 在细胞内一系列氧还酶催化下**分步进行**。
- 每一步反应，都由特定的**酶催化**。
- 其物质氧化及 $\text{CO}_2$ 和 $\text{H}_2\text{O}$ 生成的方式**与一般氧化不同**。



# 1. 生物氧化的方式

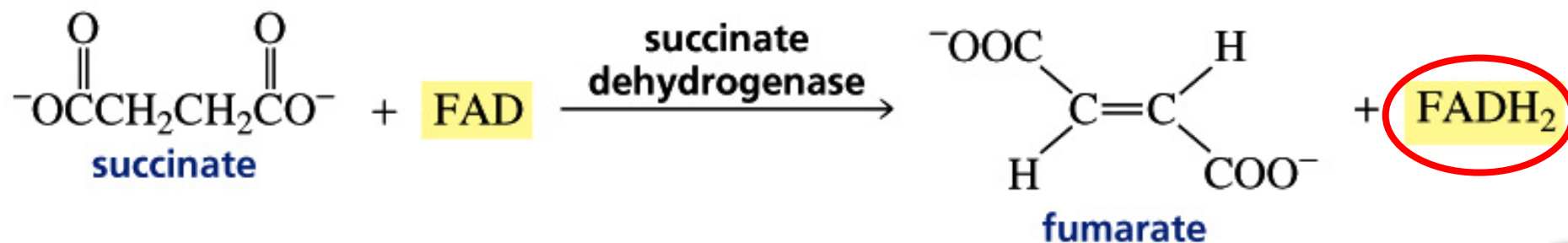


# 1. 生物氧化的方式

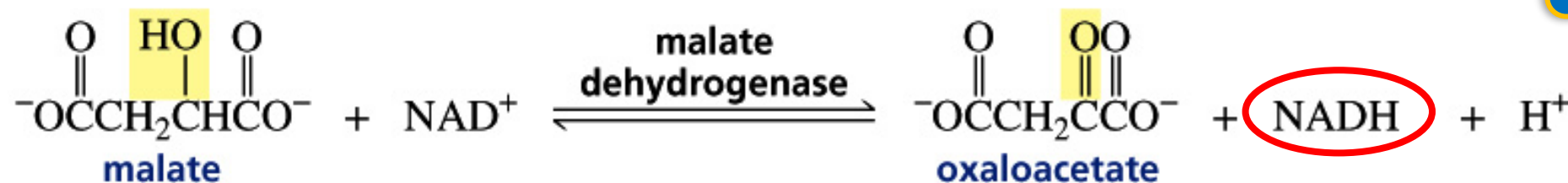
## 1.1 脱氢氧化反应

### (1) 脱氢

- 是许多有机物质生物氧化的重要步骤。
- 由各种类型的脱氢酶完成这类反应。



底物脱氢

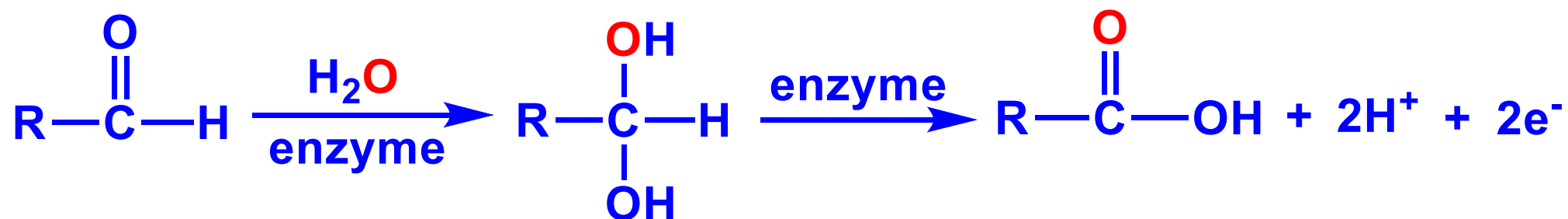


# 1. 生物氧化的方式

## 1.1 脱氢氧化反应

### (2) 加水脱氢

- 如酶催化的醛氧化成酸的反应。



水为供氧体

# 1. 生物氧化的方式

## 1.2 加氧氧化反应

### (1) 加氧酶(oxygenase)

能够催化氧分子直接加入到有机分子中。



底物插氧

# 1. 生物氧化的方式

## 1.2 加氧氧化反应

### (2) 氧化酶(oxidase)

主要催化以**氧分子**为电子受体的氧化反应，反应产物为**水**。

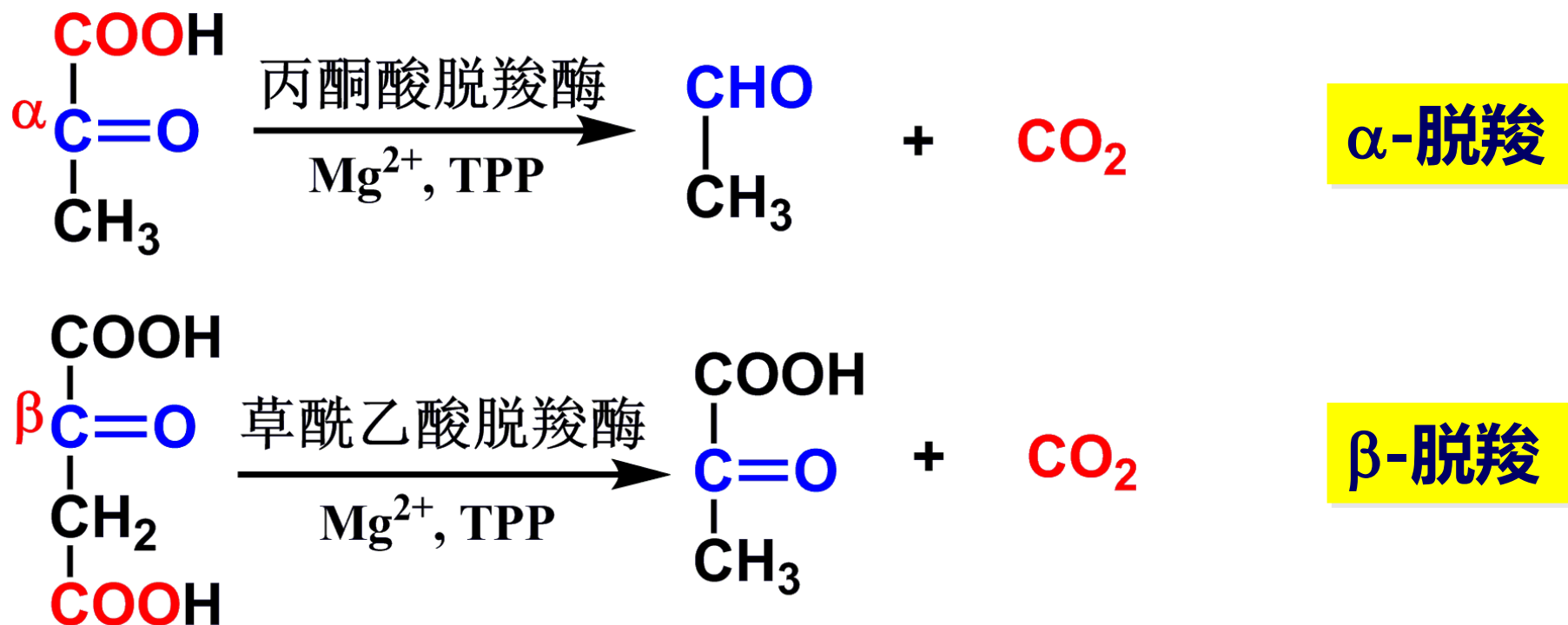


氧为受氢体

# 1. 生物氧化的方式

## 1.3 直接脱羧作用

- 氧化代谢的中间产物羧酸在脱羧酶的催化下，直接从分子中脱去羧基。



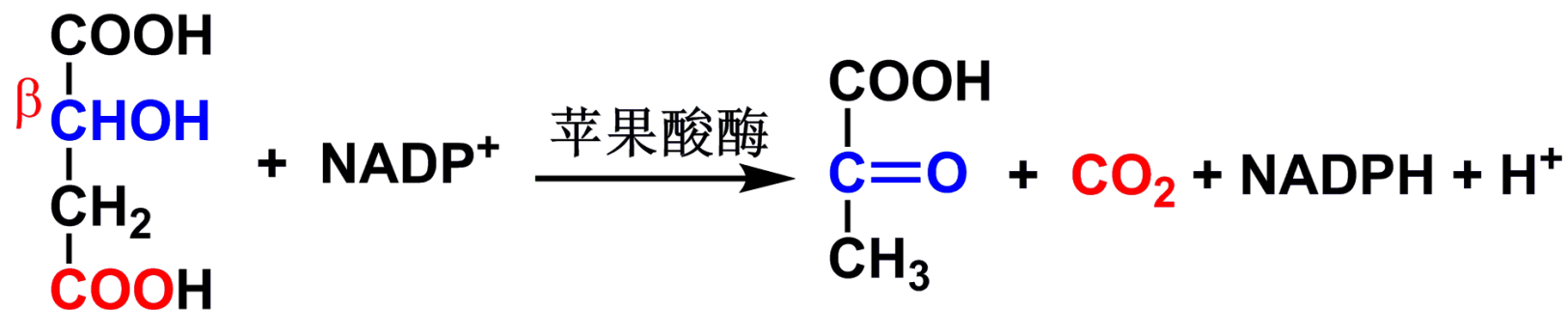
# 1. 生物氧化的方式

## 1.4 氧化脱羧作用

- 氧化代谢产生的羧酸在氧化脱羧酶系催化下，同时发生脱羧和脱氢氧化作用。



**$\alpha$ -氧化脱羧**



**$\beta$ -氧化脱羧**

## 2. 生物氧化的特点

---

- ① 条件温和。
- ② 必然伴随生物还原。
- ③ 水是所有生物氧化反应的氧供体。
- ④ 碳的氧化和氢的氧化并非同步进行。
- ⑤ 分步进行（氧化链）。有利于温和条件下释放能量，提高能量利用率。
- ⑥ 释放的能量，与ATP合成相偶联，转换成生物体能直接利用的生物能（ATP）。



## 二、生物能及其存在形式

### 1. 生物能和ATP

---

#### 1.1 ATP是生物能存在的主要形式

- 一般的能量形式，如光能（如太阳能）、热能和化学能等，都不能为生物细胞直接利用。
- **ATP**是能够被生物细胞直接利用的主要能量形式。

生物  
合成

底物  
活化

酶的  
激活

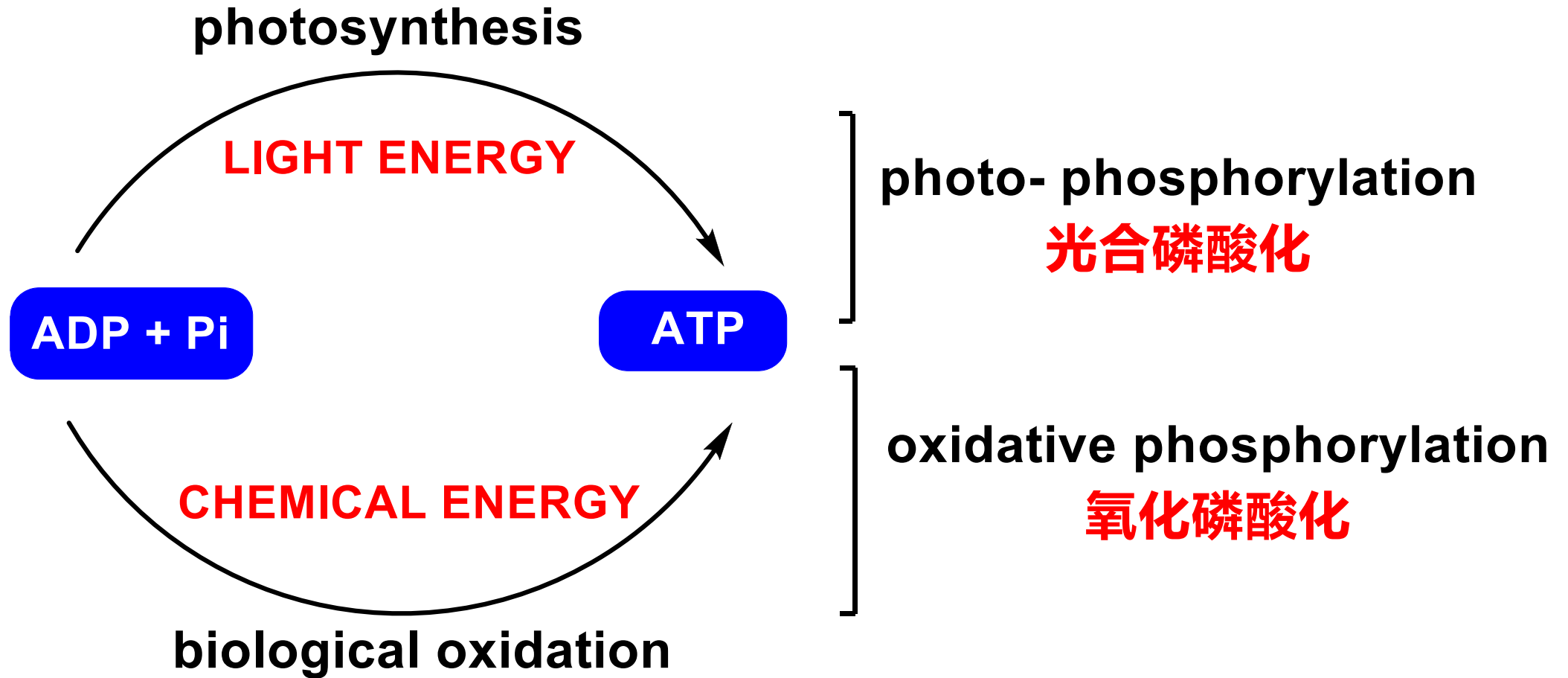
信息  
传递

物质  
转运

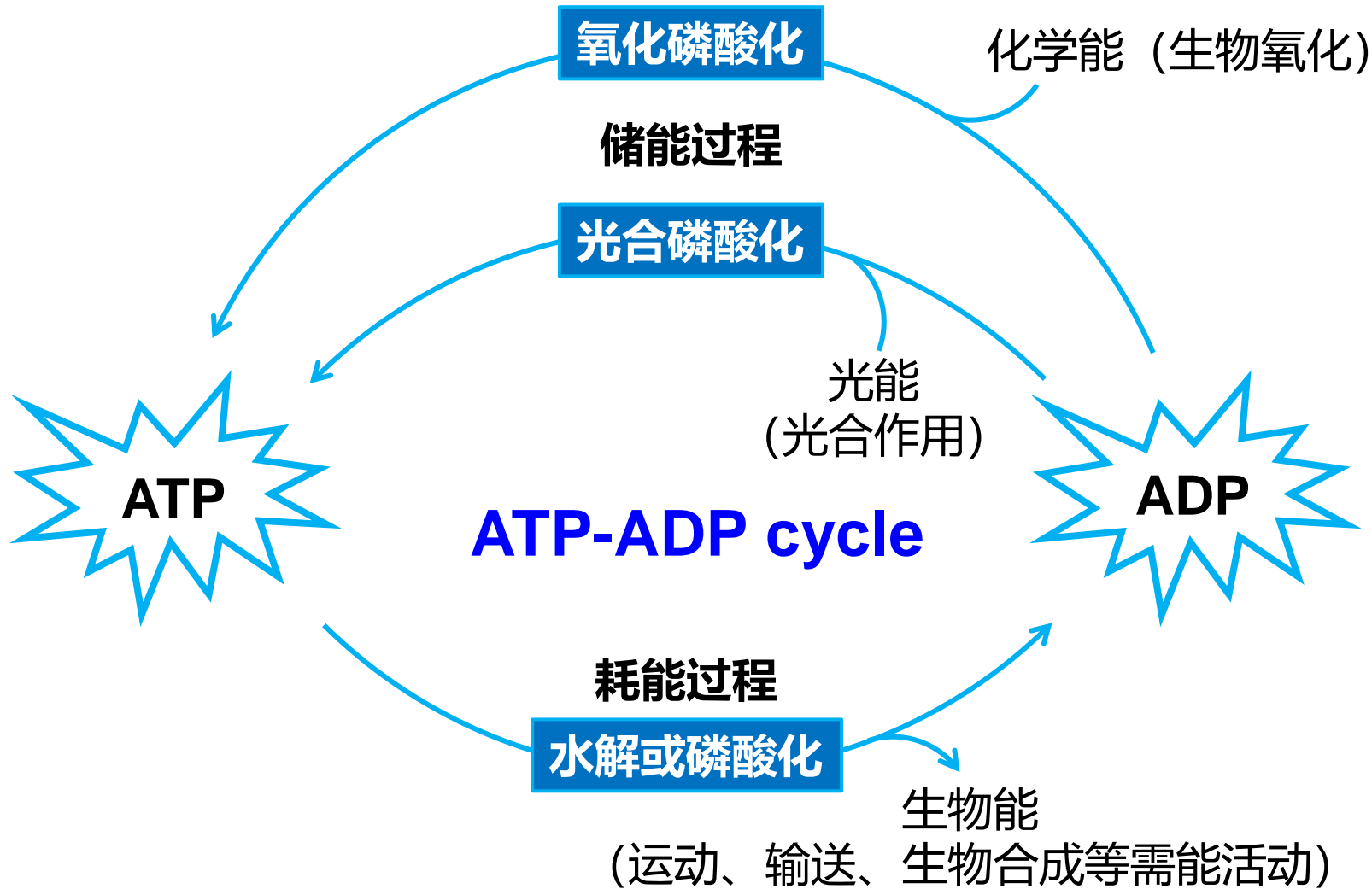
细胞  
运动

# Where is the ATP come from?

---



# What are the properties of ATP in cell?



- ① 一种**瞬时**自由能供体。
- ② ATP, ADP, Pi始终处于**动态平衡**状态。
- ③ ATP-ADP**循环**，速率**非常快**。

# 1. 生物能和ATP

## 1.2 生物化学反应的自由能变化

- 生化反应服从热力学定律

$$\Delta G^\circ = \Delta H^\circ - T\Delta S^\circ$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta G^\circ \text{ --- 反应自由能变化} \\ \Delta H^\circ \text{ --- 反应焓变化} \\ T\Delta S^\circ \text{ --- 反应熵变化} \end{array} \right.$$

