

第五章 植物的光合作用

第一节 光合作用的概念、意义

第二节 叶绿体和光合色素

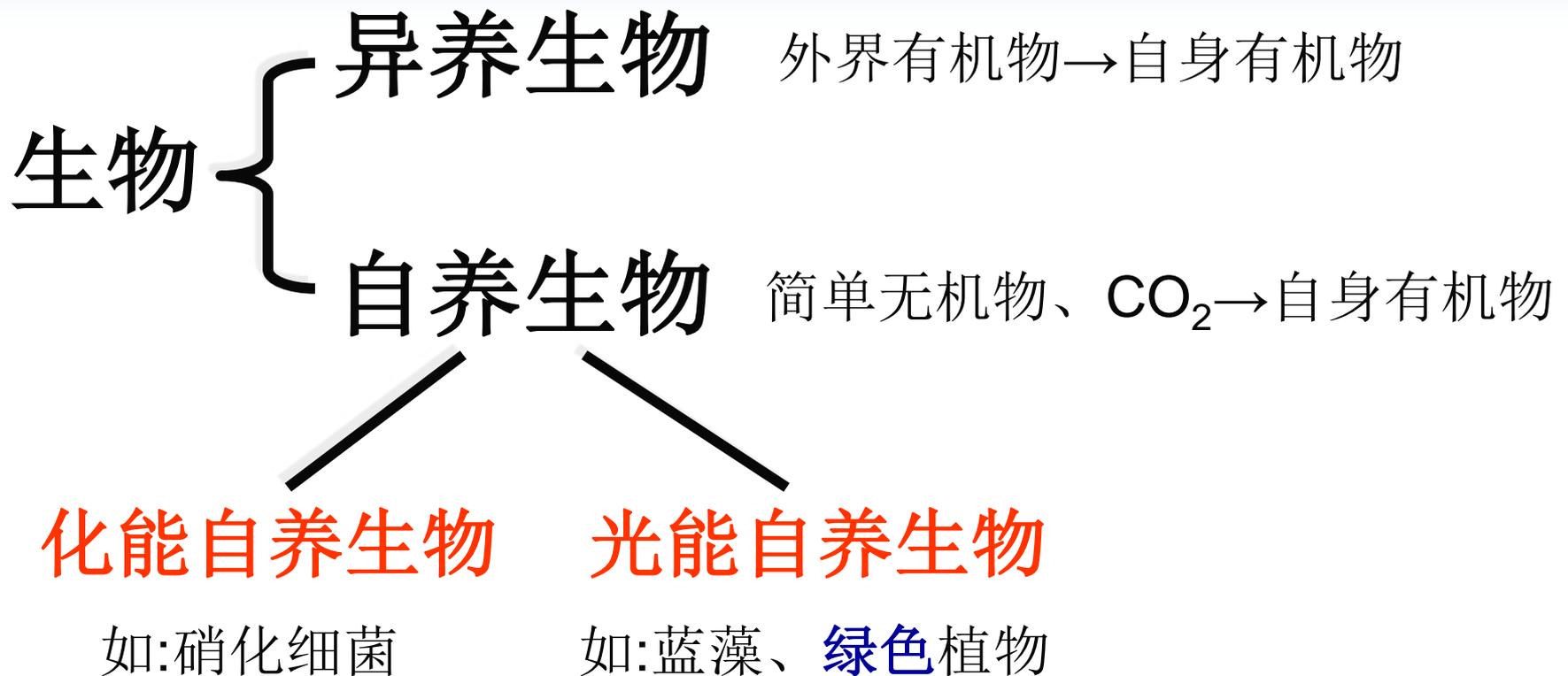
第三节 光合作用的机理

第四节 光呼吸

第五节 影响光合作用的因素

第六节 作物的光能利用率





☆植物一般都是自养型生物，但也有一些种类为部分或完全异养型；部分异养型植物如食虫植物、某些寄生植物(槲hú寄生、桑寄生等)。典型的异养型植物主要是一些寄生植物，如菟丝子、大花草等；此外还有天麻等。

