

# 第五章 物质代谢与能量转换

新陈代谢是生命的基本特征之一

新陈代谢是活细胞中全部化学反应的总称，它包括物质代谢和能量代谢两个方面。

物质代谢：合成代谢和分解代谢

能量代谢：放能代谢和吸能代谢

• 物质代谢和能量代谢是密不可分

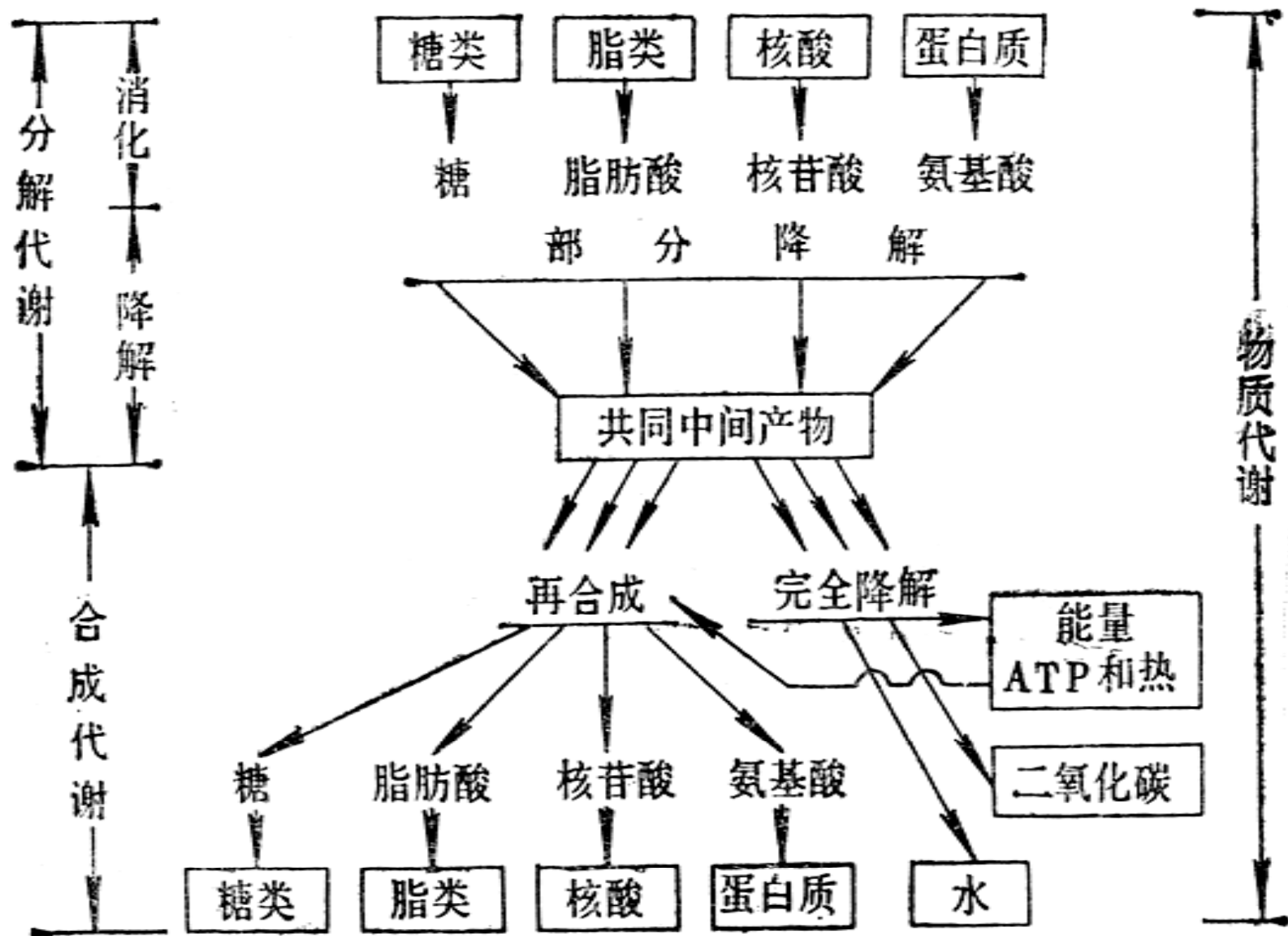
## ◆ 物质代谢和能量代谢的关系

### ◇ 合成代谢:

由小分子合成生物大分子的耗能过程;

### ◇ 分解代谢:

将生物大分子分解成小分子的放能过程;



◆ 新陈代谢的 类型：

◇ 自养型 (autotroph) 与 异养型 (heterotroph)

自养型：能够利用无机物合成细胞物质。

异养型：必需利用小分子有机物才能合成细胞自身的大分子。

◆ 需氧型、兼性厌氧型和厌氧型——按呼吸类型不同分为：

◆ 需氧型：依靠游离氧，分解有机物以获取能量；

◆ 兼性厌氧型：有无 $O_2$ 均可生活；

◆ 厌氧型：进行无氧代谢，有 $O_2$ 抑制其代谢活动。



自养型



C

异养型

## ◆ 新陈代谢的特点

◆ 严格的细胞内定位——细胞内的区域化

是功能定位的基础

◆ 特异的温和的酶促反应

◆ 严谨的反应顺序

◆ 具有高效的自我调控机制

◆ 形成高度有序的代谢网络

## 严格的细胞内定位

酶在细胞内有一定的布局 and 定位。催化不同代谢途径的酶类，往往分别组成各种多酶体系。多酶体系存在于一定的亚细胞结构区域中，或存在于胞质中，这种现象称为酶的区域化。

功能：浓缩效应，防止干扰，便于调节。

胞质：糖酵解，糖原合成，磷酸成糖途径，脂肪酸合成，  
部分蛋白质合成，尿素循环（还有肝细胞线粒体）

线粒体：脂肪酸 $\beta$ 氧化，三羧酸循环，呼吸链，氧化磷酸化  
氨基酸分解

细胞核 叶绿体 线粒体：核酸的合成、修饰以及转录。

叶绿体：糖类合成

粗面内质网：部分蛋白质合成（膜与分泌蛋白，溶酶体蛋白）

光滑内质网：脂类和胆固醇的合成

溶酶体：多种水解酶

高尔基体：翻译后加工糖基化



# 第一节

## 生物体内的物质转运

# 一 生物体内的物质转运

体内转运:

循环系统 (动物), 导管与筛管 (植物)

细胞 (内外) 转运--进入细胞以及细胞内部转运

小分子物质的跨膜运输

大分子或颗粒性物质的跨膜运输

# 小分子物质的跨膜运输

**被动运输(passive transport)**---- 分子由浓度较高的一侧 通过细胞膜向浓度较低 的一侧转运，不需要提供能量。

**自由扩散(simple diffusion)**:不需膜蛋白的协助，转运速率 取决于被转运 分子的大小与极性。

**协助扩散(facilitated diffusion)**: 需要膜蛋白的协助，转运的速率和特异性极高。

**主动运输(active transport)**----分子由浓度较低的一侧 通过细胞膜向浓度较高的一侧转运，需要提供能量。

如:  $\text{Na}^+\text{K}^+$ 泵,  $\text{H}^+$ 泵,  $\text{Ca}^{2+}$ 泵等。

**协同运输 (cotransport)** 物质跨膜运动所需要的能量来自膜两侧离子的电化学浓度梯度，而维持这种电化学势的是钠钾泵或质子泵。动物细胞常利用 $\text{Na}^+$ 浓度梯度，植物细胞和细菌常利用 $\text{H}^+$ 浓度梯度来驱动。

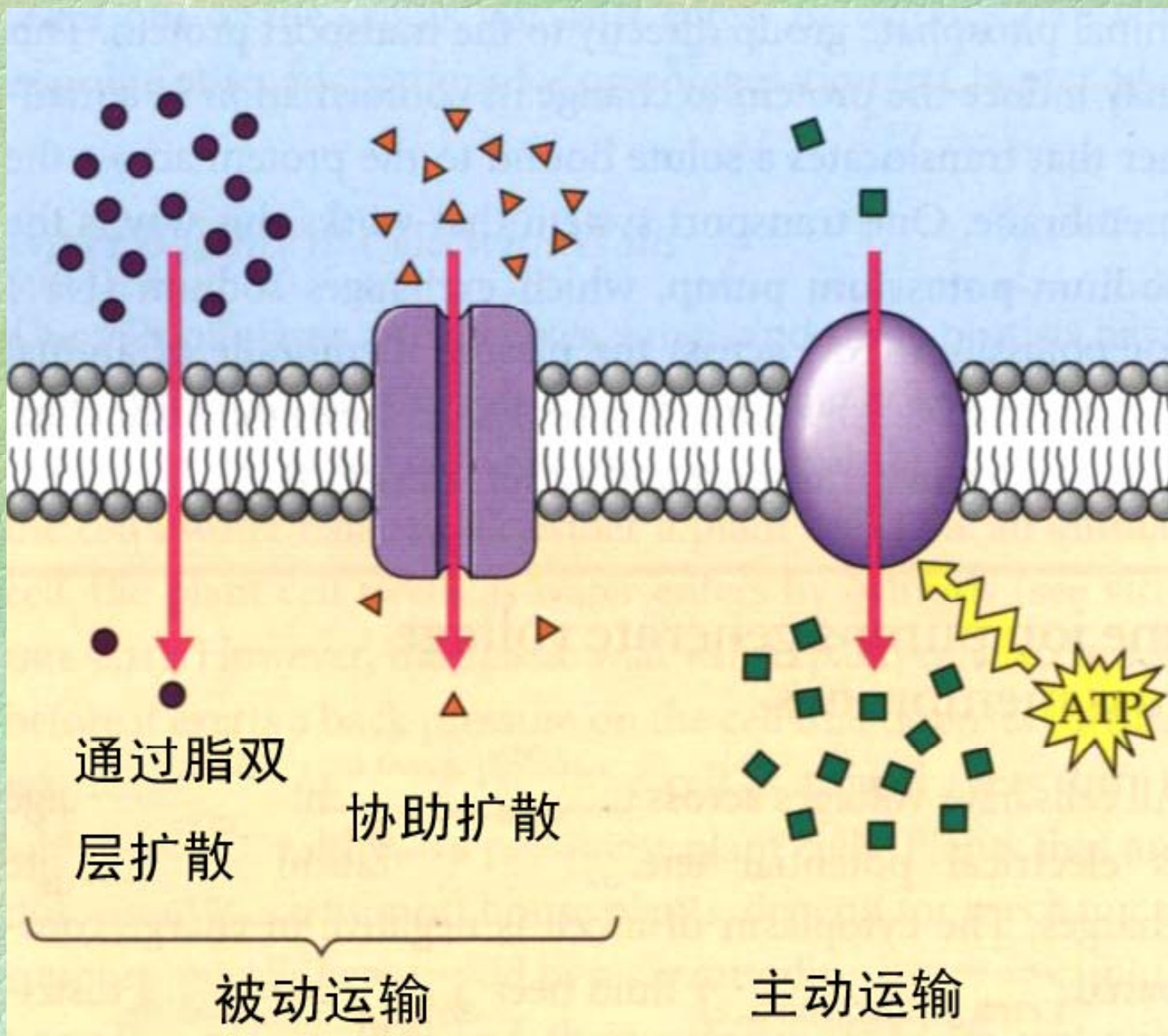
## 大分子或颗粒性物质的跨膜运输

**胞吞作用:**细胞内陷, 将外界物质裹进细胞内形成胞吞泡。

**胞饮作用 (pinocytosis):** 胞吞物为液体状和较小的物质, 形成的胞吞泡小于0.15 微米, 有笼形蛋白 (clathrin)参与。

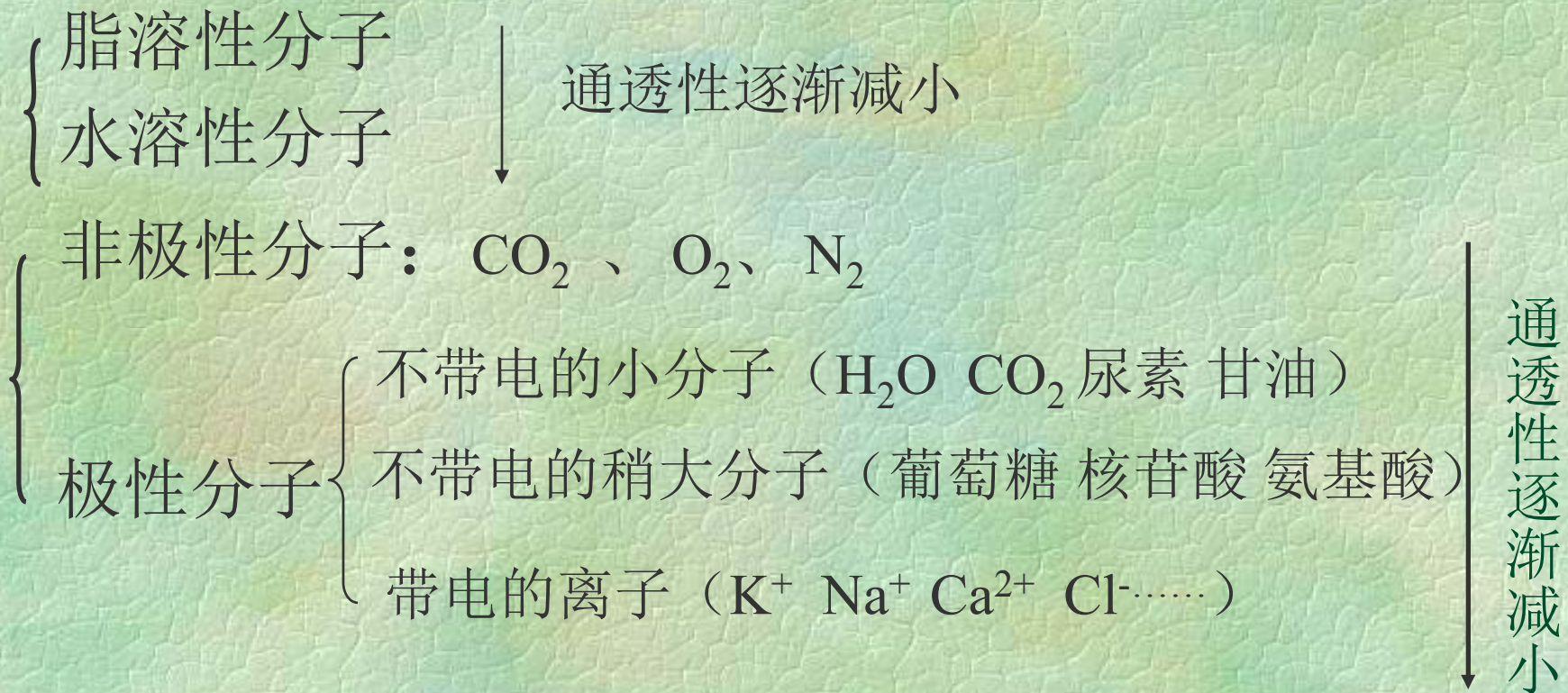
**吞噬作用(phagocytosis):** 胞吞物为大的颗粒状物质, 形成的胞吞泡大于0.25微米, 肌动蛋白 (actin)参与。

# 跨膜运输的方式



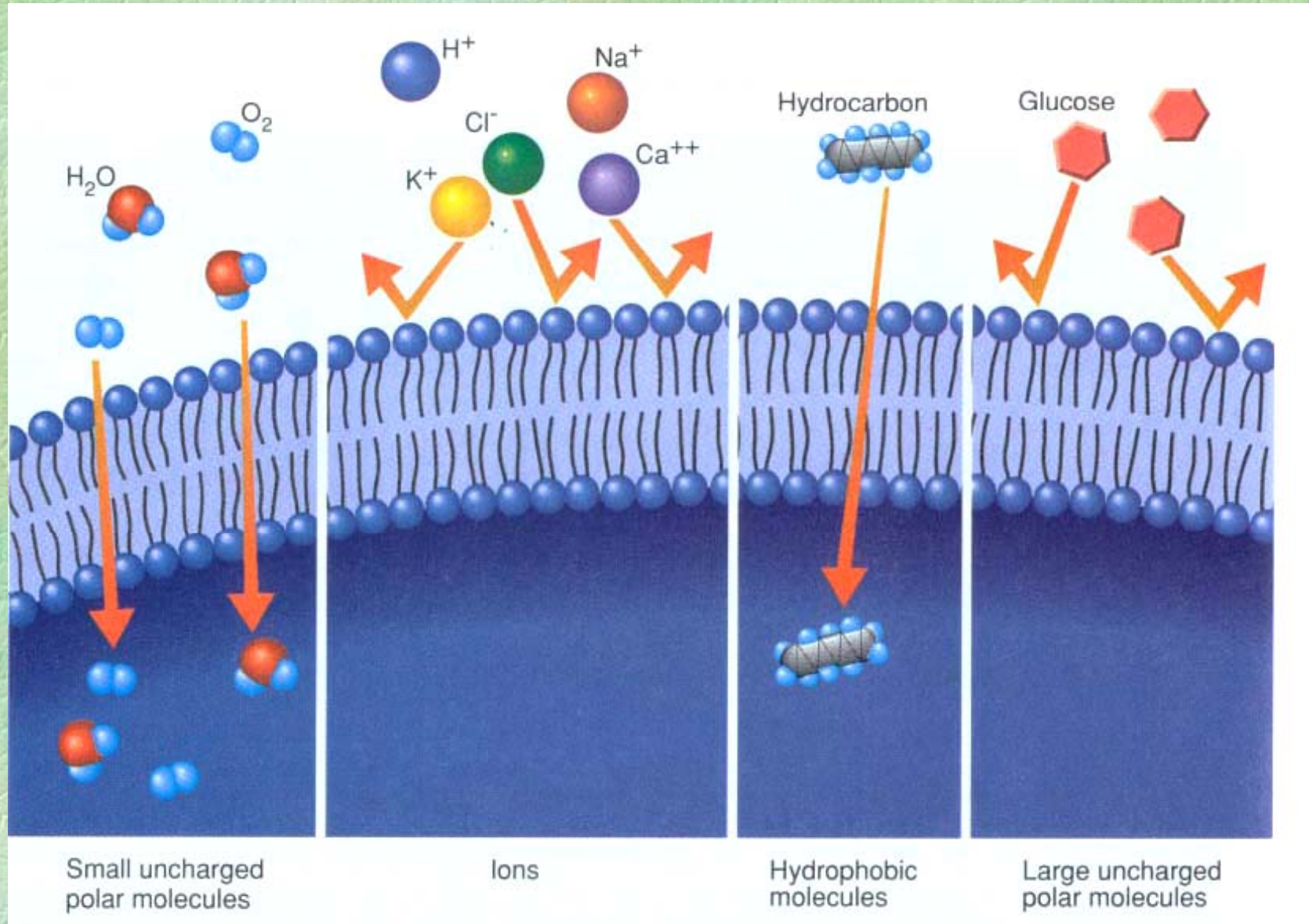
# 物质的跨膜运输

## ■ 运输物质的分类

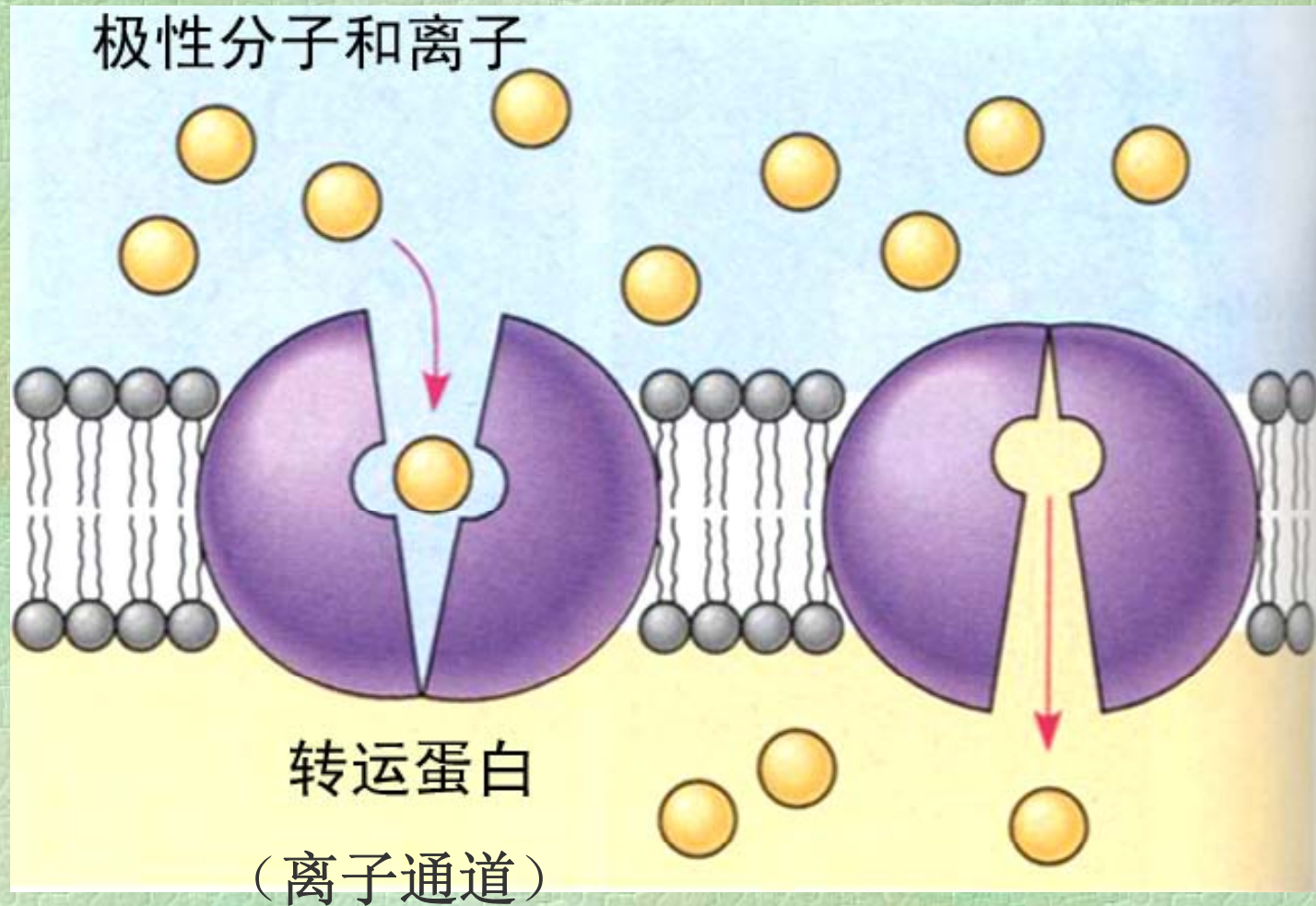


大分子及其颗粒性物质

# 物质的跨膜运输---自由扩散

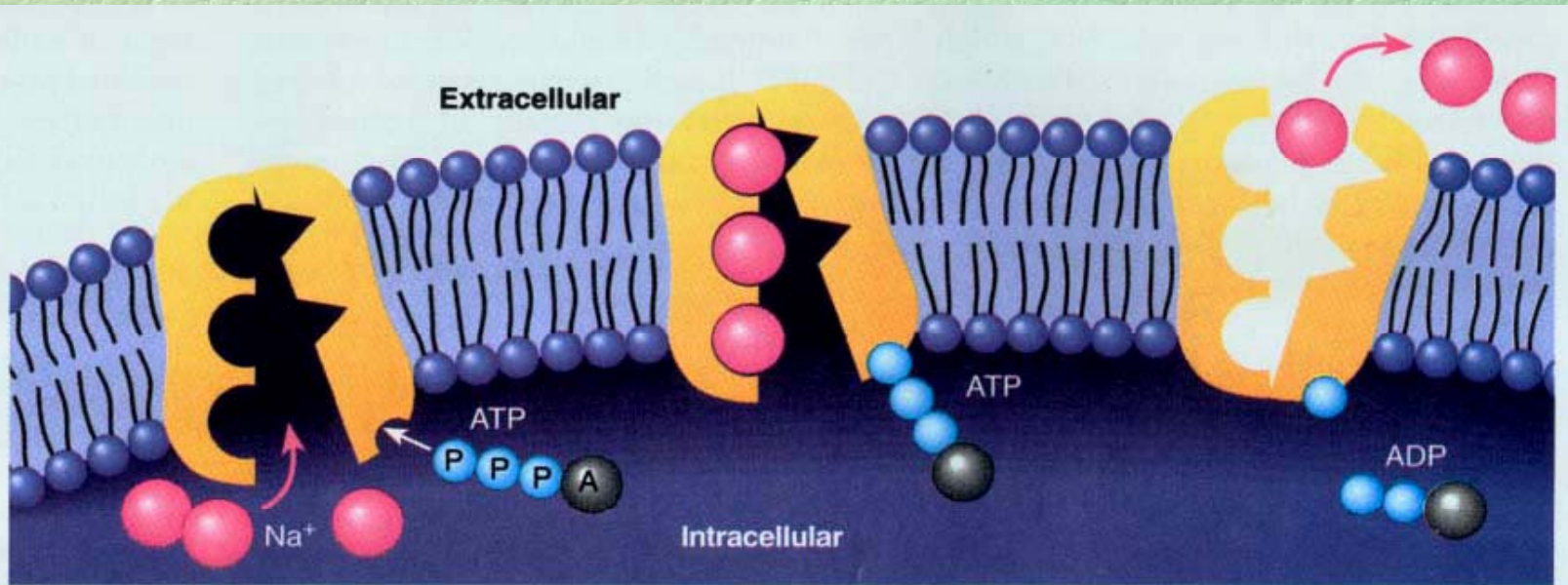


协助扩散：某些溶质在特异性  
膜蛋白的帮助下扩散



$\text{Na}^+ - \text{K}^+$  泵

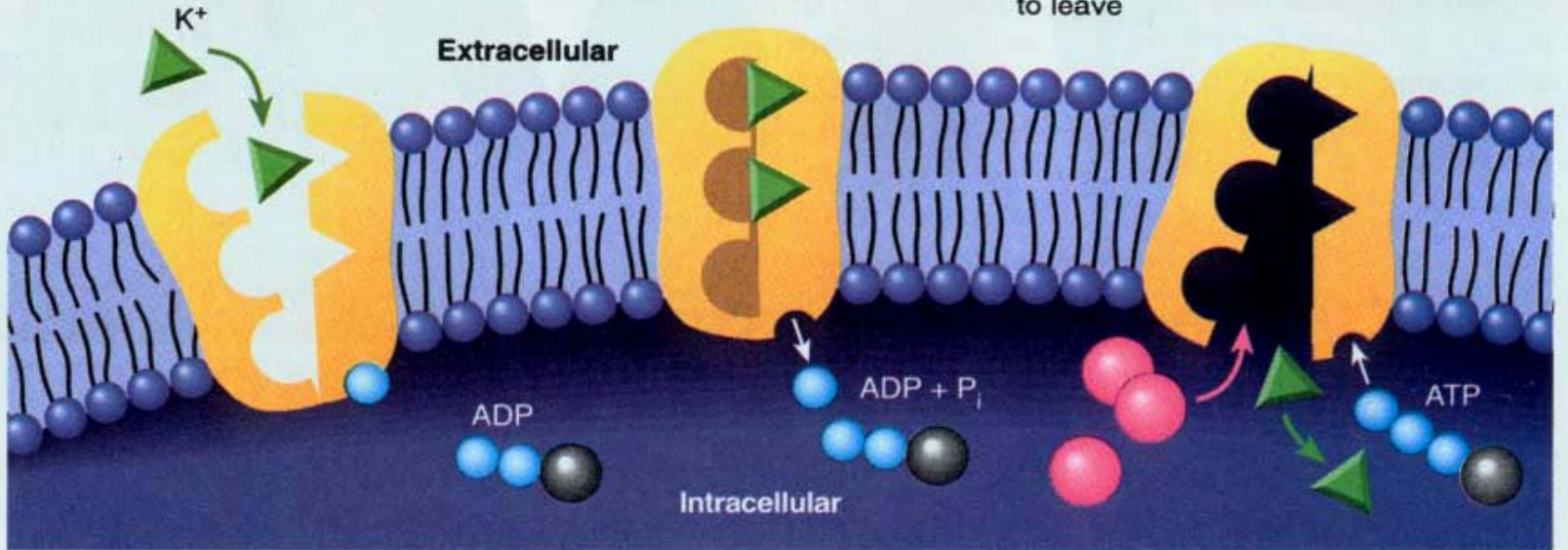
(主动运输)



1. Protein in membrane binds intracellular sodium

2. Protein with bound sodium is phosphorylated by ATP

3. Phosphorylation causes conformational change in protein, allowing sodium to leave

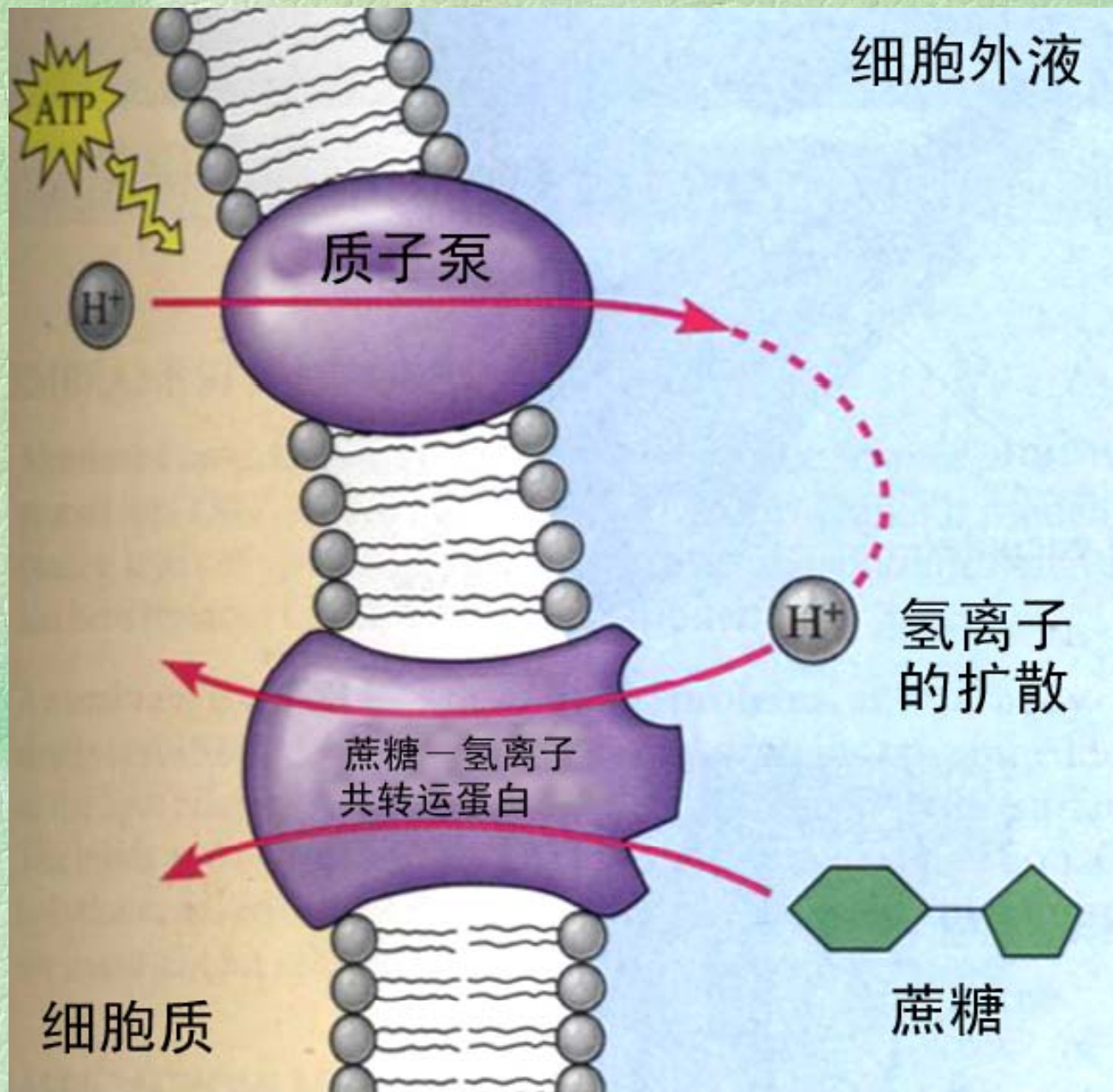


4. Extracellular potassium binds to exposed sites

5. Binding of potassium causes dephosphorylation of protein

6. Dephosphorylation of protein triggers change back to original conformation, potassium moves into cell and the cycle repeats



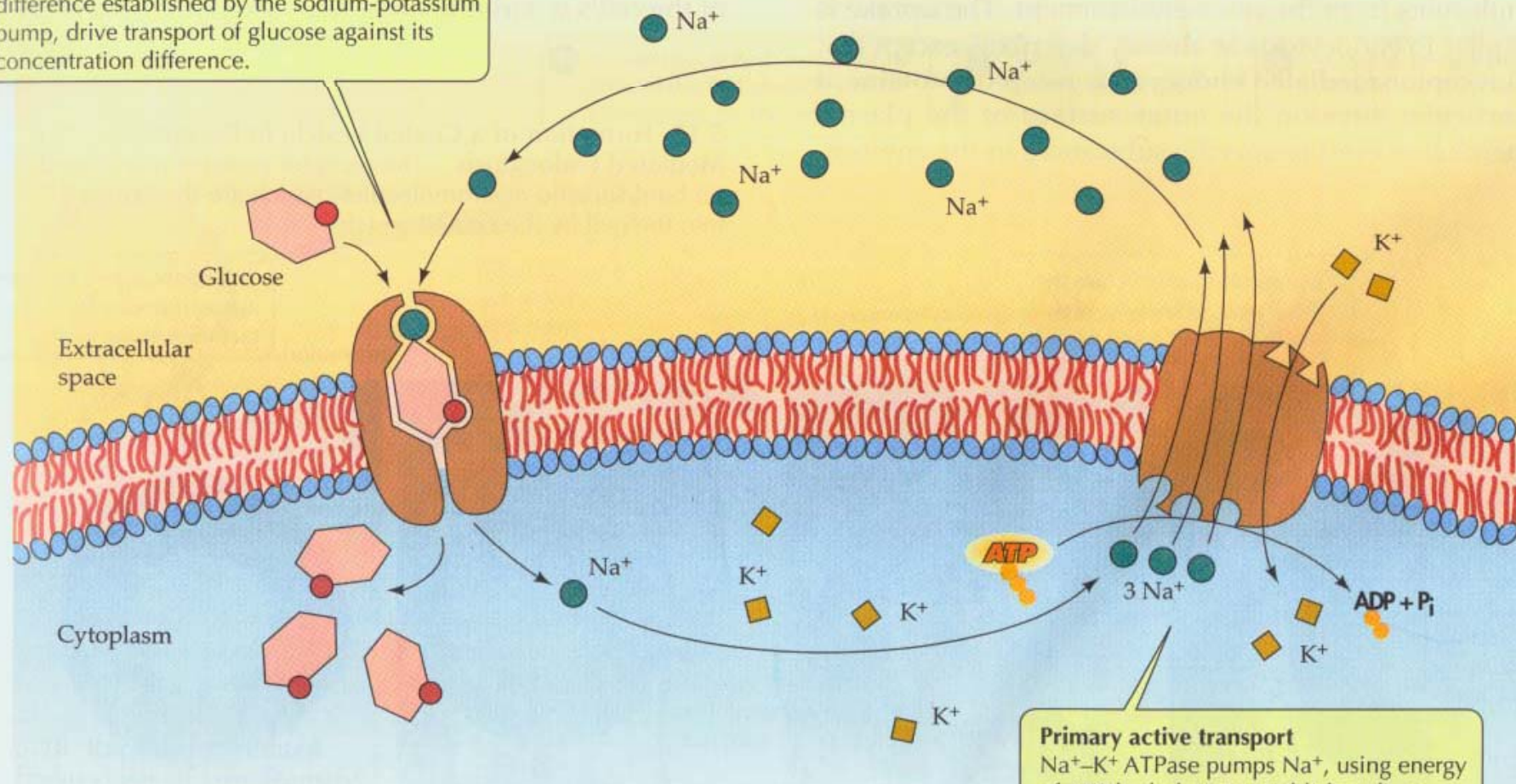


**协同运输 (cotransport):**  
由钠/钾离子泵 (或质子泵) 与载体蛋白协同作用, 逆浓度梯度, 间接耗能所完成的主动运输

# 协同运输 (coupled transport):

## Secondary active transport

Sodium ions, moving with the concentration difference established by the sodium-potassium pump, drive transport of glucose against its concentration difference.