- 细胞体系:  $\Delta S^\circ \approx 0$ ,  $\Delta G^\circ \approx \Delta H^\circ$

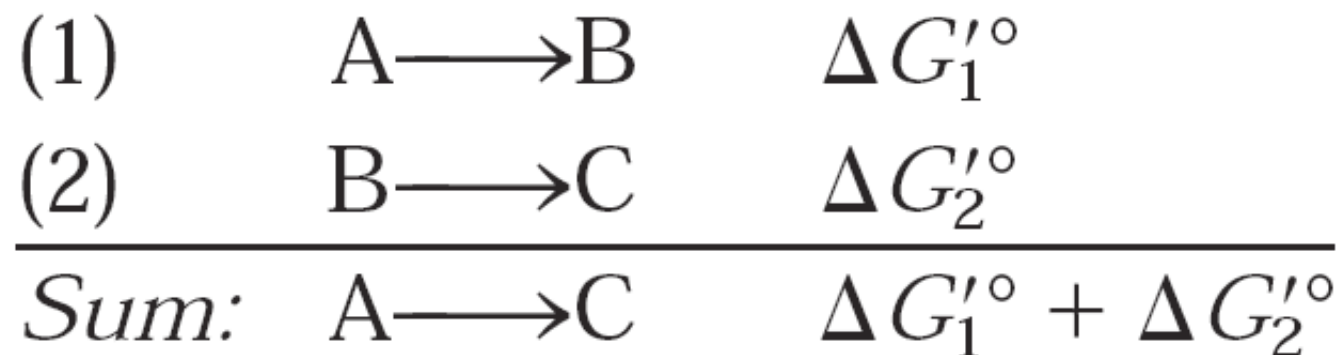
吸热反应,  $\Delta G^\circ > 0$ , 不能自发进行。

放热反应,  $\Delta G^\circ < 0$ , 能自发进行。

# 1. 生物能和ATP

## 1.3 ATP与需能生化反应的偶联

- 热力学上不利的生化反应，可以通过与一个热力学上有利的反应相偶联的方式来实现。



# 1. 生物能和ATP

---

## 1.3 ATP与需能生化反应的偶联

• 例如:



$$\Delta G^{\circ'}_{\text{总}} = + 14 + (- 31) = -17 \text{ (kJ/mol)} < 0$$

# Why is ATP a high energy compound?

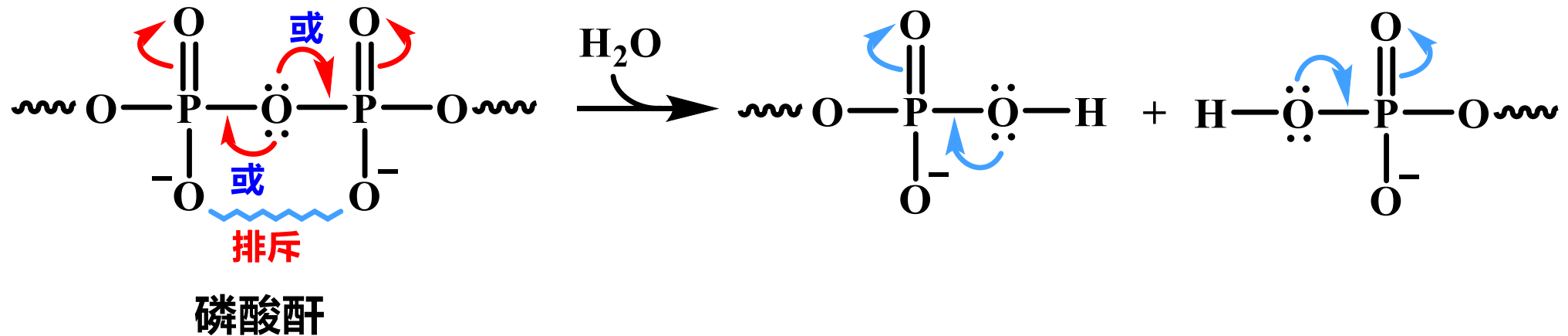
## □ 两种不稳定因素:

(1) **静电排斥:**  $\text{ATP}^{4-}$ , 负电荷密度高, 排斥力强, 不稳定

(2) **共振竞争:** 磷酸酐键不稳定

## □ 一种稳定因素:

(3) **溶剂化效应:** 产物  $\text{ADP} + \text{Pi}$  带更多负电荷, 溶剂化效应大



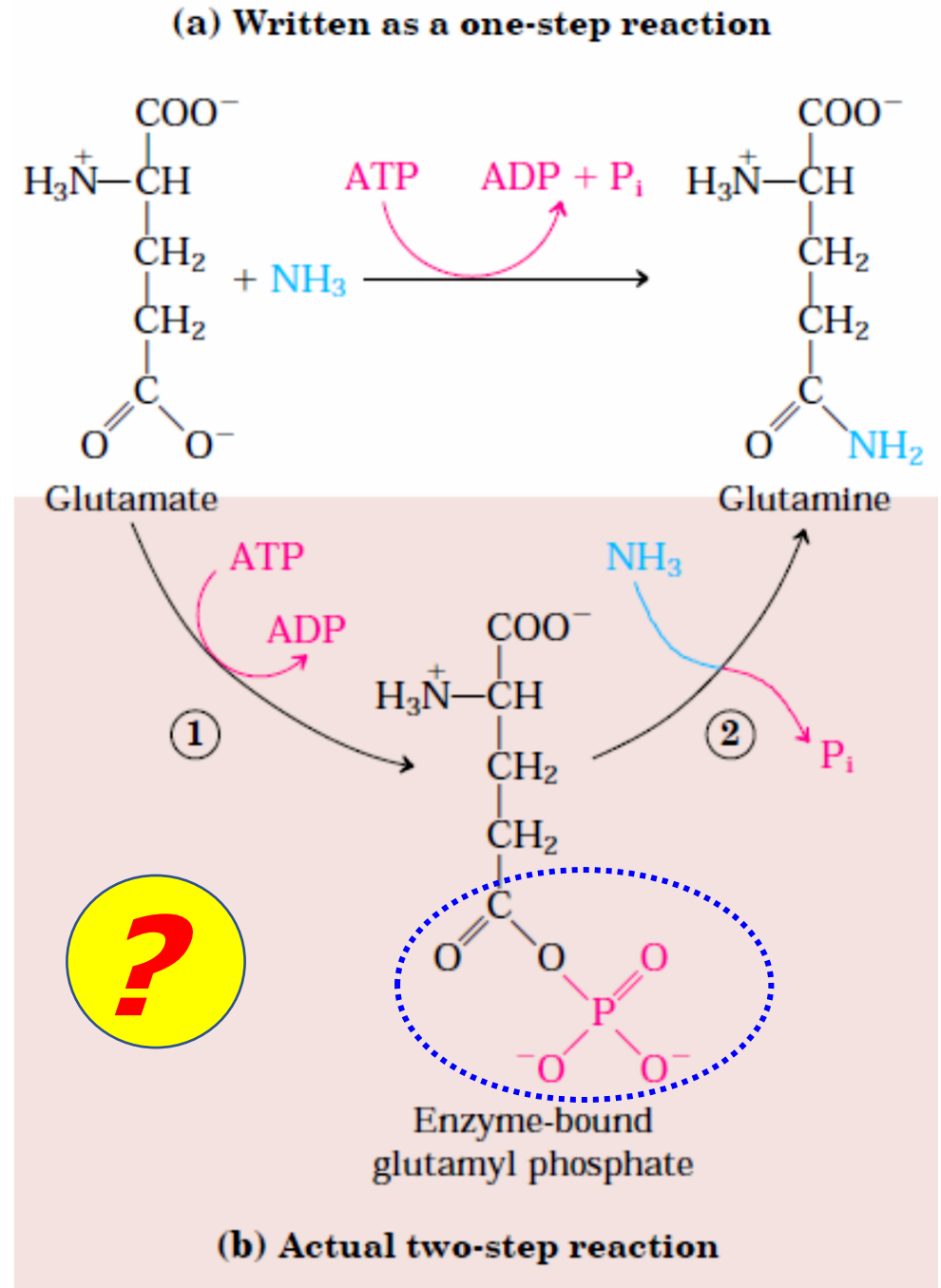
# What are the functions of ATP?

(1) 能量转换中间体

(2) 磷酸基转移中间体

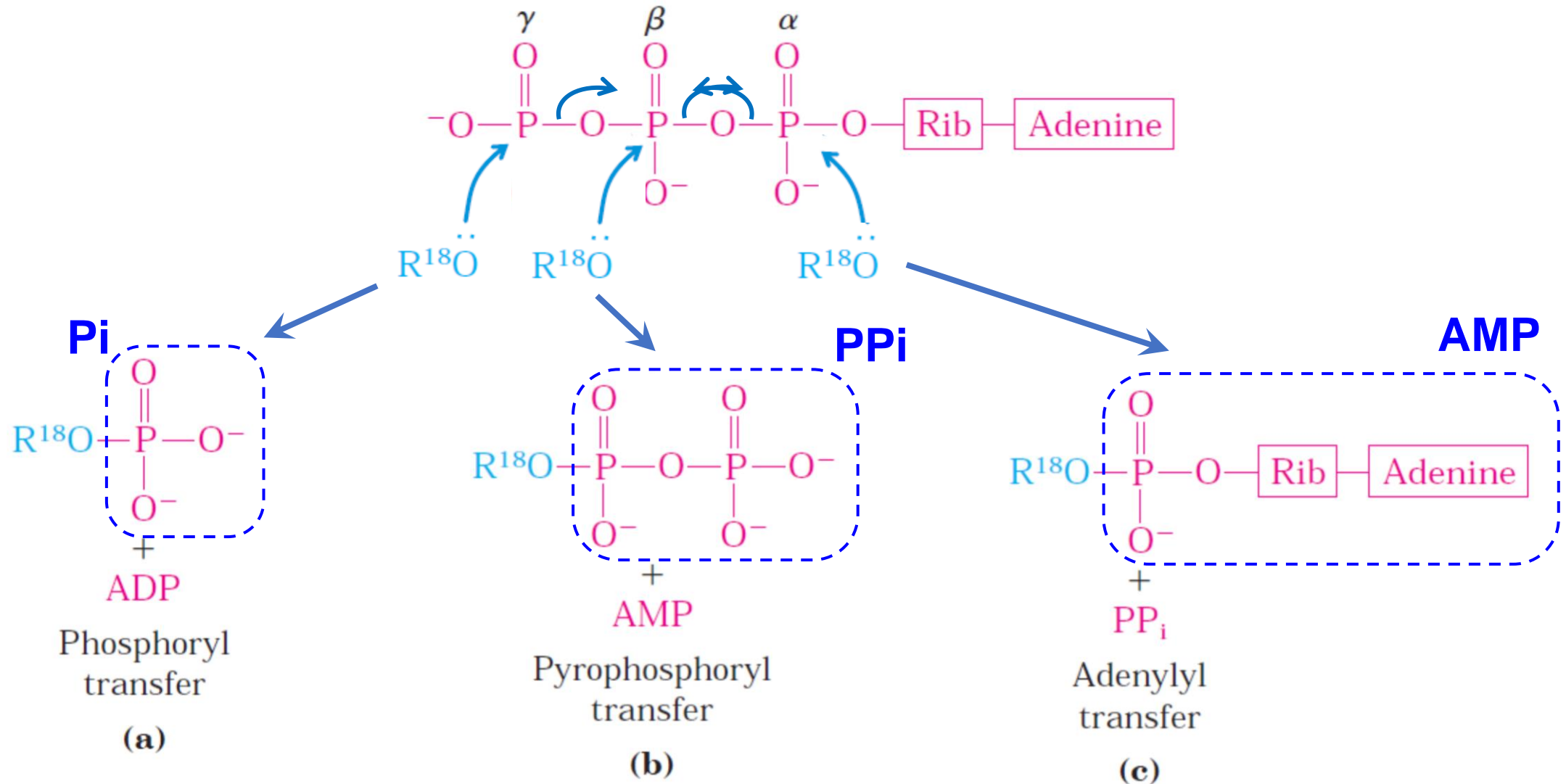
**Note! !**

*ATP provides energy by group transfers, not by simple hydrolysis.*





# ATP Donates Phosphoryl, Pyrophosphoryl, and Adenylyl Groups



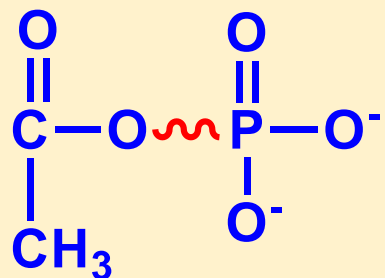
## 二、生物能及其存在形式

### 2. 生物体系中的高能化合物

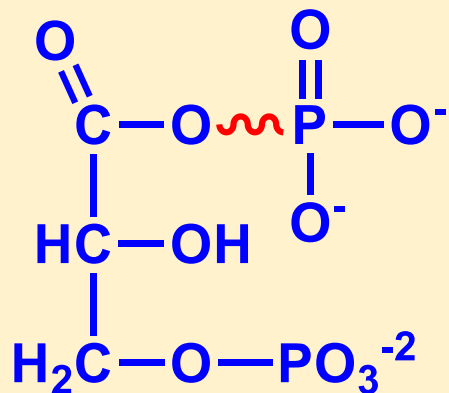
---

- **高能化合物：**  $-\Delta G^{\ominus'} > 21 \text{ kJ/mol}$ 的化合物
- ATP是生物体中最重要的高能化合物。
- 存在许多其他高能化合物，也能释放出自由能。
- ATP与这些高能化合物**相互转换、相互补充**，成为细胞需能活动的**自由能供体库**。
- 几种类型。

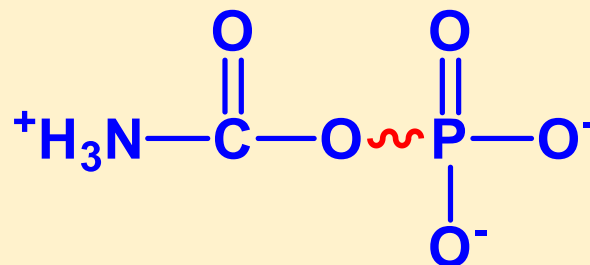
## 2.1 氧磷键型(O-P)