部分异养型植物:



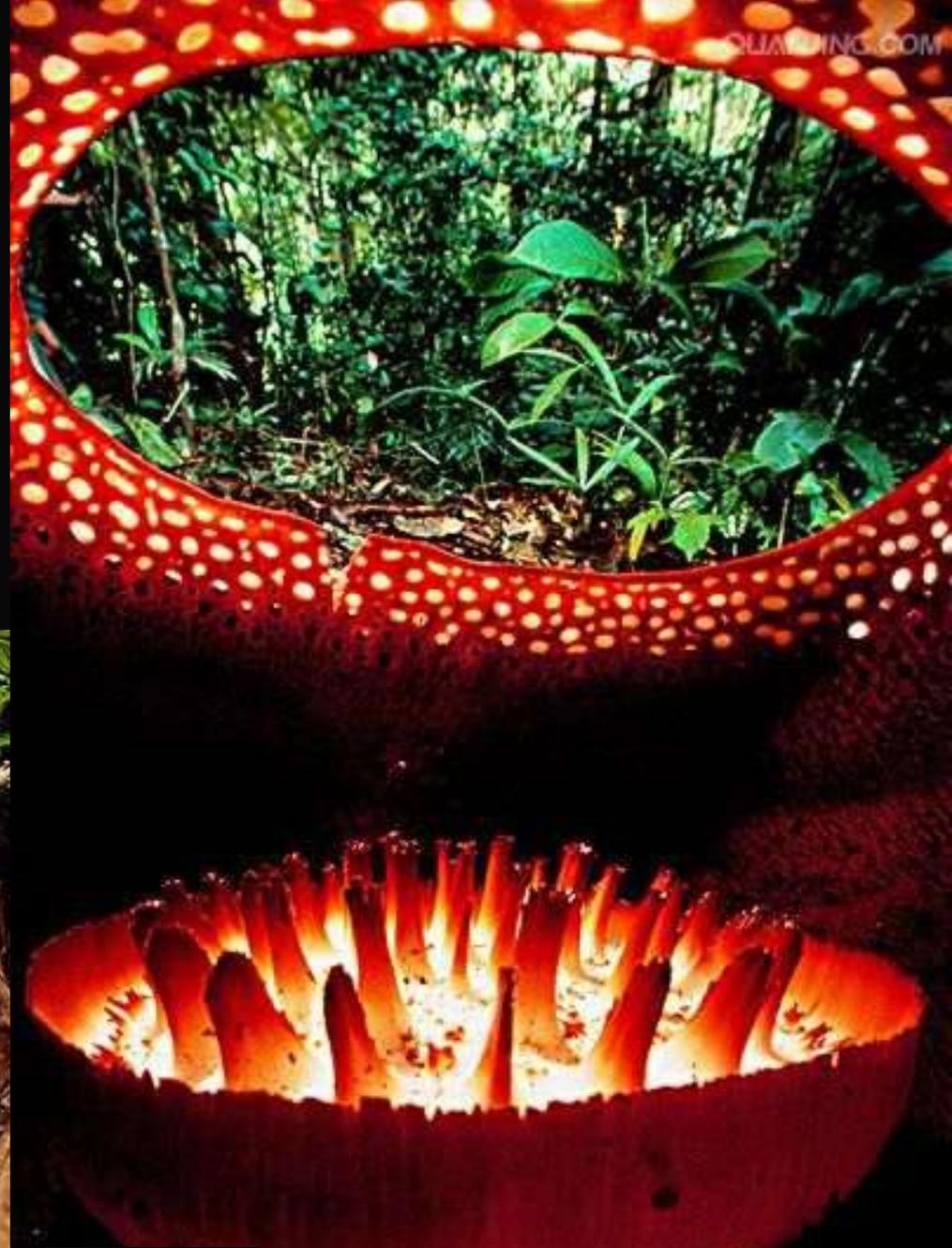


桑寄生 桑寄生科

完全异养型植物：



菟丝子 旋花科



大王花, 以花朵巨大而气味恶臭著称

地球上一切生物所消耗的能量, 绝大部分都来自于绿色植物的光合作用。



- ①地球上每年通过光合作用固定的有机物为 1.7×10^{11} t (3.2×10^5 t/min)。
- ②每年光合作用所贮存的太阳能： 3×10^{21} J, 约为人类所需能量的100倍。