## Primary active transport

Na<sup>+</sup>-K<sup>+</sup> ATPase pumps Na<sup>+</sup>, using energy of ATP hydrolysis to establish sodium concentration difference.

**5.13 Secondary Active Transport** The sodium ion concentration difference established by primary active transport (right) powers the secondary active transport of glucose (left). The movement of glucose across the membrane against its concentration difference is coupled by a symport protein to the diffusion of Na<sup>+</sup> into the cell.

**葡萄糖** 协同运输

协助扩散

(小肠上皮, 肾小管管壁上皮细胞) (大多数细胞)

**氨基酸:** 协同运输

协助扩散

(小肠上皮, 肾小管管壁上皮细胞)

**核苷酸:** 协同运输

协助扩散

**脂肪酸:** 被动运输 脂溶性分子

Na<sup>+</sup>内流是协助扩散, 外流是主动运输。

K<sup>+</sup>内流是主动运输, 外流是协助扩散。

水分子是简单扩散或协助扩散运输 (水通道蛋白)

Na<sup>+</sup>-葡萄糖同向转运体

Na<sup>+</sup>-氨基酸同向转运体

氢离子-蔗糖共运输 (植物细胞)

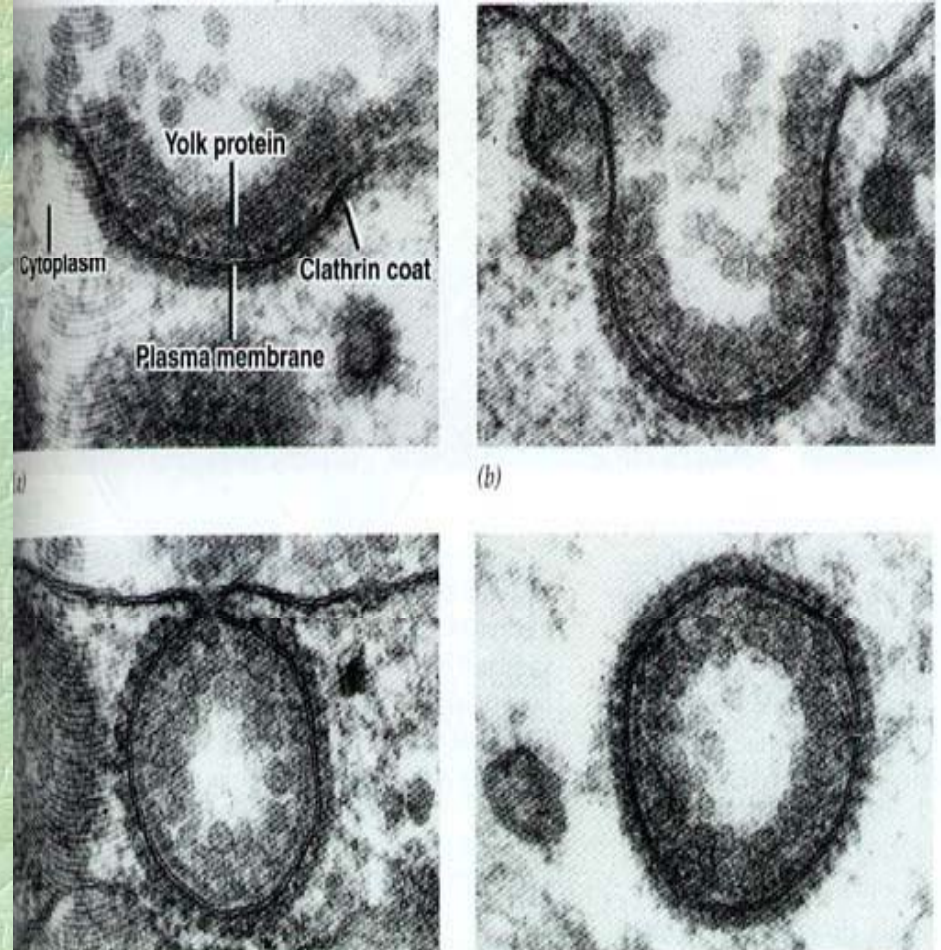
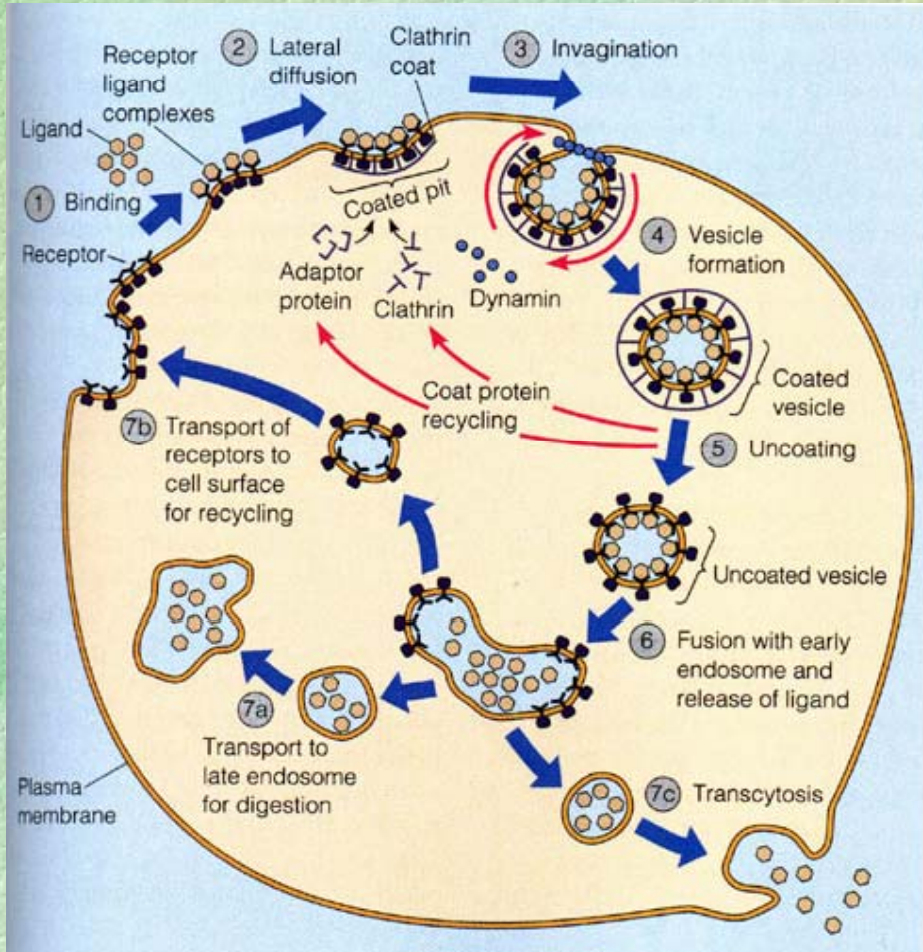
# 大分子或颗粒性物质的跨膜运输

胞吞作用:细胞内陷,将外界物质裹进细胞内形成胞吞泡。涉及膜融合和膜泡转运,主动运输。受体介导和非受体介导

1.胞饮作用 (pinocytosis): 胞吞物为液体状和较小的物质,形成的胞吞泡小于0.15 微米,有**笼形蛋白 (clathrin)**参与。

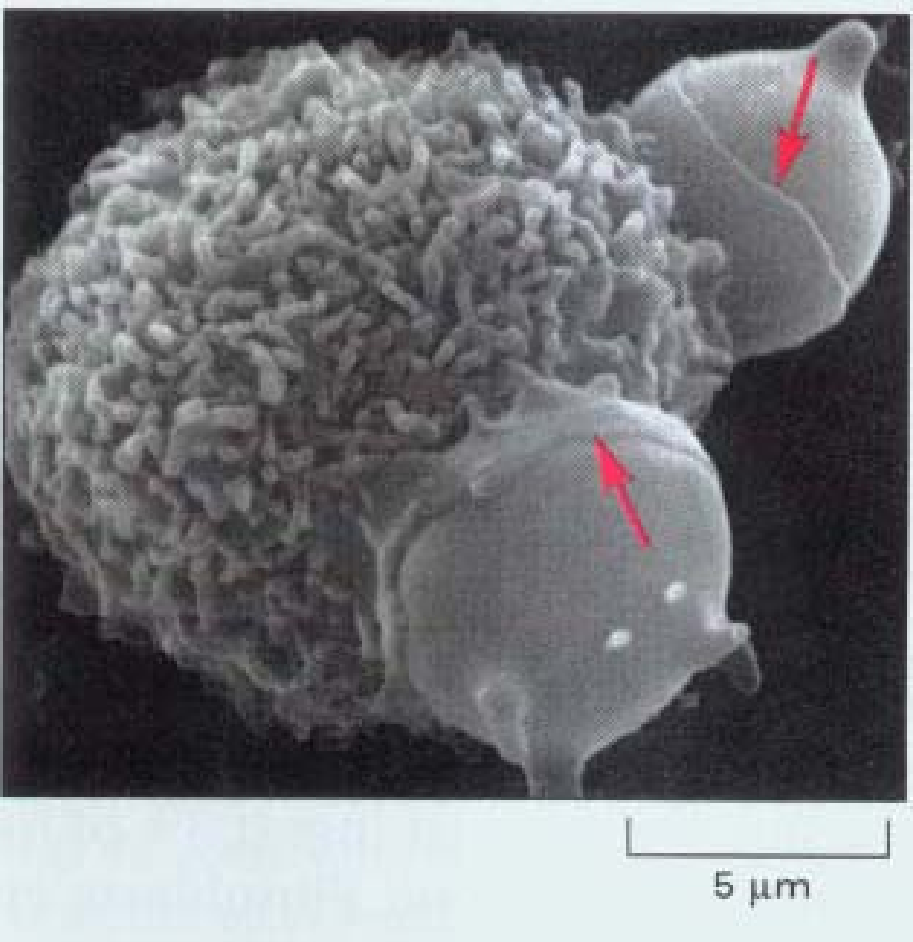
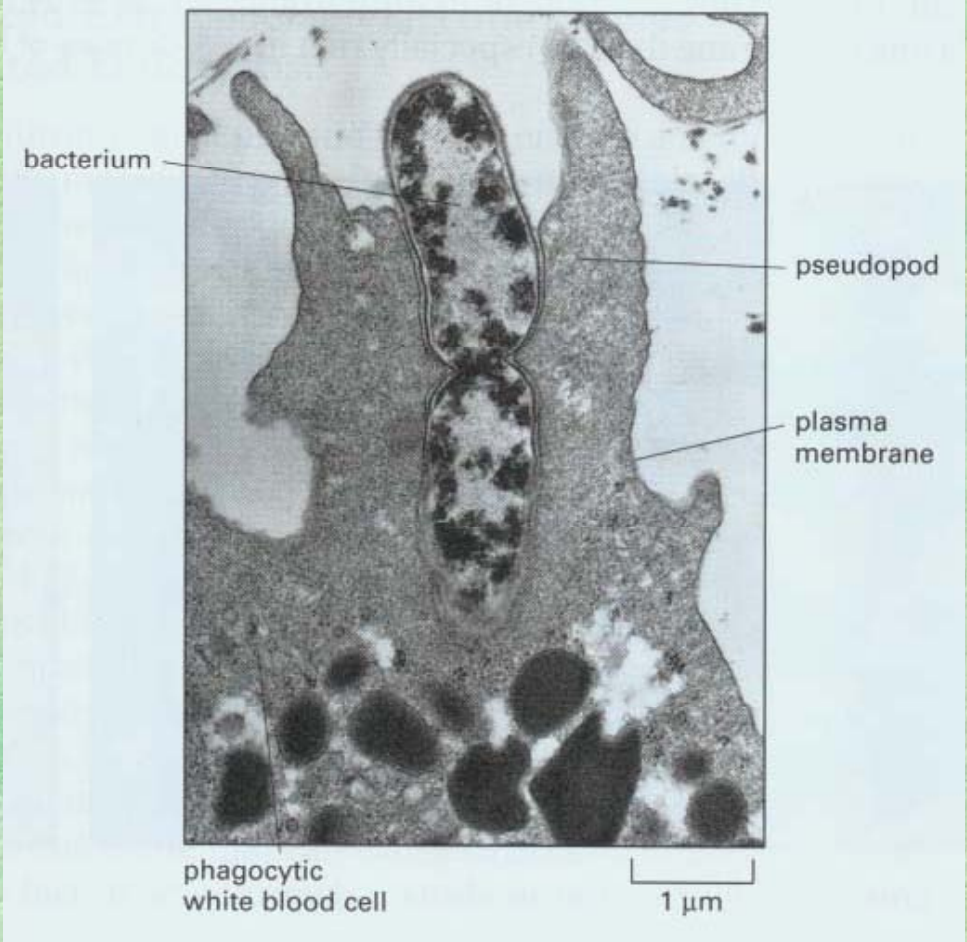
2.吞噬作用(phagocytosis): 胞吞物为大的颗粒状物质,形成的胞吞泡大于0.25微米,**肌动蛋白 (actin)**参与。多细胞动物,一些特化细胞如巨噬细胞和中性粒细胞。

# 受体介导的胞饮过程



某些病毒通过胞饮过程侵入细胞

# 吞噬作用



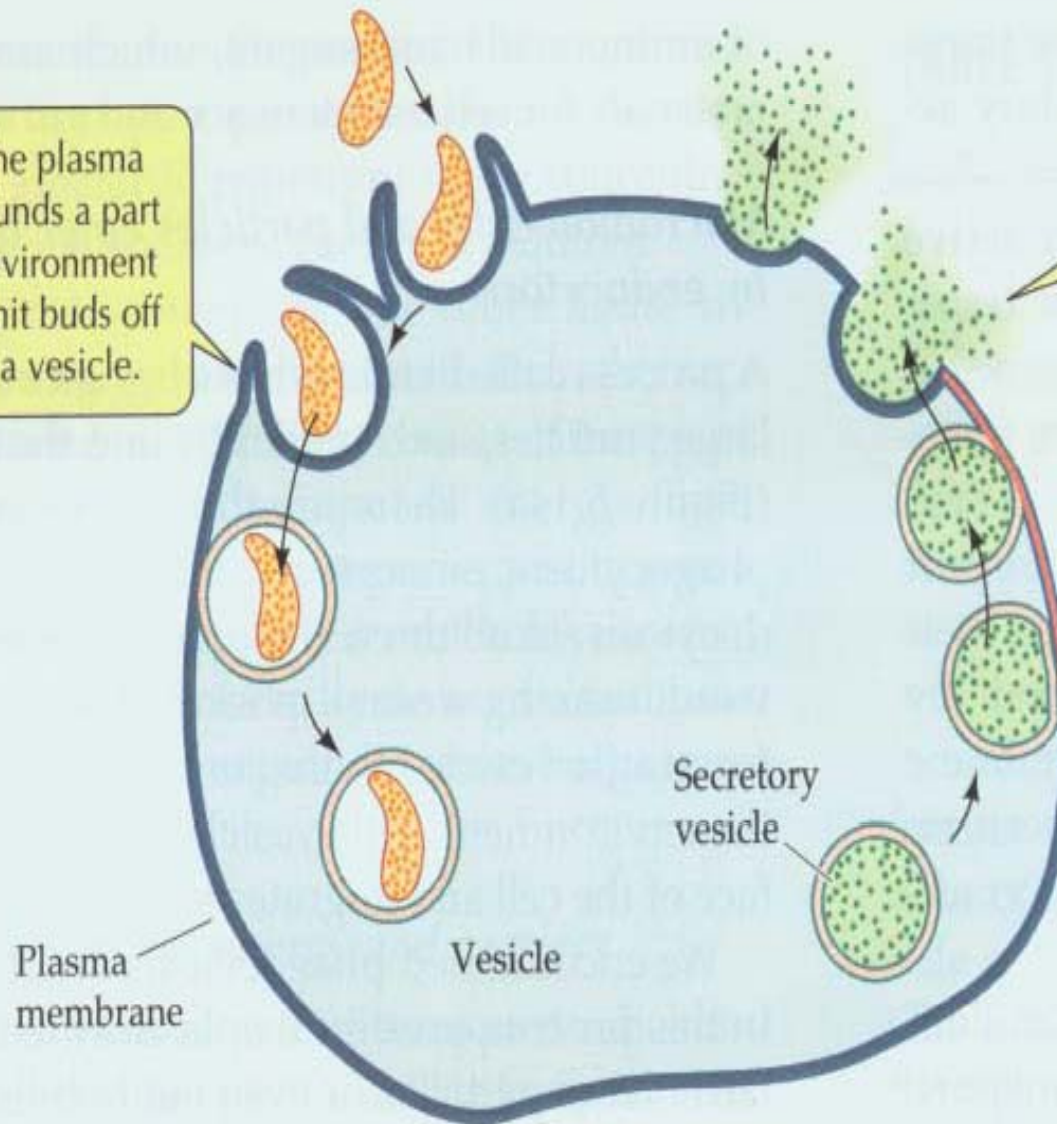
# 胞饮与胞吐作用

(a) Endocytosis

In endocytosis, the plasma membrane surrounds a part of the exterior environment and the whole unit buds off to the interior as a vesicle.

(b) Exocytosis

In exocytosis, a membrane-enclosed vesicle containing substances for export fuses with the plasma membrane. The contents of the vesicle scatter, and the vesicle membrane becomes part of the plasma membrane.



ment outside the cell  
called **coated pits** by  
slight depression of  
plasma membrane whose inner surf  
various proteins, such as *clath*

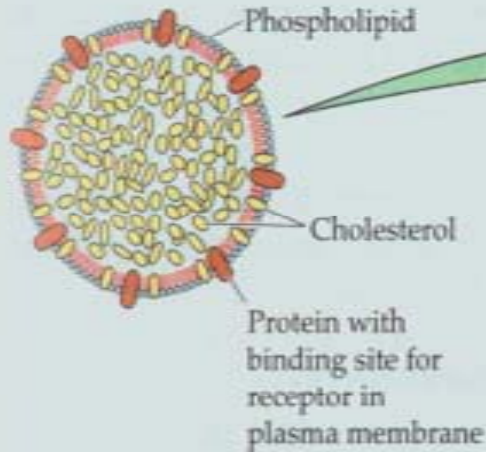
# 家族性血胆固醇过多

(familial hypercholesterolemia FH)

纯合体的个体含有致病基因会导致严重增加血清胆固醇浓度。这种病常常导致阻断动脉（动脉粥样硬化），并且通常在患者20岁之前就死于心脏病。在当时，几乎没有人知道这种致病的生理原理。而且，目前尚无特效药物可以治疗。

- LDL（低密度脂蛋白）受体广泛分布于肝脏、动脉壁平滑肌细胞、肾上腺皮质细胞、血管内皮细胞、淋巴细胞、单核细胞、巨噬细胞，各组织或细胞的LDL受体活性差别很大。
- LDL受体主要功能是通过摄取胆固醇进入细胞内，用于细胞增殖和固醇类激素及胆汁酸盐的合成等。

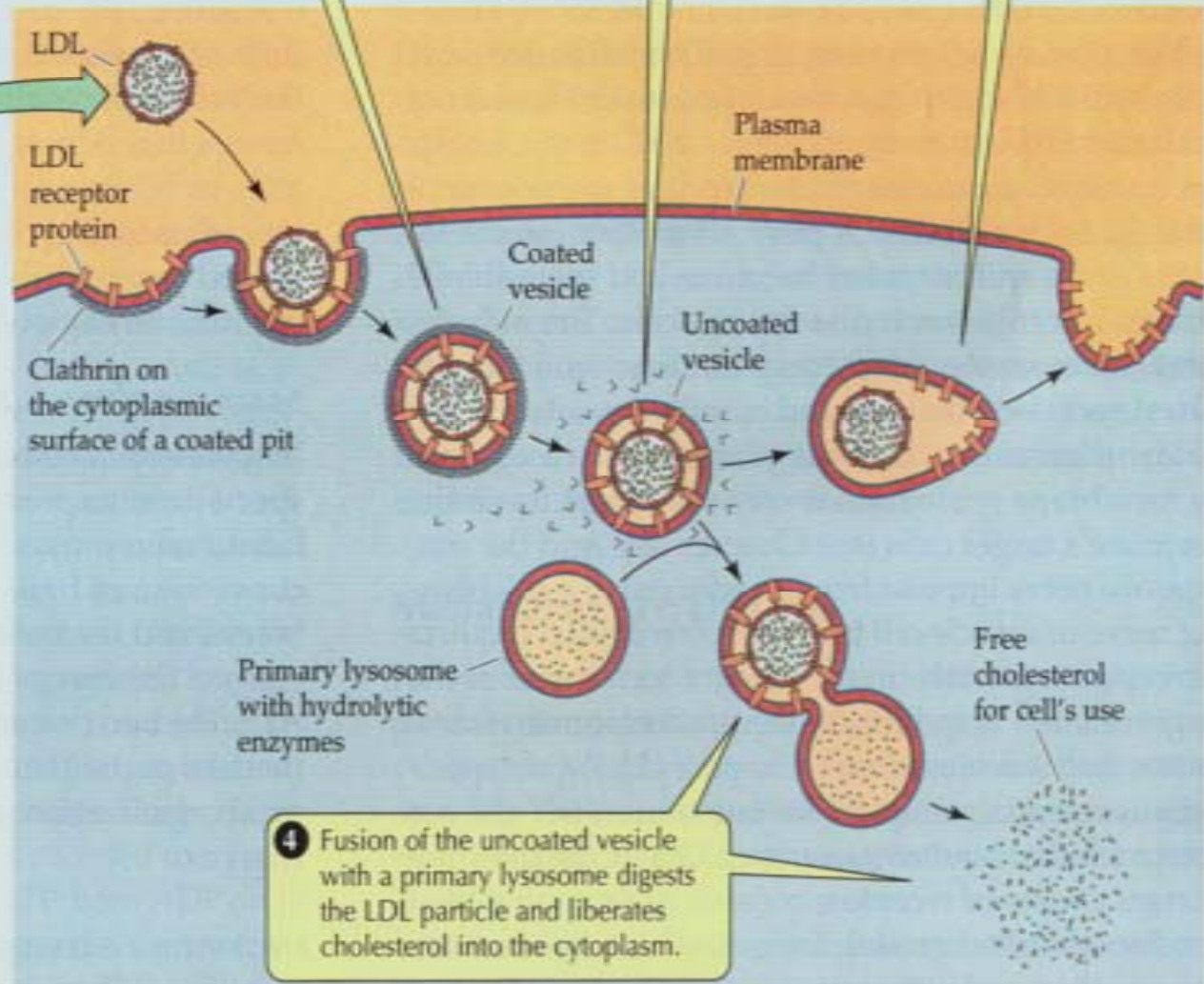
LDL particle



1 A clathrin-coated vesicle forms around the LDL particle bound to receptors on the cell.

2 The clathrin coating dissociates and is recycled.

3 Receptors release from LDL and are recycled to the cell's membrane.



**5.16 Receptor-Mediated Endocytosis of Low-Density Lipoprotein (LDL)** A specific receptor on the surface of most mammalian cells is responsible for the uptake of LDL and its cholesterol load from the blood.

Michael S. Brown & Joseph L. Goldstein, 1985

# 家族性血胆固醇过多

(familial hypercholesterolemia FH)

LDL受体的缺陷，  
导致受体结合脂  
蛋白不能被内化，  
所以就不能被传  
送至细胞质的溶  
酶体进行加工。



# 第五章 物质代谢与能量转换

## 第二节 能量转换

一、细胞的能量货币——ATP

二、绿色植物的光合作用

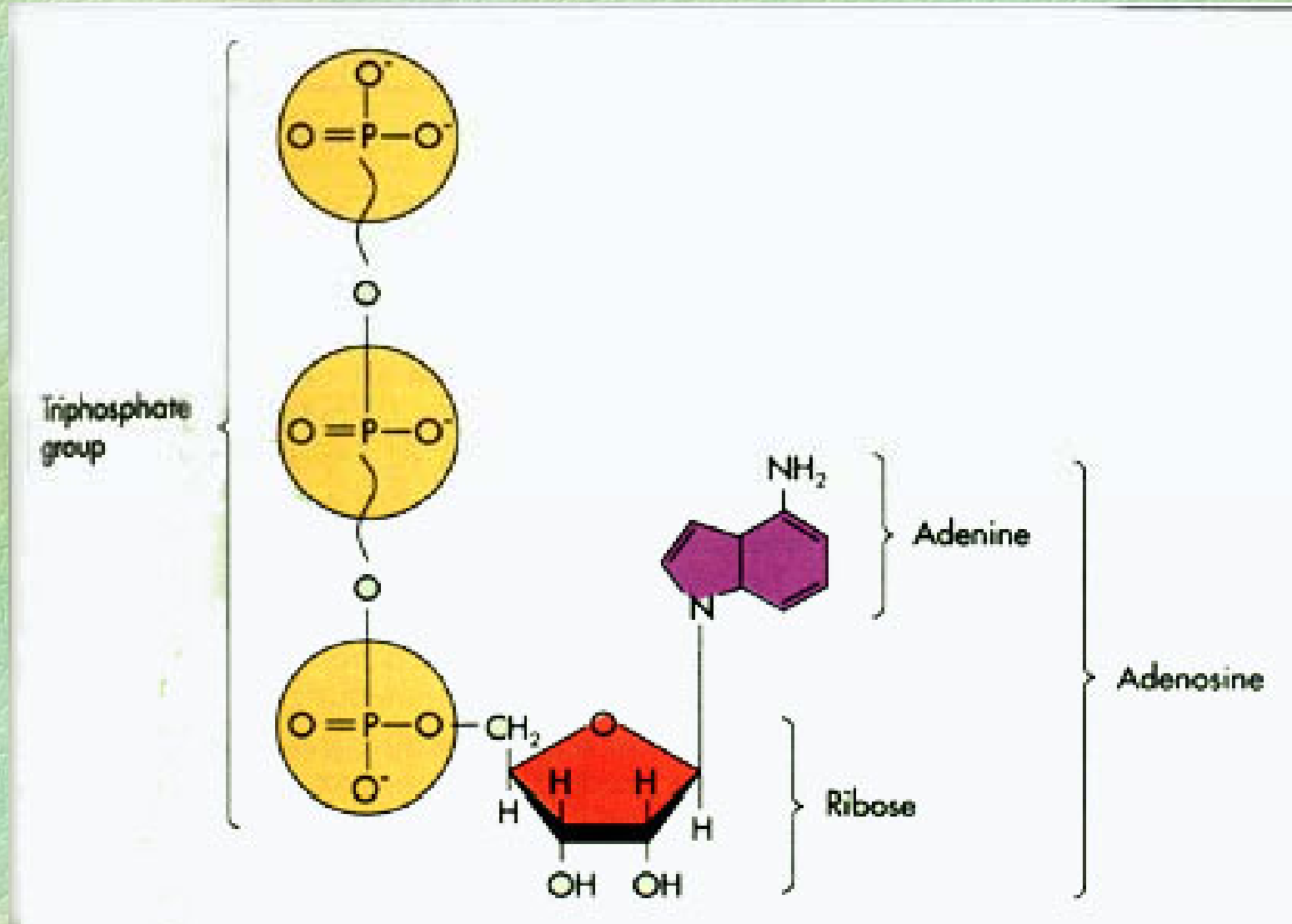
三、生物氧化

四、生物体内的代谢网络

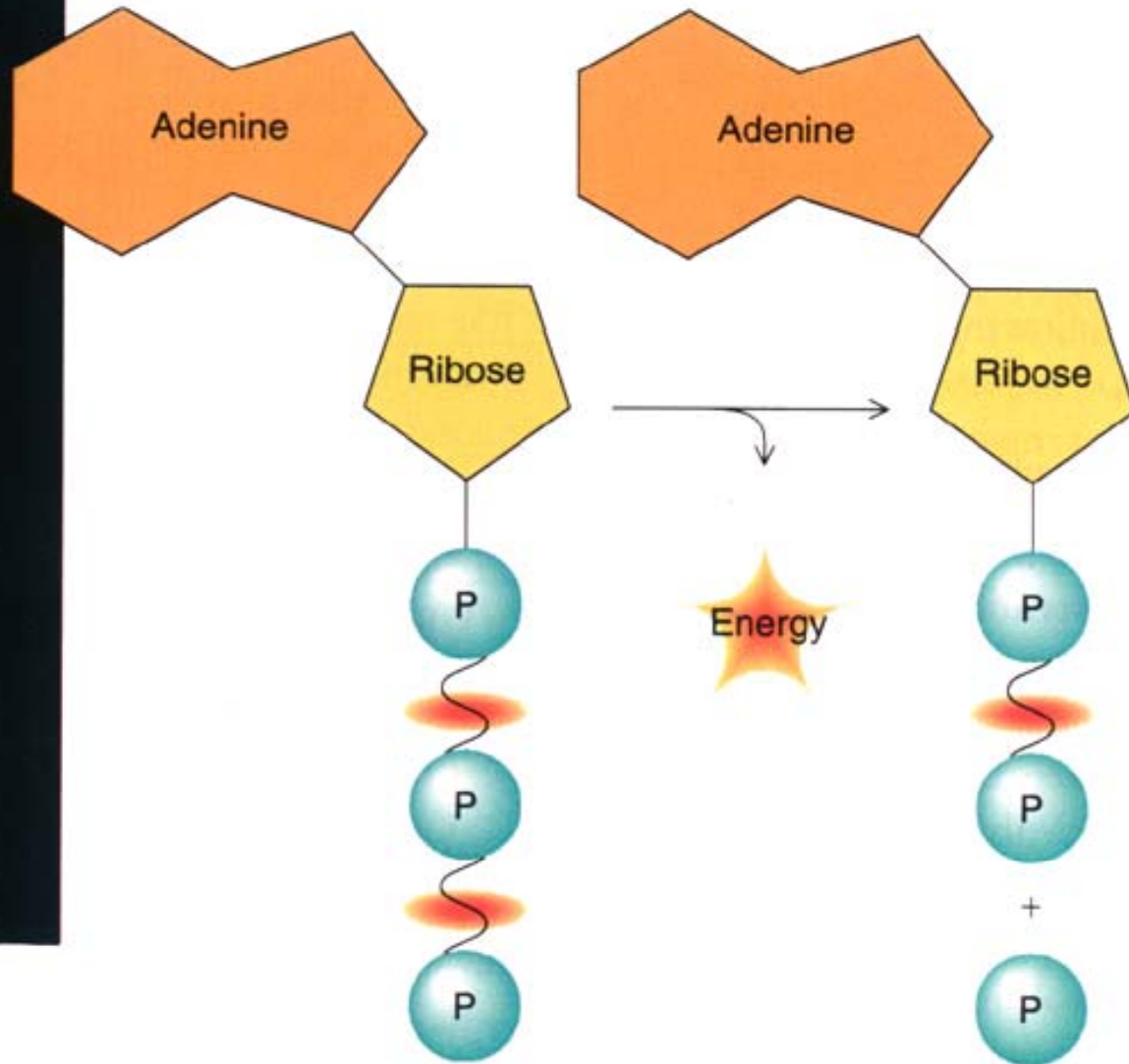
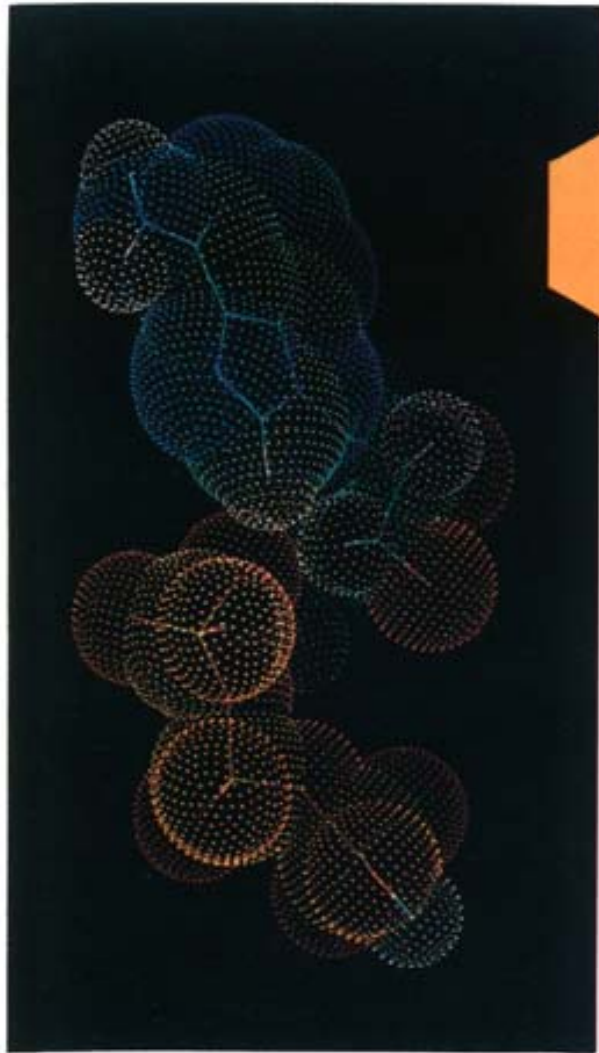
# 一、生物的能量通用货币—ATP

◆代谢过程中能量的转移、储存与利用

◆ 三磷酸腺苷 (ATP)