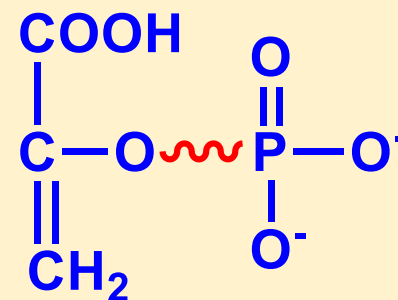
**乙酰磷酸**  
**42.3 kJ/mol**



**二磷酸甘油酸**  
**49.3 kJ/mol**

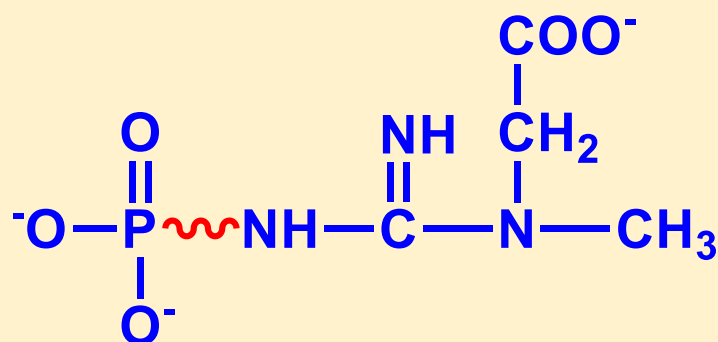


**氨甲酰磷酸**  
**51.5 kJ/mol**



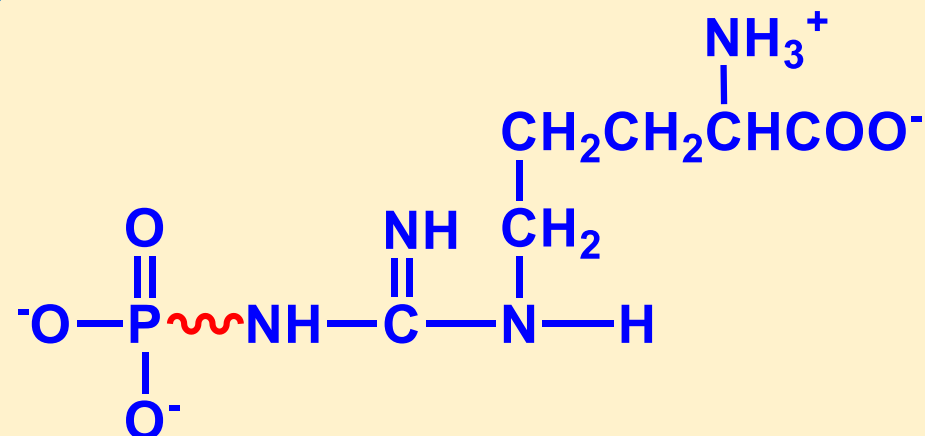
**磷酸烯醇式丙酮酸**  
**61.9 kJ/mol**

## 2.2 氮磷键型(N-P)



磷酸肌酸

43.0 kJ/mol

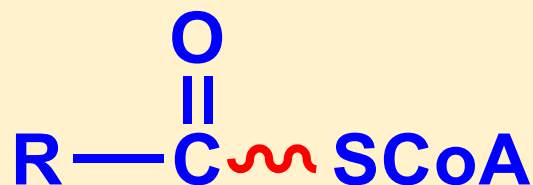


磷酸精氨酸

32.2 kJ/mol

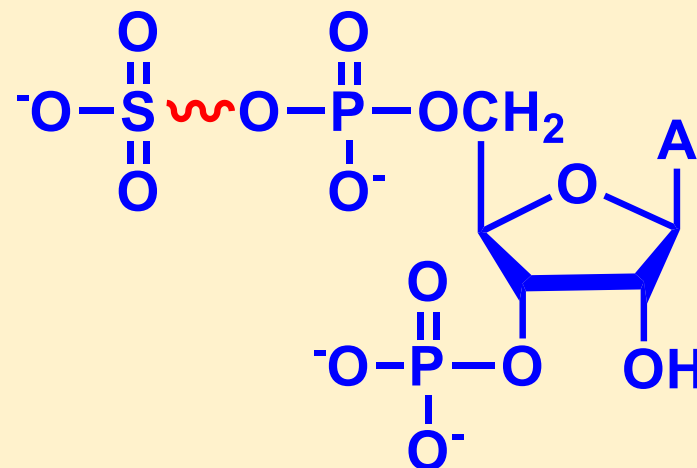
这两种高能化合物在生物体内起储存能量的作用。

## 2.3 含硫键型(-S-)



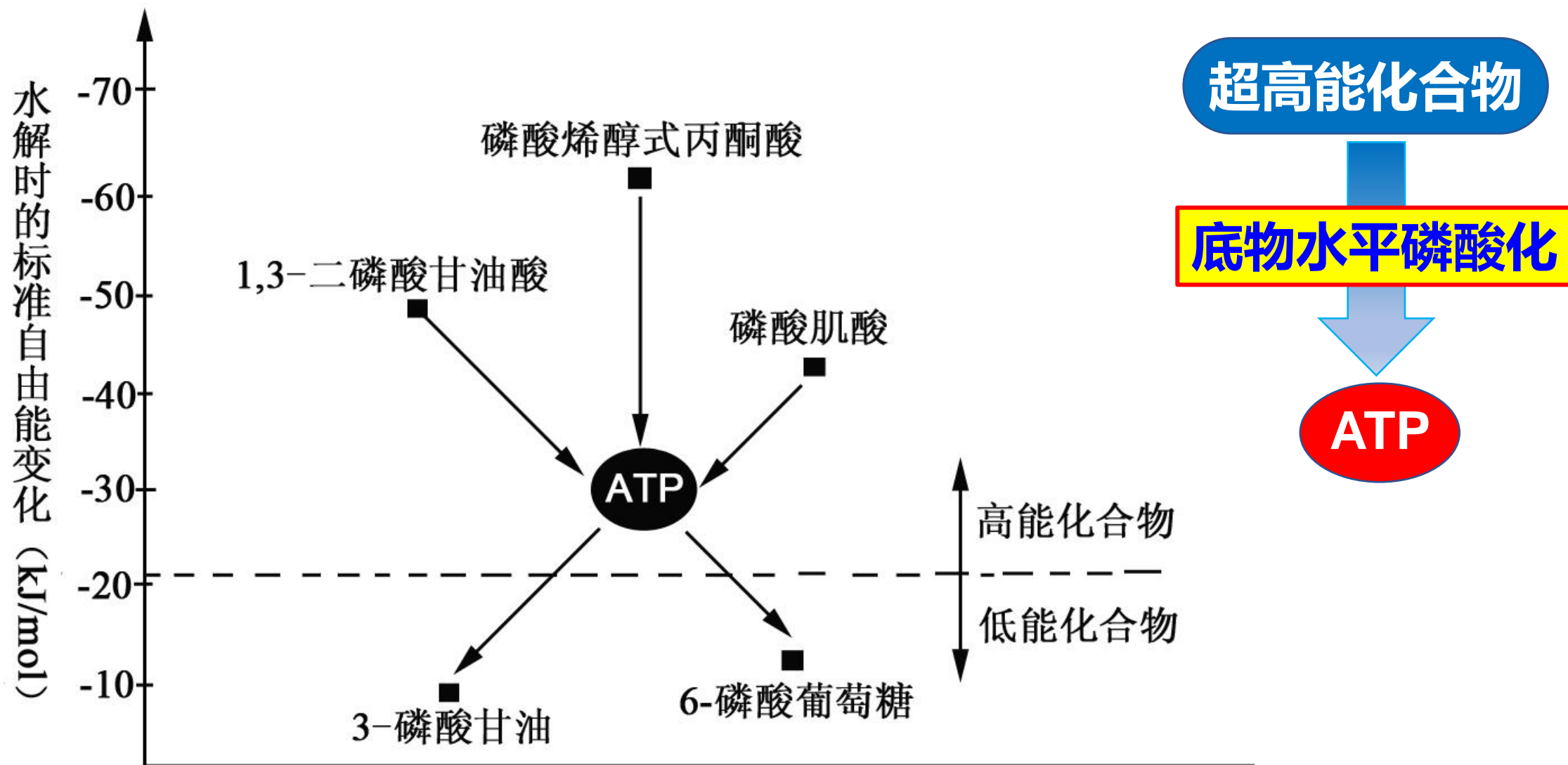
酰基辅酶A

31.4 kJ/mol



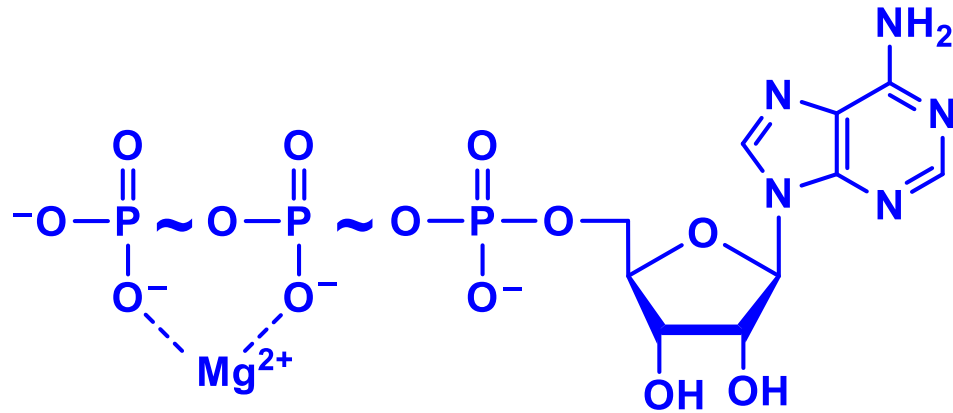
3'-磷酸腺苷-5'-磷酰硫酸

# ATP在能量转运中的中间传递体作用

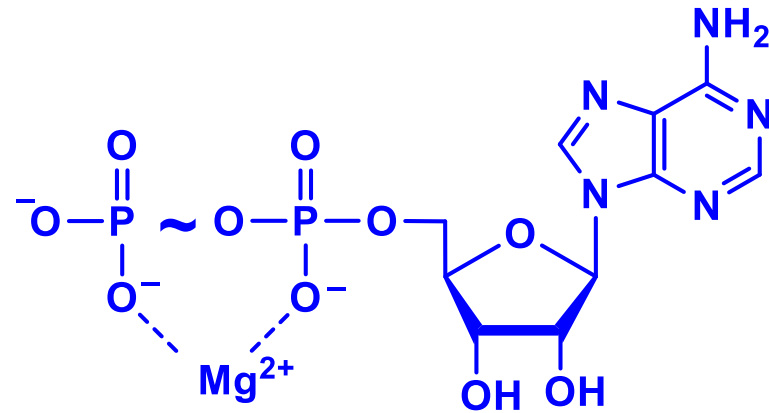


# 细胞内ATP自由能的释放

- pH = 7, 磷酸基团为解离状态, 与 $\text{Mg}^{2+}$ 形成配合物。



$\text{MgATP}^{2-}$



$\text{MgADP}^-$

- 影响因素较为复杂 (pH, 配合物种类、阳离子类型等)
- 活细胞中, 浓度比标准的1 mol/L低得多,

$$\Delta G^{0'} = -31 \text{ kJ/mol},$$

实际可达到-50 ~ -65 kJ/mol。 (怎么得来的? )

**TABLE 13–5** Adenine Nucleotide, Inorganic Phosphate, and Phosphocreatine Concentrations in Some Cells

	Concentration (mM)*				
	ATP	ADP <sup>†</sup>	AMP	P <sub>i</sub>	PCr
Rat hepatocyte	3.38	1.32	0.29	4.8	0
Rat myocyte	8.05	0.93	0.04	8.05	28
Rat neuron	2.59	0.73	0.06	2.72	4.7
Human erythrocyte	2.25	0.25	0.02	1.65	0
<i>E. coli</i> cell	7.90	1.04	0.82	7.9	0

$$\Delta G_p = \Delta G'^{\circ} + RT \ln \frac{[\text{ADP}][\text{P}_i]}{[\text{ATP}]}$$

$$\Delta G_p = -30.5 \text{ kJ/mol} +$$

$$\left[ (8.315 \text{ J/mol} \cdot \text{K})(298 \text{ K}) \ln \frac{(0.25 \times 10^{-3})(1.65 \times 10^{-3})}{2.25 \times 10^{-3}} \right]$$

$$= -30.5 \text{ kJ/mol} + (2.48 \text{ kJ/mol}) \ln 1.8 \times 10^{-4}$$

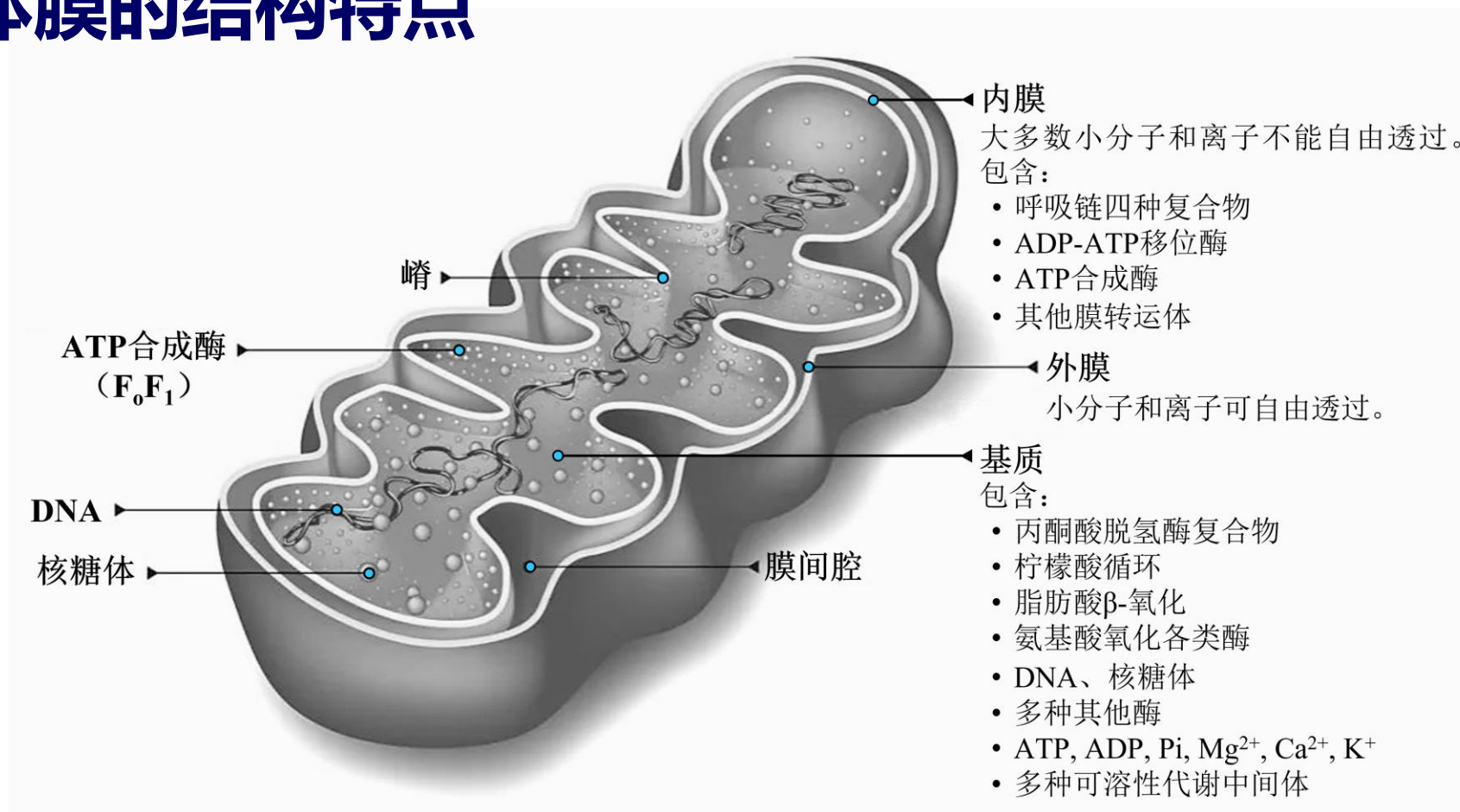
$$= -30.5 \text{ kJ/mol} - 21 \text{ kJ/mol}$$

$$= -52 \text{ kJ/mol}$$



# 三、线粒体呼吸链

## 1. 线粒体膜的结构特点



# 三、线粒体呼吸链

## 2. 线粒体及其呼吸链

---

- **线粒体**：生物氧化的主要场所。

- **线粒体的主要功能**：

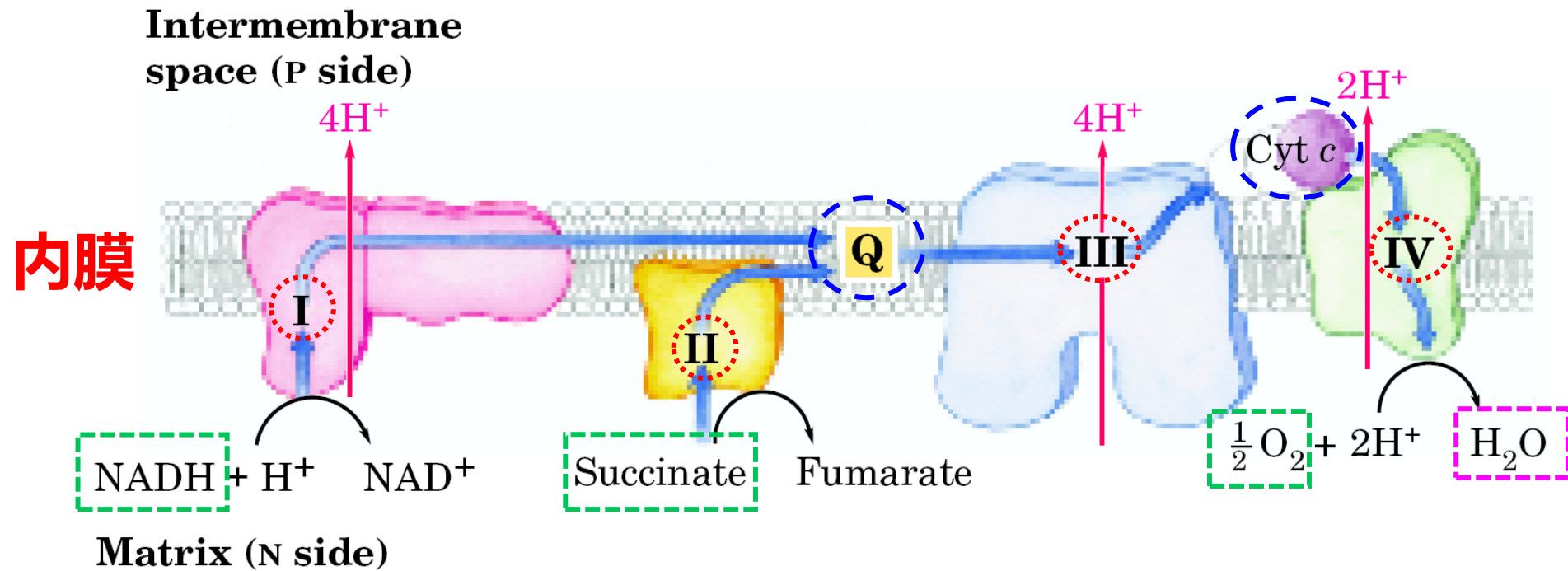
将代谢物（糖、脂、蛋白质等）脱下的**氢**通过多种酶及辅酶所组成的传递体系的传递，最终**与氧结合生成水**。

# 三、线粒体呼吸链

## 2. 线粒体及其呼吸链

---

- **线粒体呼吸链**：存在于线粒体内膜上的由一系列氧化还原酶、蛋白质电子载体以及辅酶Q等组成的一个完整的电子传递体系。
- **线粒体呼吸链的功能**：将NADH或琥珀酸等脱下的电子和质子传递给氧，生成水，释放出能量，并合成ATP。



**Complex I: NADH-Q氧化酶**

**Complex II: 琥珀酸-Q氧化酶**

**Complex III:  $\text{QH}_2$ -Cyt.c氧化酶**

**Complex IV: Cyt.c氧化酶**

**NADH: 供氢供电子底物**

**Succinate: 供氢供电子底物**

**$\text{O}_2$ : 供氧底物**

**Coenzyme Q: 辅助底物**

**Cyt. c: 辅助底物**

**$\text{H}_2\text{O}$ : 产物**

# 三、线粒体呼吸链

## 3. 线粒体呼吸链的电子传递

---

### 3.1 氧化-还原电势与自由能的变化

- 氧化与还原总是相互偶联的。一个化合物（还原剂）失去电子，必然伴随另一个化合物（氧化剂）接受电子。
- 在线粒体呼吸链中，推动电子从NADH传递到 $O_2$ 的力，是由于 $NAD^+/NADH + H^+$  和  $1/2 O_2/H_2O$  两个半反应之间存在很大的电势差。

### 3. 线粒体呼吸链的电子传递

#### 3.1 氧化-还原电势与自由能的变化



将 (a) 减去 (b), 即得 (c) 式:



$$E^{\ominus'} = 0.82 - (- 0.32) = +1.14 \text{ V}$$

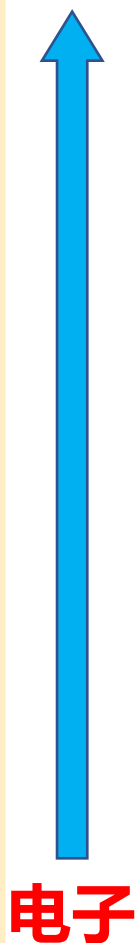
$$\Delta G^{\ominus'} = -nF\Delta E^{\ominus'} = -2 \times 96500 \times 1.14 = - 220 \text{ kJ / mol}$$