- ③光合作用每年固定约 7×10^{11} 吨 CO_2 , 向大气释放 5.53×10^{11} 吨 O_2 。

第一节 光合作用的概念、意义

一、光合作用的概念与意义

1、概念

光合作用：绿色植物利用太阳光能，将CO₂和H₂O合成有机物，并释放O₂的过程。



2、意义

1. 把无机物变为有机物

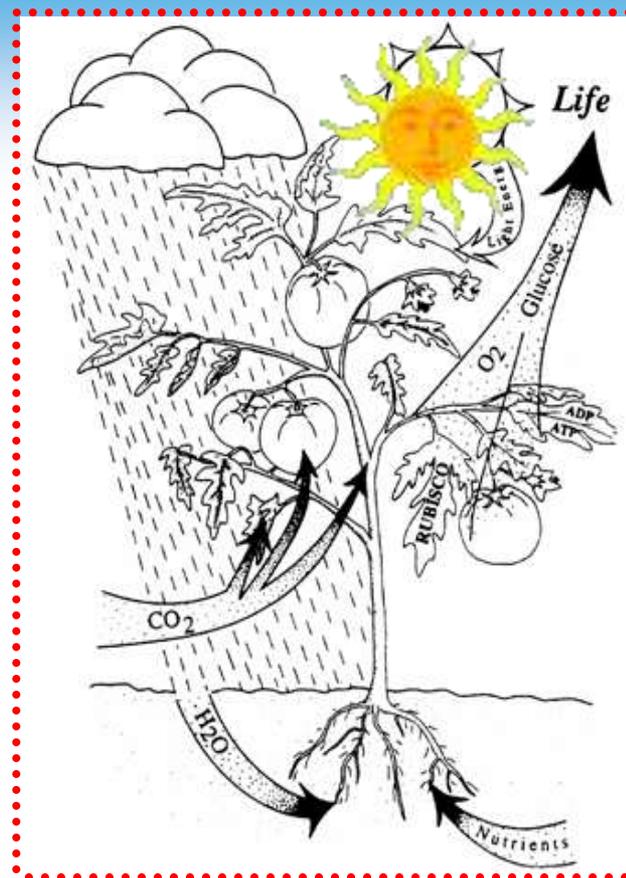
地球上每年通过光合作用固定的有机物为 $1.7 \times 10^{11} \text{t}$ ($3.2 \times 10^5 \text{t/min}$)。