ATP结构



## ◇ ATP是生物体自由能的通用货币

生命机体内，具有高能键的化合物很多：

磷氧键型； **ATP**，磷酸甘油、乙酰磷酸等。

氮磷键型：**磷酸肌酸**、**磷酸精氨酸**；

硫酯键型：**酯酰CoA**等；

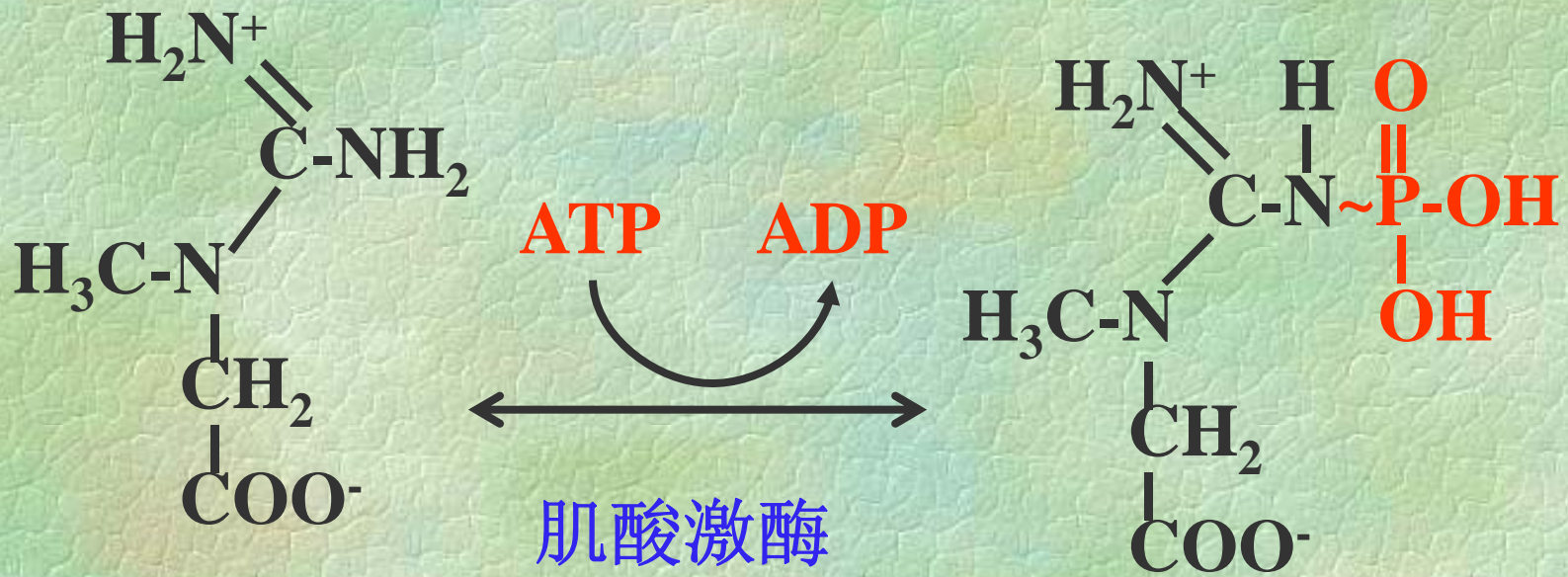
甲硫键型：**S-腺苷甲硫氨酸**。

高能化合物间可相互转化，以满足机体的需要，其中ATP最容易被机体利用。

## 几种常见的高能化合物

通 式	举 例	释放能量(pH 7.0, 25℃) kJ/mol (kcal/mol)
$\begin{array}{c} \text{NH} \\    \\ \text{R}-\text{C}-\text{N} \sim \text{PO}_3\text{H}_2 \\   \\ \text{H} \end{array}$	磷酸肌酸	- 43. 9 ( - 10.5)
$\begin{array}{c} \text{CH} \\    \\ \text{RC}-\text{O} \sim \text{PO}_3\text{H}_2 \end{array}$	磷酸烯醇式丙酮酸	- 61. 9 ( - 14.8)
$\begin{array}{c} \text{O} \\    \\ \text{RC}-\text{O} \sim \text{PO}_3\text{H}_2 \end{array}$	乙酰磷酸	- 41. 8 ( - 10.1)
$\begin{array}{c} \text{O} \quad \quad \text{O} \\    \quad \quad    \\ -\text{P}-\text{O} \sim \text{P}-\text{OH} \\   \quad \quad   \\ \text{OH} \quad \quad \text{OH} \end{array}$	ATP, GTP, UTP, CTP	- 30. 5 ( - 7.3)
$\begin{array}{c} \text{O} \\    \\ \text{RC} \sim \text{SCoA} \end{array}$	乙酰 CoA	- 31. 4 ( - 7.5)

# 磷酸肌酸的生成

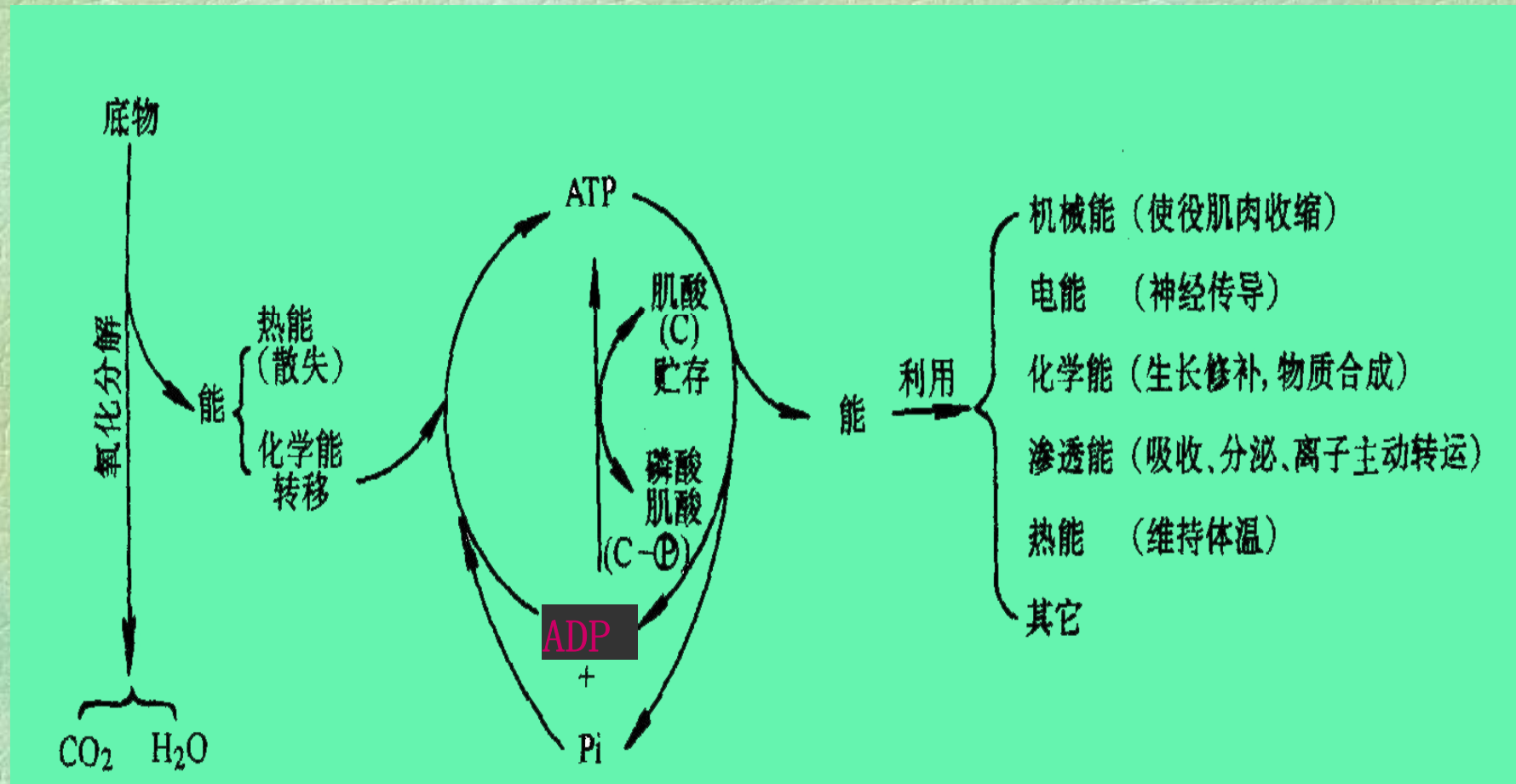


肌酸

磷酸肌酸  
(CP)

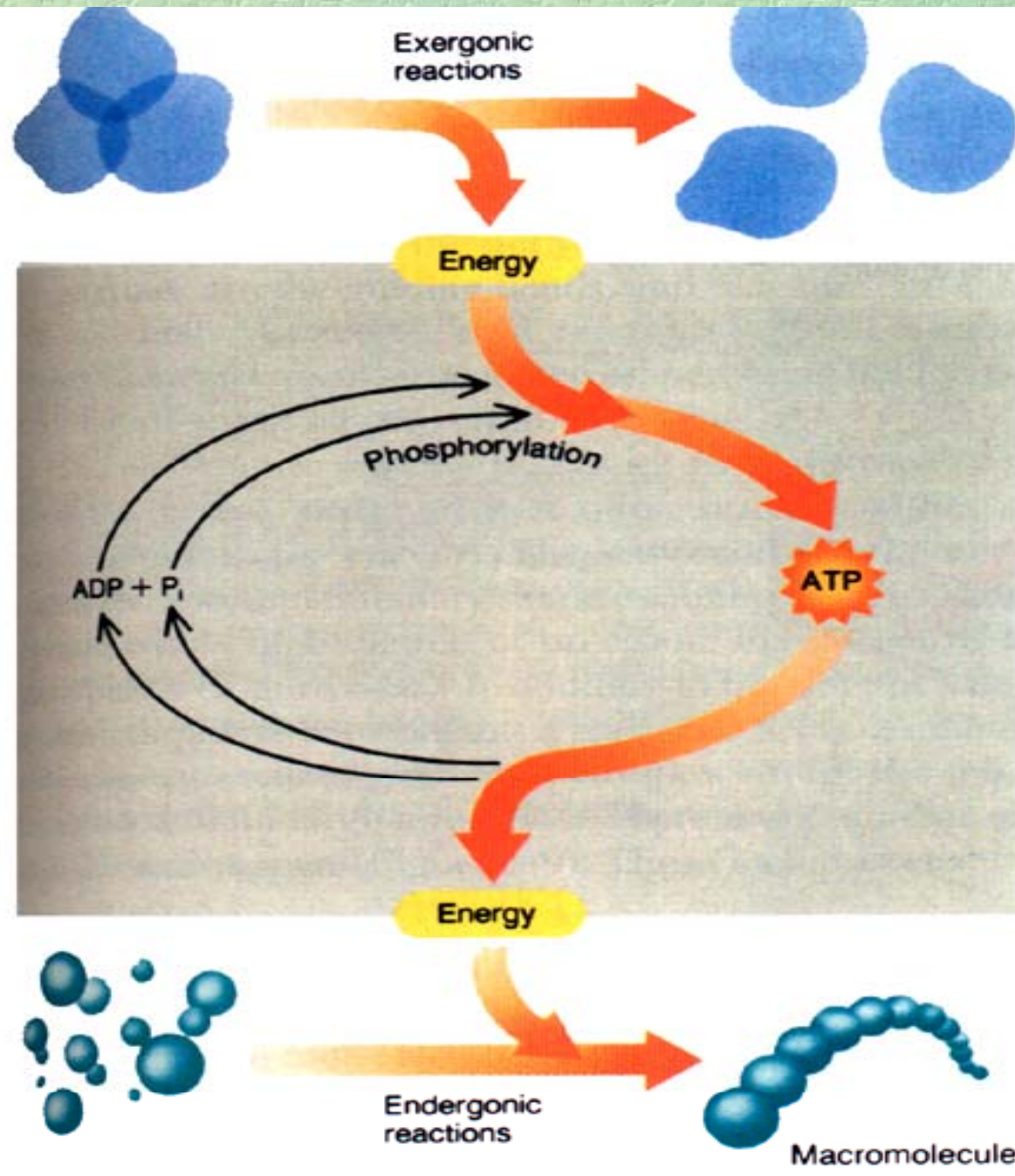
肌肉和脑组织中能量的贮存形式

# 生物系统中的能流

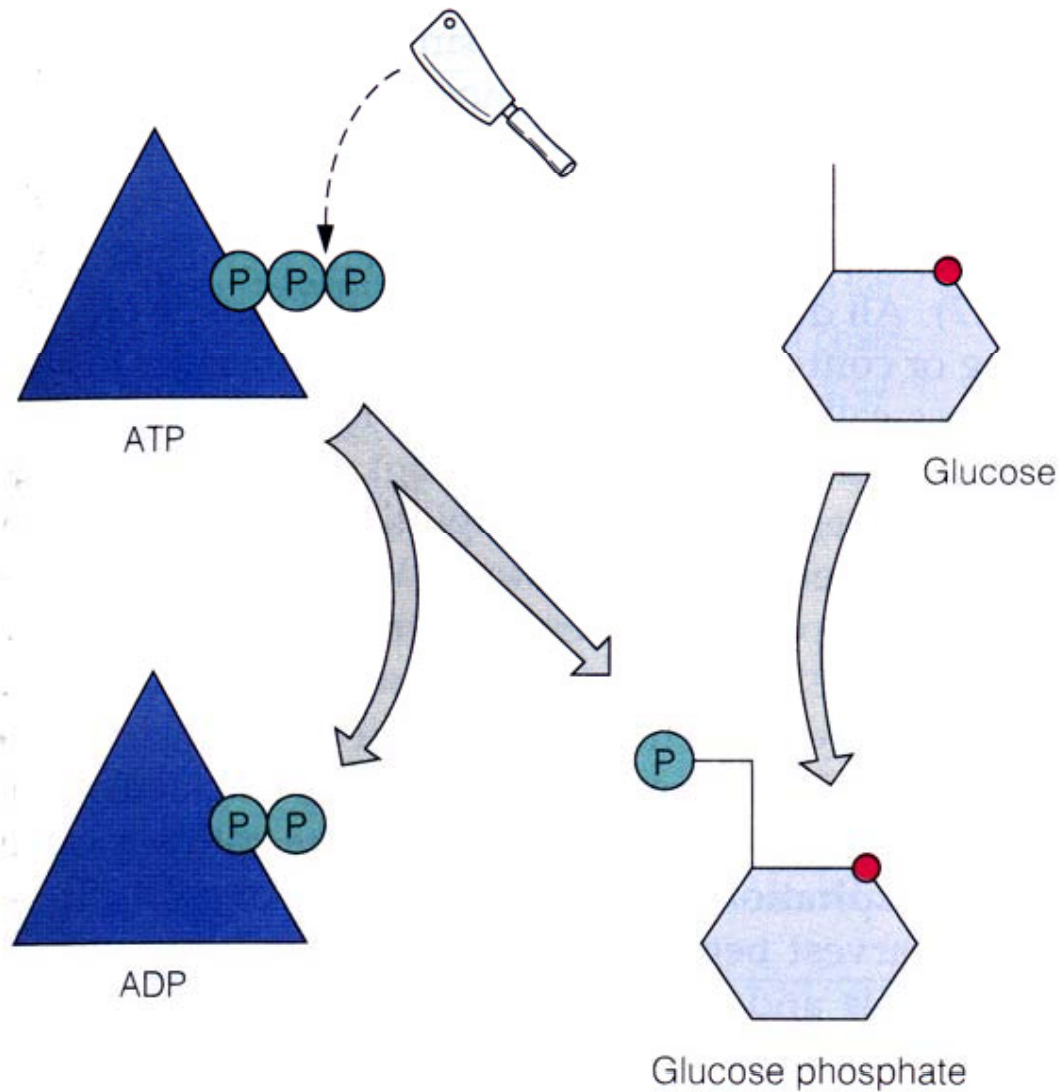


★ ATP是细胞内的“能量通货”

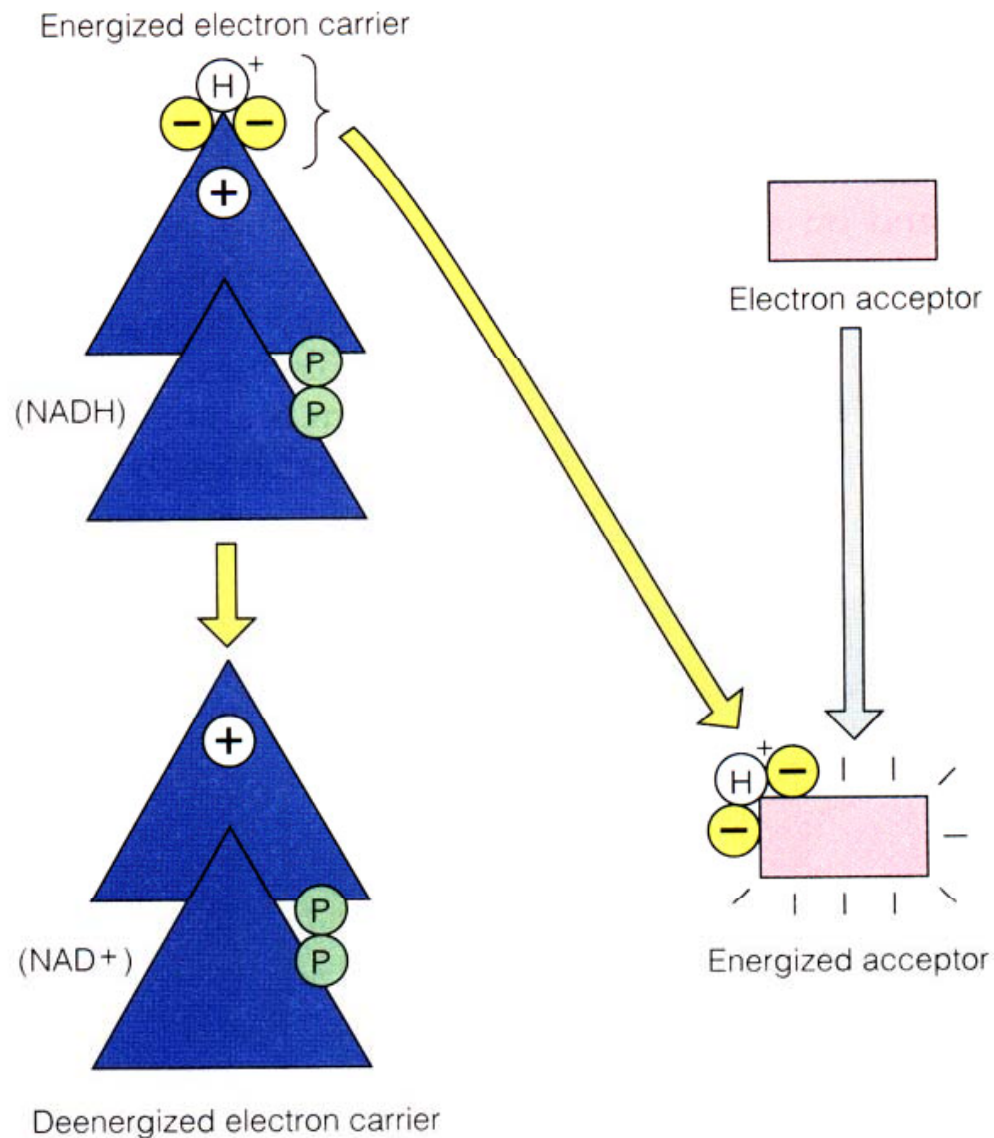
ATP是生物系统能量交换的中心



ATP  
是  
能  
量  
流  
通  
的  
货  
币



**FIGURE 5.4** *Energizing Glucose.* Glucose can be “supercharged” by the cleaving of ATP and the addition of the cleaved phosphate group to the glucose carbon ring. This transferred phosphate group acts like a little battery pack, providing power that enables the glucose phosphate to participate in reactions in which a regular glucose molecule cannot take part.



**FIGURE 5.5** *Electron Transfer from Carrier to Acceptor.* Energy pathways such as glycolysis and aerobic respiration run on coupled electron transfer reactions, often linked by electron carriers. As an electron carrier releases two electrons and one hydrogen ion, these become available to an acceptor, which becomes energized, or charged, as it receives them.

## 电子传递载体

**NAD<sup>+</sup>**(烟酰胺腺嘌呤二核苷酸)  
**NADP<sup>+</sup>**(烟酰胺腺嘌呤二核苷酸磷酸)  
**FAD<sup>+</sup>** 黄素腺嘌呤二核苷酸

## ◆ATP与生命活动

◆转移到其它分子中储存：



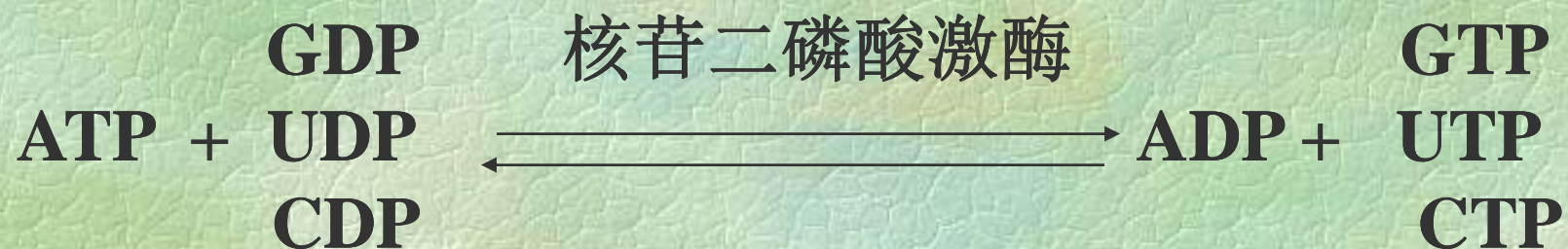
◆用于耗能做功：

一个人在静卧情况下每24小时，消耗40kgATP；一个人在重体力劳动情况每24小时，消耗1000kgATP。

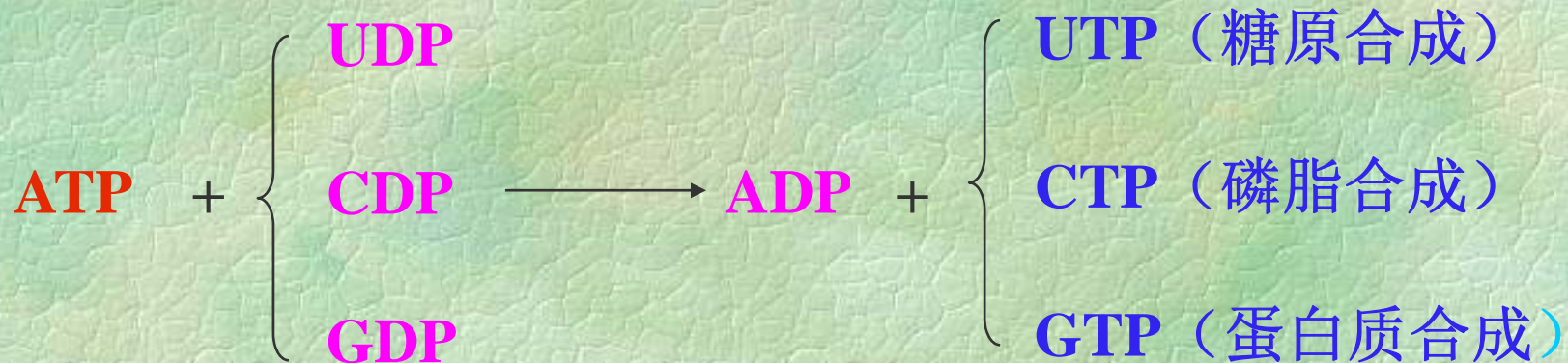
运动（机械能）、物质吸收（渗透能）、生物合成（化学能）、生物电（电能）、体温（热能）、生物发光（光能）

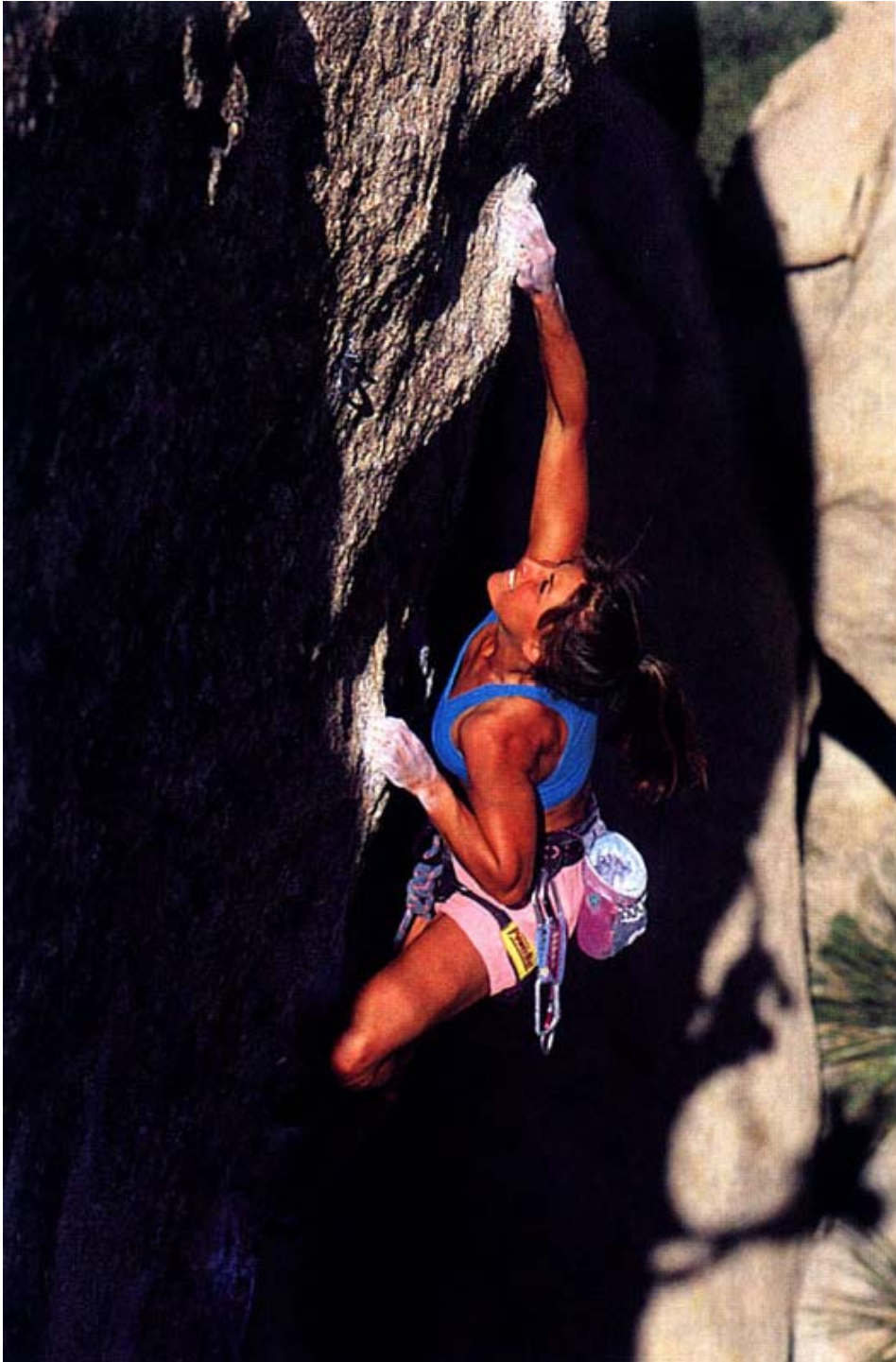
## 其它核苷三磷酸

UTP、CTP、GTP中的高能磷酸基团均来自ATP



## 高能键转移





化学能转化为机械能

## 二、绿色植物的光合作用 (photosynthesis)

◆人类应向叶绿体 (素) 脱帽致敬

◇生命世界最初的能量来源于太阳能。

◇光合作用是自然界通过自养生物 (绿色植物和光合细菌) 将光能转变为化学能的主要途径。

◇叶绿体是绿色植物光合作用的器官。

# 光合作用的研究历史

1771年，英国科学家普利斯特利把一支点燃的蜡烛和一只小白鼠分别放到密闭的玻璃罩里，蜡烛不久就熄灭了，小白鼠很快也死去了。



他把两盆植物分别放到两个密闭的玻璃罩里。他发现植物能够长时间地活着，蜡烛没有熄灭，小鼠活动正常。



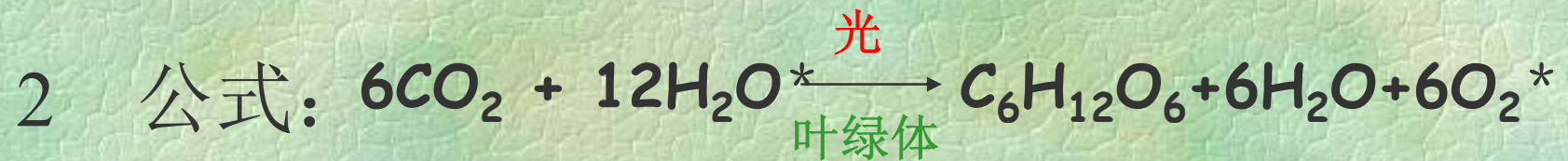
✚ 植物可以在光下净化“坏了”的空气 → 光合作用

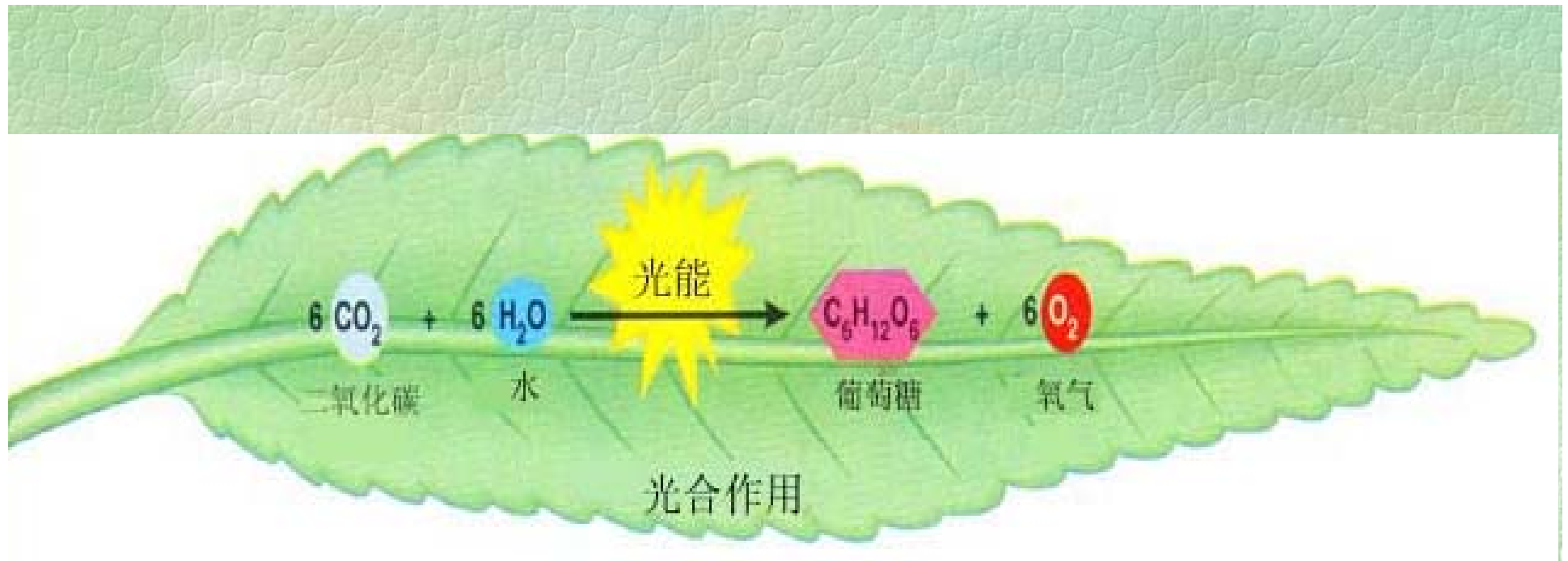


# 光合作用概述

## 定义及公式

1 定义：绿色植物吸收阳光的能量，同化二氧化碳和水，制造有机物并释放氧气的过程。



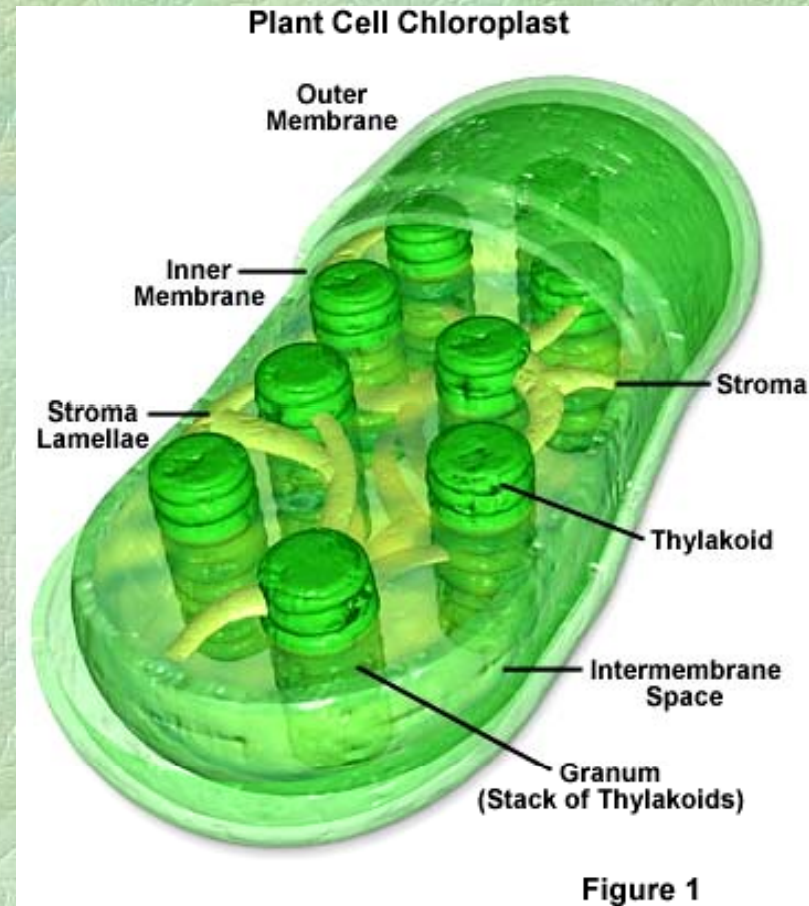


## 绿叶中的光合作用

# 叶绿体及光合色素

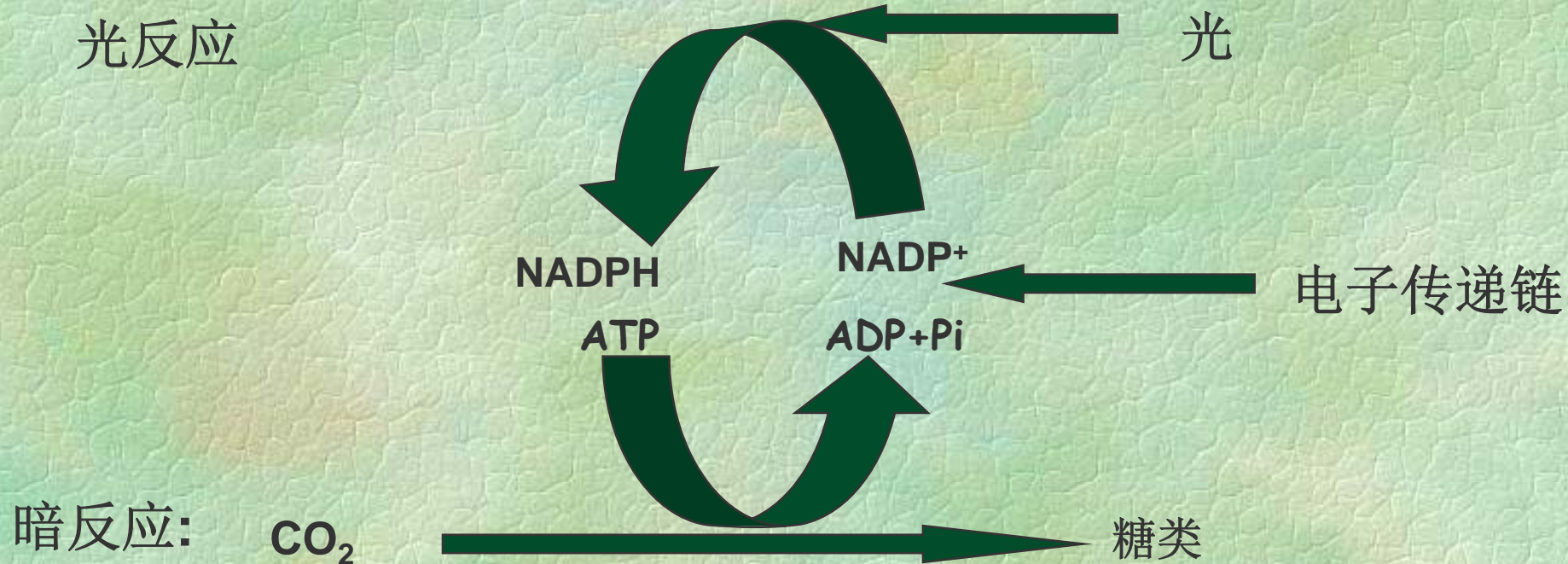
## 叶绿体的结构

- 1 双层膜：内膜为选择性屏障。
- 2 基质：CO<sub>2</sub>同化；淀粉形成
- 3 基粒：由类囊体垛叠而成的绿色颗粒。

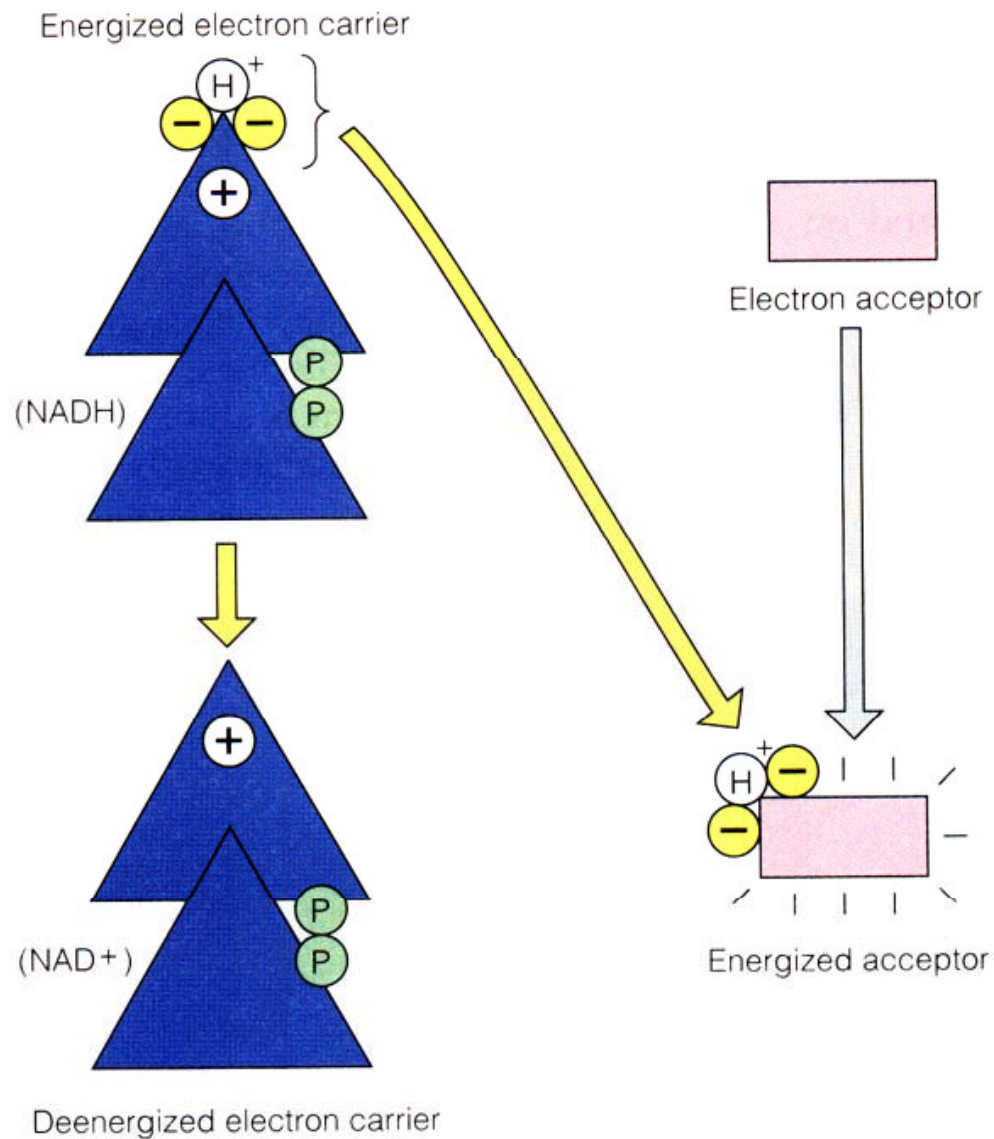


## 叶绿体的结构

# 光合作用的总过程



**NADPH** 烟酰胺腺嘌呤二核苷酸



**FIGURE 5.5** *Electron Transfer from Carrier to Acceptor.* Energy pathways such as glycolysis and aerobic respiration run on coupled electron transfer reactions, often linked by electron carriers. As an electron carrier releases two electrons and one hydrogen ion, these become available to an acceptor, which becomes energized, or charged, as it receives them.