**TABLE 13–7** Standard Reduction Potentials of Some Biologically Important Half-Reactions, at pH 7.0 and 25°C (298 K)

Half-reaction	$E'^{\circ}$ (V)
$\frac{1}{2}\text{O}_2 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \longrightarrow \text{H}_2\text{O}$	0.816
$\text{Fe}^{3+} + \text{e}^- \longrightarrow \text{Fe}^{2+}$	0.771
$\text{NO}_3^- + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \longrightarrow \text{NO}_2^- + \text{H}_2\text{O}$	0.421
Cytochrome <i>f</i> ( $\text{Fe}^{3+}$ ) + $\text{e}^- \longrightarrow$ cytochrome <i>f</i> ( $\text{Fe}^{2+}$ )	0.365
$\text{Fe}(\text{CN})_6^{3-}$ (ferricyanide) + $\text{e}^- \longrightarrow \text{Fe}(\text{CN})_6^{4-}$	0.36
Cytochrome <i>a</i> <sub>3</sub> ( $\text{Fe}^{3+}$ ) + $\text{e}^- \longrightarrow$ cytochrome <i>a</i> <sub>3</sub> ( $\text{Fe}^{2+}$ )	0.35
$\text{O}_2 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \longrightarrow \text{H}_2\text{O}_2$	0.295
Cytochrome <i>a</i> ( $\text{Fe}^{3+}$ ) + $\text{e}^- \longrightarrow$ cytochrome <i>a</i> ( $\text{Fe}^{2+}$ )	0.29
Cytochrome <i>c</i> ( $\text{Fe}^{3+}$ ) + $\text{e}^- \longrightarrow$ cytochrome <i>c</i> ( $\text{Fe}^{2+}$ )	0.254
Cytochrome <i>c</i> <sub>1</sub> ( $\text{Fe}^{3+}$ ) + $\text{e}^- \longrightarrow$ cytochrome <i>c</i> <sub>1</sub> ( $\text{Fe}^{2+}$ )	0.22
Cytochrome <i>b</i> ( $\text{Fe}^{3+}$ ) + $\text{e}^- \longrightarrow$ cytochrome <i>b</i> ( $\text{Fe}^{2+}$ )	0.077
Ubiquinone + $2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \longrightarrow$ ubiquinol + $\text{H}_2$	0.045
$\text{Fumarate}^{2-} + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \longrightarrow \text{succinate}^{2-}$	0.031
$2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \longrightarrow \text{H}_2$ (at standard conditions, pH 0)	0.000
Crotonyl-CoA + $2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \longrightarrow$ butyryl-CoA	−0.015
Oxaloacetate <sup>2−</sup> + $2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \longrightarrow$ malate <sup>2−</sup>	−0.166
Pyruvate <sup>−</sup> + $2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \longrightarrow$ lactate <sup>−</sup>	−0.185
Acetaldehyde + $2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \longrightarrow$ ethanol	−0.197
$\text{FAD} + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \longrightarrow \text{FADH}_2$	−0.219*
Glutathione + $2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \longrightarrow$ 2 reduced glutathione	−0.23
$\text{S} + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \longrightarrow \text{H}_2\text{S}$	−0.243
Lipoic acid + $2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \longrightarrow$ dihydrolipoic acid	−0.29
$\text{NAD}^+ + \text{H}^+ + 2\text{e}^- \longrightarrow \text{NADH}$	−0.320
$\text{NADP}^+ + \text{H}^+ + 2\text{e}^- \longrightarrow \text{NADPH}$	−0.324
Acetoacetate + $2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \longrightarrow \beta$ -hydroxybutyrate	−0.346
$\alpha$ -Ketoglutarate + $\text{CO}_2 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \longrightarrow$ isocitrate	−0.38
$2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \longrightarrow \text{H}_2$ (at pH 7)	−0.414
Ferredoxin ( $\text{Fe}^{3+}$ ) + $\text{e}^- \longrightarrow$ ferredoxin ( $\text{Fe}^{2+}$ )	−0.432

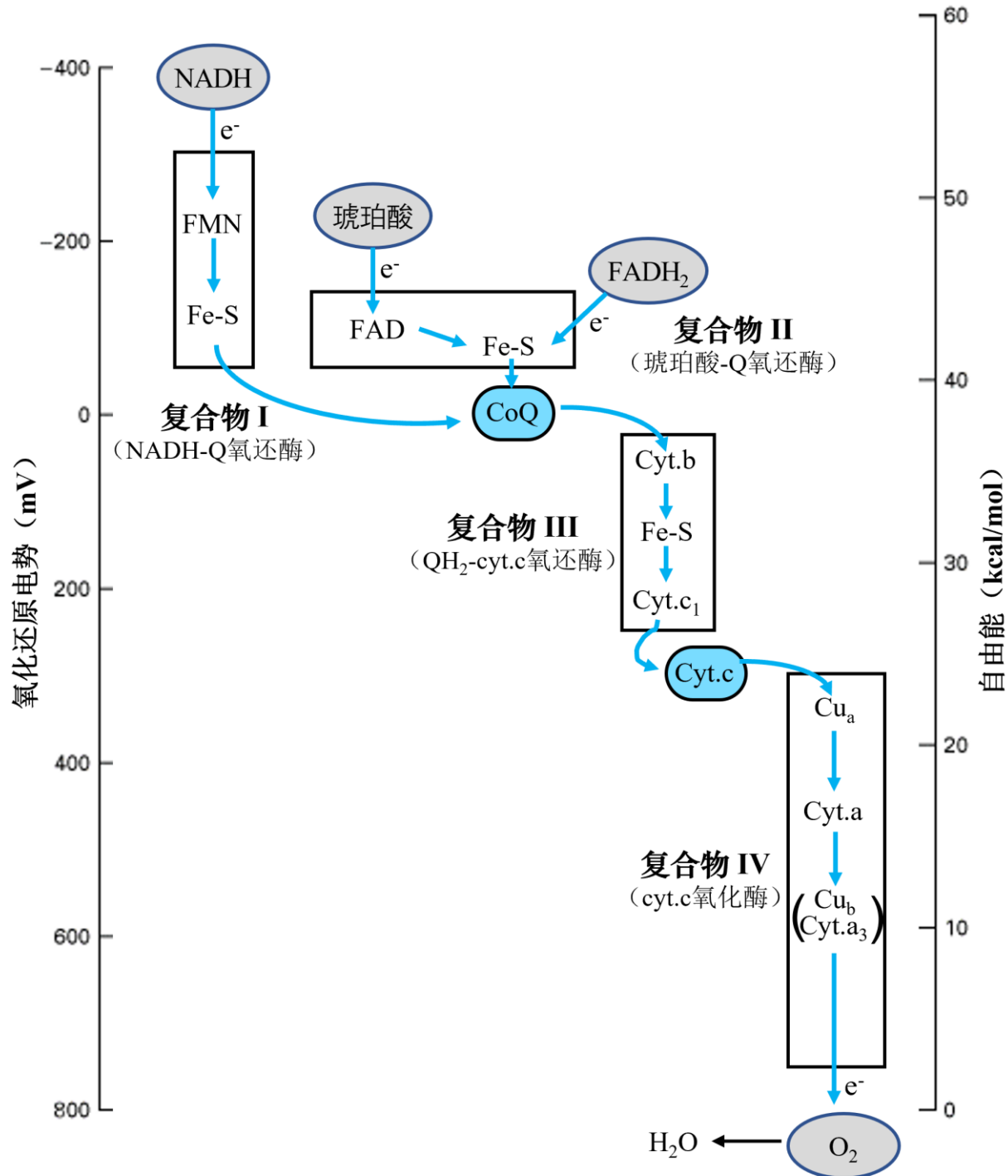
## 关于还原电位 $E^{\ominus'}$

- 氧化剂/还原剂半反应标准还原电位。
- $E^{\ominus'}$  越正，氧化剂氧化（得电子）能力越强。
- $E^{\ominus'}$  越负，还原剂还原（失电子）能力越强。
- 可判断电子传递方向。



# 氧化还原电势 与呼吸链电子 传递方向

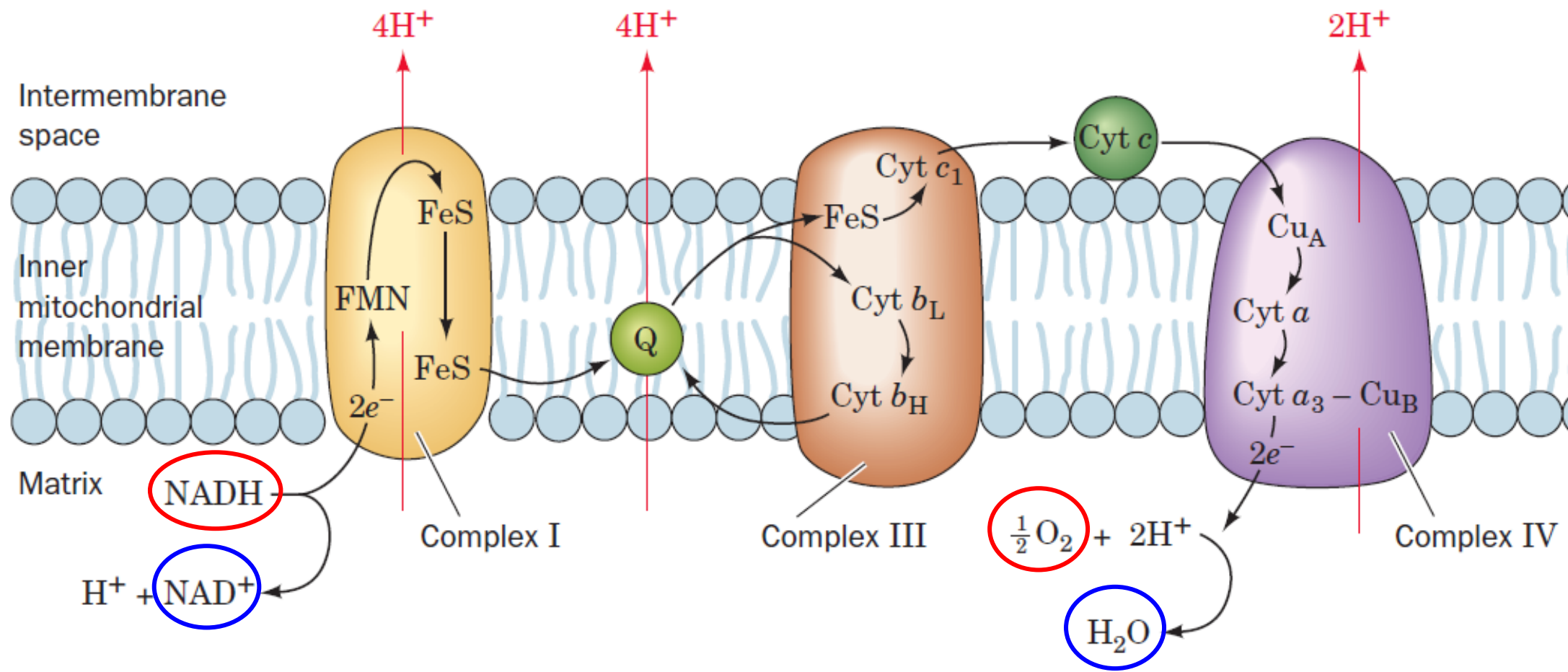
$$\Delta G^{\ominus'} = -nF\Delta E^{\ominus'}$$





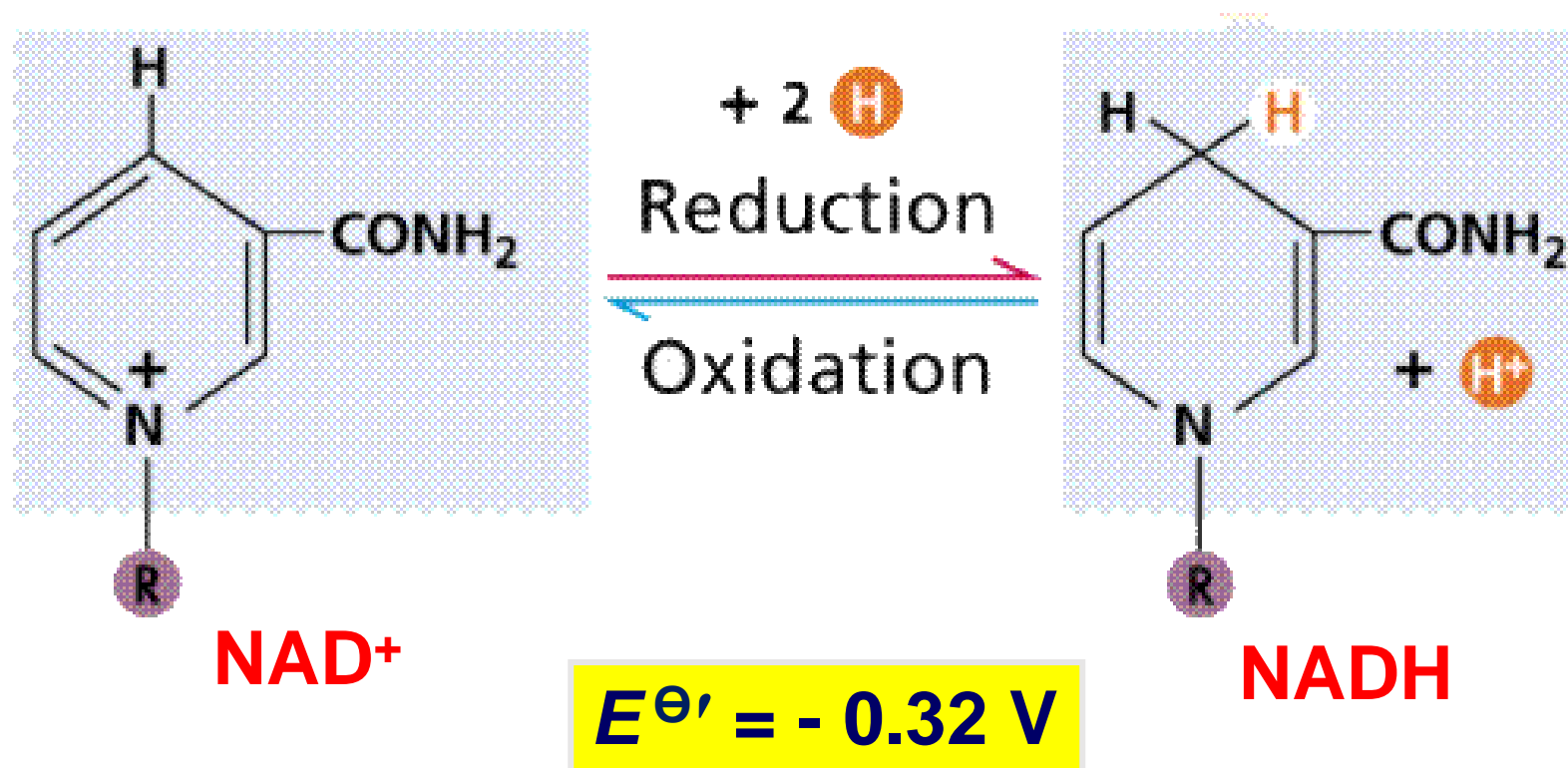
### 3. 线粒体呼吸链的电子传递

#### 3.2 线粒体呼吸链 $\text{NADH} \rightarrow \text{O}_2$ 的电子传递



## ① 供氢供电子底物：NADH

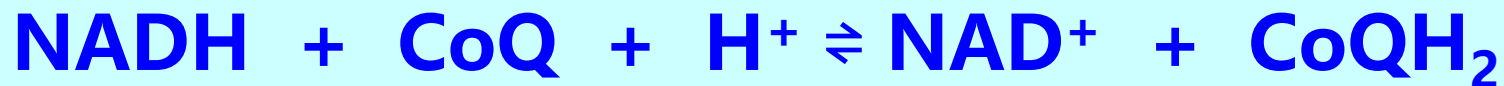
- 还原型辅酶，由NAD<sup>+</sup>接受多种代谢产物脱氢得到的产物。是线粒体呼吸链主要电子和质子供体之一。



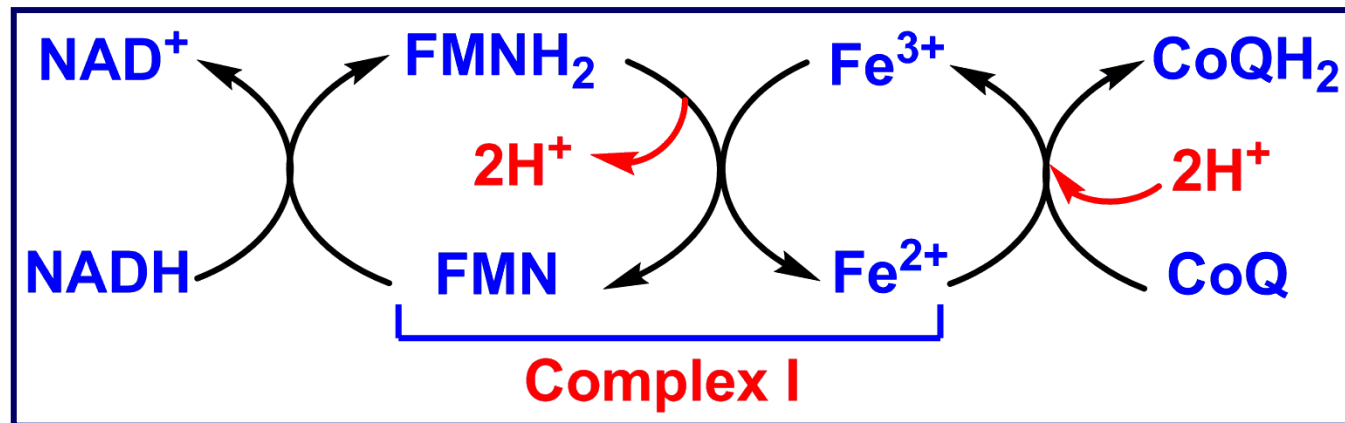
## ② 氧还酶：Complex I

### NADH-CoQ oxidoreductase

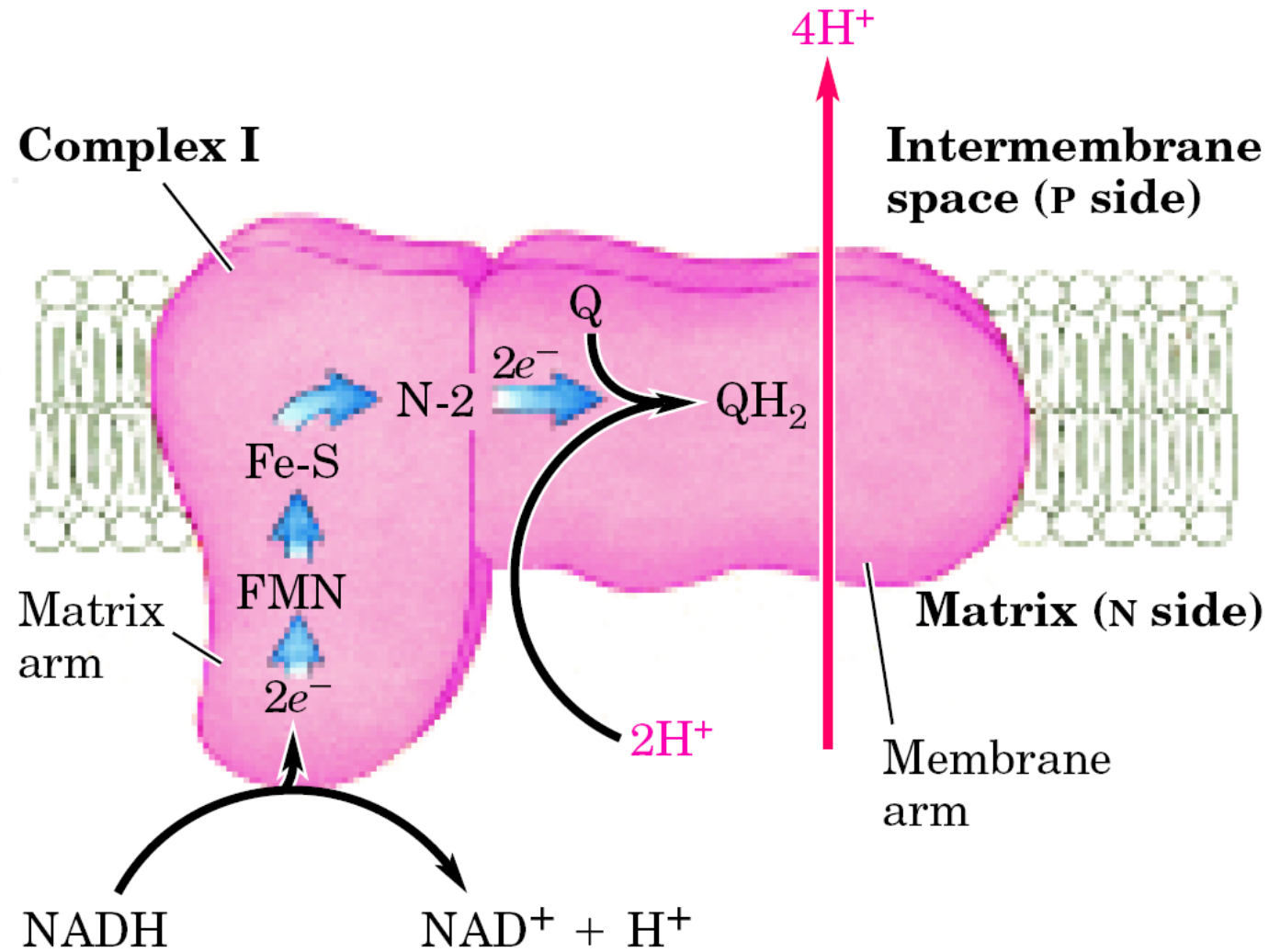
- **作用：**催化NADH的脱氢以及CoQ的还原。



- 既是一种脱氢酶，也是一种还原酶。
- 至少含有16个多肽亚基。
- **活性部位：**黄素蛋白（含FMN）和铁硫蛋白。



# NADH-CoQ oxidoreductase (Complex I)



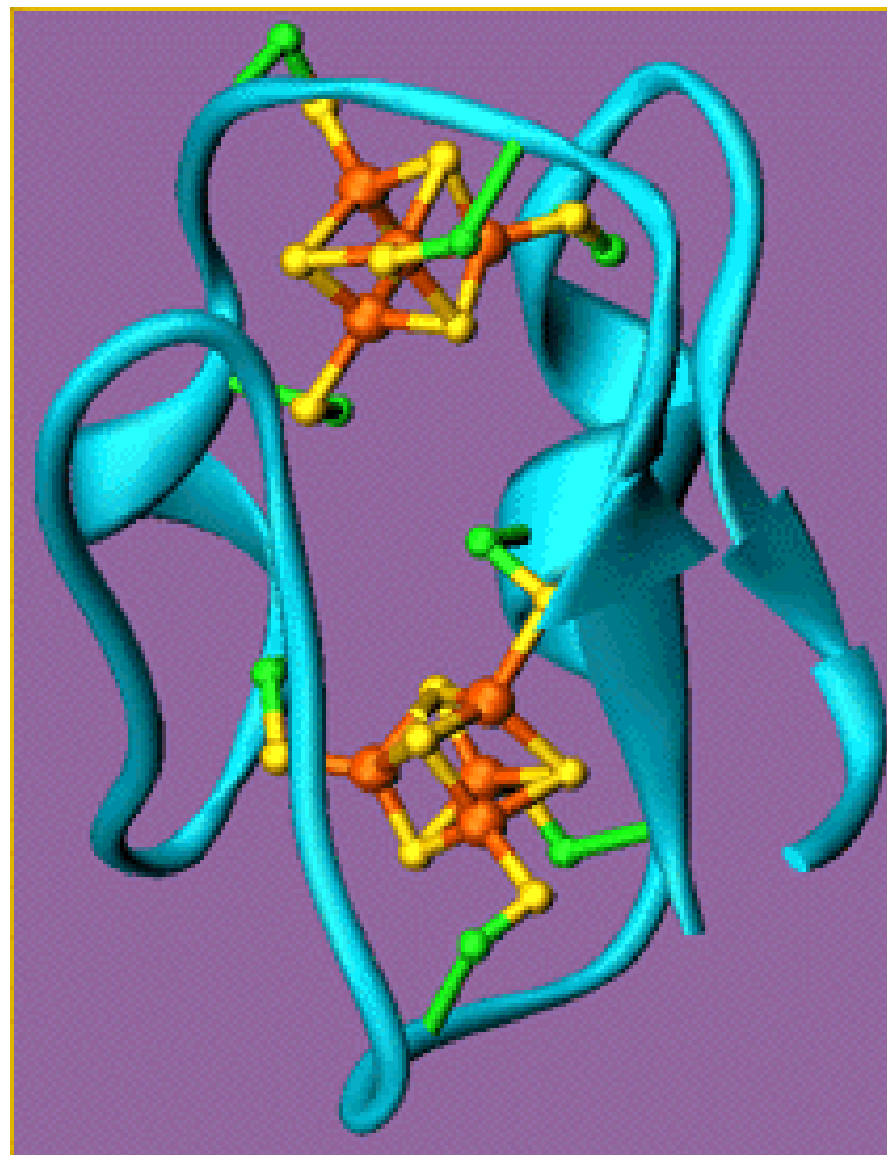
(N-2: one of iron-sulfur proteins)

# 铁硫蛋白

## iron-sulfur proteins

---

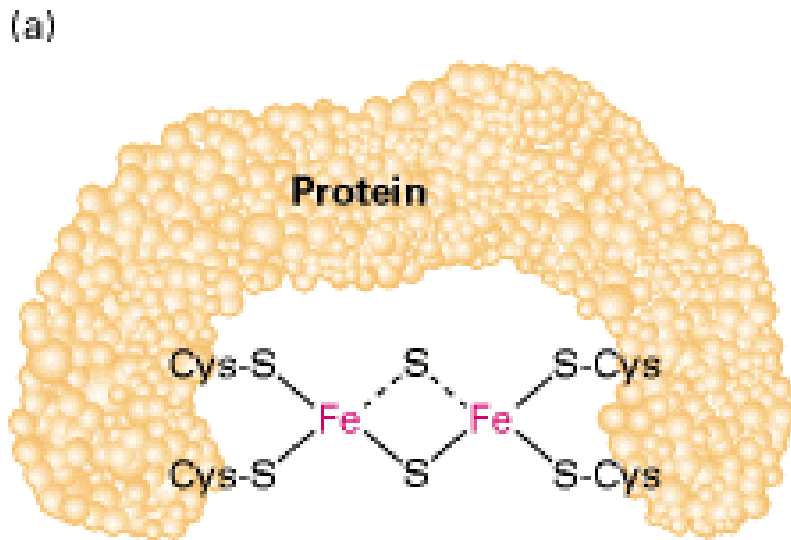
- **铁硫蛋白**：简写为[Fe-S]，是一种与电子传递有关的蛋白质，它与氧还酶的其他蛋白质组分结合成复合物形式存在。
- **铁硫中心**：铁硫蛋白中的非蛋白部分。



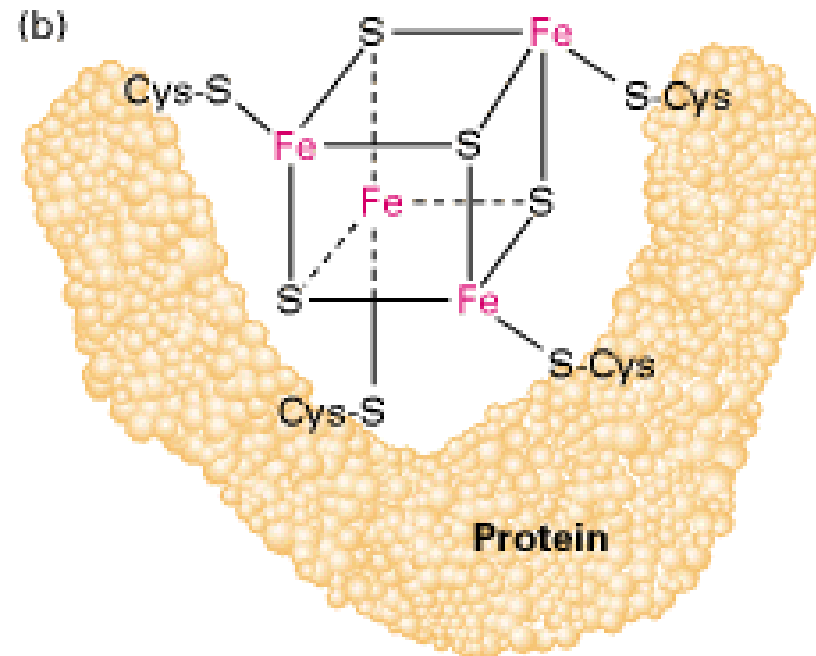
# 铁硫蛋白中的铁硫中心

## iron-sulfur center in iron-sulfur proteins

- 主要以 [2Fe-2S] 或 [4Fe-4S] 形式存在。
- 通过  $\text{Fe}^{3+} \leftrightarrow \text{Fe}^{2+}$  变化起传递电子的作用



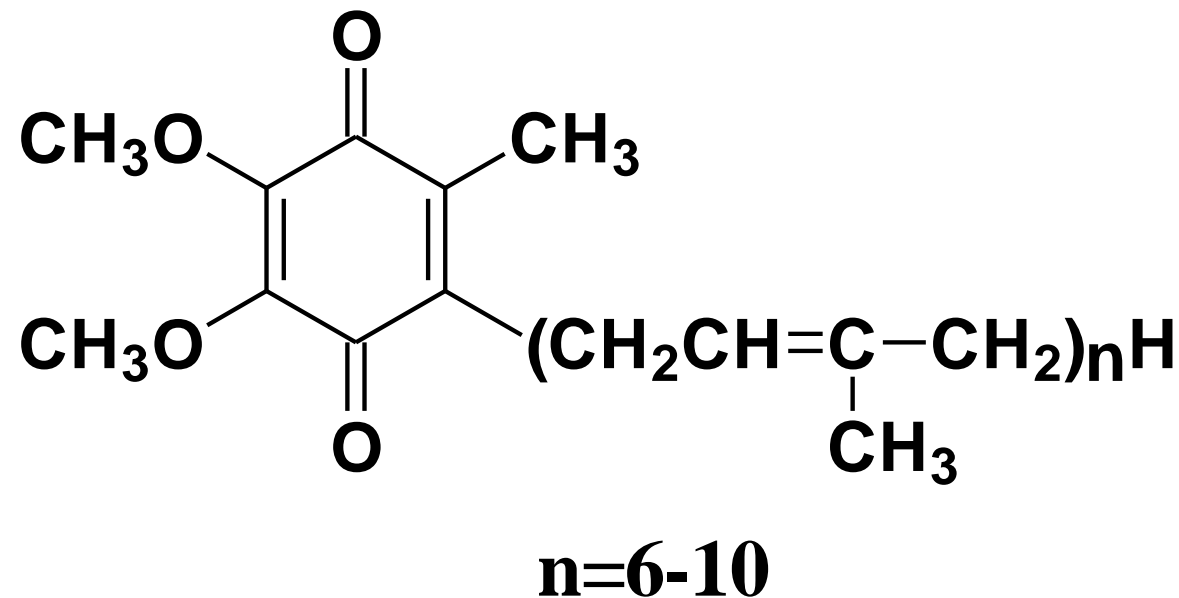
[2Fe-2S]



[4Fe-4S]