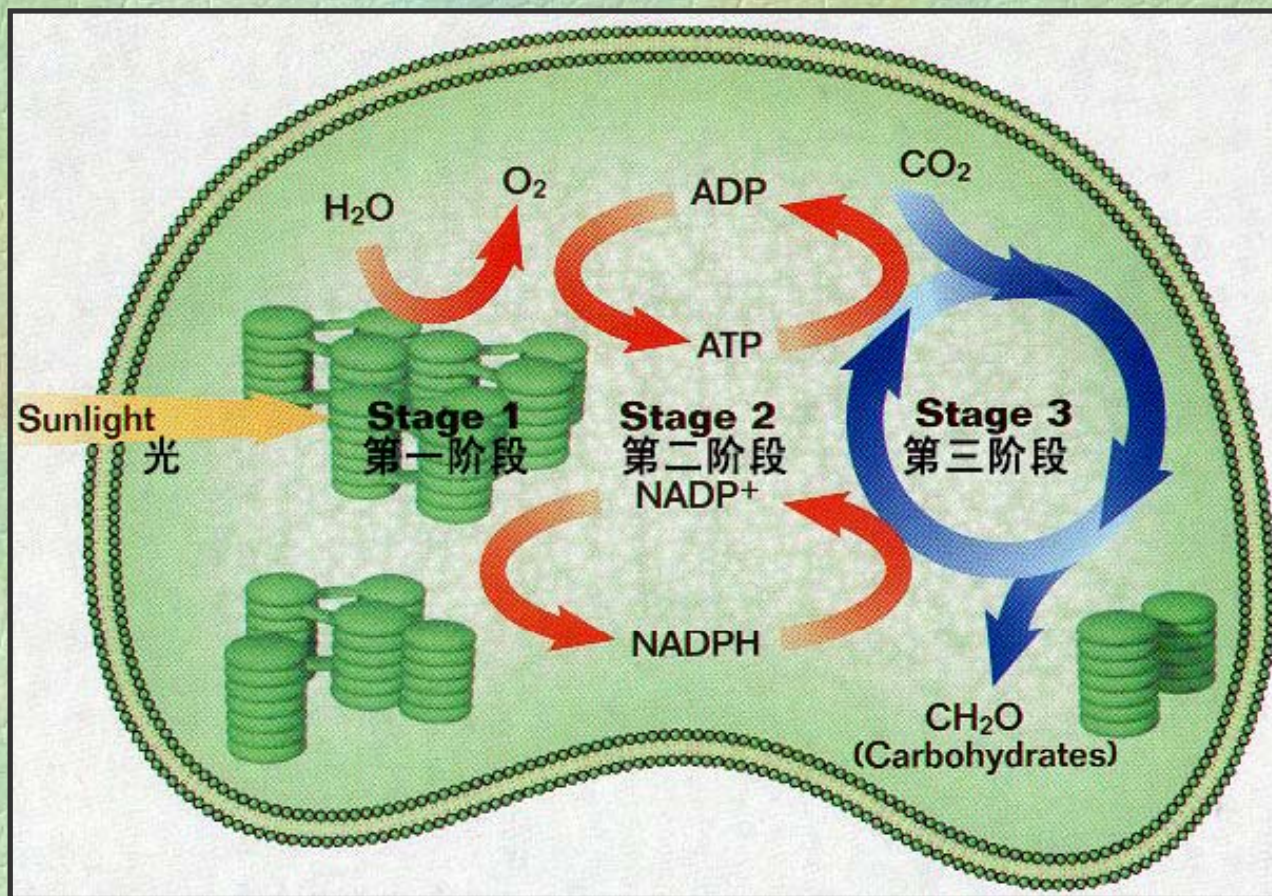
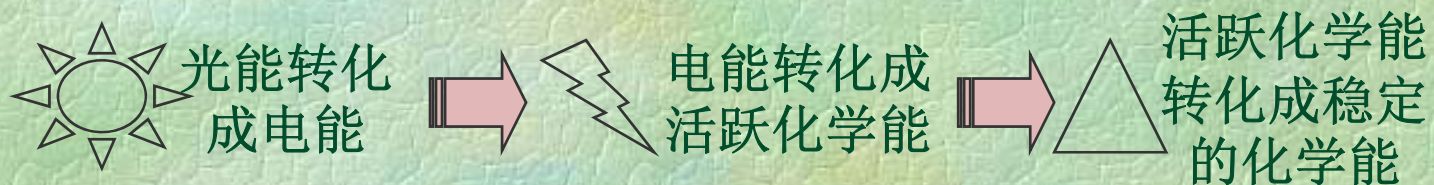
## 电子传递载体

**NADP<sup>+</sup>**(烟酰胺腺嘌呤二核苷酸磷酸) 光合作用

**NAD<sup>+</sup>**(烟酰胺腺嘌呤二核苷酸)

**FAD<sup>+</sup>** 黄素腺嘌呤二核苷酸

# 光合作用中光能转化过程



# 光合色素（叶绿素和类胡萝卜素）

## 1 叶绿素：Chlorophyll, Chl

Chla: 蓝绿色，吸收兰紫光 and 红光，大部分用于捕光，少部分用于转化光能

Chlb: 黄绿色，吸收蓝光 and 橙光，全部用于捕光

## 2 类胡萝卜素：

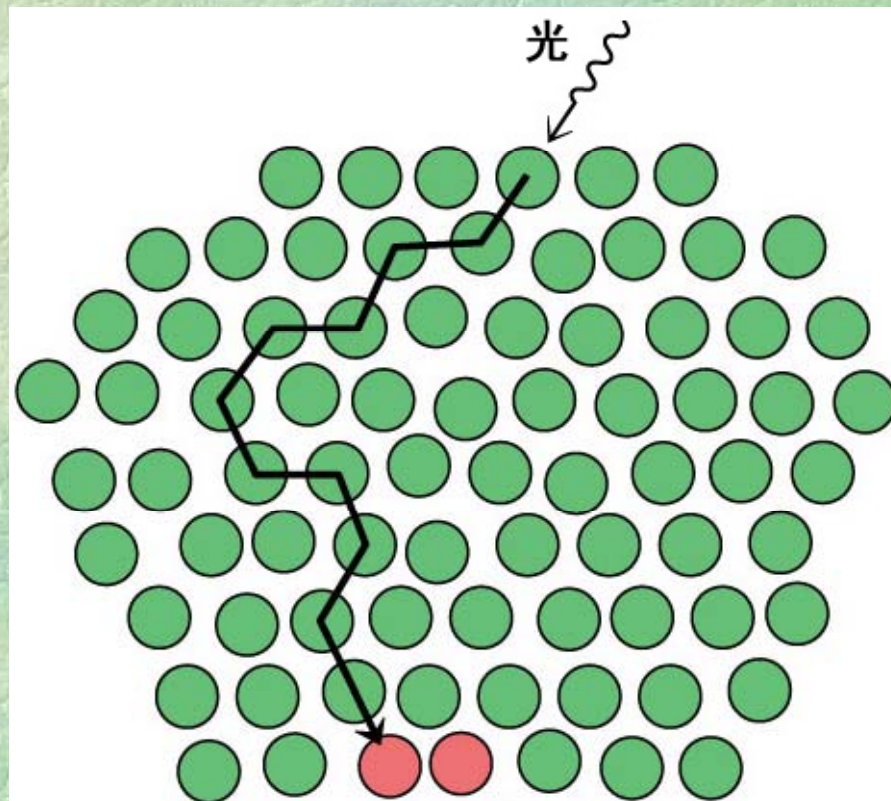
胡萝卜素：

叶黄素：

聚光作用，消耗多余光能

# 光能在色素中的转移

- 在光的照射下，具有吸收和传递光能作用的色素，将吸收的光能传到处在特殊状态的叶绿素a上。

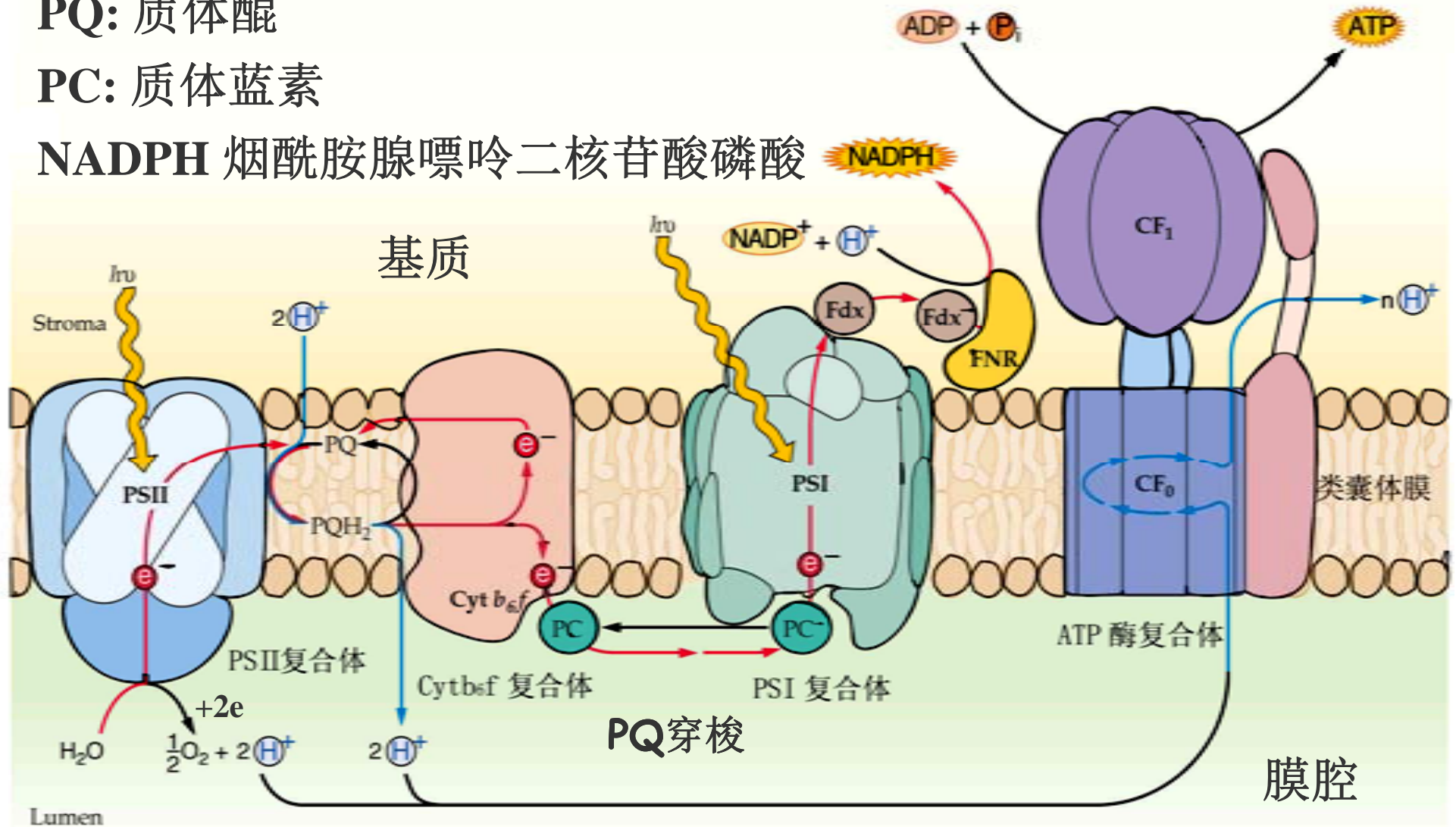


# 电子传递与光合磷酸化堆 光反应

PQ: 质体醌

PC: 质体蓝素

NADPH 烟酰胺腺嘌呤二核苷酸磷酸



## ◆光合作用：光反应和暗反应

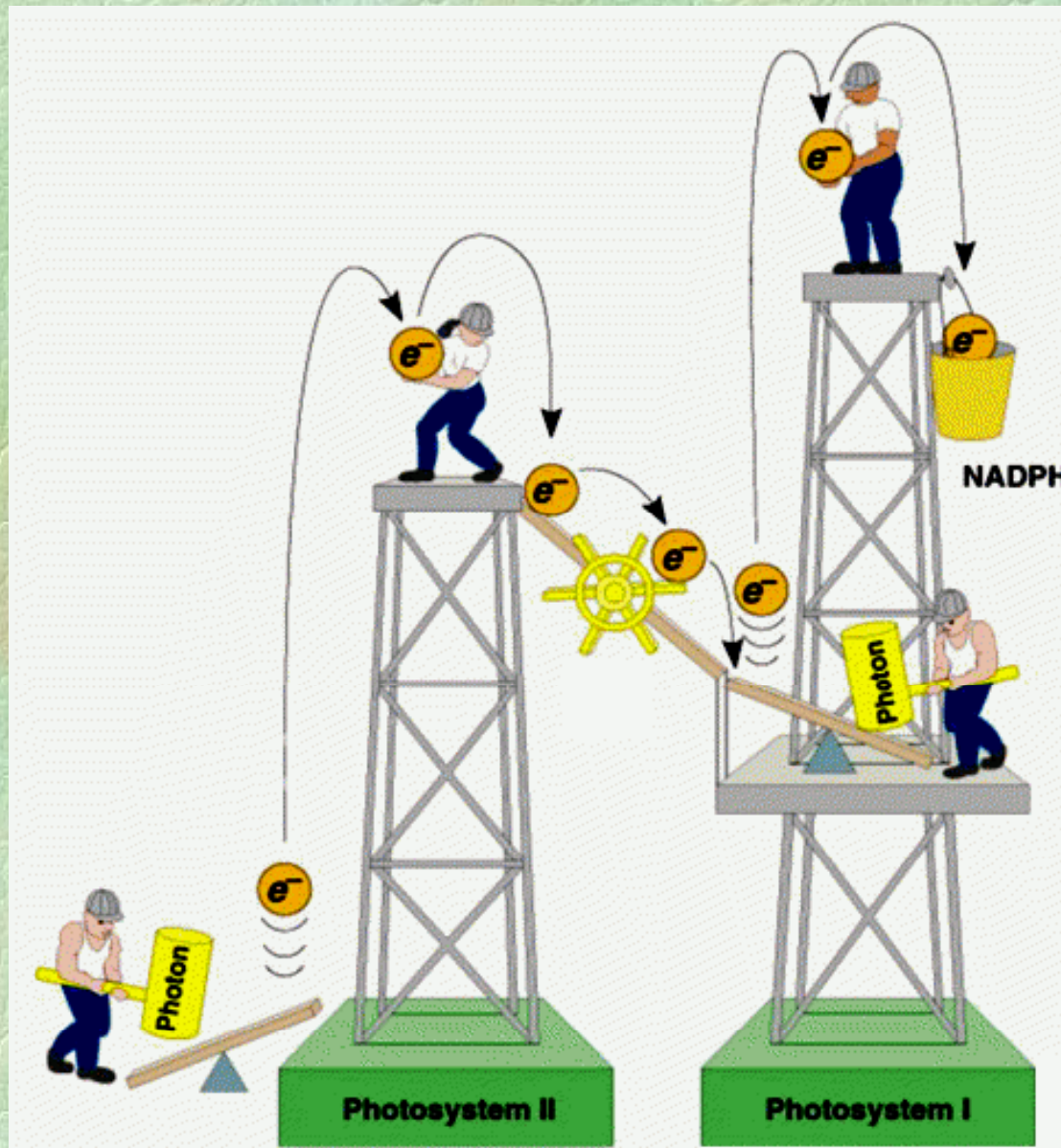
◆光反应：由光所引起的一系列光物理和光化学反应，发生在类囊体片层中。

◆光能的吸收、传递和转换

光反应系统 I (PS I)：反应中心色素（叶绿素a) P700。聚光复合体和电子受体，含有被称为“P700”的高度特化的叶绿素a

光反应系统 II (PS II)：反应中心色素（叶绿素a) P680。聚光复合体和放氧复合体，含有被称为“P680”高度特化的叶绿素a。

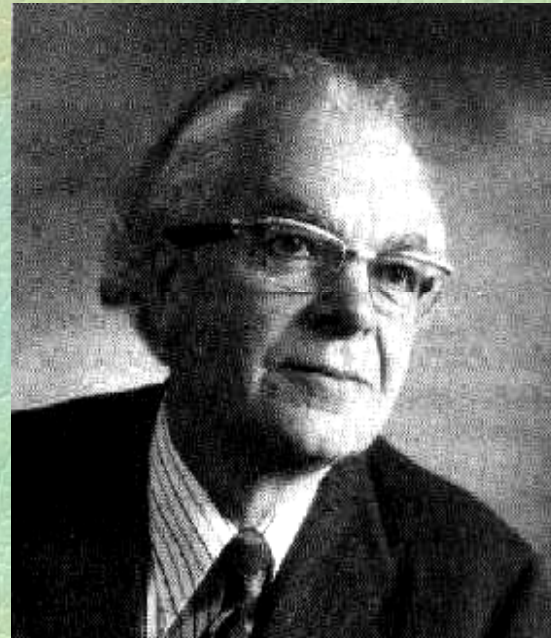
# 光系统II和光系统I的协同作用



# 光合磷酸化

利用贮存在跨类囊体膜的质子梯度的光能把**ADP**和无机磷合成为**ATP**的过程。与电子传递相偶联。

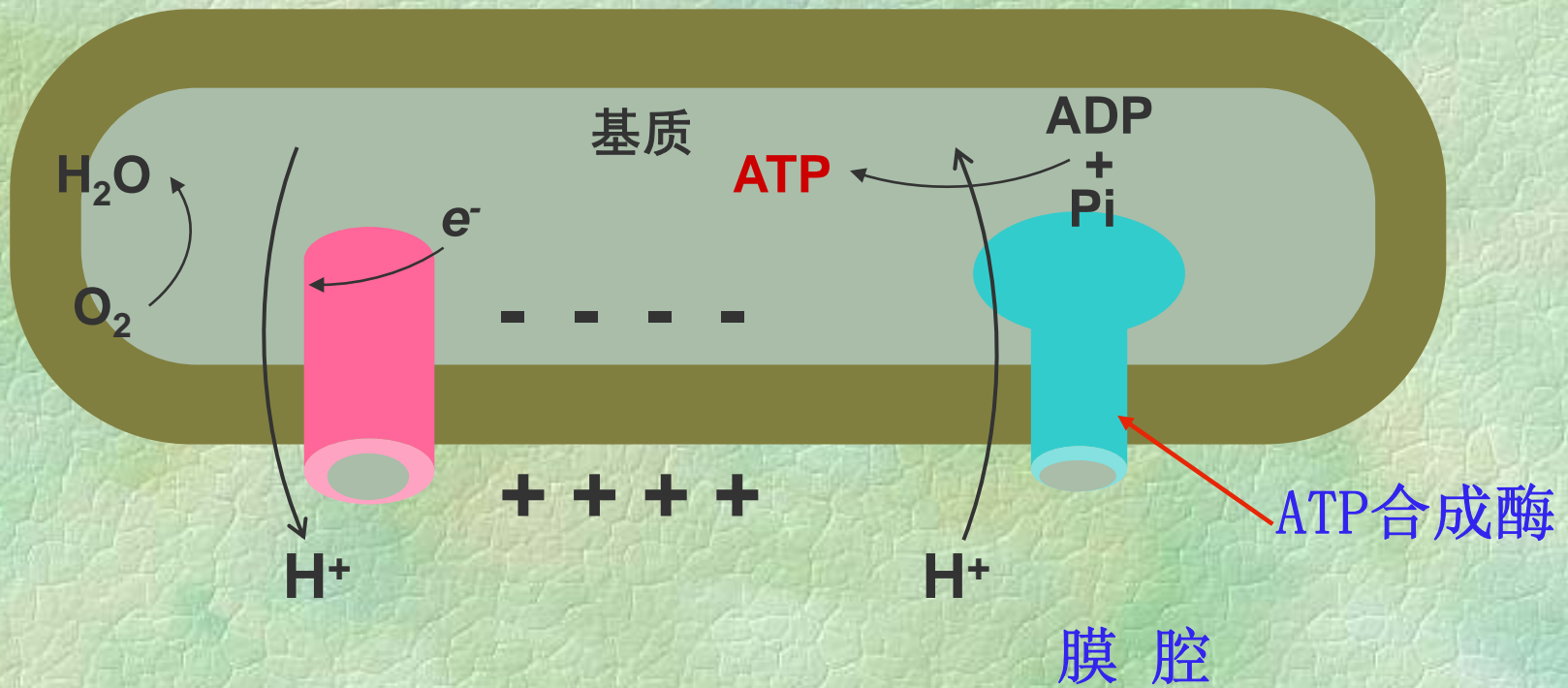
- 1) 光合磷酸化机理
- 普遍被接受的是米切尔 (Mitchell) 的化学渗透学说。  
根据化学渗透学说, 光合电子传递的作用是建立一个跨类囊体膜的质子动力势, 在质子动力势的作用下, 类囊体膜上的**ATP合成酶**合成**ATP**。
- 根据化学渗透学说, 光合磷酸化过程可分为两个阶段, 一是质子动力势的建立, 二是**ATP**的合成。



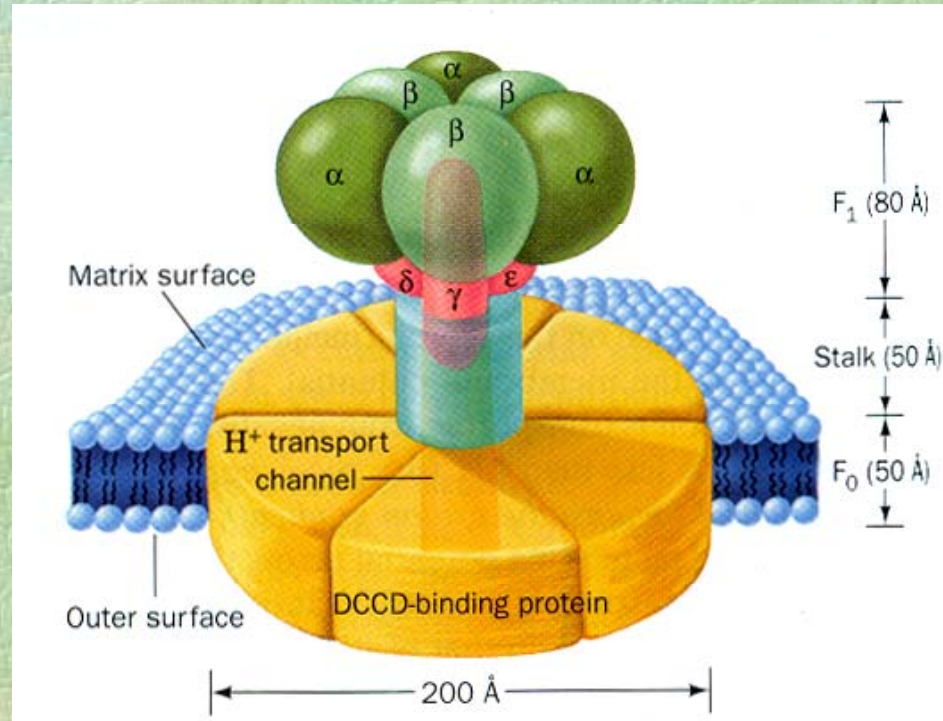
**Peter Mitchell (1920 - 1992)**

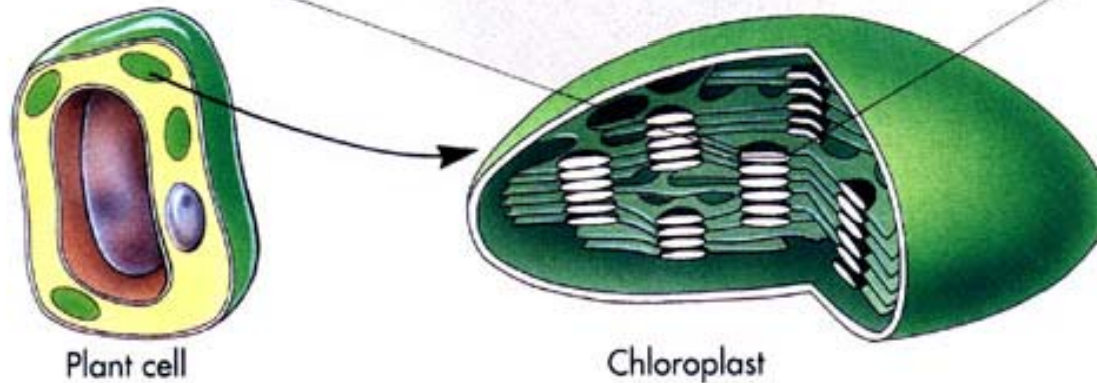
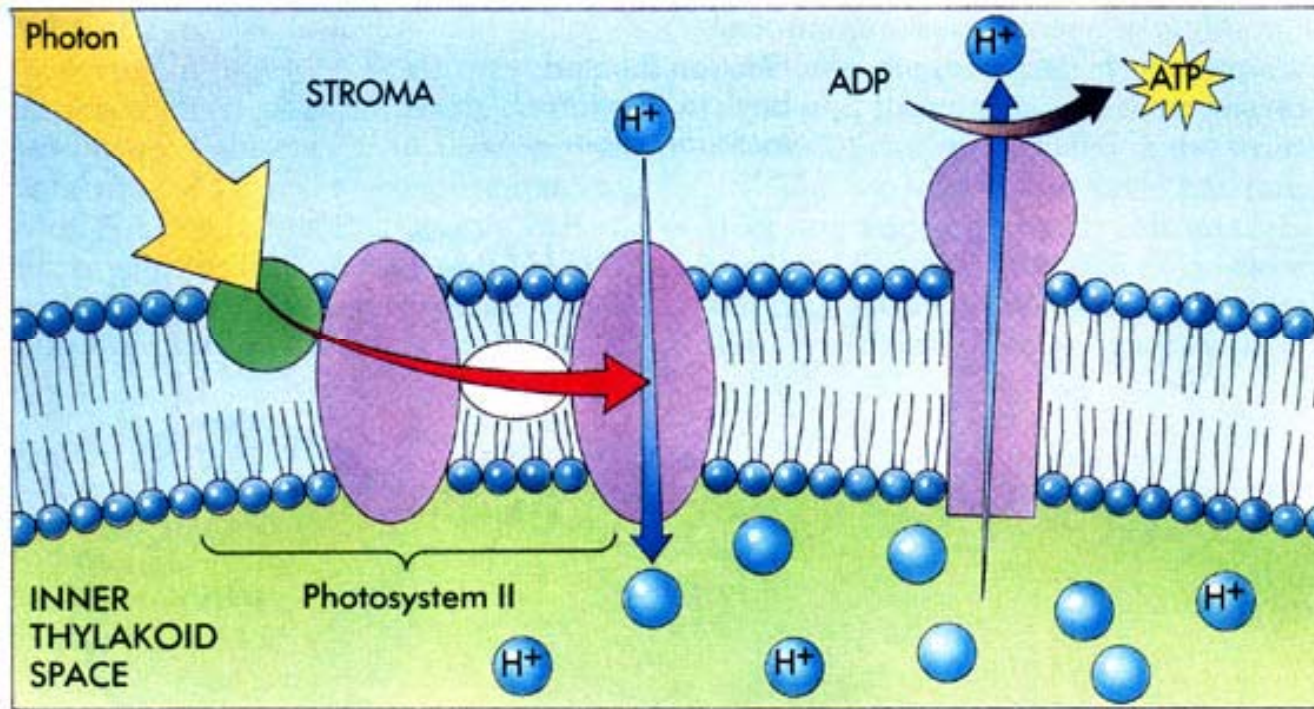
**The 1978 Nobel Prize laureate in Chemistry**

# 化学渗透假说简单示意图



# ATP合成酶

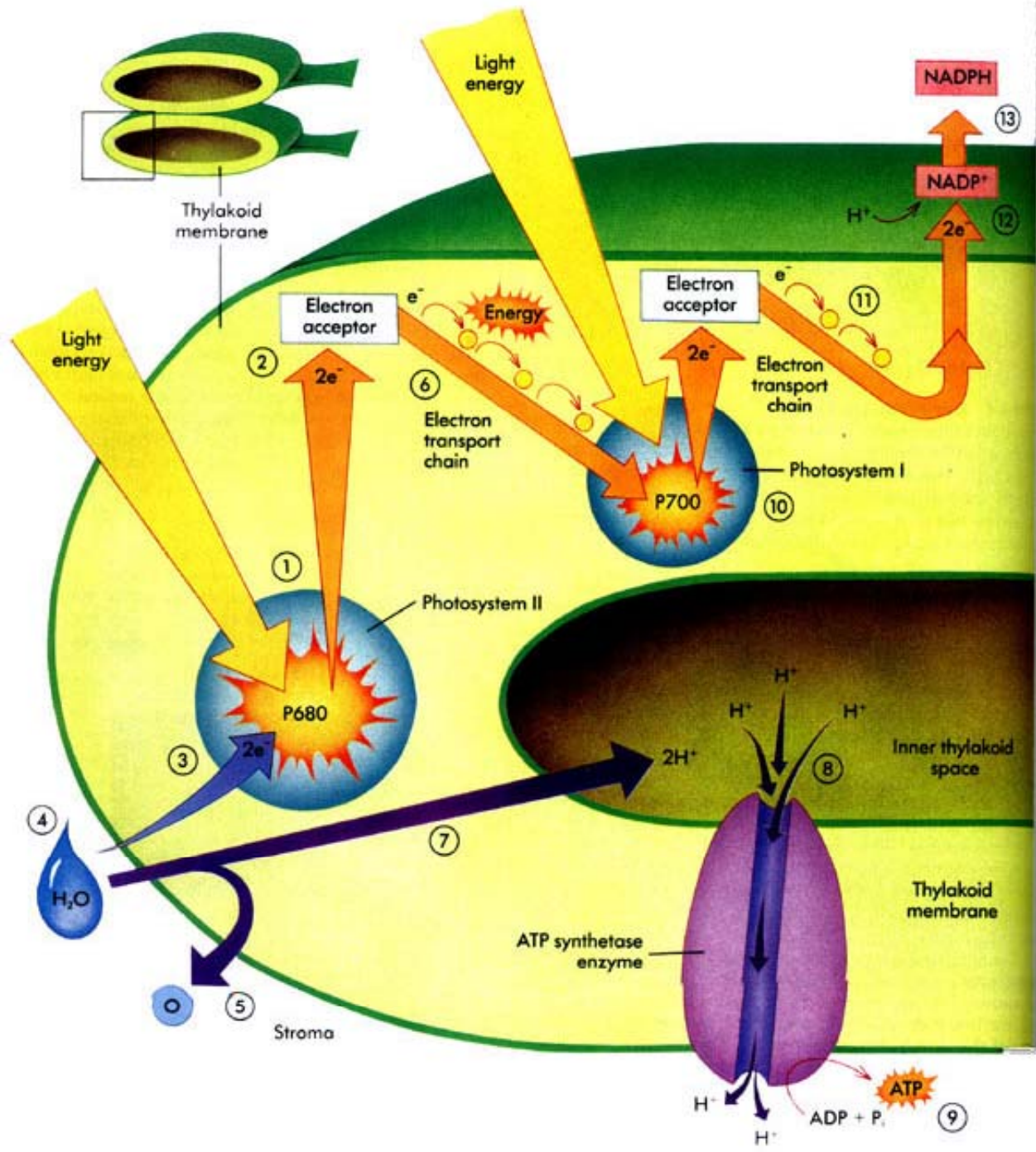




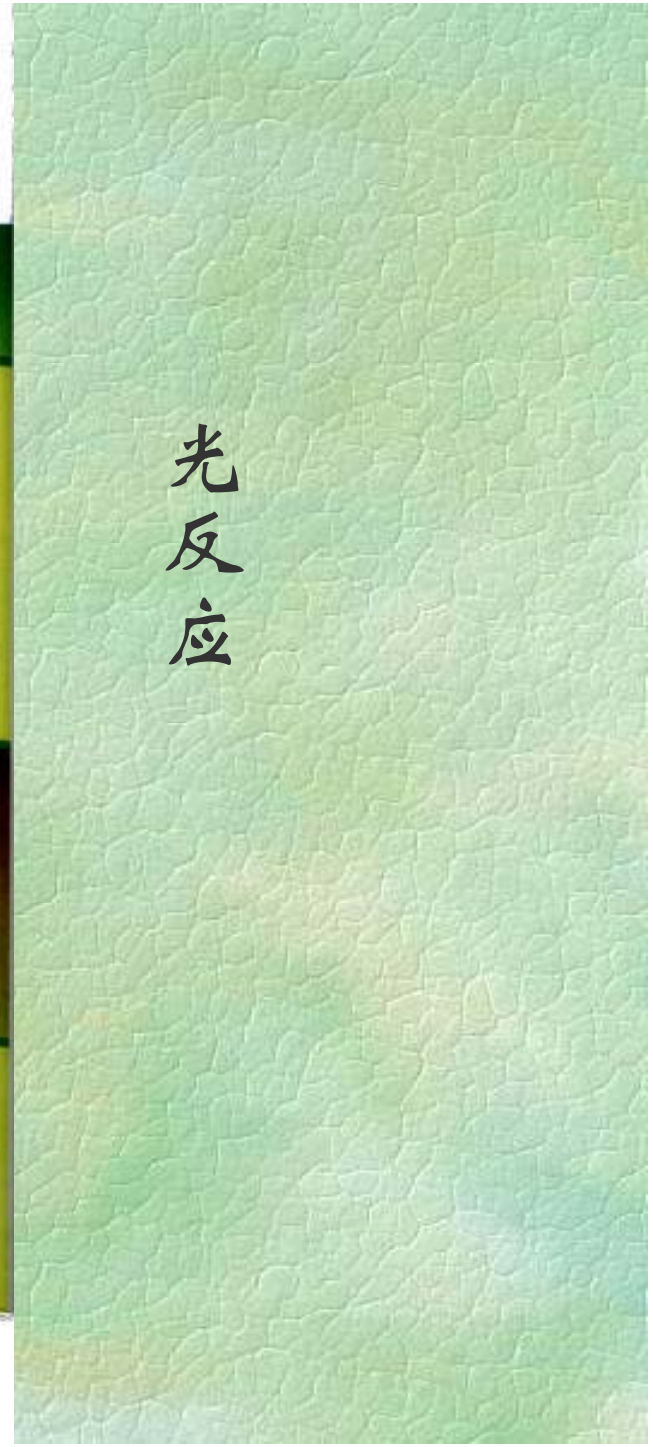
**FIGURE 8-11 How ATP is made in a chloroplast.**

As a high concentration of protons builds up in the thylakoid space, protons are pumped out of the space through special channels. Enzymes couple the force of this proton movement to the synthesis of ATP from ADP and  $P_i$ .