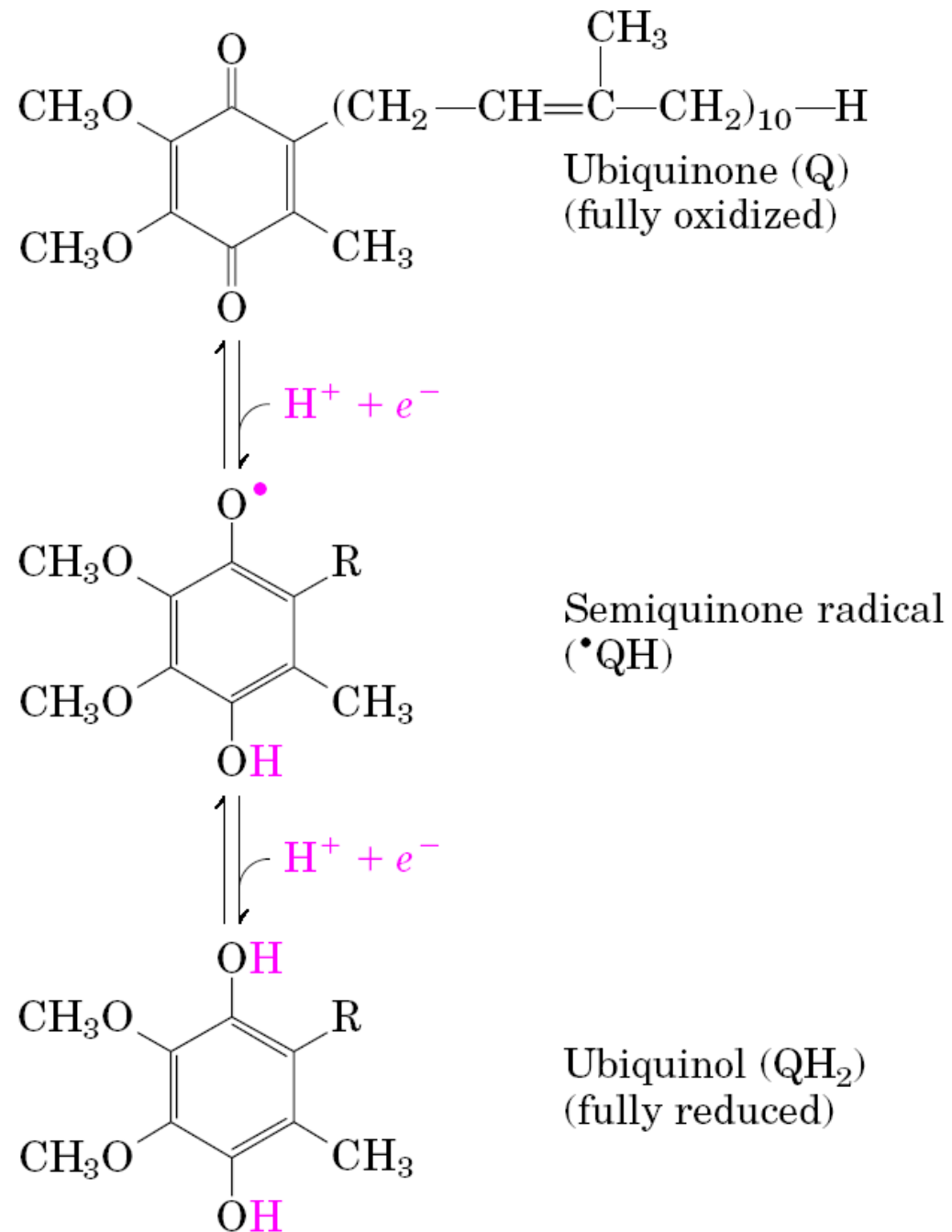
### ③ 辅助底物：泛醌

- 简写为Q 或辅酶-Q (CoQ)
- 脂溶性醌类化合物
- 电子传递链中唯一的非蛋白电子、质子传递体



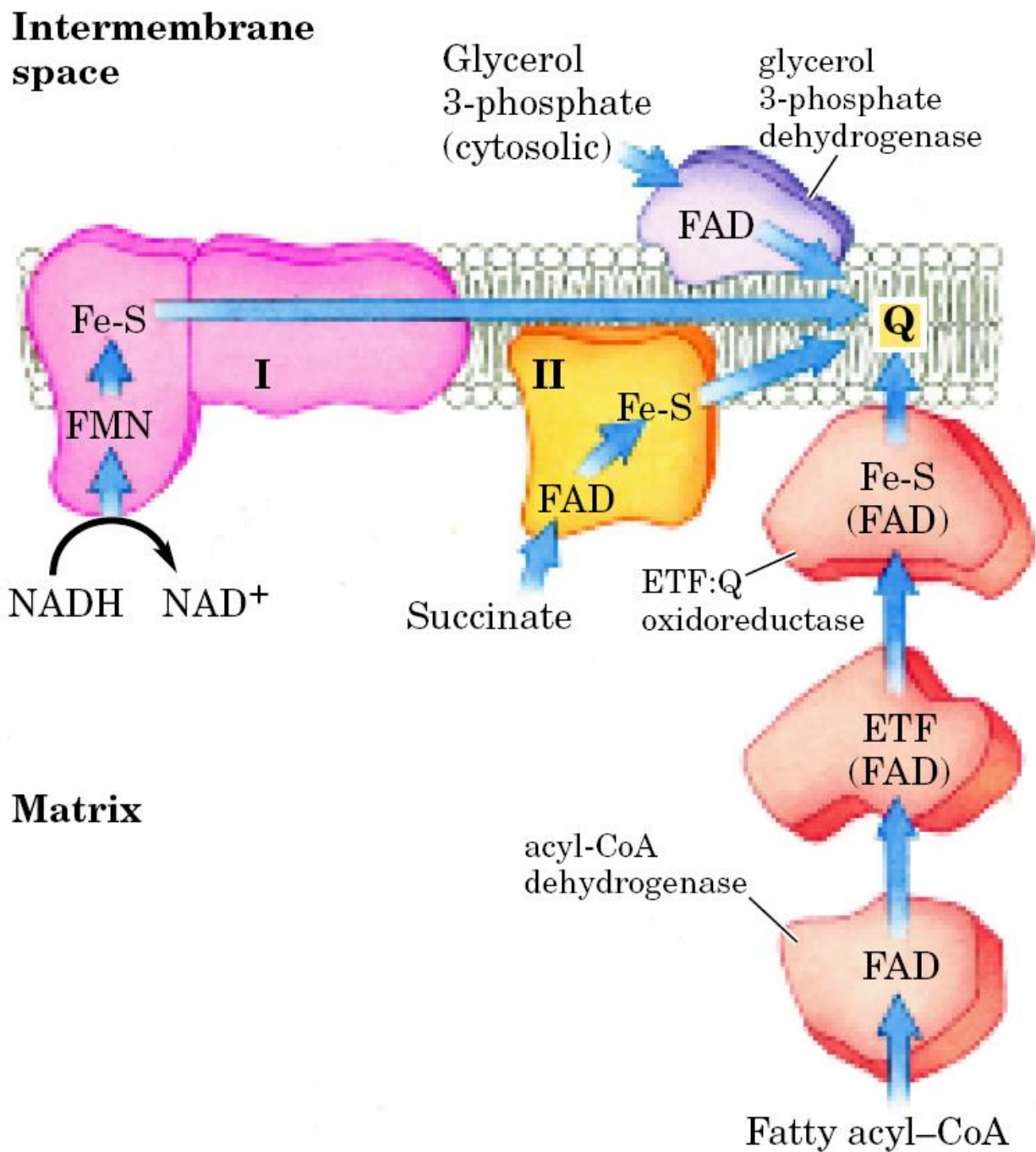
# CoQ的功能

- Q (醌型) 很易接受电子和质子，还原成QH<sub>2</sub> (氢醌型); QH<sub>2</sub>也易给出电子和质子，重新氧化成Q。
- 线粒体呼吸链中重要的电子和质子传递体。





## 辅酶Q在电子传递过程中的重要作用



## ④ 氧还酶：Complex III

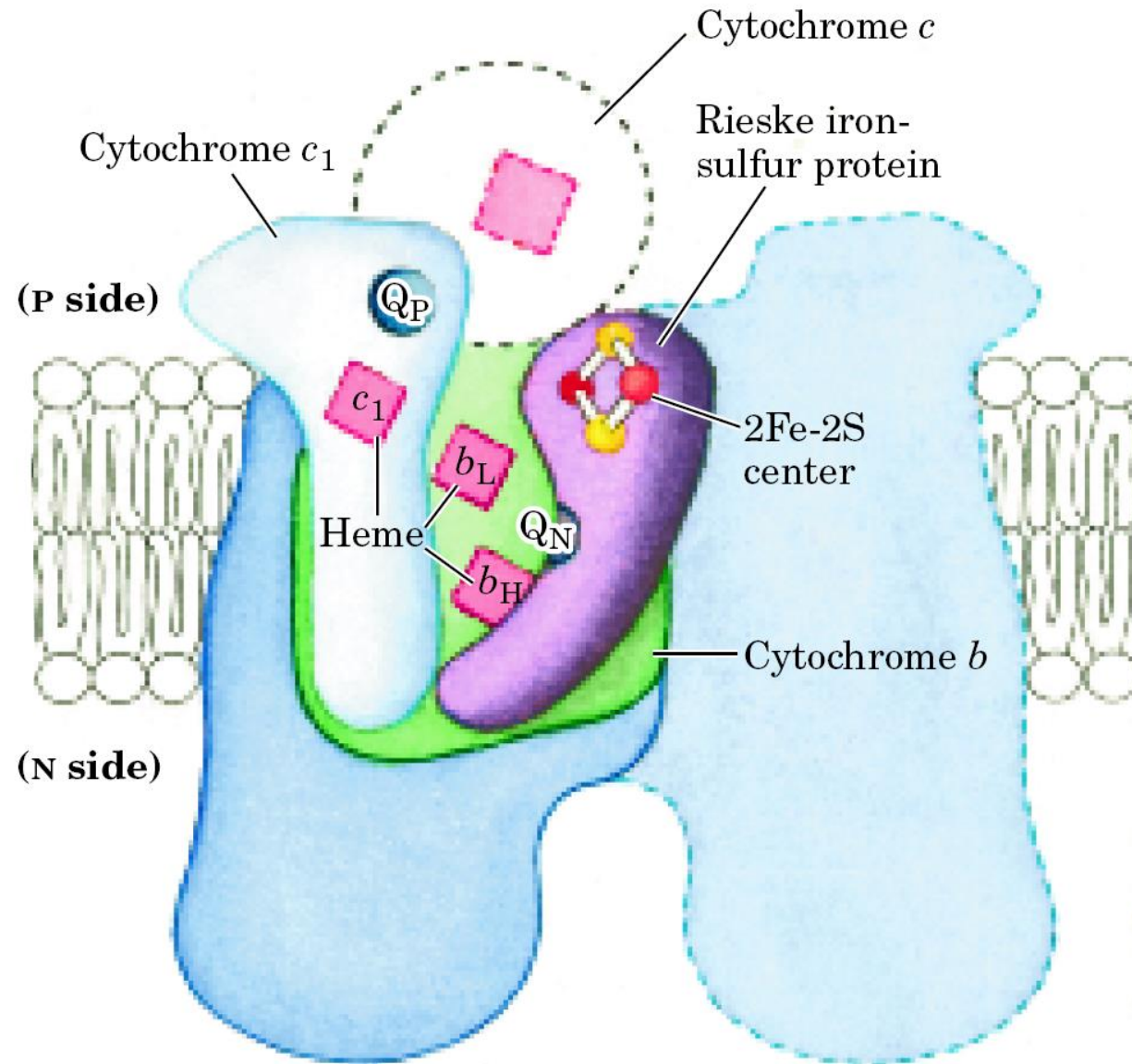
### CoQH<sub>2</sub>-Cyt. c oxidoreductase

- 线粒体内膜上的一种跨膜蛋白复合物
- 作用：催化QH<sub>2</sub>的氧化和Cyt. c的还原。  
$$\text{QH}_2 + 2 \text{ cyt. c (Fe}^{3+}) \rightleftharpoons \text{Q} + 2 \text{ cyt. c (Fe}^{2+}) + 2\text{H}^+$$
- dimer of identical monomers, each with 11 different subunits  
(牛心) (酵母：9个亚基)。
- 活性部分：Cyt. b, Cyt. c<sub>1</sub>, 铁硫蛋白[2Fe-2S]
- 又称Cytochrome bc<sub>1</sub> complex



Complex III

# CoQH<sub>2</sub>-Cyt. c oxidoreductase (Complex III)



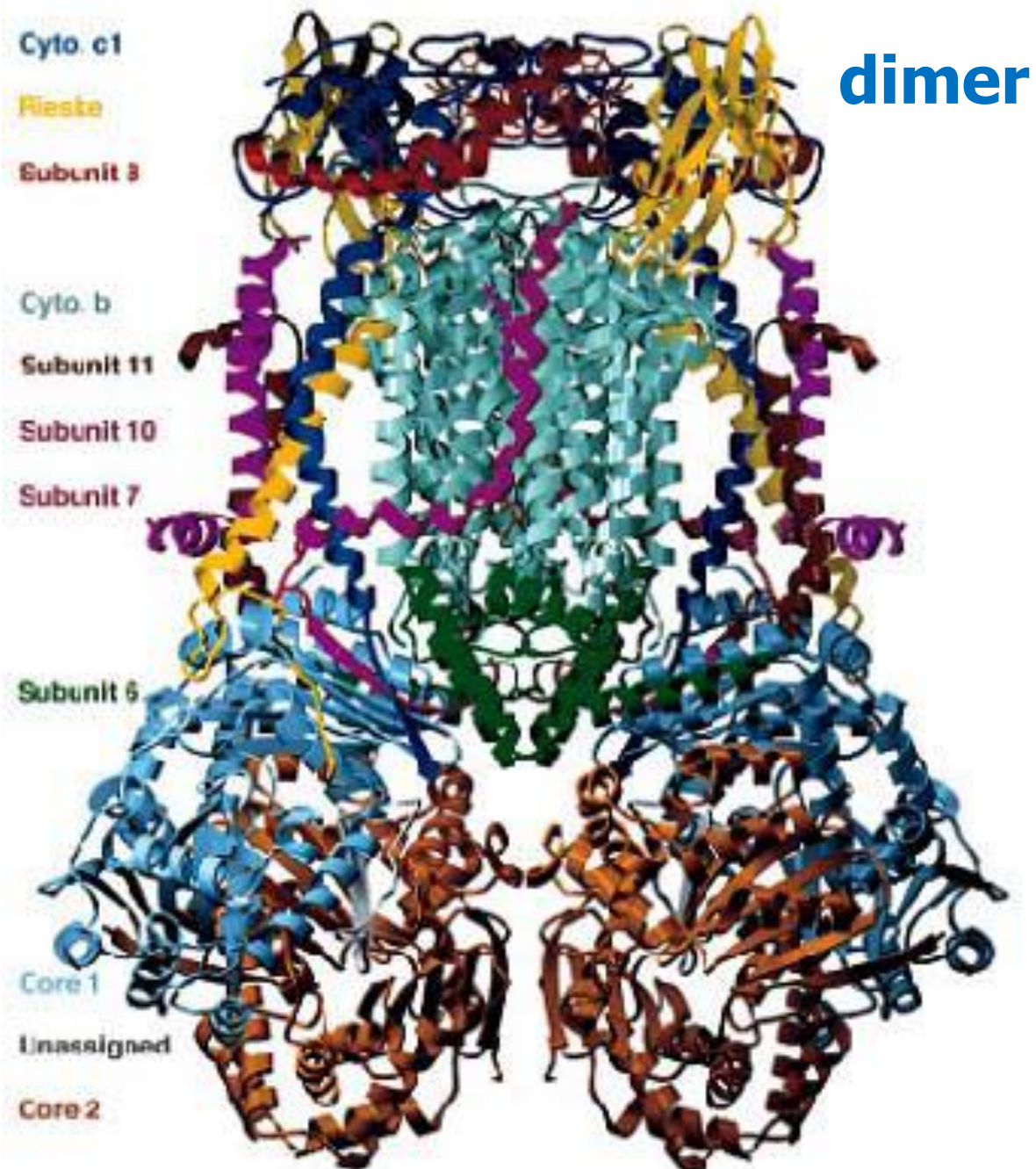
***b*<sub>562</sub> or *b<sub>H</sub>*:**  
**还原电势高**

***e*<sup>-</sup>↑**

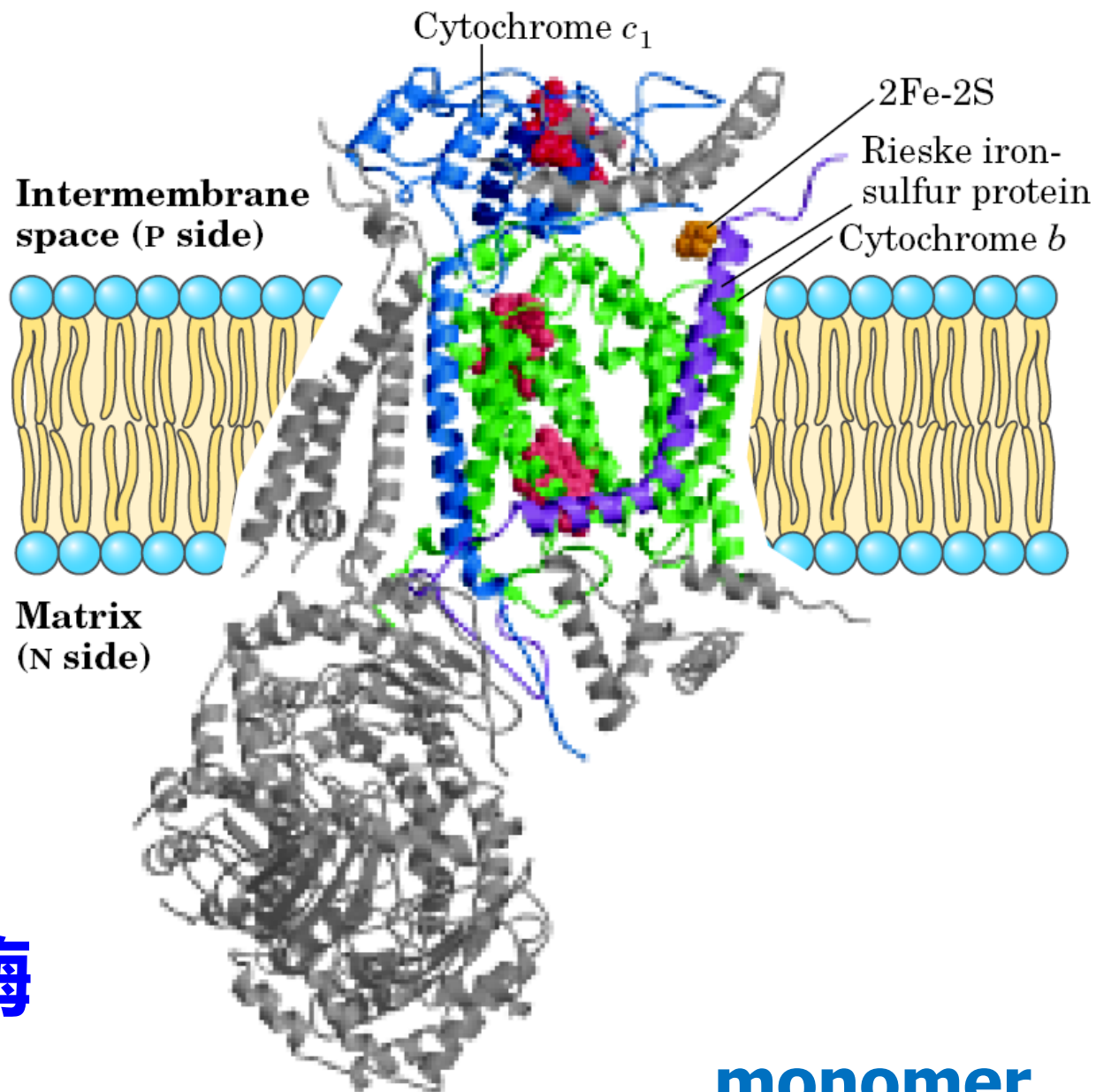
***b*<sub>566</sub> or *b<sub>L</sub>*:**  
**还原电势低**



## 泛醌 — 细胞色素c氧化酶



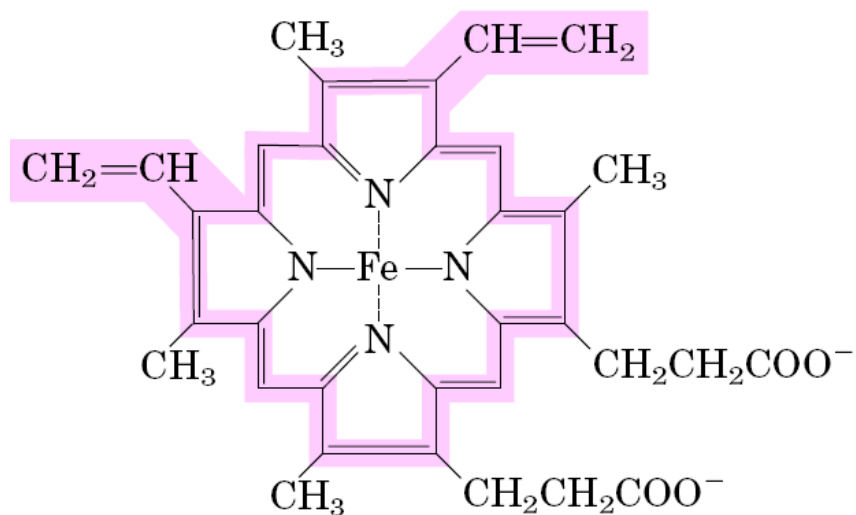
# 泛醌 — 细胞色素c氧化酶



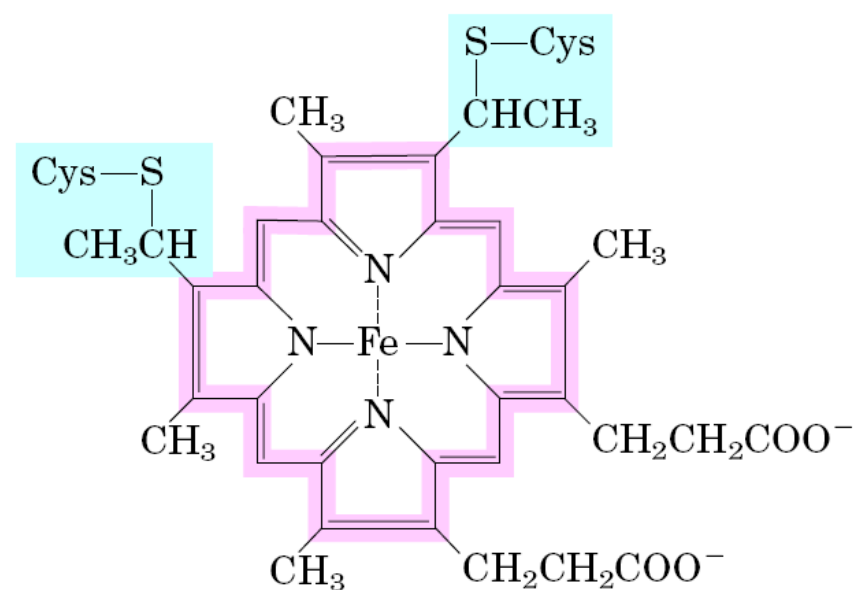
# 细胞色素 (Cytochrome, Cyt.)

---

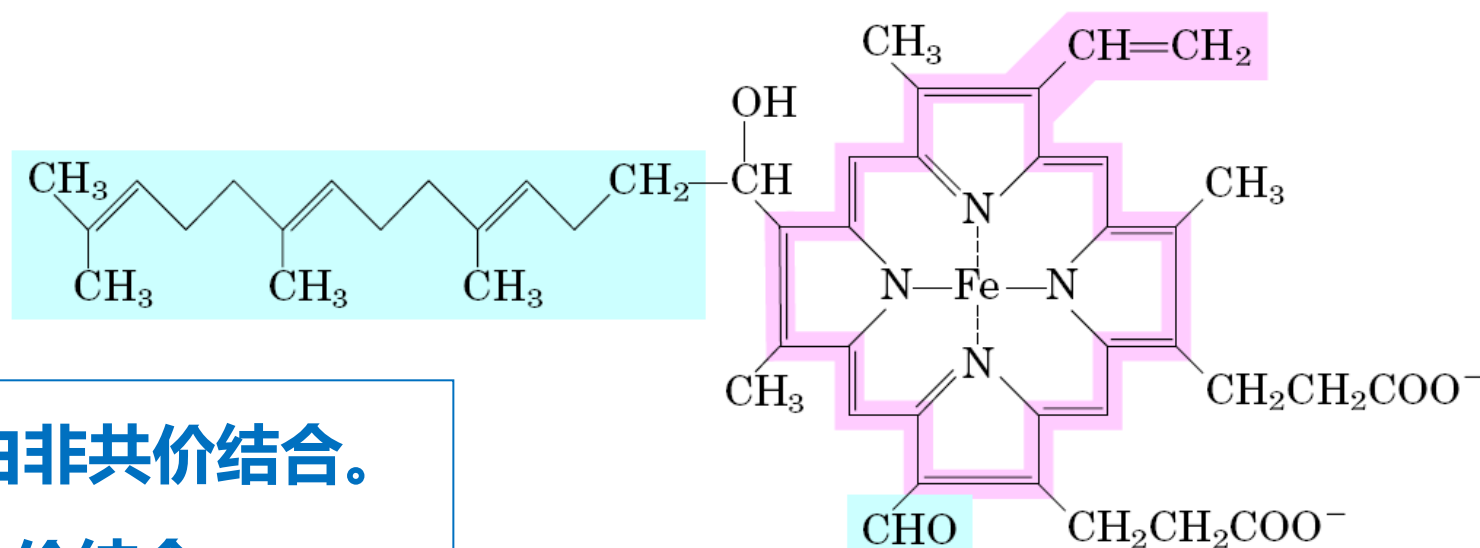
- 含铁的蛋白质，辅基为**血红素(heme)**，即铁卟啉衍生物。
- 各种细胞色素的辅基结构略有不同。
- 线粒体呼吸链中主要含有细胞色素 $a$ ,  $a_3$ ,  $b$ ,  $c$  和 $c_1$ 等，辅基分别为血红素A、B 和 C。
- 细胞色素 $a$ ,  $b$ ,  $c$ 可以通过它们的紫外-可见吸收光谱来鉴别 (参见教材p277) 。
- **作用：**通过 $\text{Fe}^{3+} \leftrightarrow \text{Fe}^{2+}$  互变传递电子



Iron protoporphyrin IX  
(in *b*-type cytochromes)



Heme C  
(in *c*-type cytochromes)



Heme A  
(in *a*-type cytochromes)

**Heme A, B: 与蛋白非共价结合。**

**Heme C: 与蛋白共价结合。**

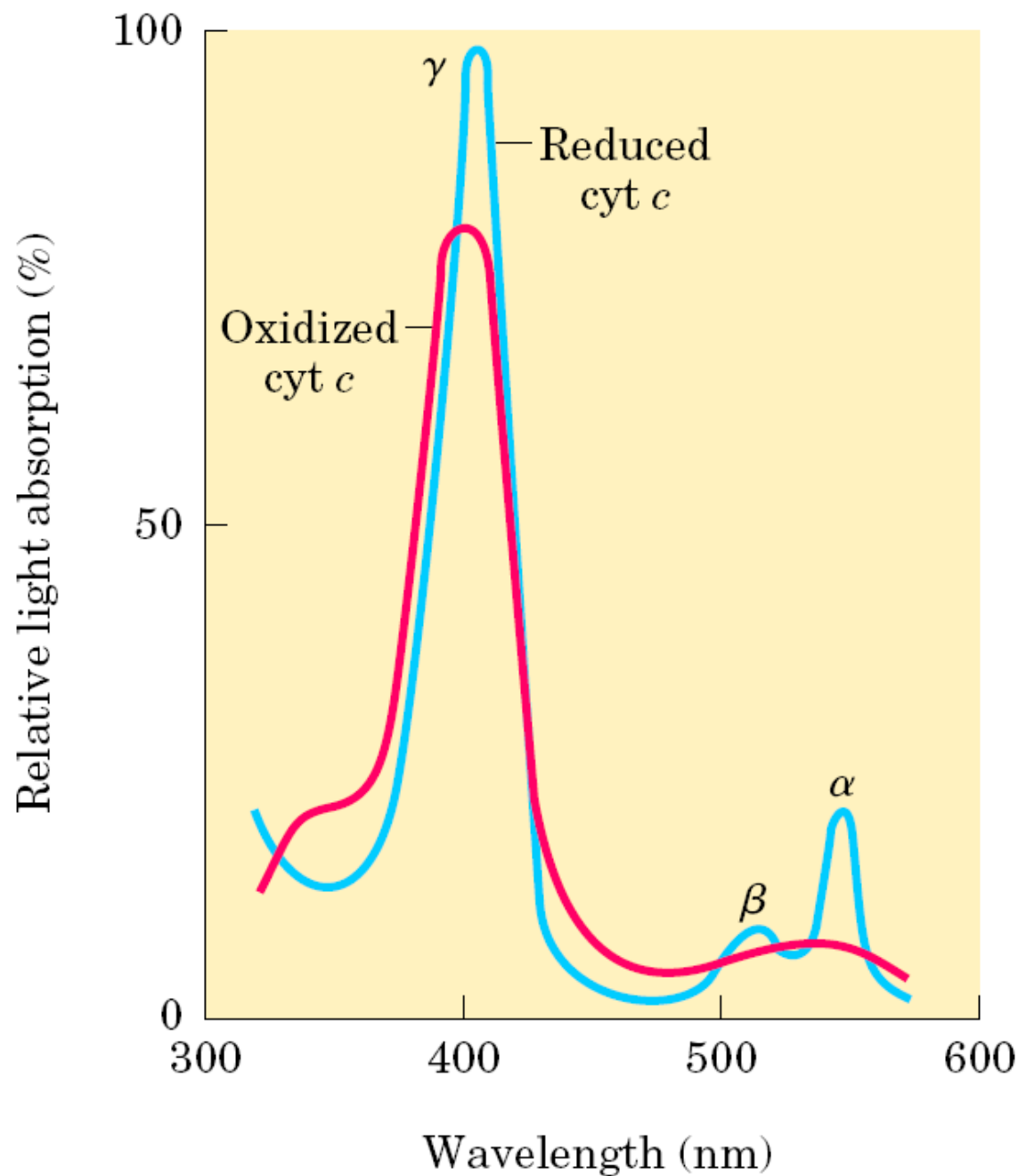
## ⑤ 辅助底物：细胞色素c (Cyt.c)

---

- 电子传递链中一个独立的蛋白质**电子载体**，位于线粒体内膜外表面，属于**膜外在蛋白**，易溶于水。
- 与细胞色素c<sub>1</sub>含有相同的辅基(Heme C)，但蛋白组成则有所不同，含有104个氨基酸残基。
- 在电子传递过程中，Cyt. c通过 $\text{Fe}^{3+} \leftrightarrow \text{Fe}^{2+}$  的互变，起**电子传递中间体**作用。



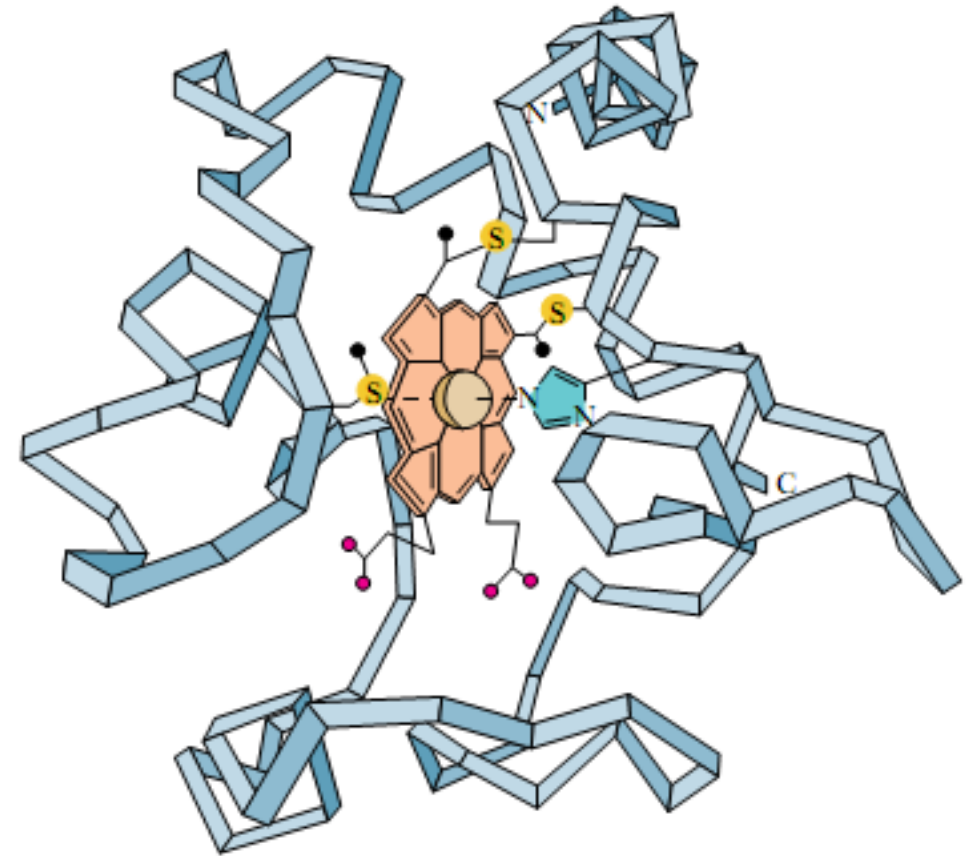
## 氧化型和还原型 细胞色素c的 紫外光谱



# Cytochrome c Is a Mobile Electron Carrier

---

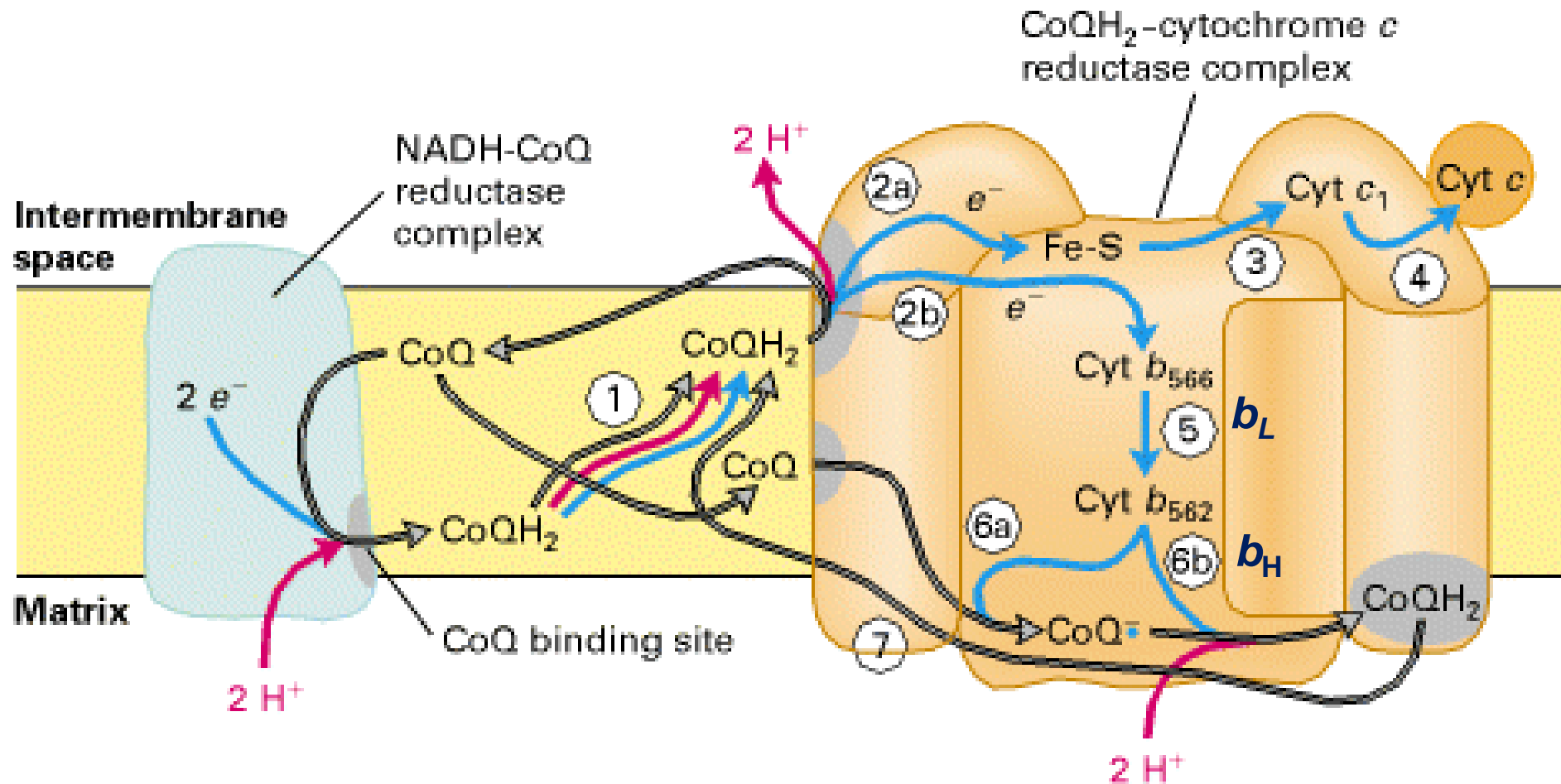
It associates **loosely** with the inner mitochondrial membrane to acquire electrons from **Complex III**, and then it **migrates** along the membrane surface in the reduced state, carrying electrons to **Complex IV**.



**FIGURE 21.13** • The structure of mitochondrial cytochrome *c*. The heme is shown at the center of the structure, covalently linked to the protein via its two sulfur atoms (yellow). A third sulfur from a methionine residue coordinates the iron.

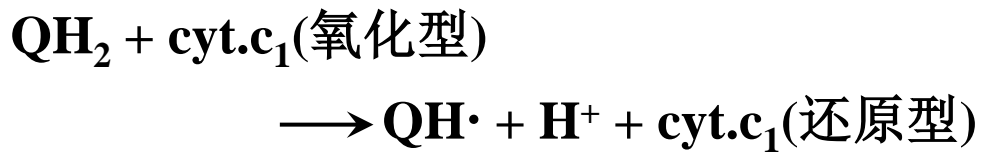
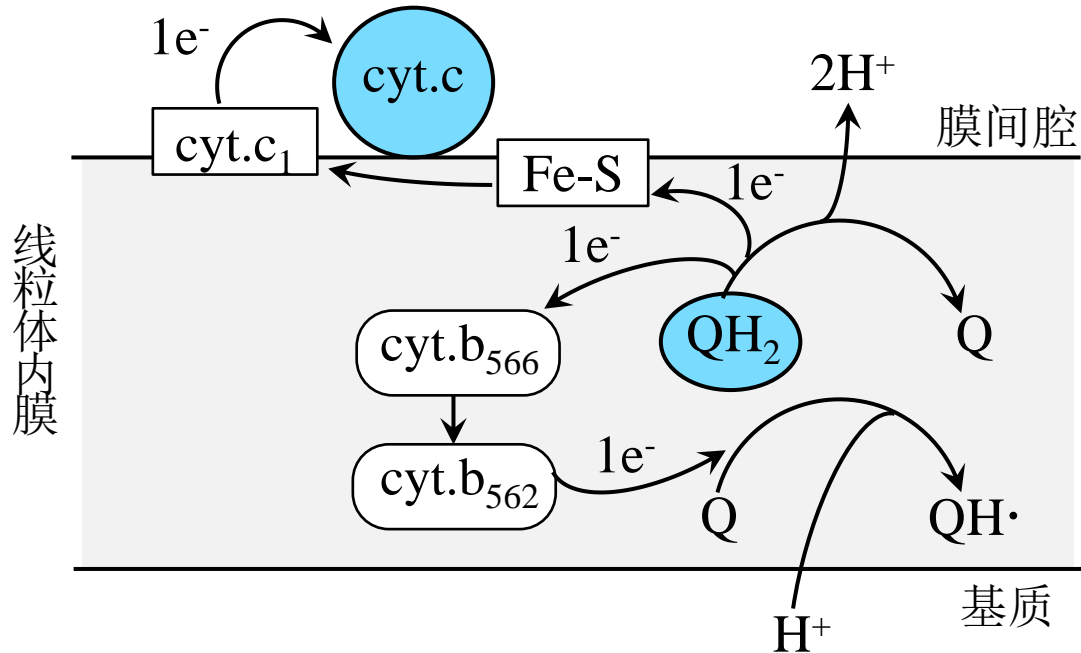
- $\text{CoQH}_2$  --- 双电子载体
- $\text{cyt.c}$  --- 单电子传递体
- How are the electrons transferred?