电子传递与光合磷酸化

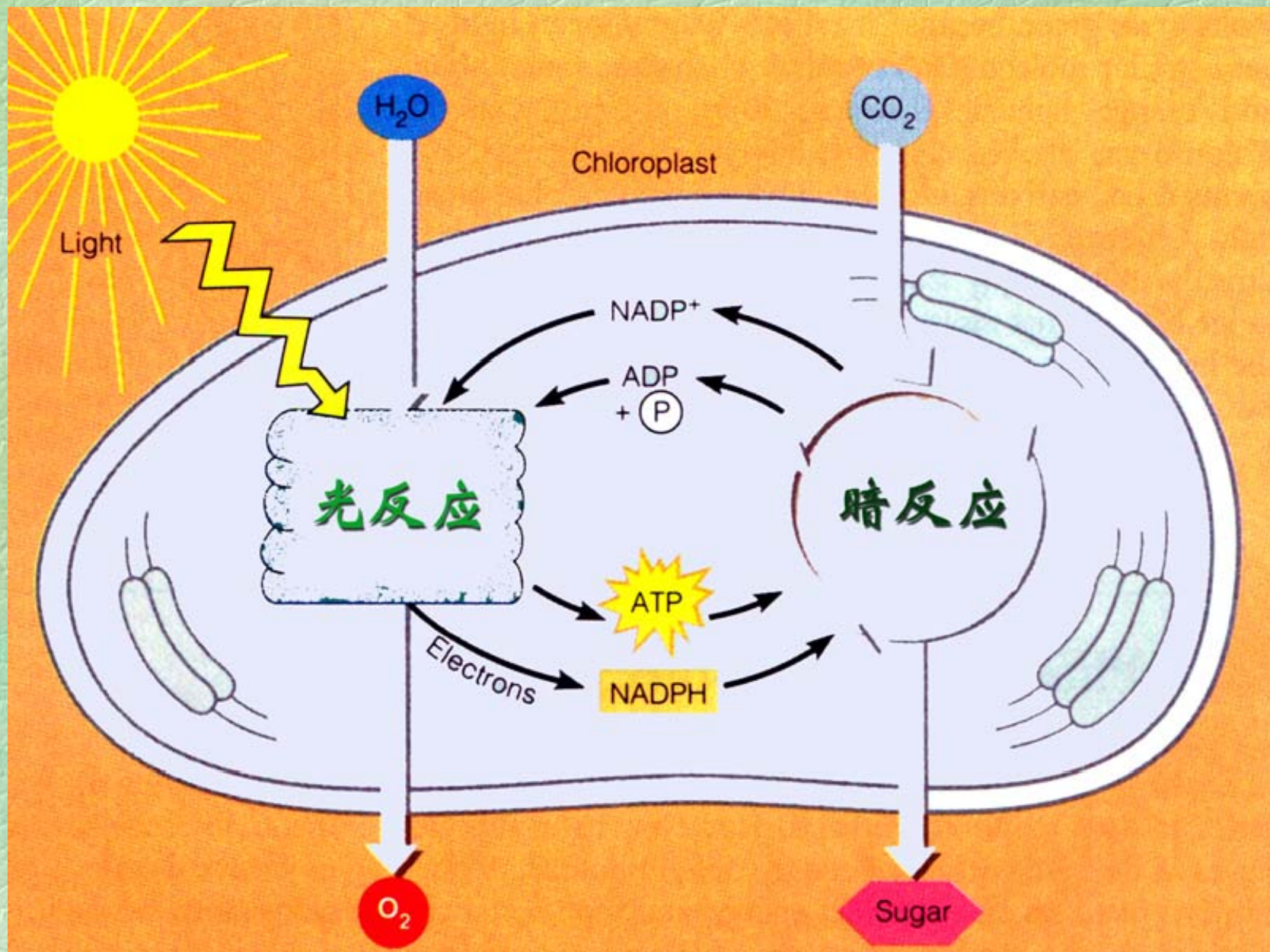


# 光反应



## ◇ 电子传递与光合磷酸化:

将光能转换为化学能，储存在ATP和NADPH中，同时水被光解生成分子氧。



◆暗反应：利用光反应生成的活跃的  
化学能（ATP和NADPH）固定CO<sub>2</sub>  
生成糖的过程。

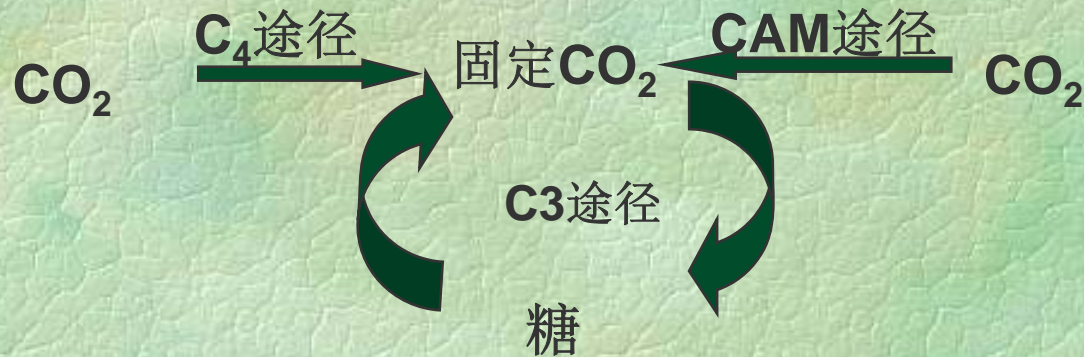
◆暗反应在叶绿体基质中进行

# 暗反应（碳同化）

场所：叶绿体基质

同化途径：

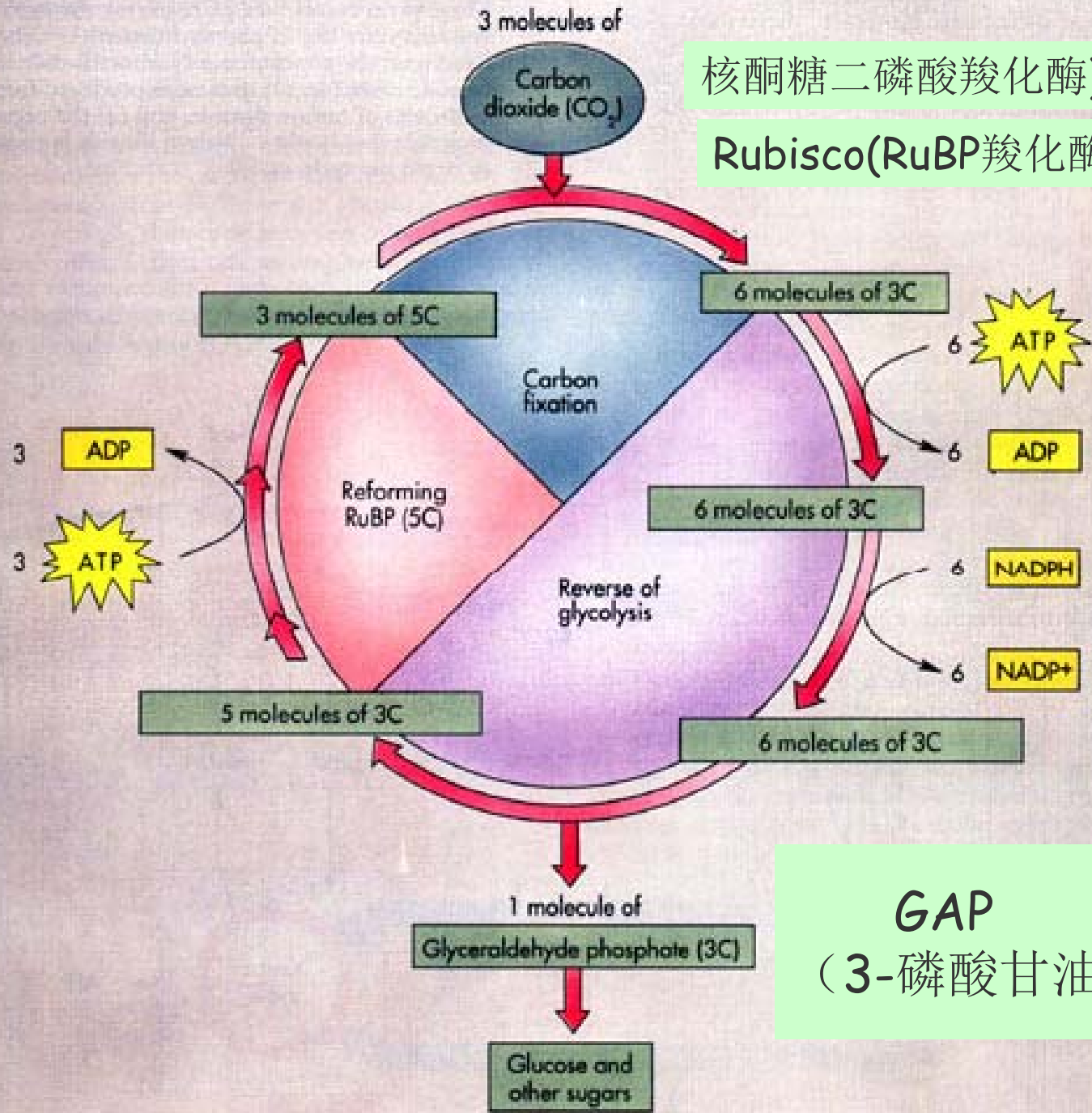
- C<sub>3</sub>途径（卡尔文循环）**  
基本途径，所有植物必经之路
- C<sub>4</sub>途径（四碳二羧酸途径）**  
CO<sub>2</sub>固定的分支，C<sub>4</sub>植物特有
- CAM途径（景天科酸代谢途径）**  
CO<sub>2</sub>固定的分支，CAM植物特有



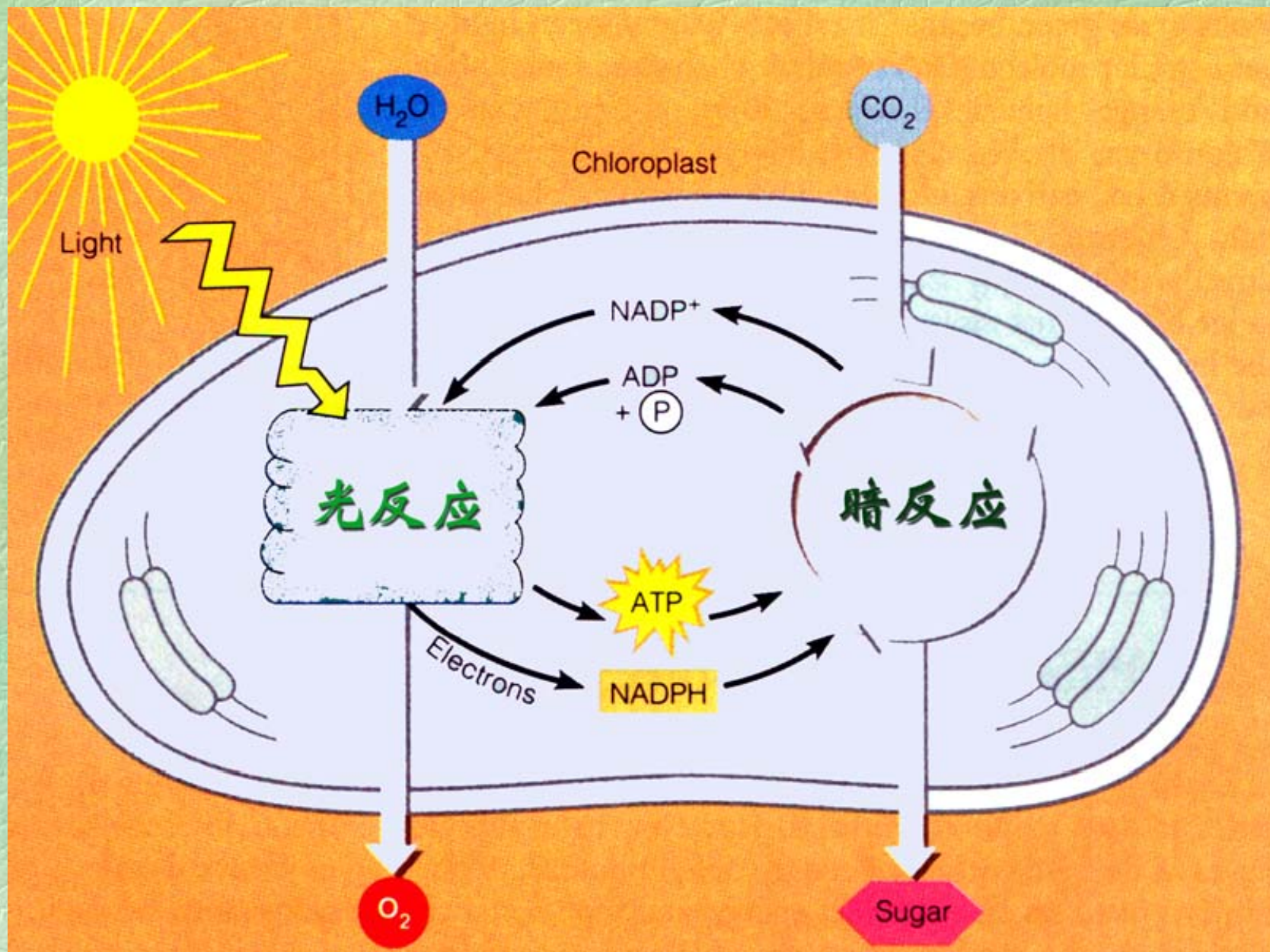
核酮糖二磷酸羧化酶)

Rubisco(RuBP羧化酶)

卡尔文循环

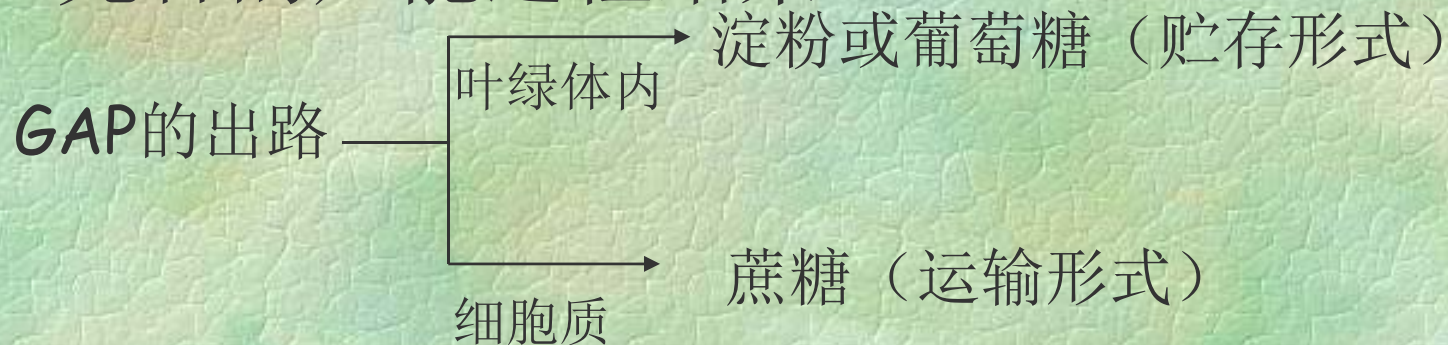


GAP  
(3-磷酸甘油醛)



## GAP (3-磷酸甘油醛)

- GAP是一种三碳糖，可以稳定的贮存能量，至此，消耗的光反应的ATP和NADPH，使光能转化为稳定的化学能，光合的贮能过程结束。



## C4途径

CO<sub>2</sub>固定的最初产物为四碳化合物的途径。

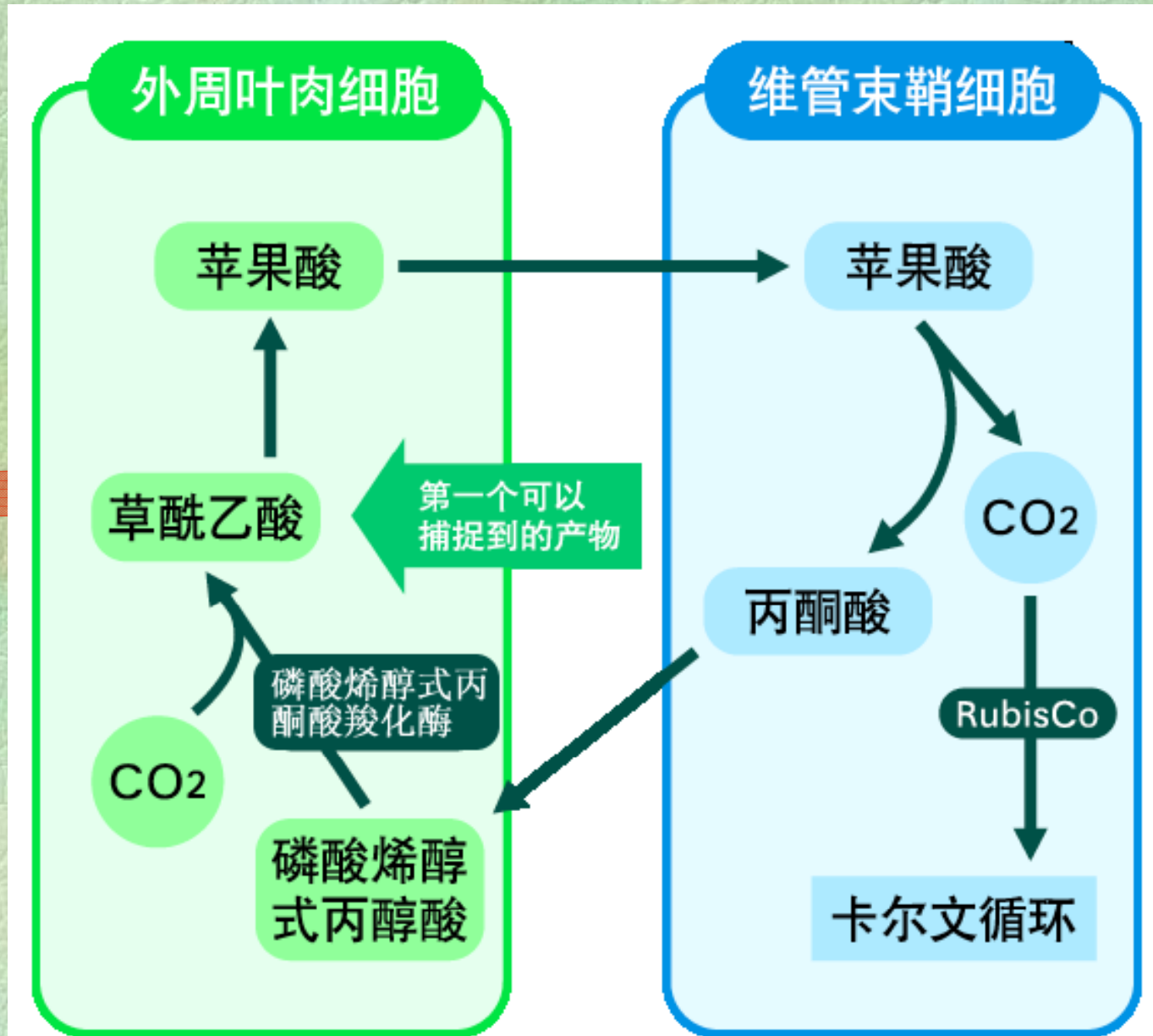
### 研究历史:

- 1965年发现甘蔗光合时，<sup>14</sup>CO<sub>2</sub>在1秒钟内，80%在苹果酸和天冬氨酸中，只有10%在GAP中。
- 后来，在研究玉米光合作用时，证实CO<sub>2</sub>被固定后的最初产物不是三碳化合物，而是四碳的二羧酸，草酰乙酸。草酰乙酸不稳定，很快转变为苹果酸。由此发现一个新的CO<sub>2</sub>固定途径。

◇ C<sub>4</sub>植物具有高效利用CO<sub>2</sub>能力。

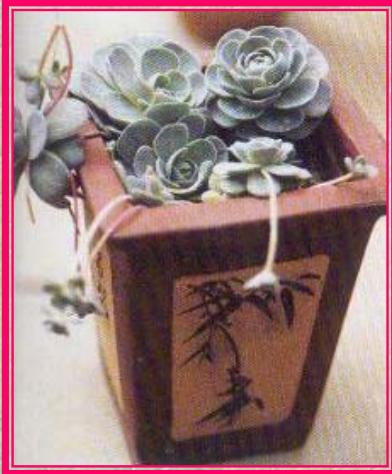
- 具有C<sub>4</sub>途径的植物称为C<sub>4</sub>植物。只具有C<sub>3</sub>途径的植物称为C<sub>3</sub>植物。
- 在农作物中，只有玉米、高粱、甘蔗等属于C<sub>4</sub>植物。而其它的农作物，如水稻、小麦、大豆都属于C<sub>3</sub>植物，大多数树木等也属于C<sub>3</sub>植物。

# C4途径



# CAM途径（景天科酸代谢途径）

景天科酸代谢植物（景天科、仙人掌和菠萝等），通过白天减少有机酸，晚上增加有机酸，而固定 $\text{CO}_2$ 的光合途径。



瓦松



龙舌兰



仙人掌



芦荟

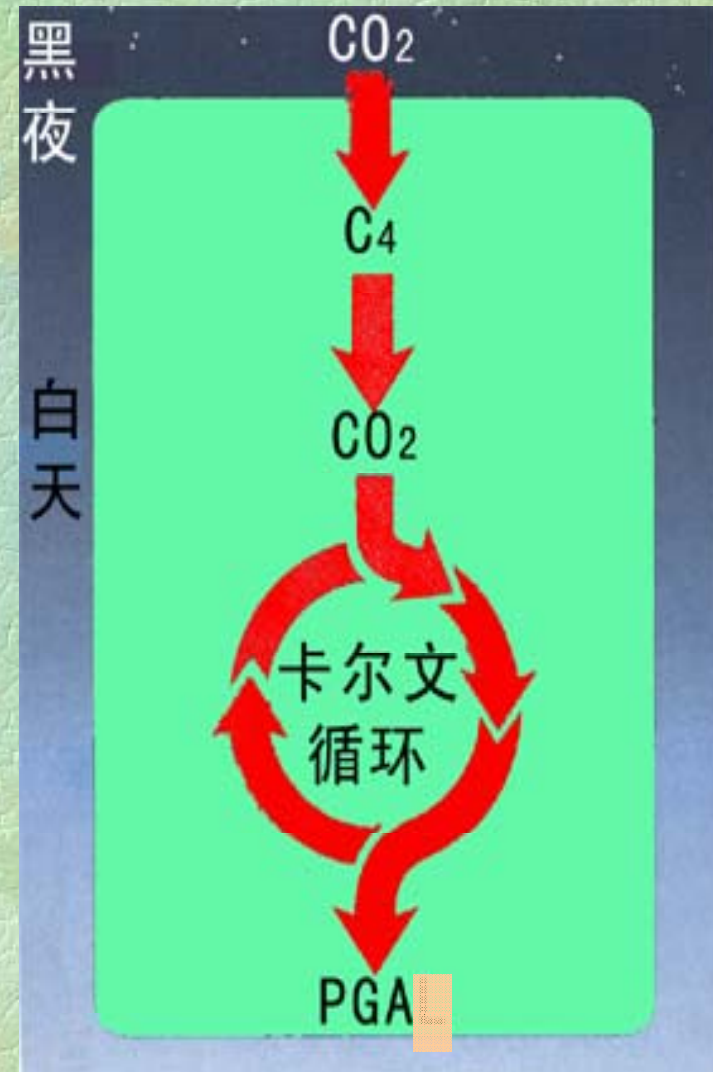
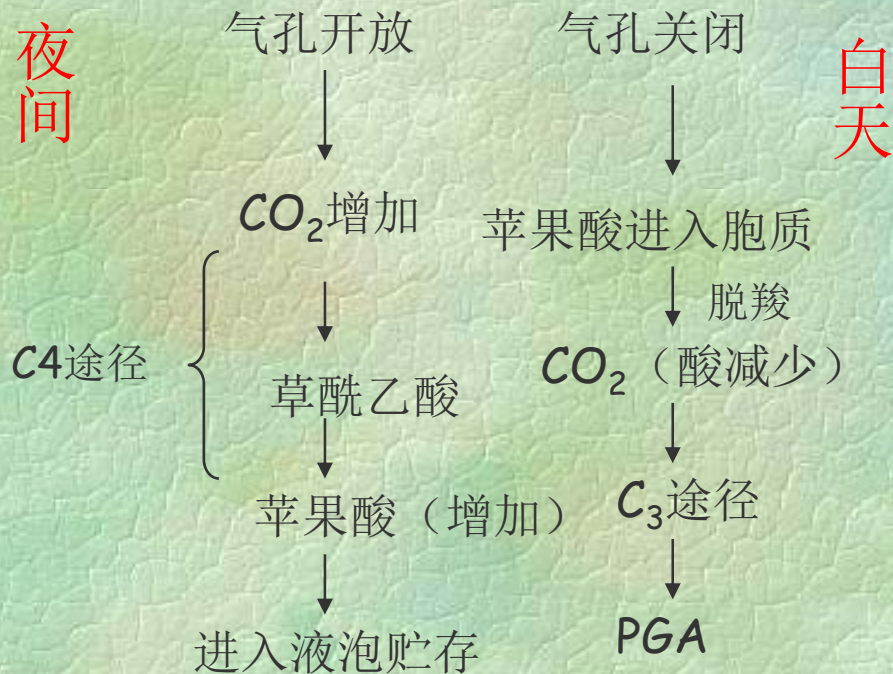


昙花

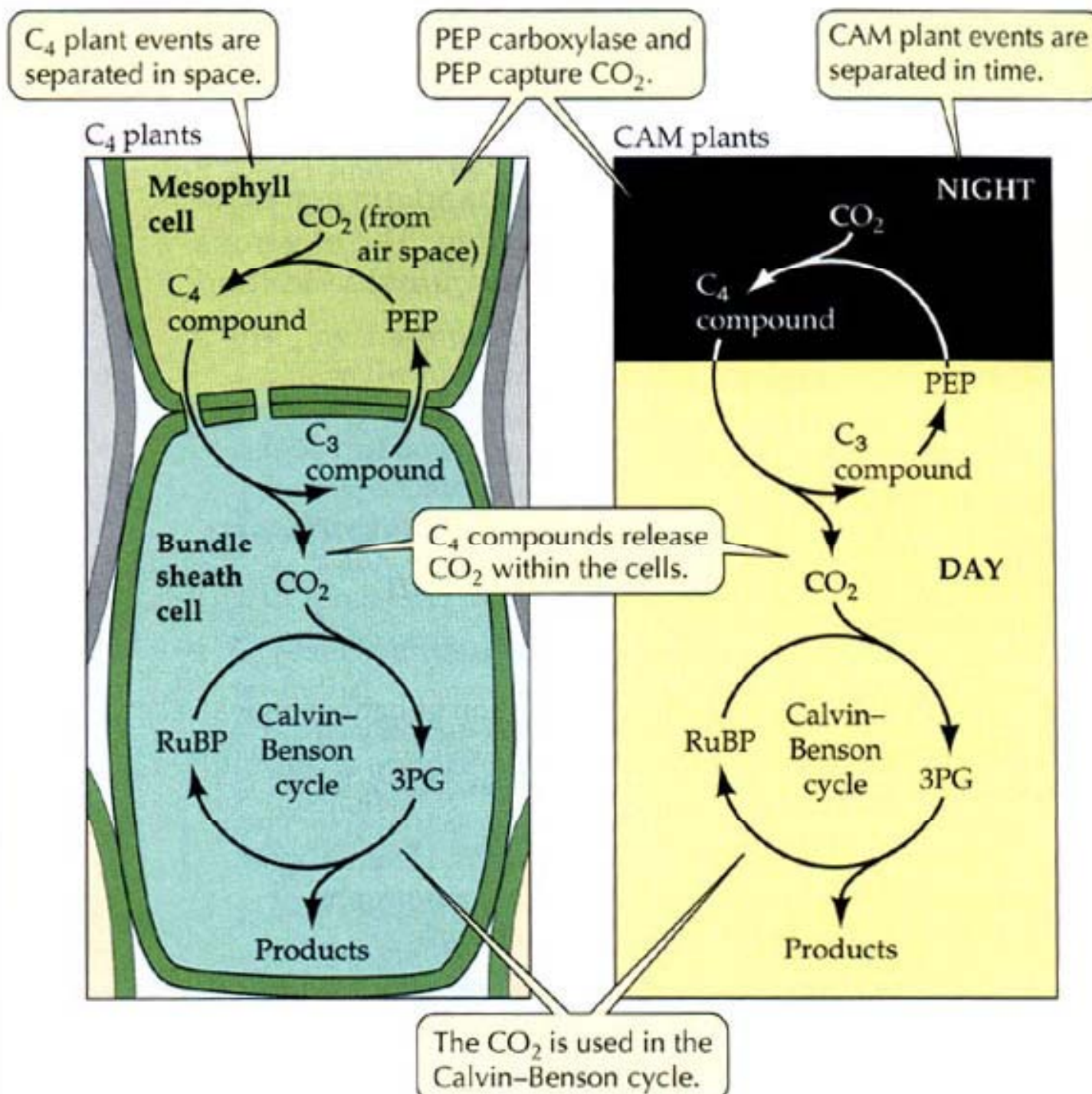
# CAM途径

- 景天科酸代谢植物的特点：  
气孔昼闭夜开

1) 过程:



# C4 及景天酸植物与 C3 植物的比较



# 光反应和暗反应的比较

	光反应	暗反应
条件	有光、色素	能量、多种酶
场所	基粒片层膜上	基质中
发生的反应	1.水的光解 2.ATP的生成	1.CO <sub>2</sub> 的固定 2.C <sub>3</sub> 的还原
产物	[H]、ATP、NADPH、O <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> 、ADP、NADP <sup>+</sup> 、Pi
能量变化	光能 $\longrightarrow$ ATP中活跃化学能 $\longrightarrow$ 稳定化学能	
关系	<p>光反应 <math>\xrightarrow{[H]、ATP}</math> 暗反应</p> <p>暗反应 <math>\xrightarrow{ADP、P_i}</math> 光反应</p>	

# 光合作用的意义

- 环境保护：空气净化器，保持CO<sub>2</sub>和O<sub>2</sub>的平衡。植物减少，CO<sub>2</sub>增加，产生温室效应。



干旱沙漠化



冰川融解

# 粮食危机



- 世界卫生组织的年度报告说，世界上每 1 4 个儿童中就有一人因为营养不良死亡，在不发达国家，儿童死亡人数有 5 0 % 是营养不良造成的。研究光合作用机理能够提高产量。

### 三、生物氧化——细胞主要的获能方式

#### ◆生物氧化的概念与特征：

##### ◇生物氧化的概念

是指糖、脂类、蛋白质等有机化合物在细胞内氧化分解为 $\text{CO}_2$ 和 $\text{H}_2\text{O}$ ，并释放能量的过程。

## ◆ 生物氧化的过程

### ◇ 糖酵解

◇ 在细胞质基质中进行，不需要 $O_2$

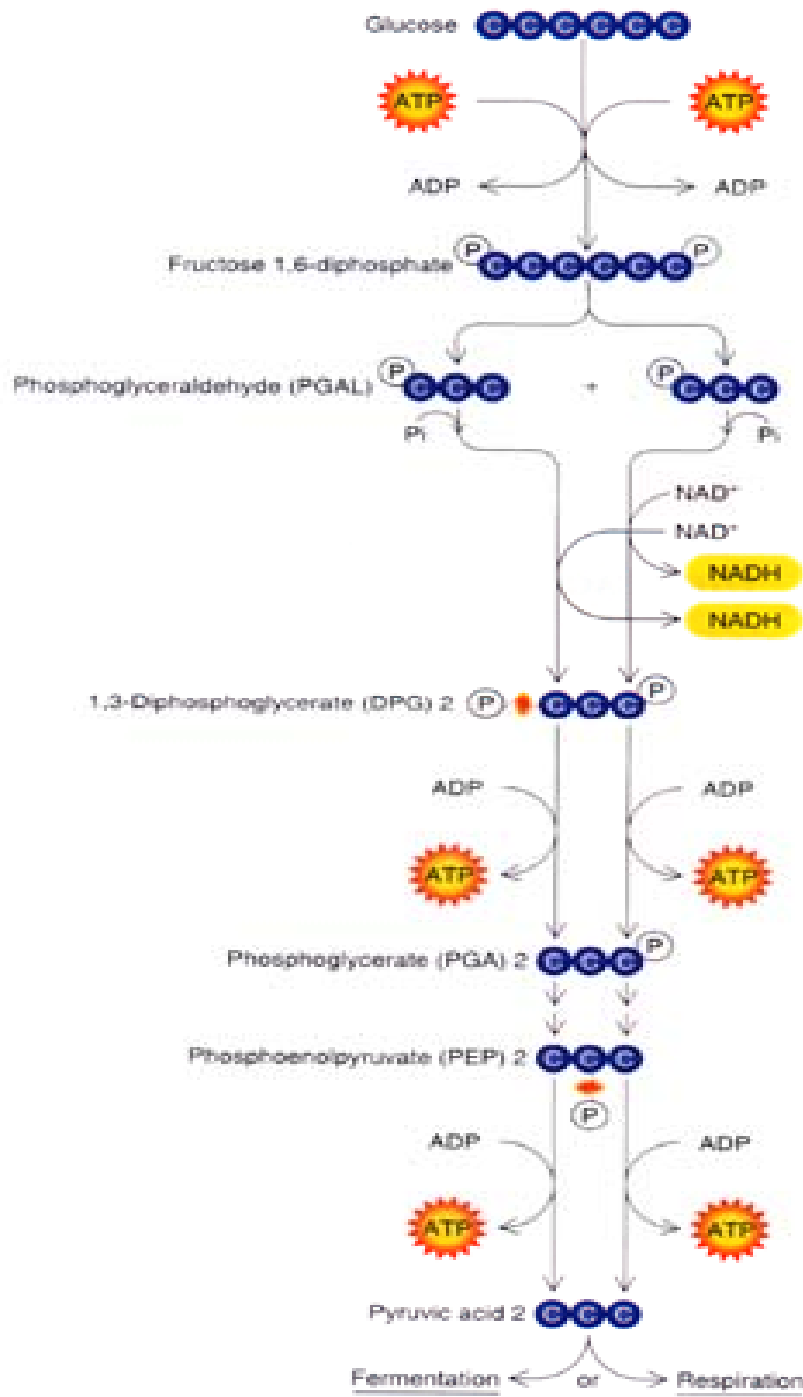
◇ 维持细胞基本能源供应的形式，也是生物进化中古老的代谢途径

### ◇ 反应过程

◇ 丙酮酸在无氧条件下的命运

糖  
酵  
解  
途  
径

1个葡萄糖

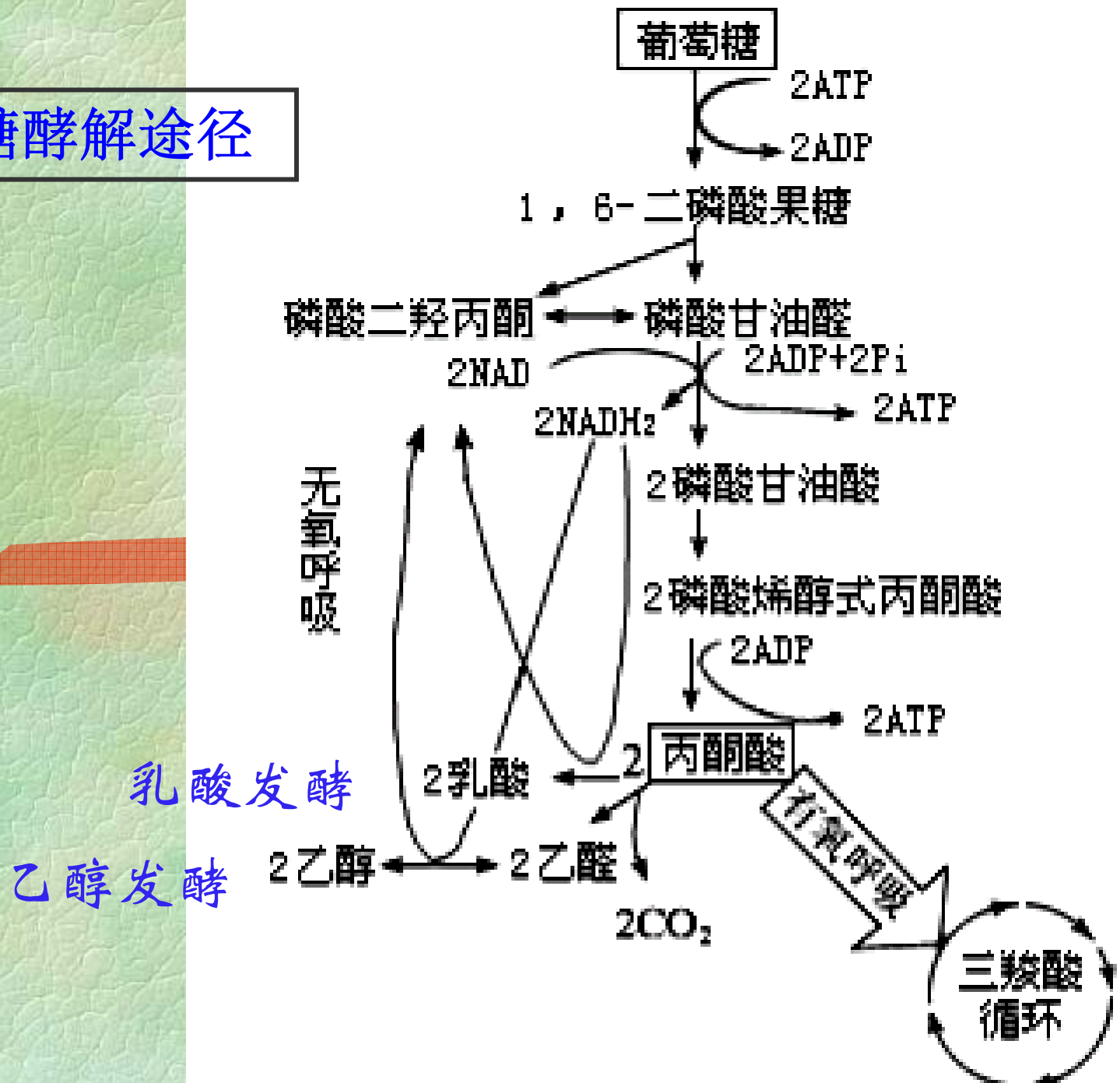


2个NADH

2个ATP

2个丙酮酸

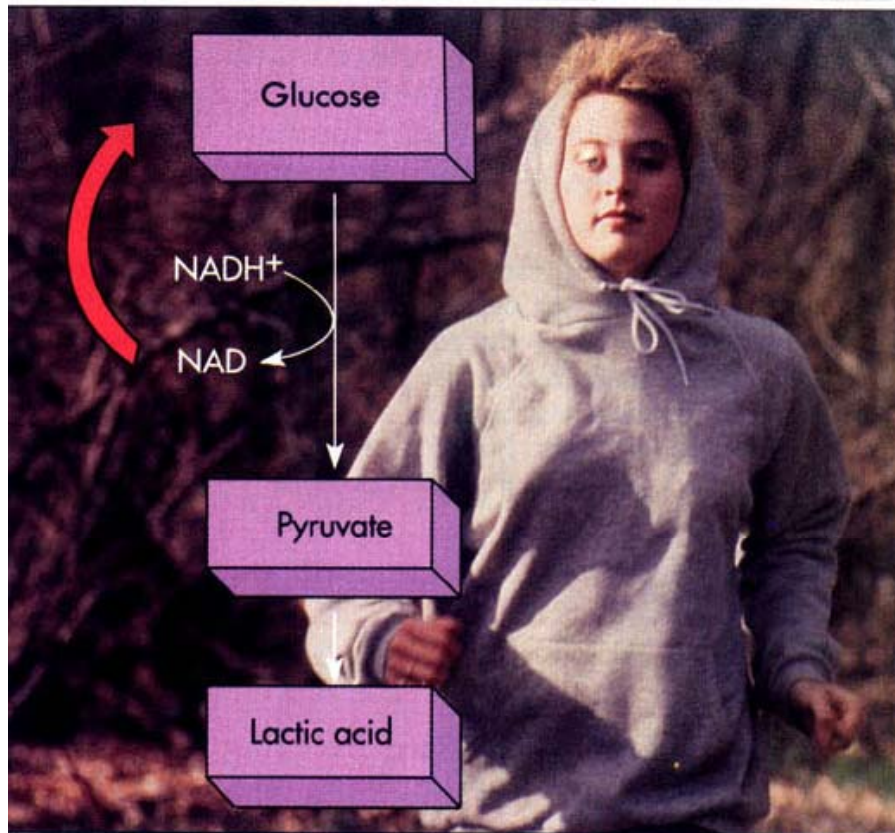
# 糖酵解途径



# 无氧呼吸意义

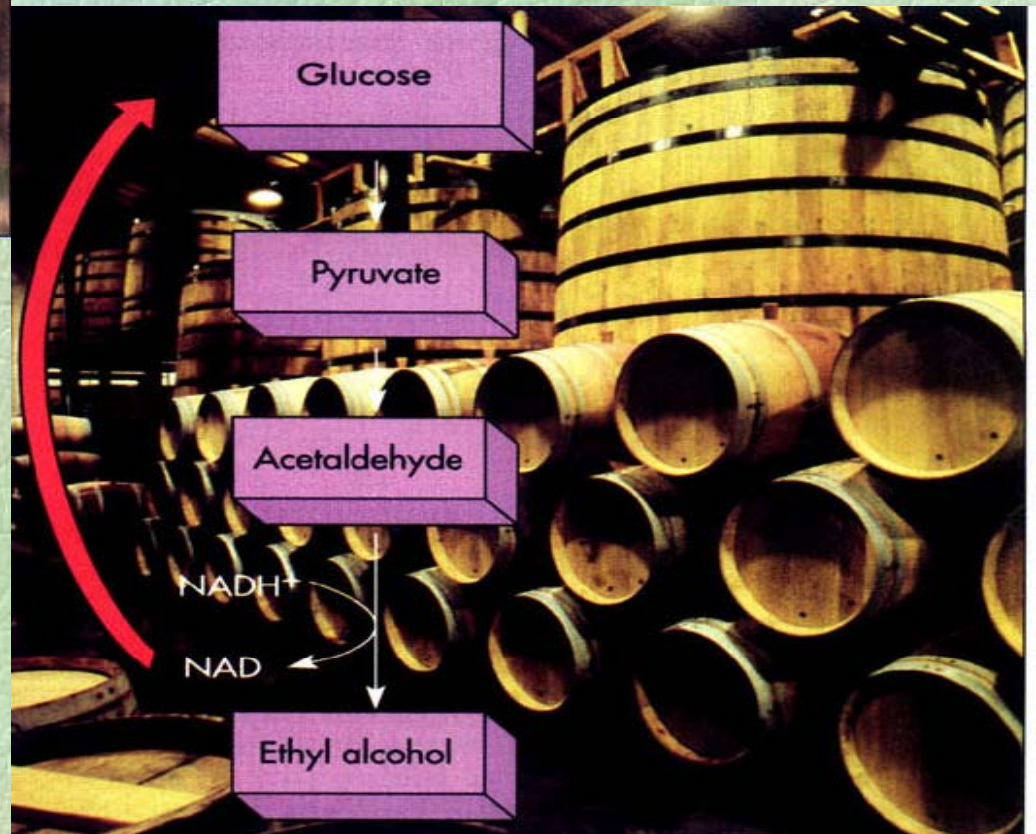
## 乳酸发酵

(动物, 植物和微生物)

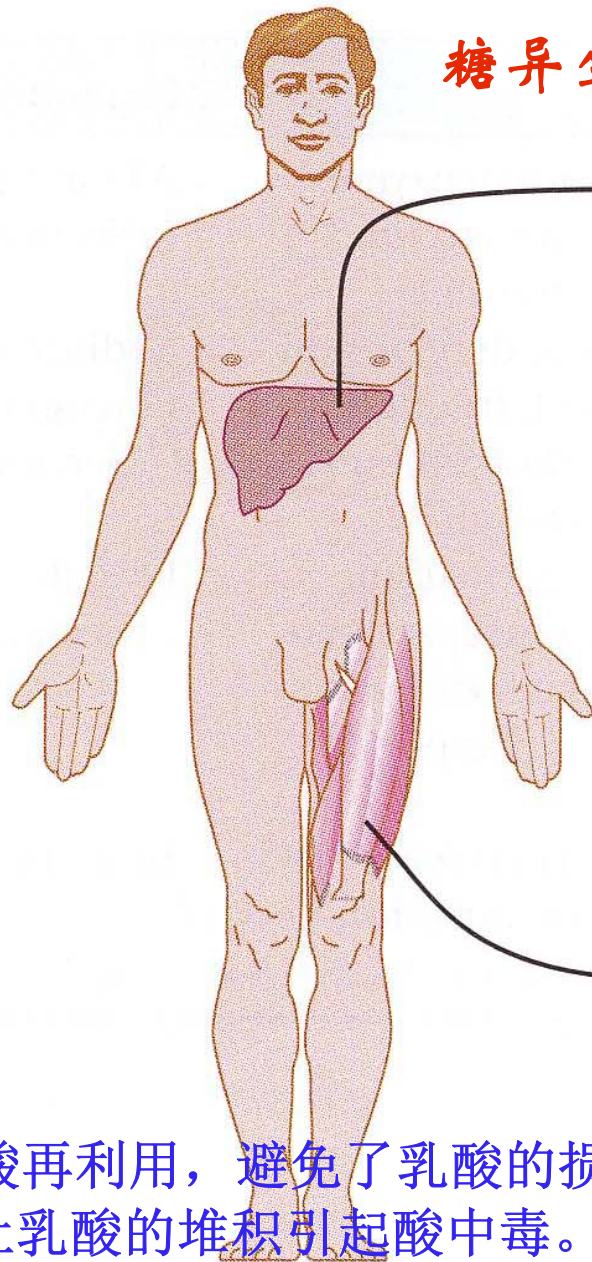


## 乙醇发酵

(酵母, 植物和微生物)



# 乳酸的命运



糖异生 乳酸循环  
Cori循环

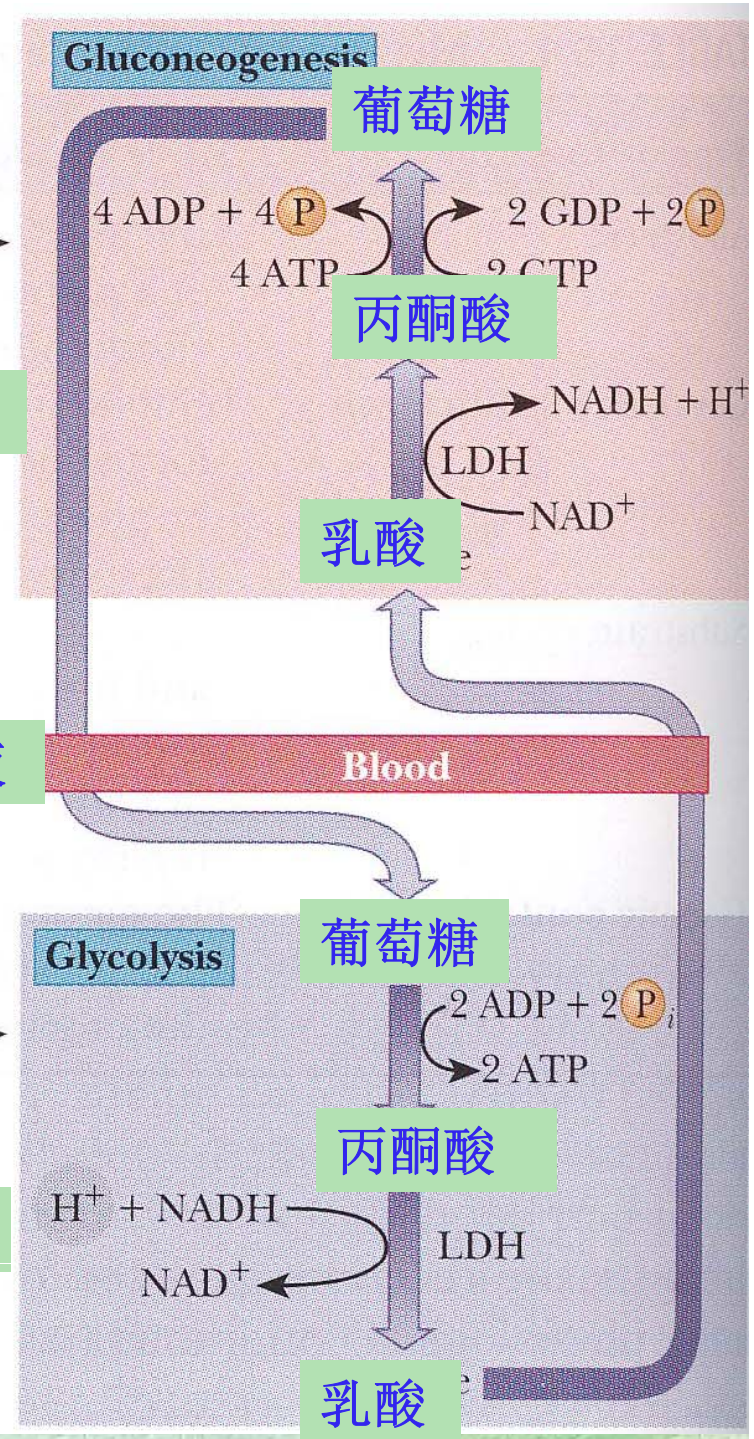
Liver

\*肝脏

Muscle

\*肌肉

- 1 乳酸再利用，避免了乳酸的损失
- 2 防止乳酸的堆积引起酸中毒。
- 3 应急能量供给



# 糖酵解生化反应过程

共有10步反应组成  
7个可逆，3个不可逆  
激酶参与4个反应，1个不可逆

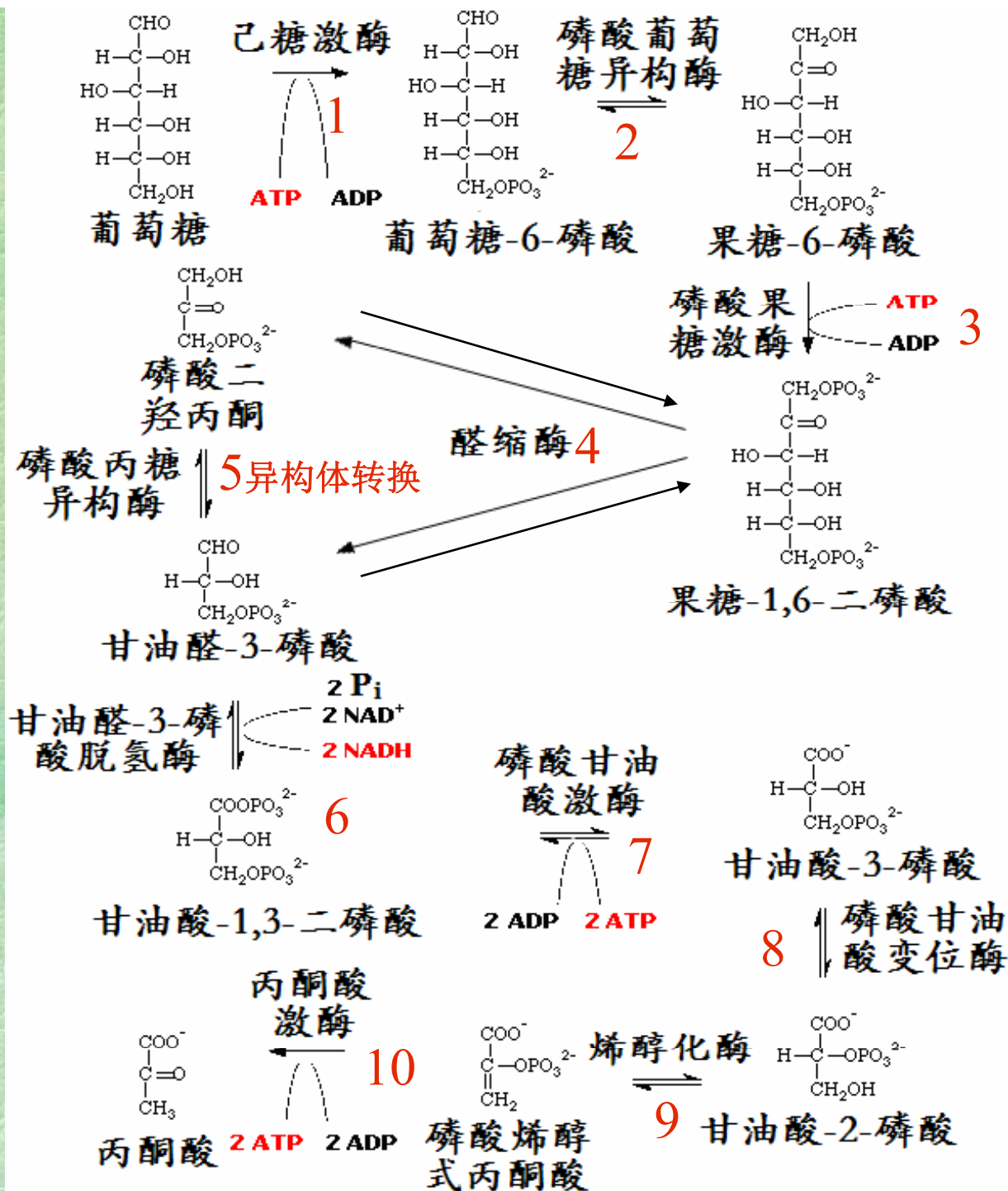
反应1 葡萄糖磷酸化  
控制葡萄糖的逃逸  
带负电，不稳定

反应3 磷酸果糖激酶  
限速反应（还有1，10）

反应4,5 裂解葡萄糖  
甘油醛-3-磷酸的消耗  
驱动反应向下进行

反应6  
生成NADH  
唯一氧化还原反应

反应7,10  
生成ATP 底物磷酸化



# *NADH* 和 丙酮酸 的去向

有氧还是无氧??

★ 在有氧状态下 **NADH** 和 丙酮酸 的命运

(1) **NADH** 的命运

**NADH** 在呼吸链被彻底氧化成  $H_2O$  并产生更多的 **ATP**。

(2) 丙酮酸 的命运

丙酮酸 进入线粒体基质，被基质内的丙酮酸脱氢酶系氧化成乙酰-CoA

★ 在缺氧状态或无氧状态下 **NADH** 和 丙酮酸 的命运

(1) 乳酸发酵

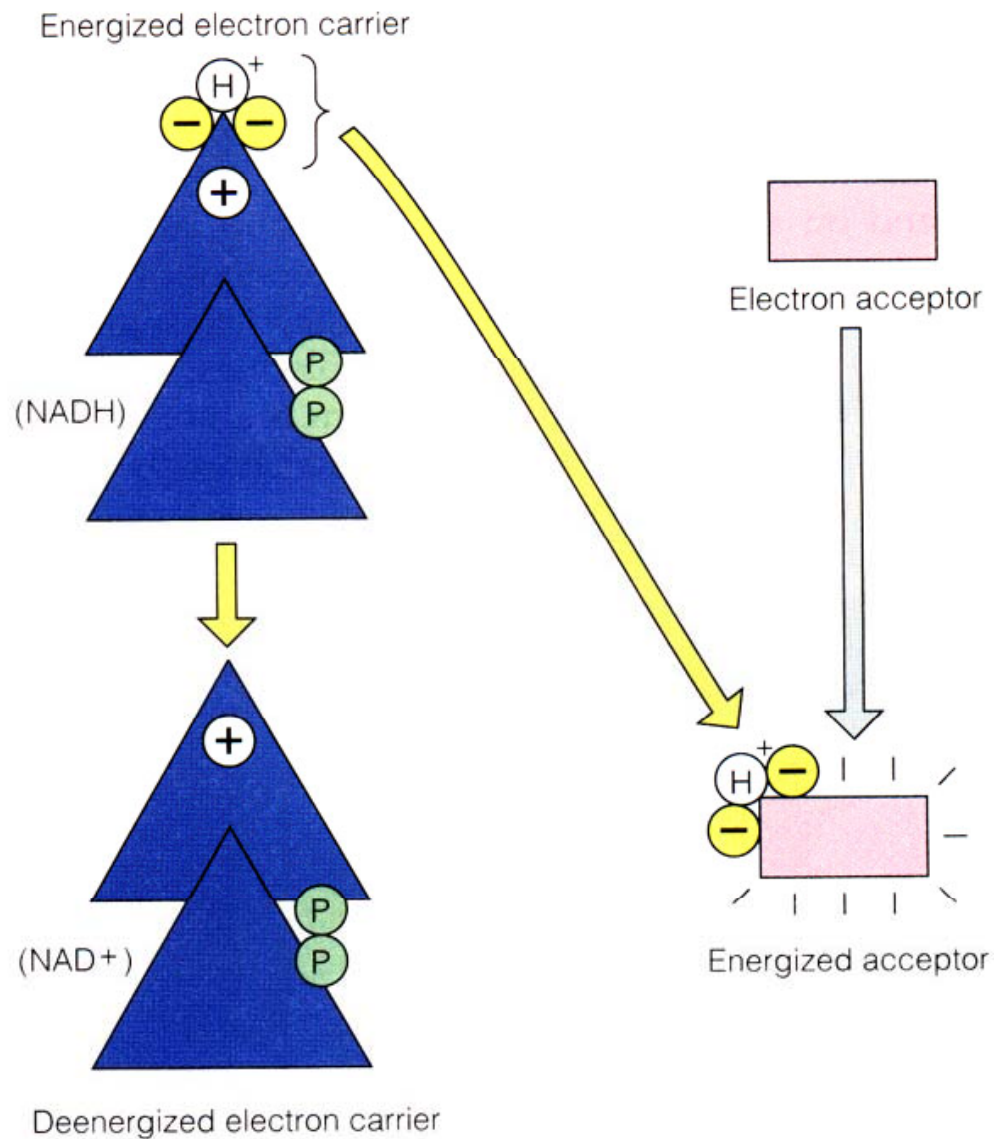
(2) 酒精发酵

## ◇ 三羧酸循环

◇ 在细胞线粒体基质中进行，需 $O_2$ 反应过程；

◇ 细胞内物质代谢的最后共同途径；

◇ 反应过程



**FIGURE 5.5** *Electron Transfer from Carrier to Acceptor.* Energy pathways such as glycolysis and aerobic respiration run on coupled electron transfer reactions, often linked by electron carriers. As an electron carrier releases two electrons and one hydrogen ion, these become available to an acceptor, which becomes energized, or charged, as it receives them.

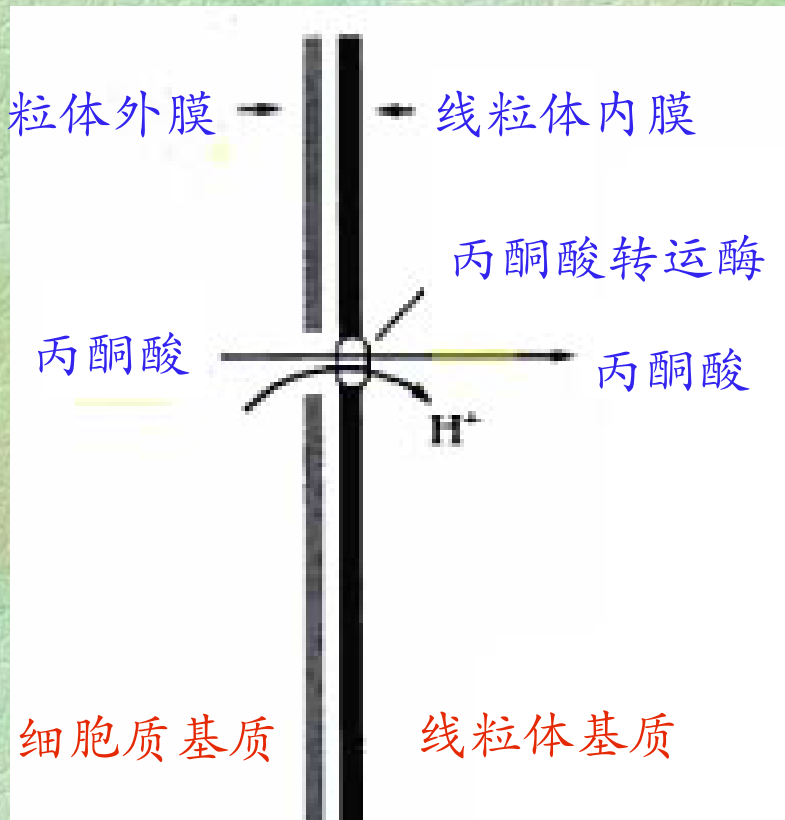
## 电子传递载体

**NADP<sup>+</sup>**(烟酰胺腺嘌呤二核苷酸磷酸) 光合作用

**NAD<sup>+</sup>**(烟酰胺腺嘌呤二核苷酸)

**FAD<sup>+</sup>** 黄素腺嘌呤二核苷酸

# 三羧酸循环- 丙酮酸进入线粒体的转运



1. 线粒体外膜通透性较大，丙酮酸可扩散穿过
2. 线粒体丙酮酸穿过内膜需要质子的浓度梯度
3. 协同运输

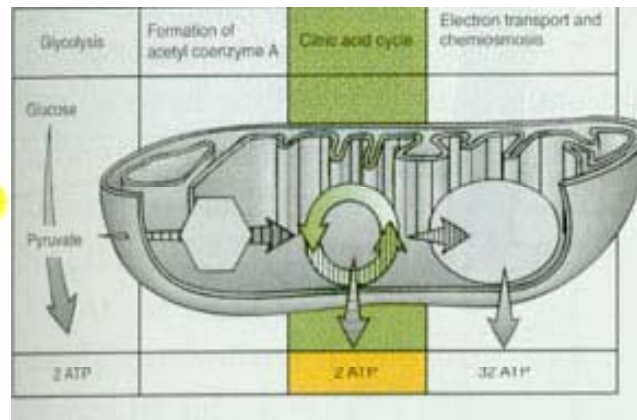
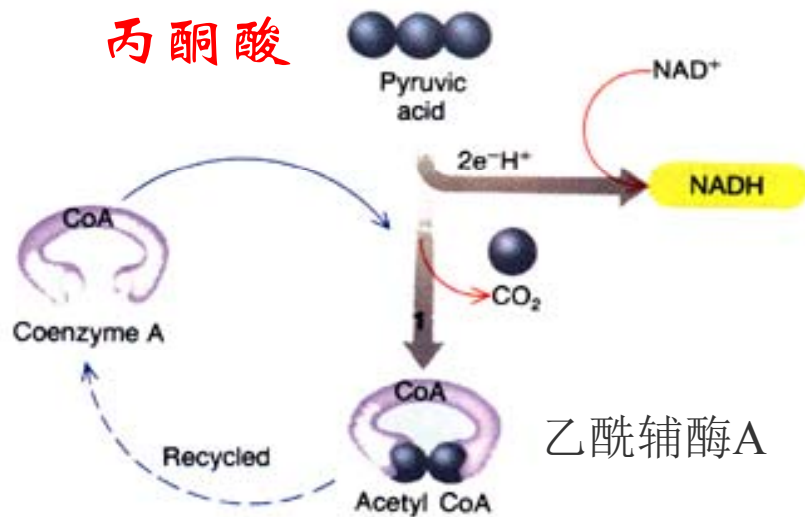
# 三羧酸循环准备

乙酰辅酶A  $\text{CH}_3\text{CO}-\text{SCoA}$   
乙酰基-辅酶A

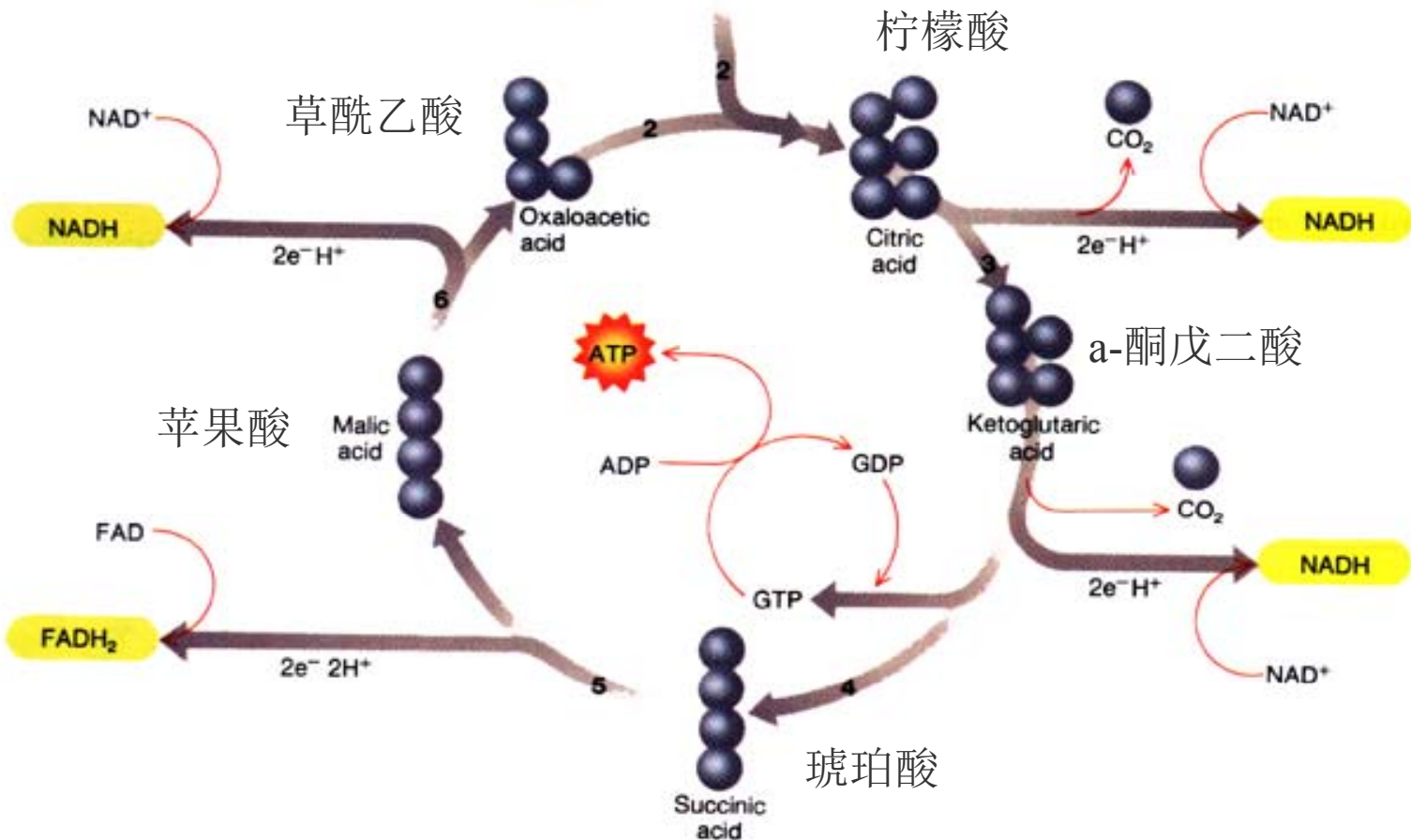


丙酮酸脱氢酶复合体：是一种催化丙酮酸脱羧反应的多酶复合体，由三种酶（丙酮酸脱氢酶、二氢硫辛酸转乙酰基酶、二氢硫辛酸脱氢酶）和六种辅助因子（焦磷酸硫胺素、硫辛酸、FAD、NAD、CoA和Mg离子）组成，在它们的协同作用下，使丙酮酸转变为乙酰CoA和CO<sub>2</sub>。