## Q-Cycle

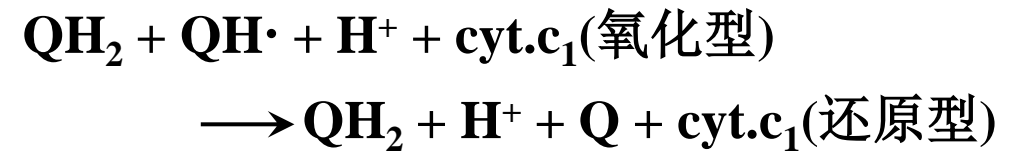
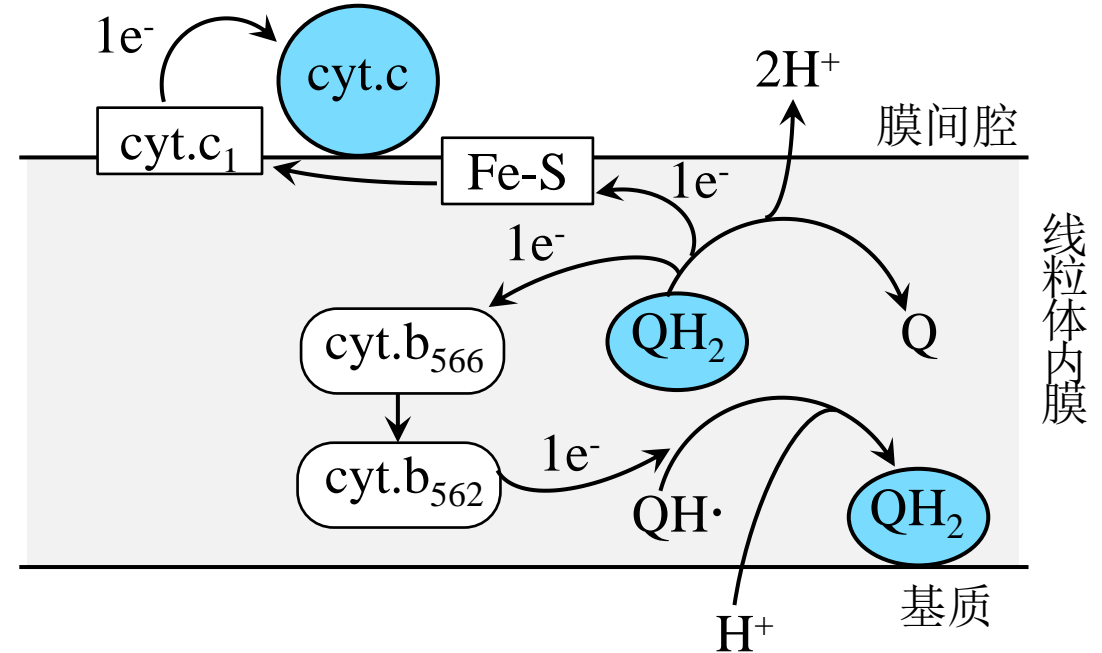


# Q-Cycle

第一个QH<sub>2</sub>的氧化



第二个QH<sub>2</sub>的氧化



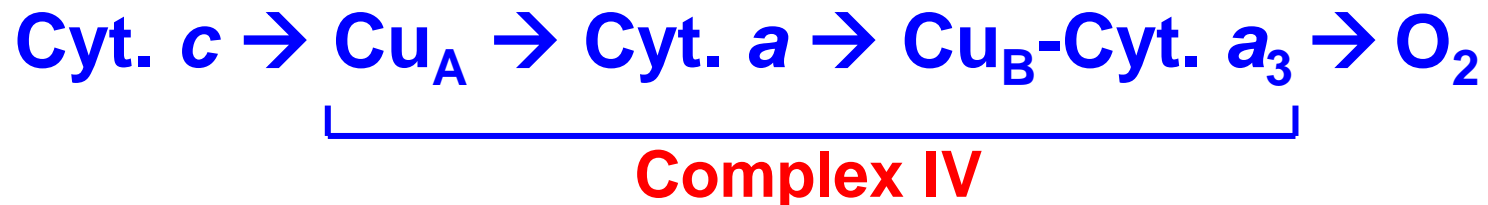
净反应式:



## ⑥ 氧化酶：Complex IV

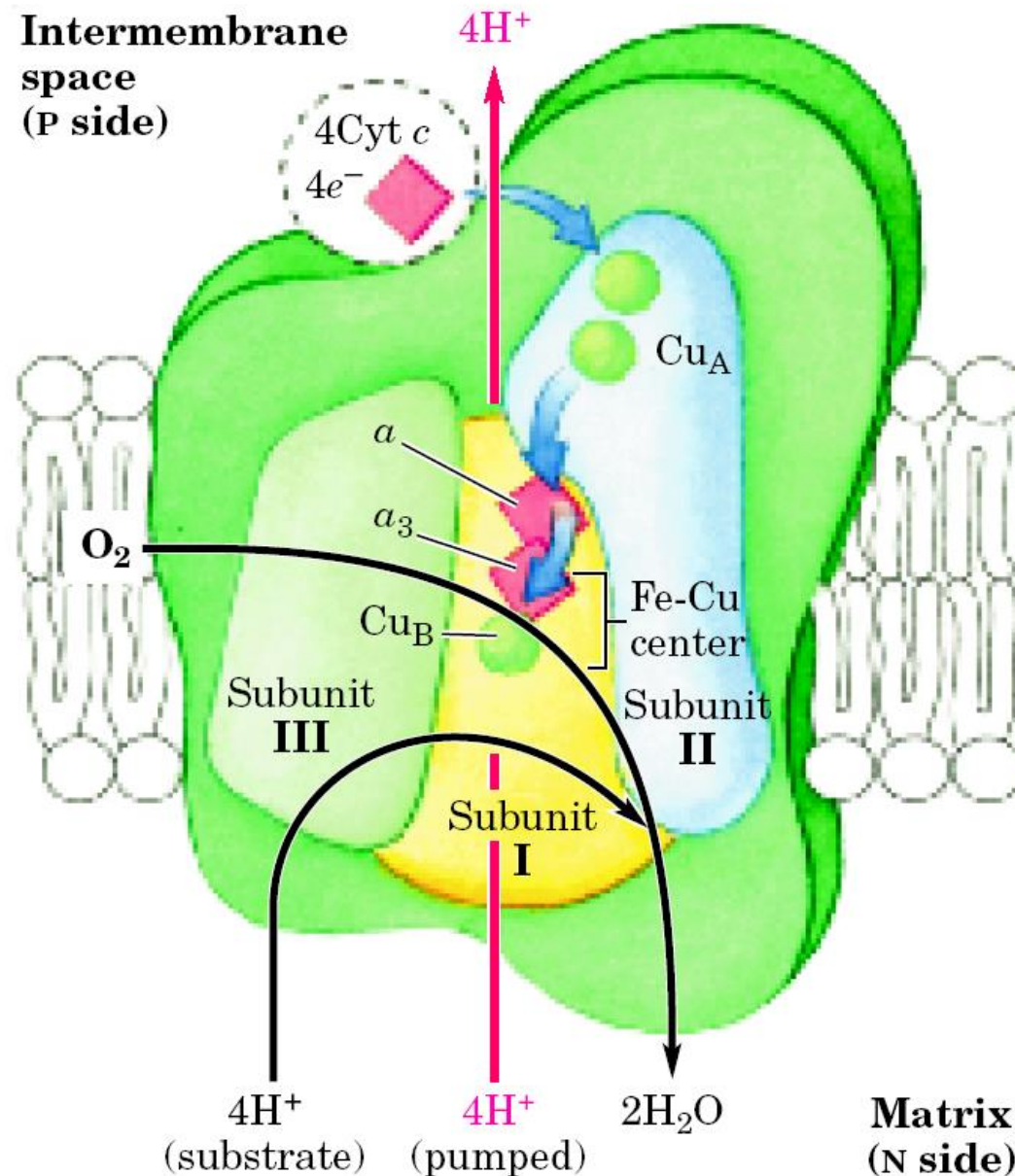
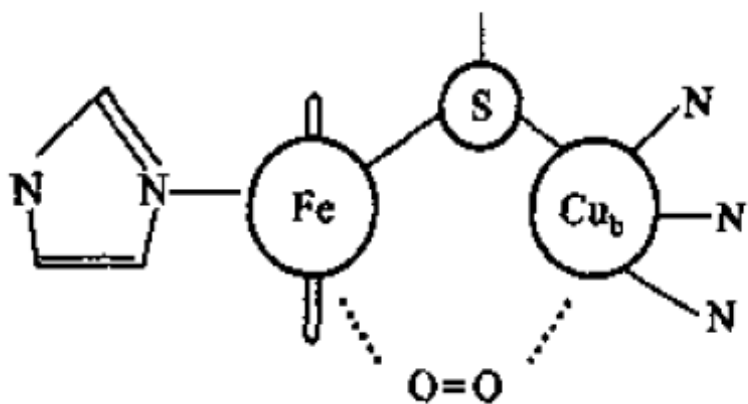
### Cytochrome c oxidase

- 位于线粒体呼吸链末端的蛋白复合物
- 由13个多肽亚基组成， $M_r$  204,000。
- 活性部位：主要包括 $\text{Cu}_A$ ， $\text{Cu}_B$ ， $\text{Cyt. } a$ 和 $\text{Cyt. } a_3$ 。
- 复合体中的铁卟啉和铜离子可以发生  $\text{Fe}^{2+} \leftrightarrow \text{Fe}^{3+}$ 和 $\text{Cu}^+ \leftrightarrow \text{Cu}^{2+}$ 互变，将cyt.c所携带的电子传递给 $\text{O}_2$ 。



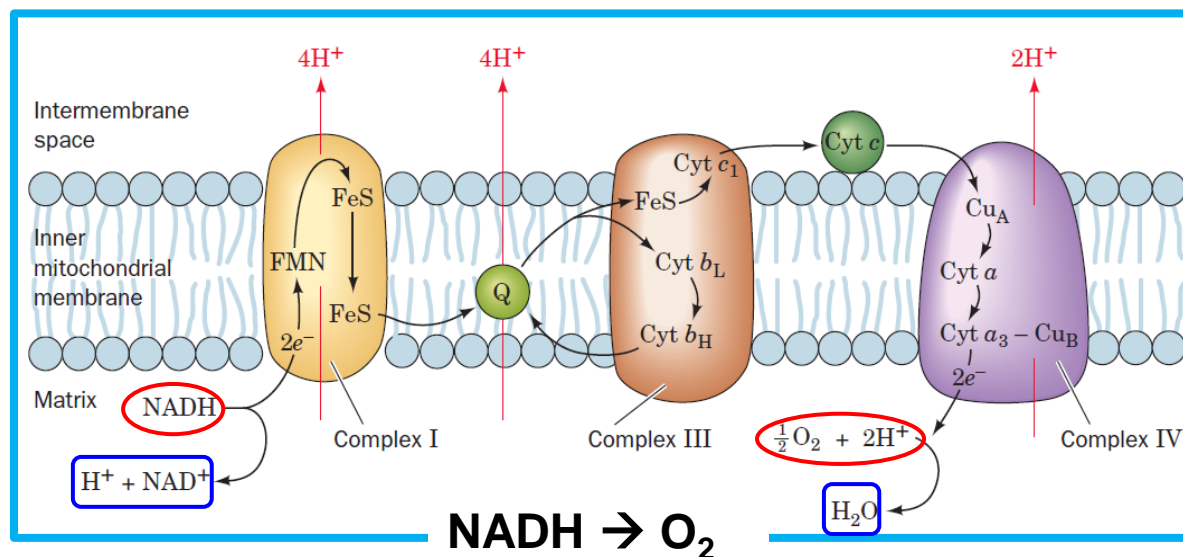
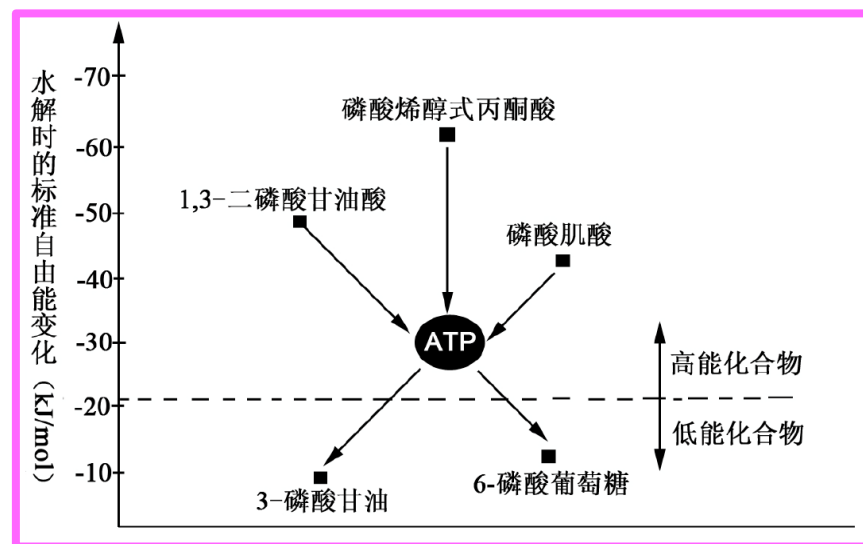
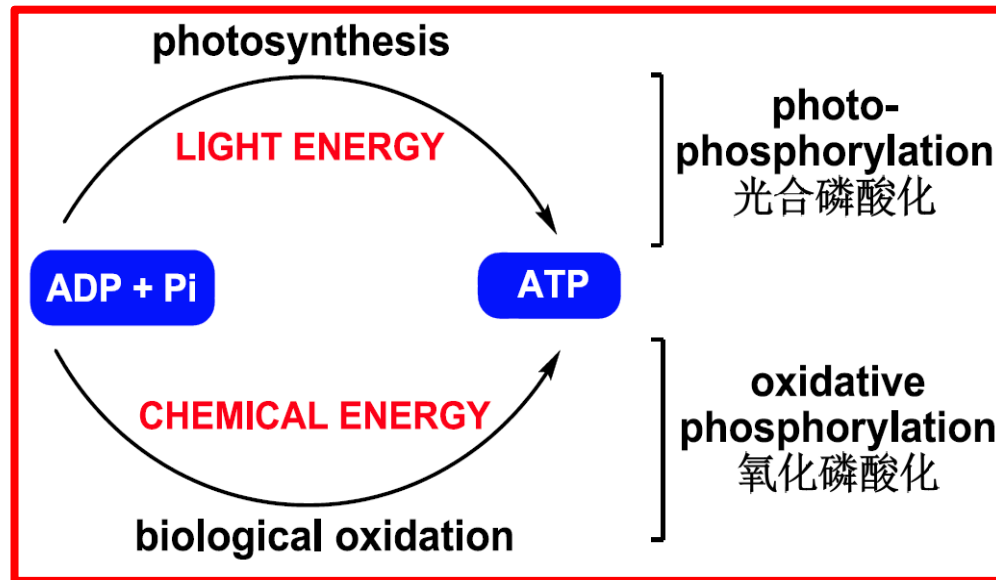
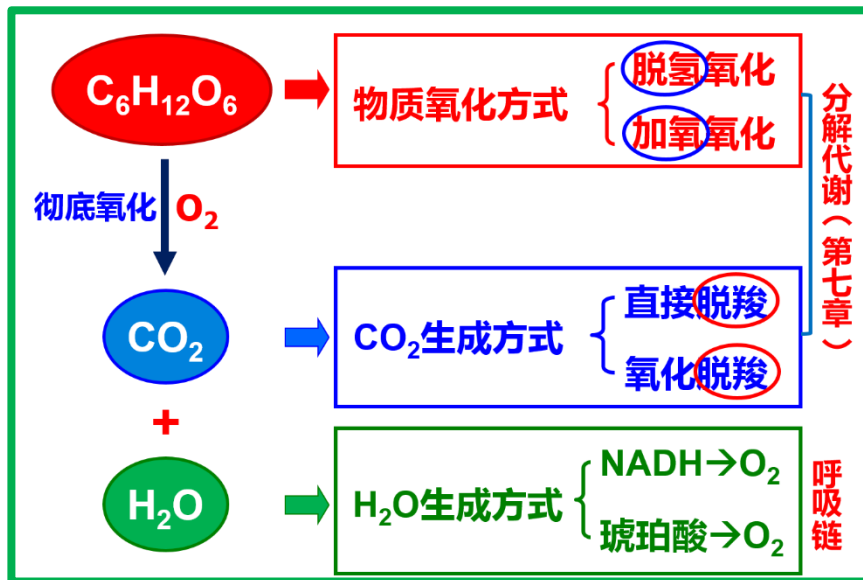
# Cytochrome c oxidase (complex IV)

**亚基I, II, III:** 细胞色素C氧化酶的核心亚基，最大且疏水性最强，位于内部。





# 本次课内容总结





# 预 习

---

## 第六章 生物氧化和生物能

### 三. 线粒体呼吸链和 (重点)

#### 3. 线粒体呼吸链的电子传递 (琥珀酸 $\rightarrow$ O<sub>2</sub>)

### 四. ATP的合成

小组探究题展示 (4)

本周三 (11月22日) 三个组展示。

文献阅读报告

14周周三 (11月29日) 晚10点前提交课堂派。