丙酮酸

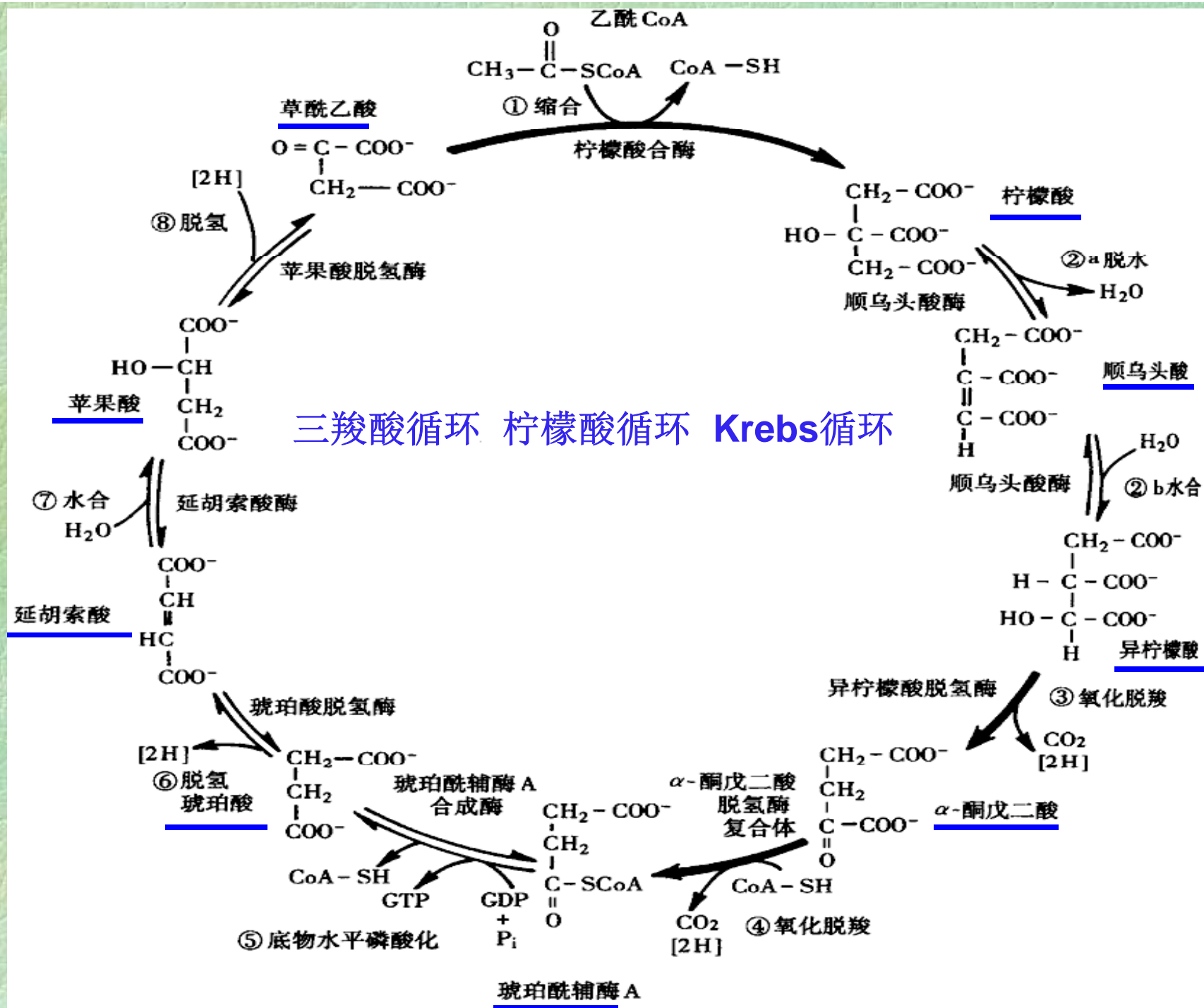


柠檬酸



三羧酸循环

# 三羧酸循环



# 三羧酸循环

## 途径

共8酶，催化9个反应

彻底氧化分解一分子乙酰辅酶A

## 包括

两次脱羧 ——  $2 \text{CO}_2$

四次脱氢 —— 3次 /  $\text{NADH}$

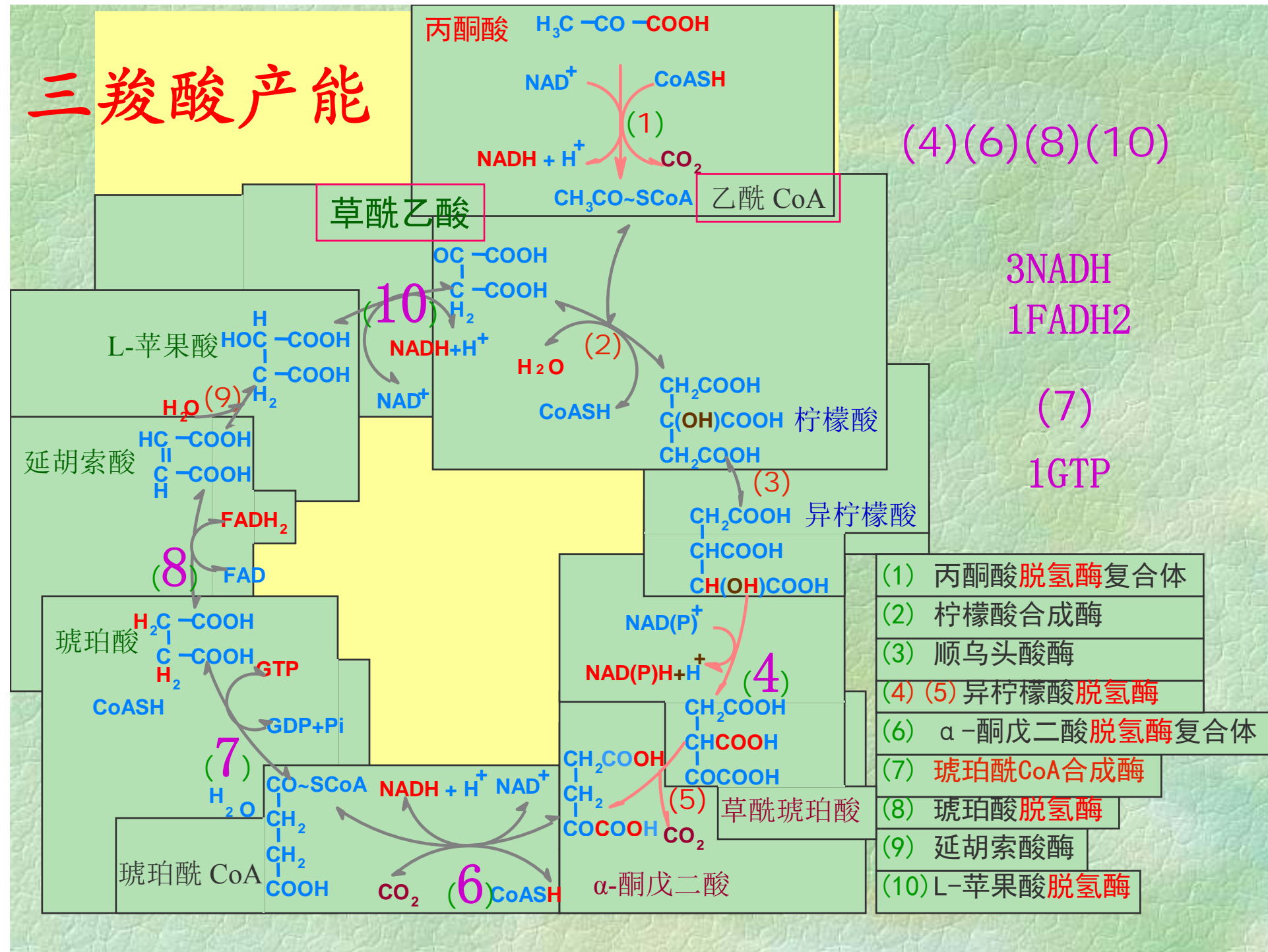
1次 /  $\text{FADH}_2$

一次底物磷酸化产能

## 特点

- 在有氧条件下是产生能量的主要途径
- 三羧酸循环是单向不可逆转的
- 三羧酸循环的中间物质必需补充与更新

# 三羧酸产能



(4)(6)(8)(10)

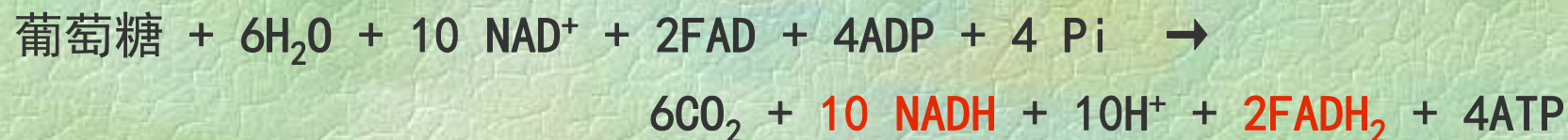
3NADH  
1FADH2

(7)

1GTP

- (1) 丙酮酸脱氢酶复合体
- (2) 柠檬酸合成酶
- (3) 顺乌头酸酶
- (4) (5) 异柠檬酸脱氢酶
- (6) α-酮戊二酸脱氢酶复合体
- (7) 琥珀酰CoA合成酶
- (8) 琥珀酸脱氢酶
- (9) 延胡索酸酶
- (10) L-苹果酸脱氢酶

如果考虑丙酮酸脱氢酶的反应，考虑到每分子葡萄糖产生2分子丙酮酸，葡萄糖通过酵解和三羧酸循环的分解代谢方程式为：



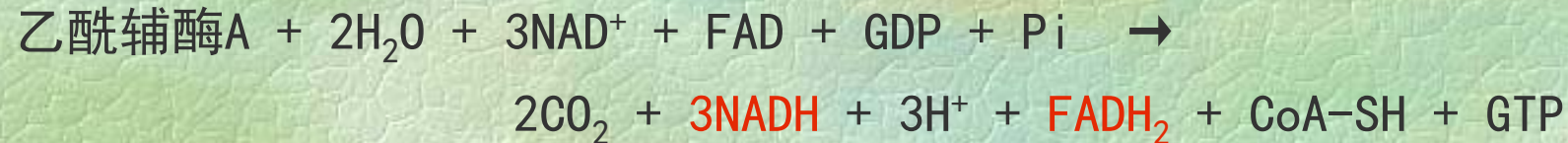
到此为止，每摩尔葡萄糖在这个方程式中只产生4摩尔ATP。在酵解部分产生的ATP是2摩尔。

葡萄糖氧化产生的ATP大多数不是直接从酵解和三羧酸循环产生的，而是通过还原的**电子载体在呼吸链中再氧化**产生的。



## 三羧酸循环反应

三羧酸循环的8个反应可写成一个化学平衡方程，总反应式为：



在动物中，琥珀酰CoA合成酶反应形成的GTP在能量上与ATP相等。

(来自1分子丙酮酸)

整个循环不需要氧，但离开氧无法进行  
循环中消耗两分子水。

1分子乙酰CoA通过TCA循环被氧化，可生成10分子ATP  
但没有氧化磷酸化，ATP的产量很低。

## ◇ 电子传递与氧化磷酸化

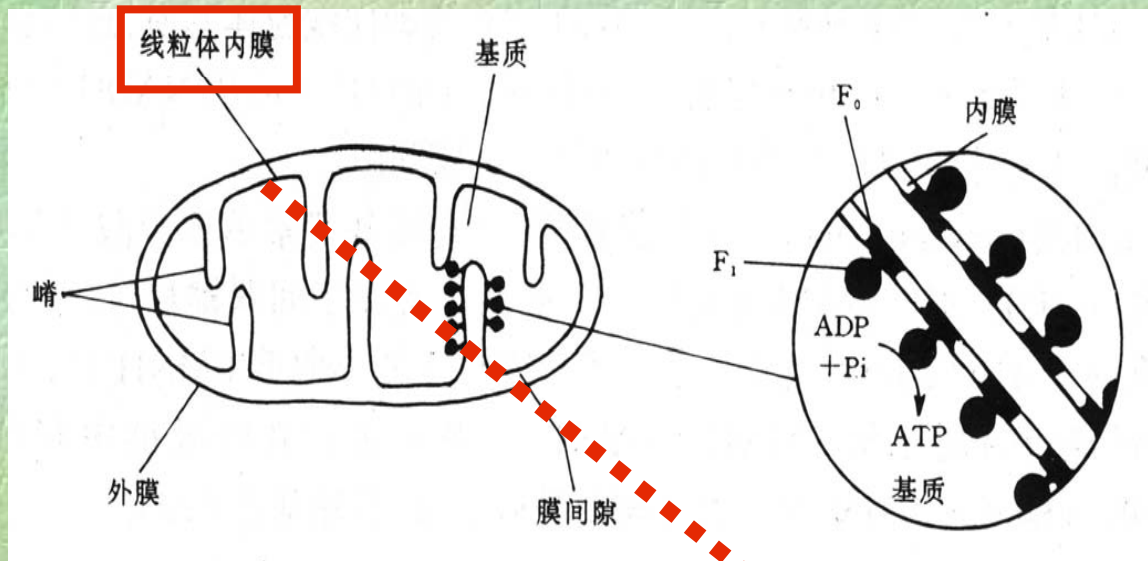
◇ 电子传递链与氧化磷酸化均发生在

线粒体内膜上

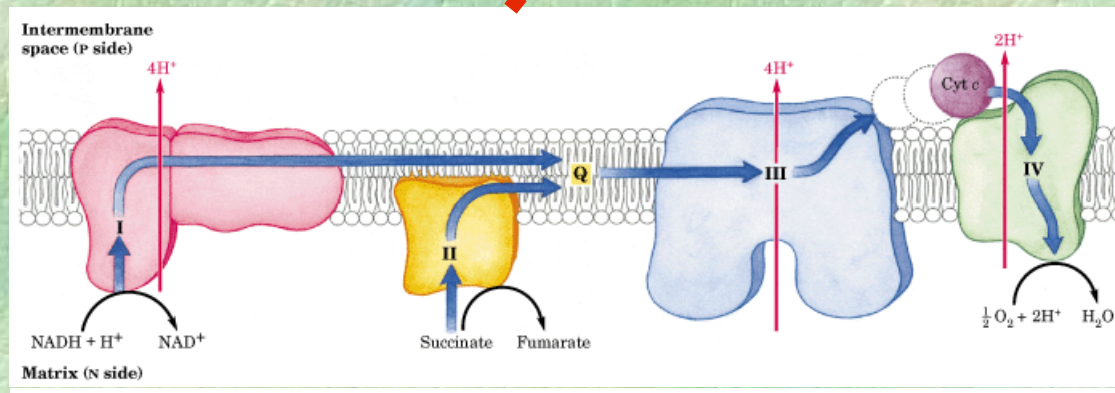
◇ 化学渗透学说与质子驱动力的形成

◇ 电子传递链与氧化磷酸化相偶联形成

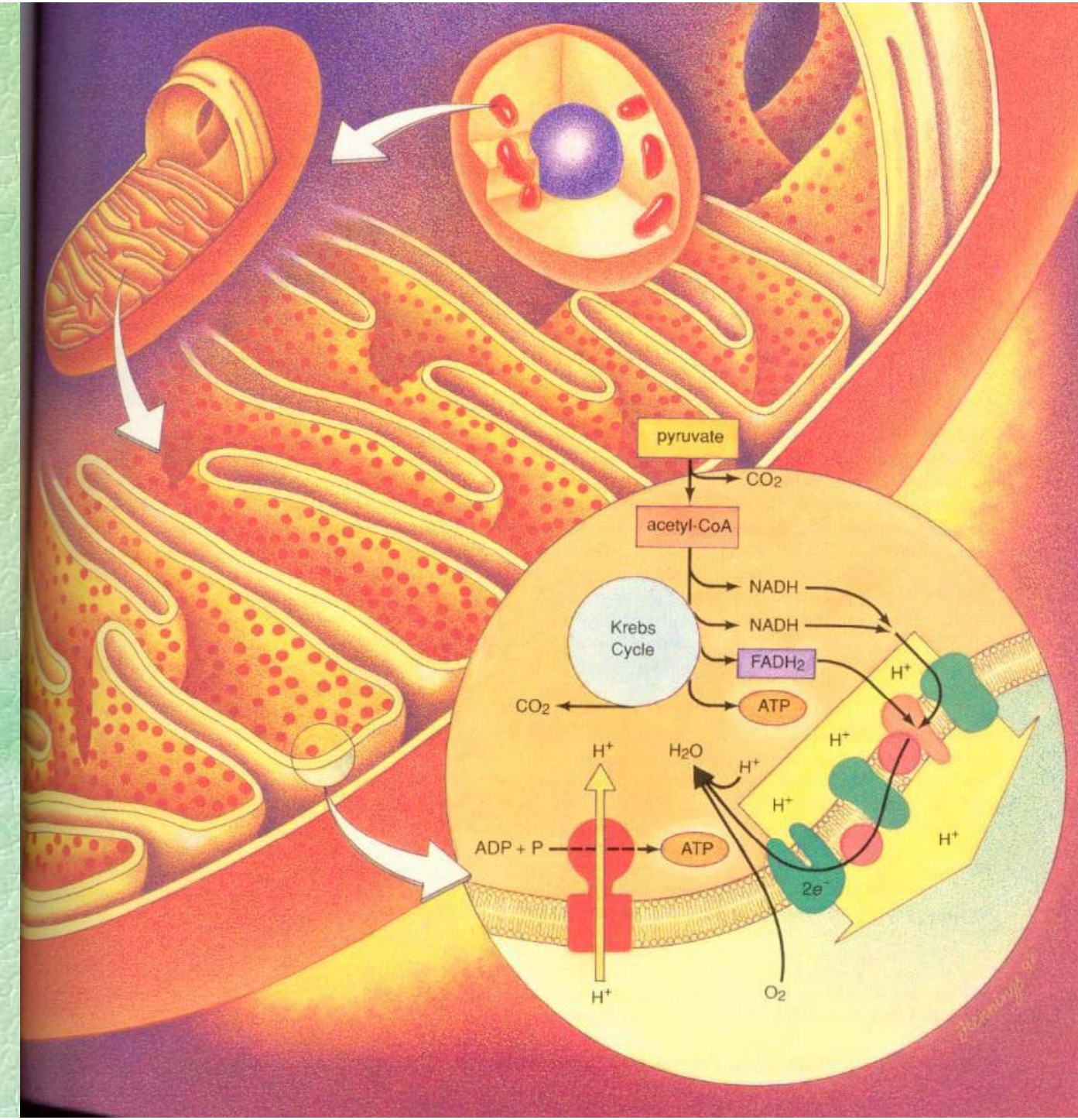
ATP



## 线粒体的结构

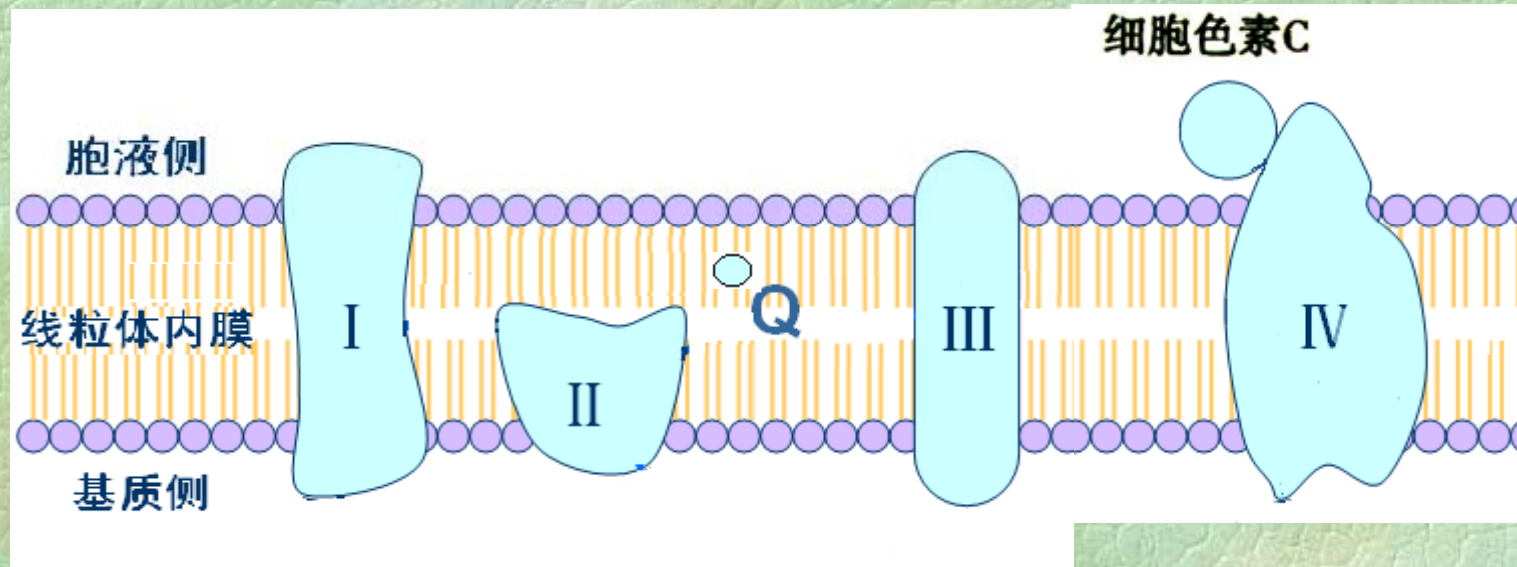


## 呼吸链



线粒体内膜的功能定位

# 呼吸链的组成



四个蛋白复合体：复合体I ~ IV

两个可灵活移动的成分：泛醌（Q）和 细胞色素C

## (一) 呼吸链的组成及其作用

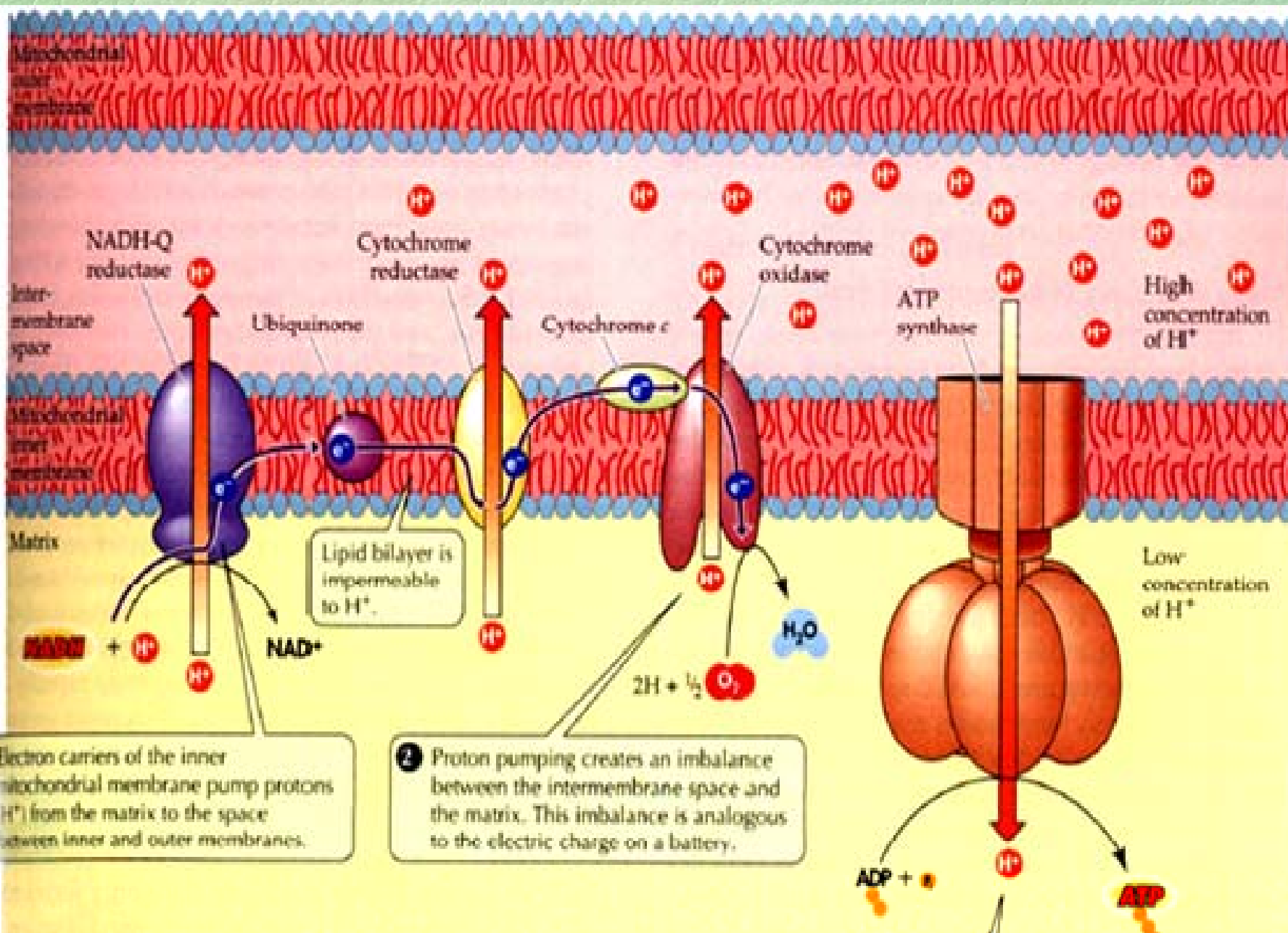
- |   |             |   |             |
|---|-------------|---|-------------|
| 1、 <b>NAD<sup>+</sup></b>   | (不需氧脱氢酶的辅酶) | } | <b>递氢体</b>  |
| 2、 <b>FAD</b>   | (黄素蛋白类的辅酶)  |   |             |
| 3、 <b>CoQ</b>   |             |   |             |
| 4、 <b>Fe-S-Pr</b>   |             | } | <b>递电子体</b> |
| 5、 <b>Cyt-Fe<sup>2+/3+</sup></b> ( <b>b</b> 、 <b>c<sub>1</sub></b> 、 <b>c</b> 、 <b>aa<sub>3</sub></b> ) |             |   |             |

## (二) 两条重要的呼吸链

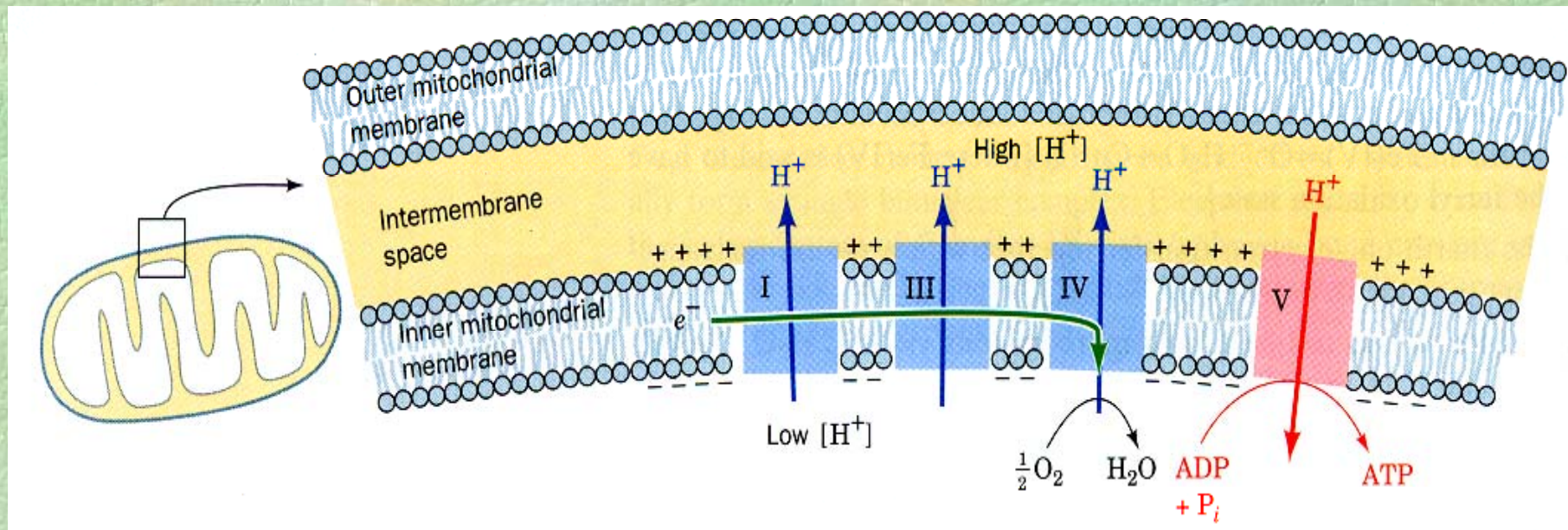
- 1、 **NADH 氧化呼吸链**
- 2、 **FAD 氧化呼吸链**

( 组成、 排列顺序、 传递作用、 两链汇合点 )

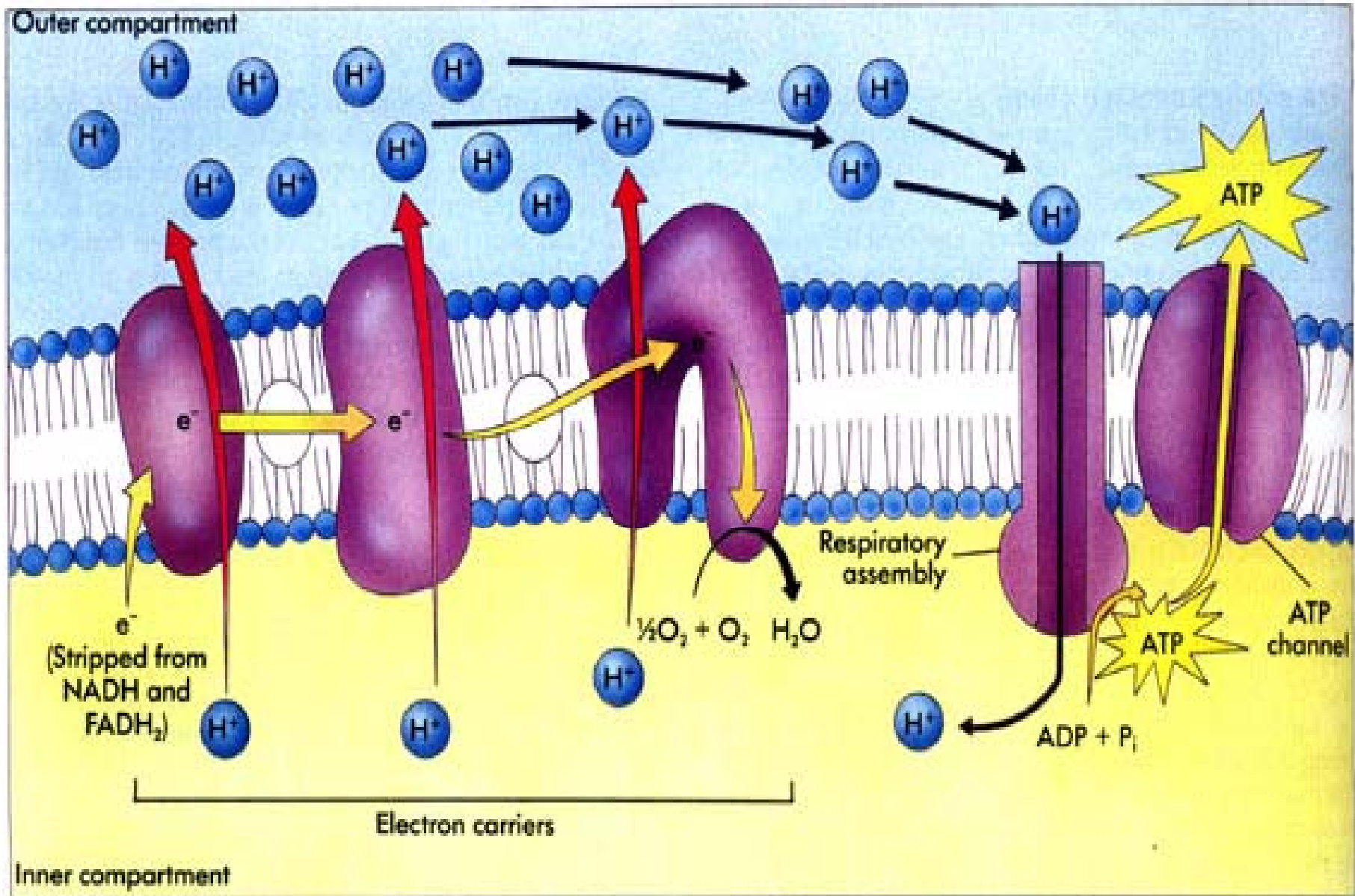
电子传递与氧化磷酸化的偶联



# ATP的形成



**Figure** The coupling of electron transport and ATP synthesis. Electron transport (green arrow) generates a proton electrochemical gradient across the inner mitochondrial membrane.  $H^+$  is pumped out of the mitochondrion during electron transport (blue arrows) and its exergonic return powers the synthesis of ATP (red arrows). Note that the intermembrane space is topologically equivalent to the cytosol because the outer mitochondrial membrane is permeable to  $H^+$



质子驱动力的产生

## 电子传递和氧化磷酸化知识要点

1 部位：真核细胞发生在线粒体内膜上，原核细胞发生在质膜上。

2 作用：NADH和FADH<sub>2</sub>再氧化，释放的能量为ADP所捕获。

3 产能：每个NADH被氧化产生2.5个ATP,每个FADH<sub>2</sub>被氧化产生2个ATP。

# 线粒体外NADH（糖酵解产生）进入线粒体

## (1) $\alpha$ -磷酸甘油穿梭

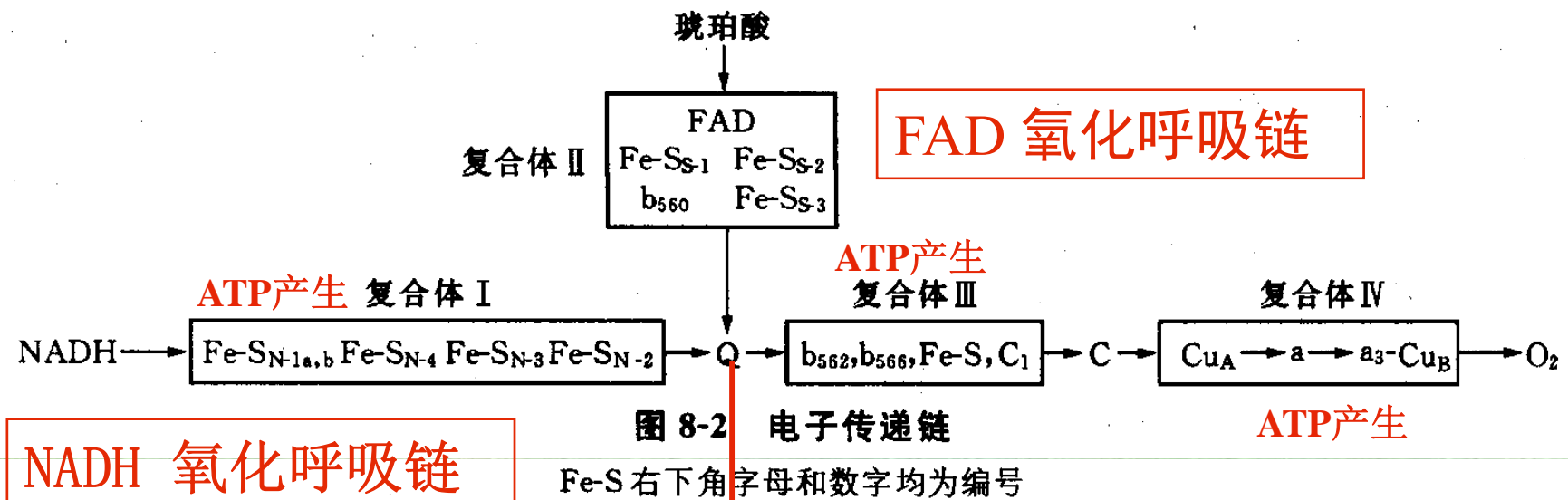
### 特点:

- 经琥珀酸氧化呼吸链, 产生2ATP
- 主要存在于骨骼肌、神经细胞

## (2) 苹果酸穿梭系统

### 特点:

- 通过NADH氧化呼吸链 产生3ATP
- 主要存在于肝、心肌组织中。



辅酶Q 是呼吸链中唯一的非蛋白氧化还原载体，可在膜中迅速移动。它在电子传递链中处于中心地位，可接受各种黄素酶类脱下的氢。COQH<sub>2</sub> 脱下 2H<sup>+</sup>+2e<sup>-</sup>，其中2H<sup>+</sup>游离于介质中，2e<sup>-</sup>传递。

复合体 I：即NADH：辅酶Q氧化还原酶复合体。传给辅酶Q。泵H<sup>+</sup>

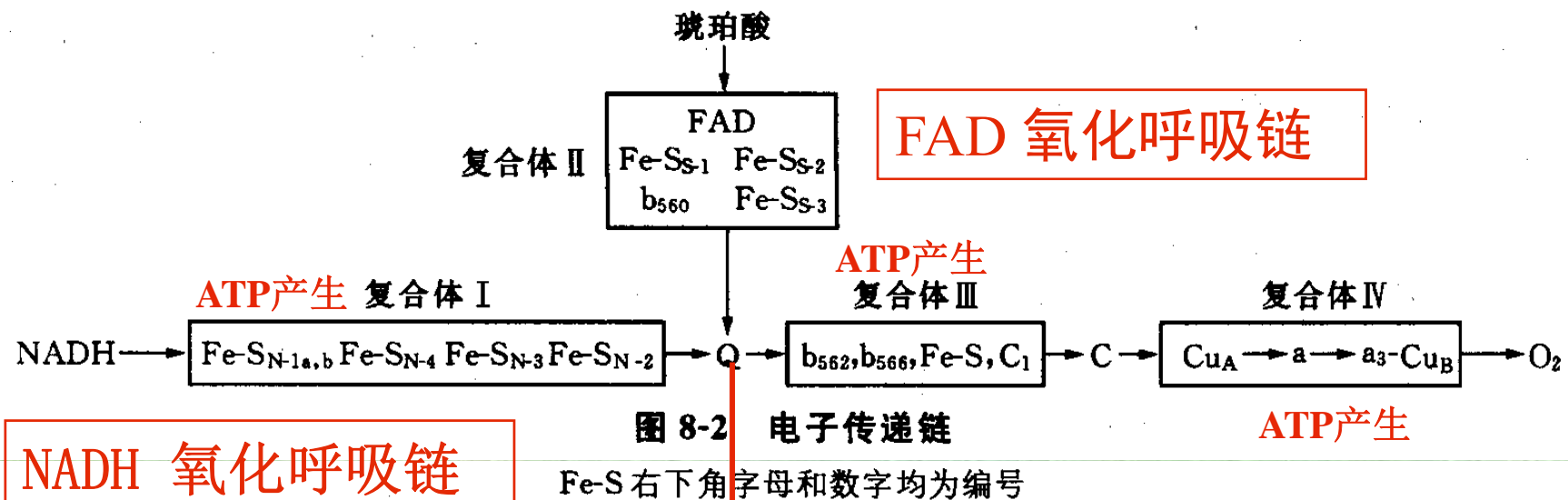
复合体II：由琥珀酸脱氢酶（FAD为辅基的黄素蛋白）和铁硫蛋白组成，将从琥珀酸得到的电子传递给辅酶Q。

复合体III：细胞色素bc<sub>1</sub>氧化还原酶复合体。泵H<sup>+</sup>

复合体IV：细胞色素C氧化酶复合体。将电子传递给氧。泵H<sup>+</sup>

一分子NADH经过呼吸链积累6个质子，产生2.5个ATP

一分子FADH<sub>2</sub>经过呼吸链积累4个质子，产生1.5个ATP



辅酶Q是呼吸链中唯一的非蛋白氧化还原载体，可在膜中迅速移动。它在电子传递链中处于中心地位，可接受各种黄素酶类脱下的氢。COQH<sub>2</sub>脱下 2H<sup>+</sup>+2e<sup>-</sup>，其中2H<sup>+</sup>游离于介质中，2e<sup>-</sup>传递。

复合体 I：即NADH：辅酶Q氧化还原酶复合体。传给辅酶Q。泵H<sup>+</sup>

复合体II：由琥珀酸脱氢酶（FAD为辅基的黄素蛋白）和铁硫蛋白组成，将从琥珀酸得到的电子传递给辅酶Q。

复合体III：细胞色素bc<sub>1</sub>氧化还原酶复合体。泵H<sup>+</sup>

复合体IV：细胞色素C氧化酶复合体。将电子传递给氧。泵H<sup>+</sup>

一分子NADH经过呼吸链积累6个质子，产生2.5个ATP

一分子FADH<sub>2</sub>经过呼吸链积累4个质子，产生1.5个ATP

# 能量统计:

糖酵解底物水平的磷酸化4个ATP，己糖活化消耗2个ATP。纯剩**2ATP**

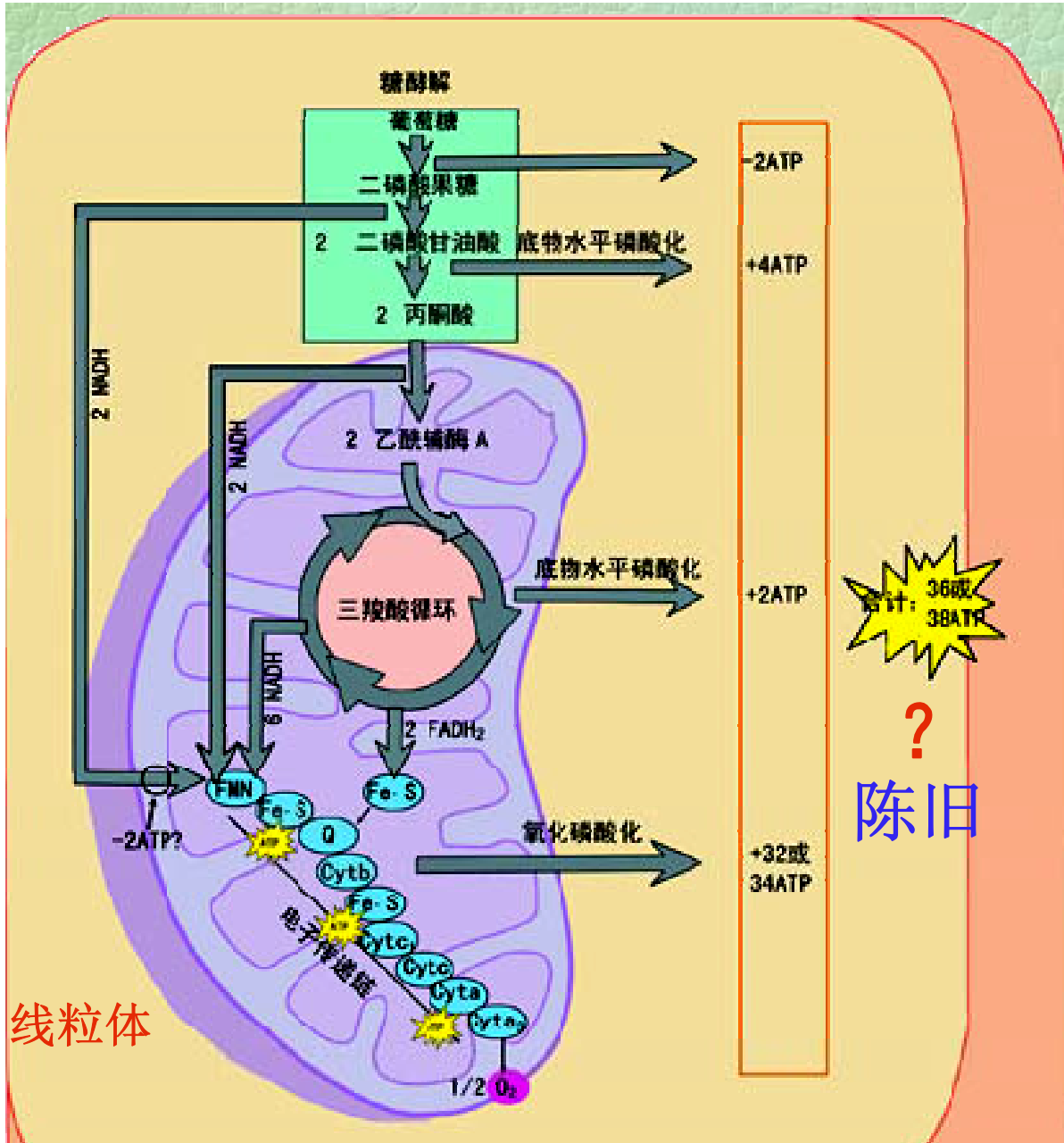
糖酵解产生2个NADH，每个NADH可得1.5或2.5个ATP，共可得3个或5个ATP。

三羧酸循环产生**2ATP**。

三羧酸循环产生8分子NADH和2分子FADH<sub>2</sub>，经电子传递可得到**23个ATP**，

合计: 36或38ATP

? 陈旧



线粒体

1分子葡萄糖彻底氧化分解共得: 30或32个ATP

按36个ATP计算：储存能量

$$7.3\text{kcal} / \text{mol} \times 36\text{mol} = 262.8\text{kcal};$$

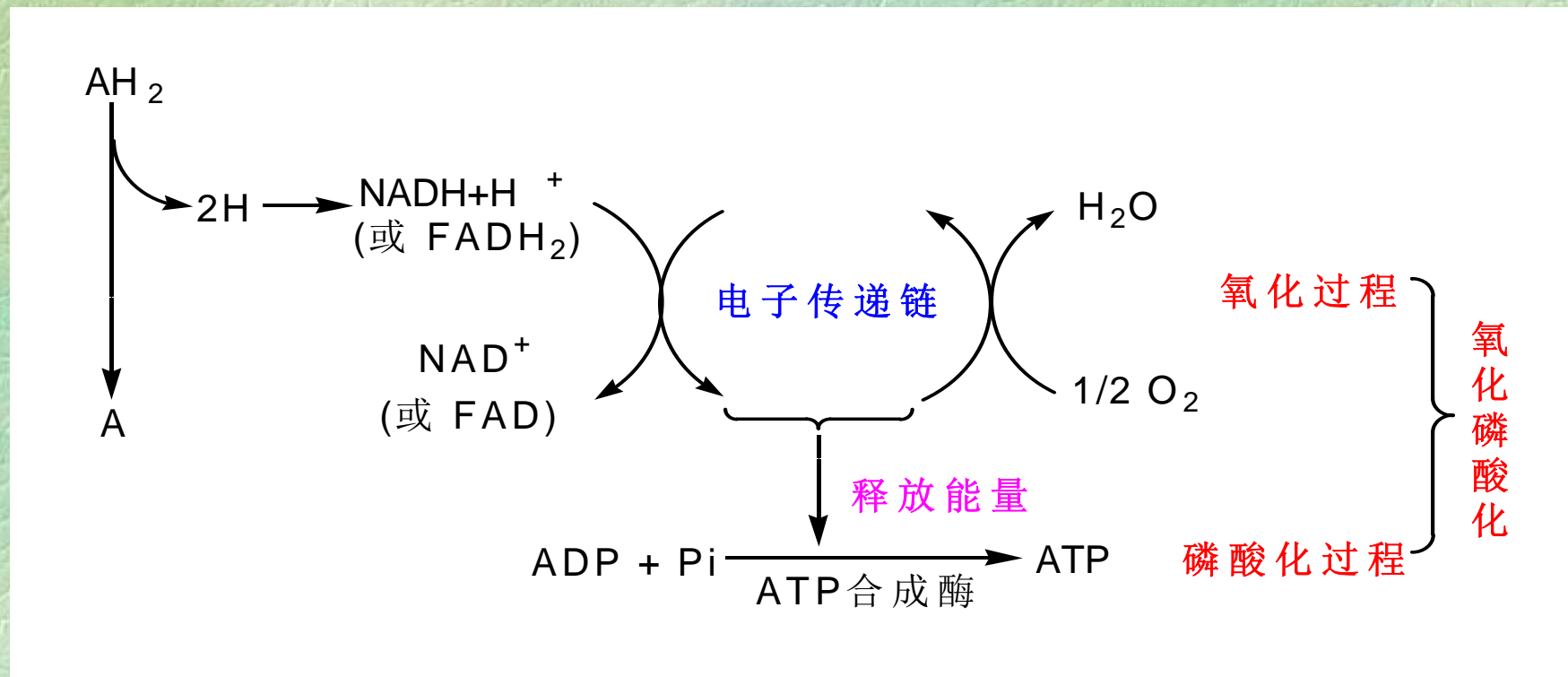
1mol葡萄糖完全燃烧可放出686kcal的能量；

细胞呼吸的产能效率：

$$262.8\text{kcal} / 686\text{kcal} = 38\%$$

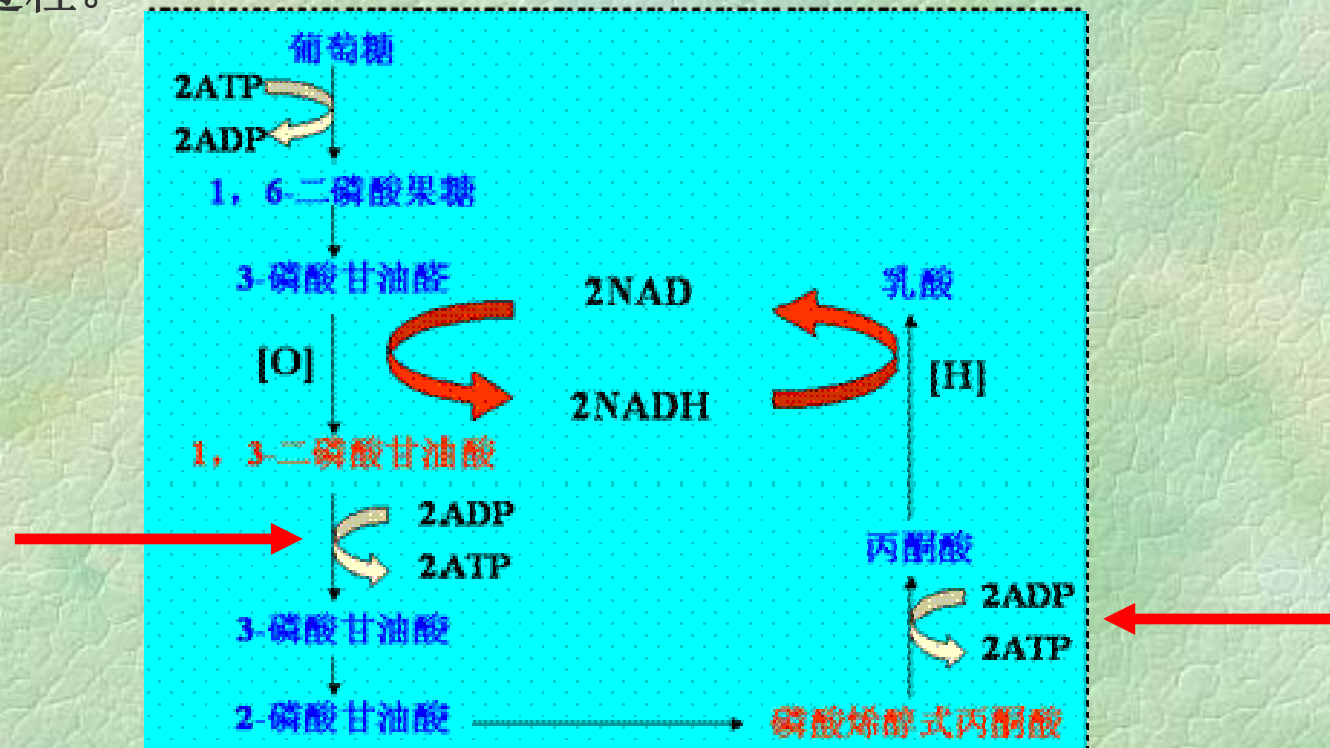
(汽车能量利用效率15%~25%)

**电子传递体系磷酸化**是指当电子从NADH或FADH<sub>2</sub>经过电子传递体系(呼吸链)传递给氧形成水时,同时伴有ADP磷酸化为ATP的全过程。通常所说的氧化磷酸化是指电子传递体系磷酸化。

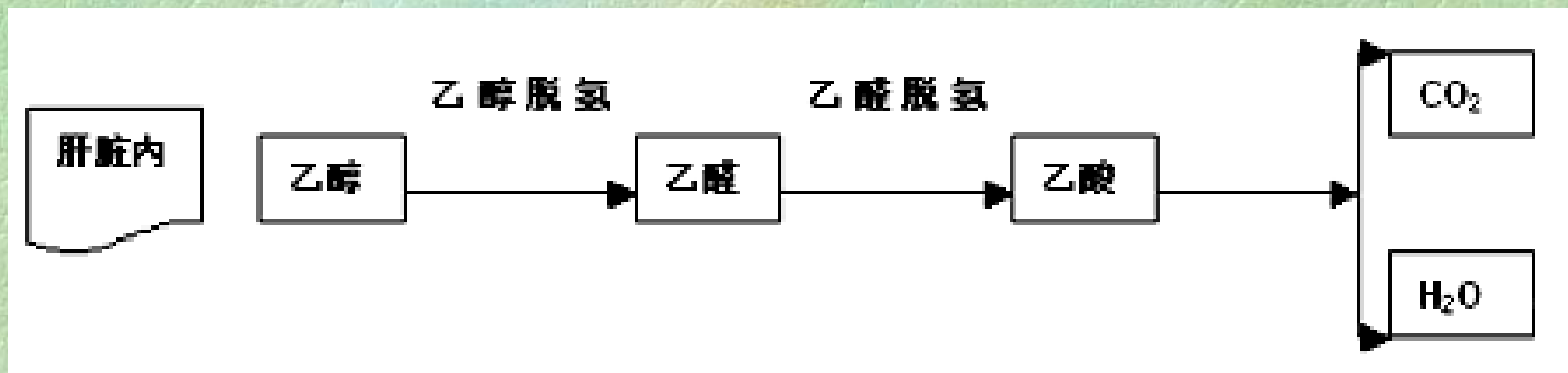


- **底物水平磷酸化**是在被氧化的底物上发生磷酸化作用。即底物被氧化的过程中，形成了某些高能磷酸化化合物的中间产物，通过酶的作用可使ADP生成ATP。

分解代谢过程中，底物因脱氢、脱水等作用而使能量在分子内部重新分布，形成高能磷酸化合物，然后将高能磷酸基团转移到ADP形成ATP的过程。



# 人酒量的大小？



## 乙 醛

器官病变(肝硬化,上下消化道癌)

酒精敏感反应(脸红,心跳加速,恶心,呕吐,  
头晕,血压下降)

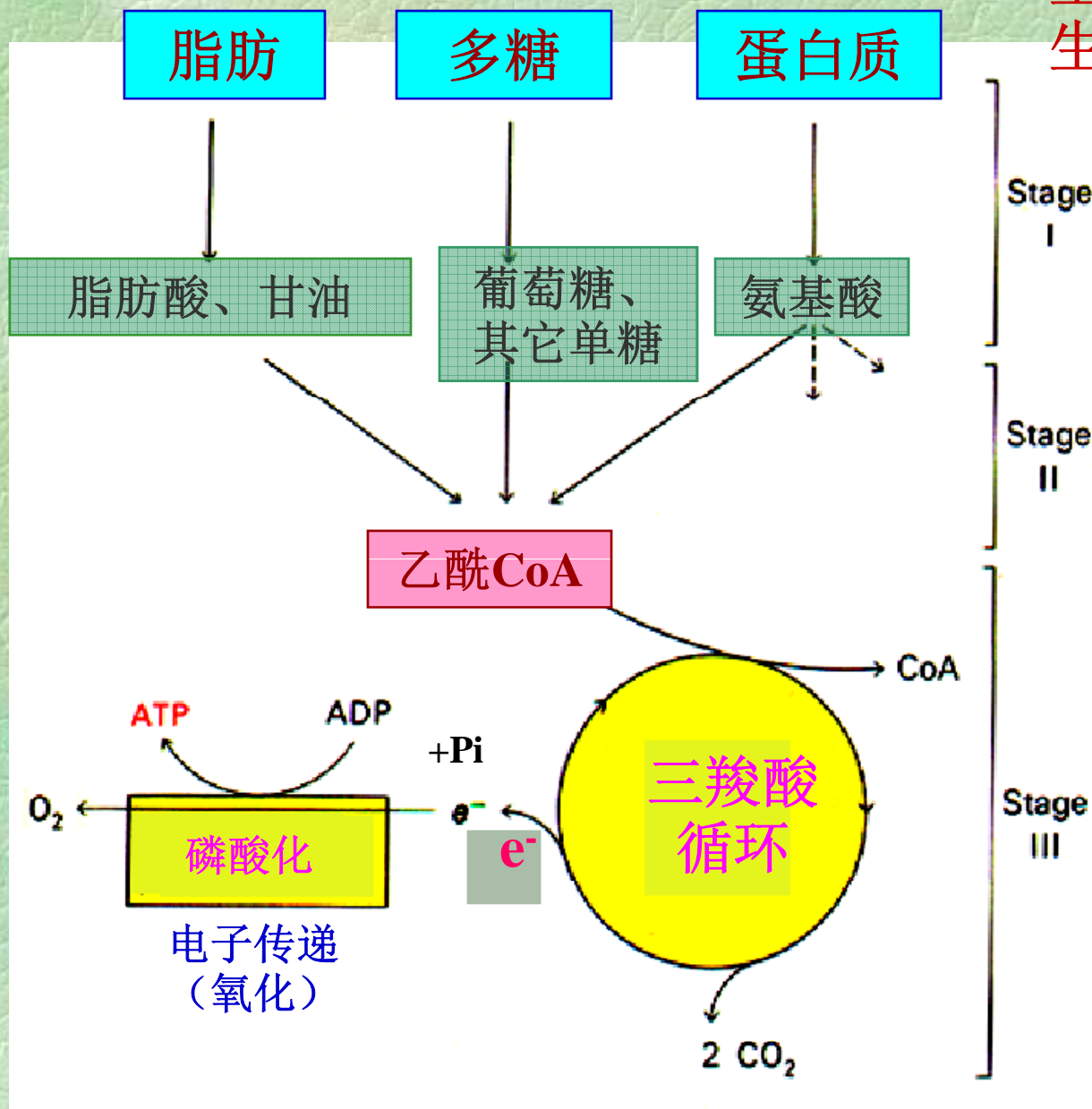
# 人酒量的大小？

- 与醛脱氢酶的活性有关！！

■ 基因型	正常纯合子	异常纯合子	杂合子
■ 人群比例	45	10	45
■ 酒量	大	小	中等

## 四、生物体内的代谢网络

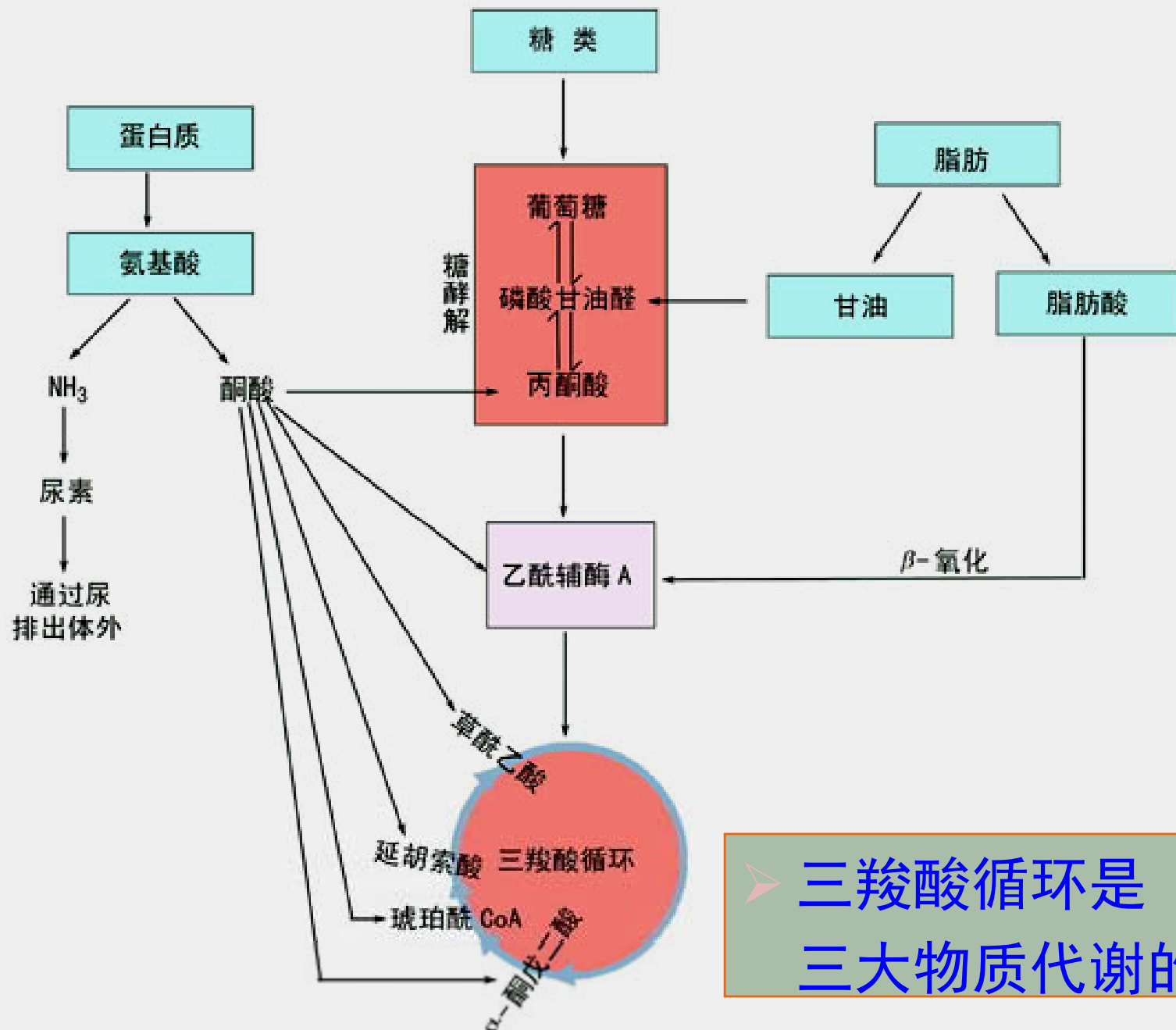
# 生物体内能量产生的三个阶段



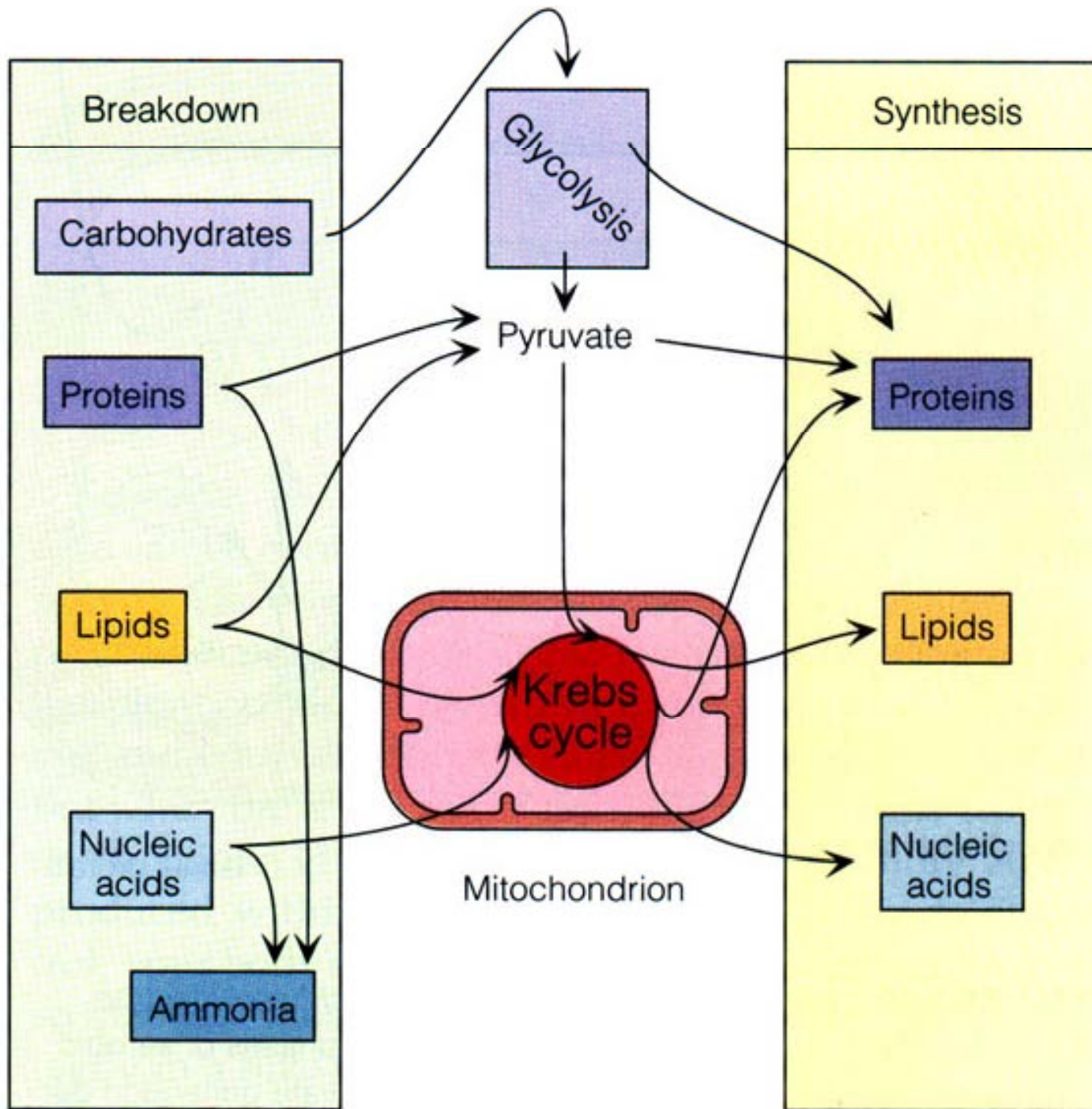
大分子降解成基本结构单位

小分子化合物分解成共同的中间产物（如丙酮酸、乙酰CoA等）

共同中间物进入三羧酸循环，氧化脱下的氢由电子传递链传递生成 $\text{H}_2\text{O}$ ，释放出大量能量，其中一部分通过磷酸化储存在ATP中。



➤ 三羧酸循环是三大物质代谢的中心



合成代谢与分解代谢组成代谢网络

光合作用与细胞呼吸之间的联系

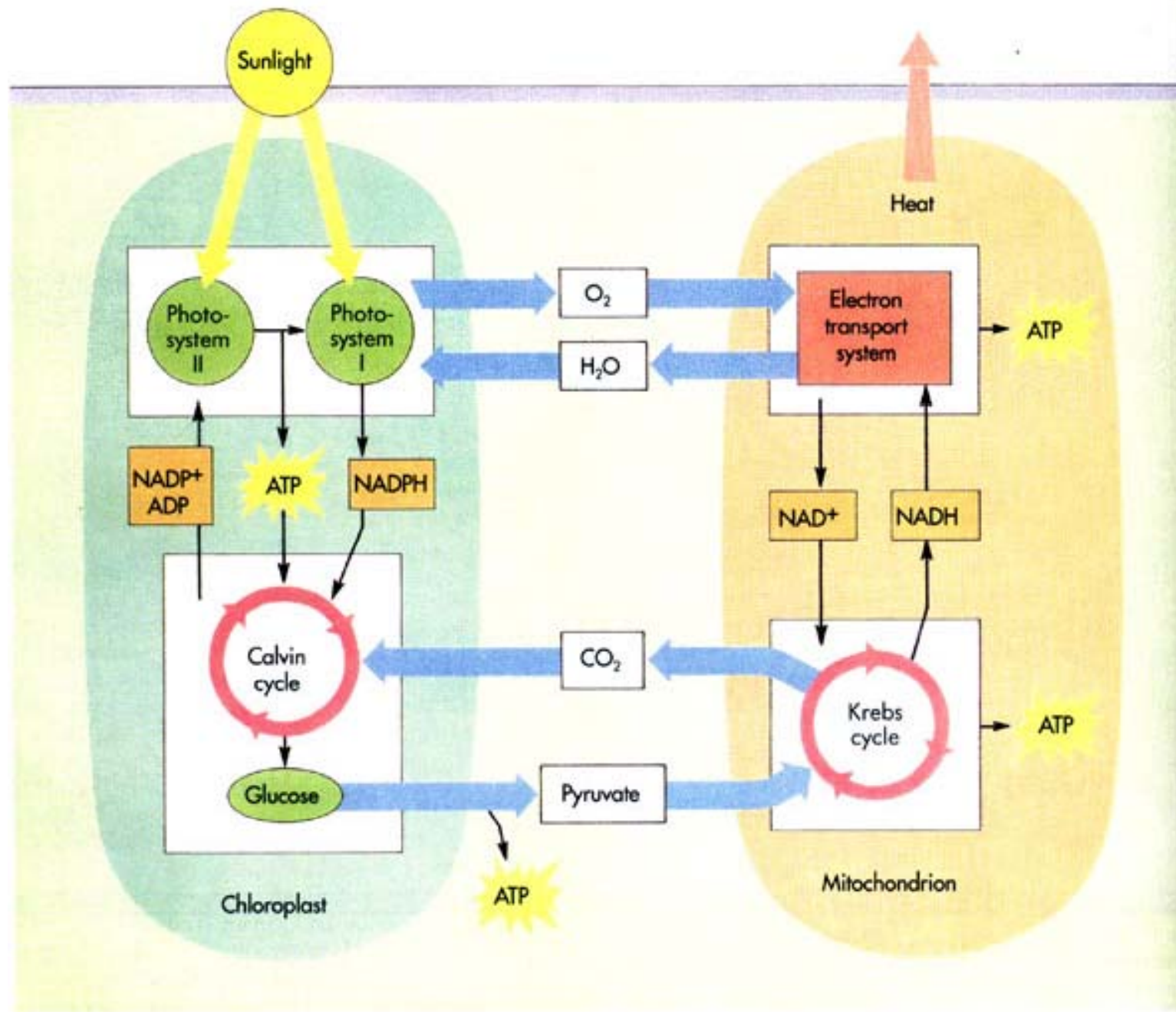


FIGURE 8-14 The metabolic machine. This diagram shows how the processes of photosynthesis and respiration are connected.

## 期中考试:

1 简要概述有关生命科学研究某个方面的进展，并结合自己的理解写出你的感想以及分析等

2 字数不少于**1500**字。

3 作业须附上你的主要参考文献**1-2**篇。中英文文献均可。

3 交作业时请装订好，并写清你的姓名，学号，年级，学院。

4 请于**11月17日**上课时交给上课老师。



哈哈，

下课了！