2. 把光能转变成化学能

每年光合作用所贮存的太阳能： $3 \times 10^{21} \text{J}$ ，约为人类所需能量的100倍。

3. 维持大气 O_2 和 CO_2 的相对平衡

光合作用每年固定约 7×10^{11} 吨 CO_2 ，向大气释放 5.53×10^{11} 吨 O_2 。



人类面临
四大问题

人口急增
食物不足
资源匮乏
环境恶化

依赖
光合生产

因此深入探讨光合作用的规律，揭示光合作用的机理，使之更好地为人类服务，愈加显得重要和迫切。



第二节 叶绿体和光合色素

植物光合作用的主要器官——叶片

光合作用的主要场所——叶绿体

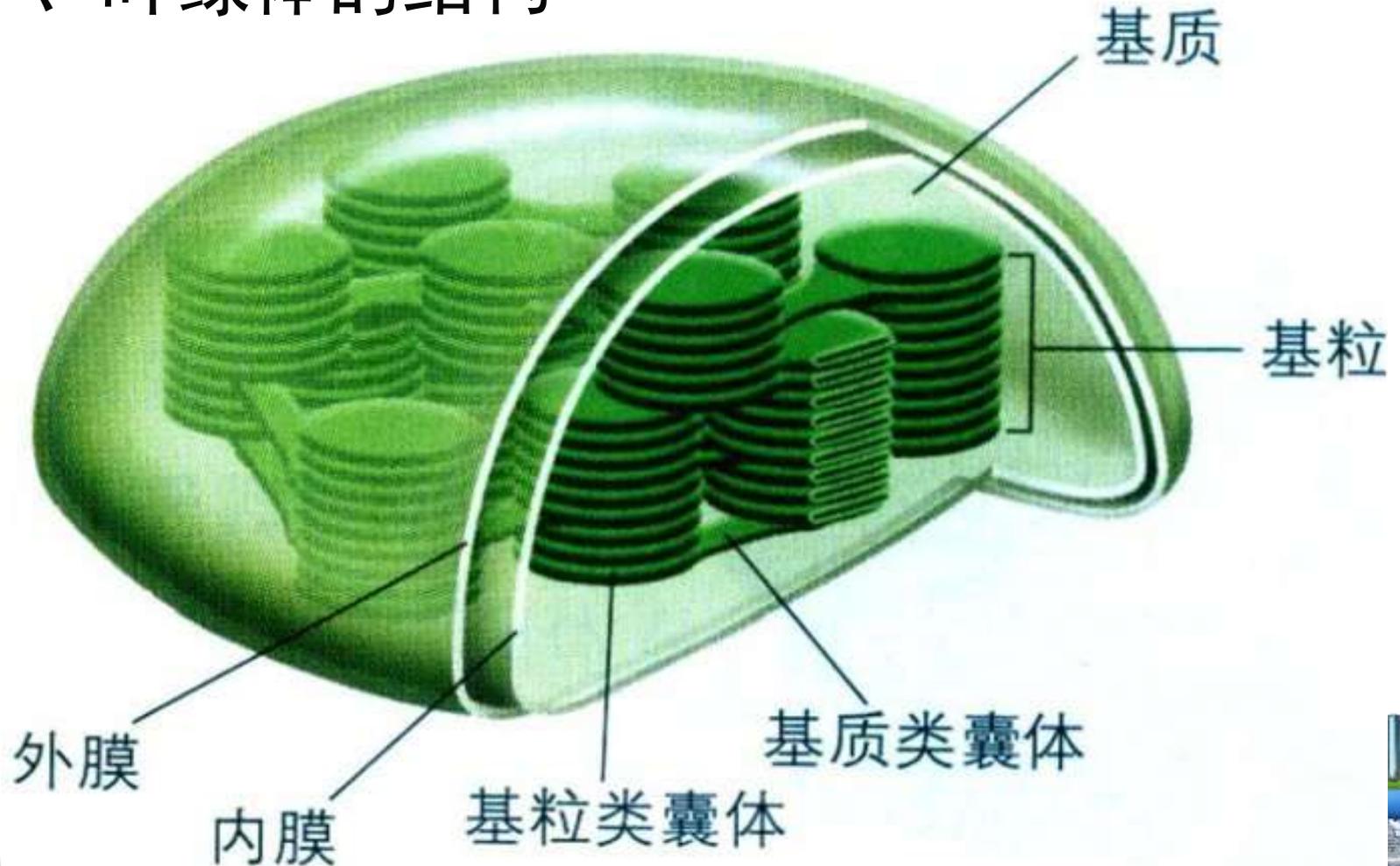
叶绿体的前身——前质体

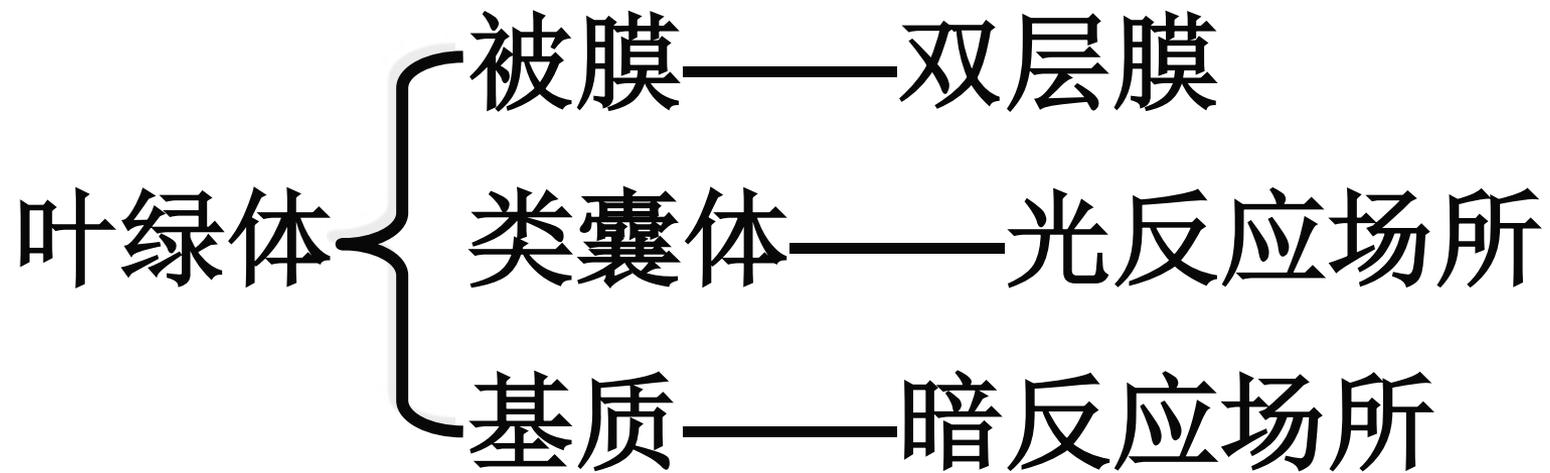
前质体发育为叶绿体需要——光



第二节 叶绿体和光合色素

一、叶绿体的结构





光反应——光能吸收与转换

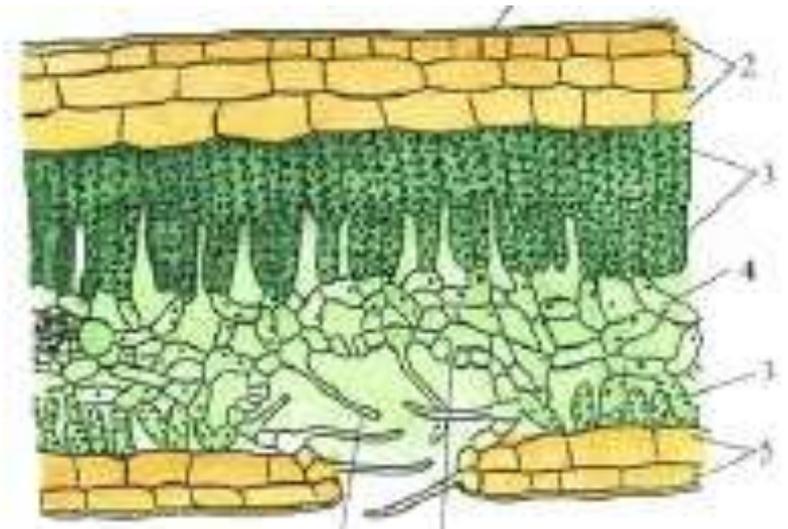
暗反应—— CO_2 的固定与还原



叶绿体主要存在于叶肉细胞中

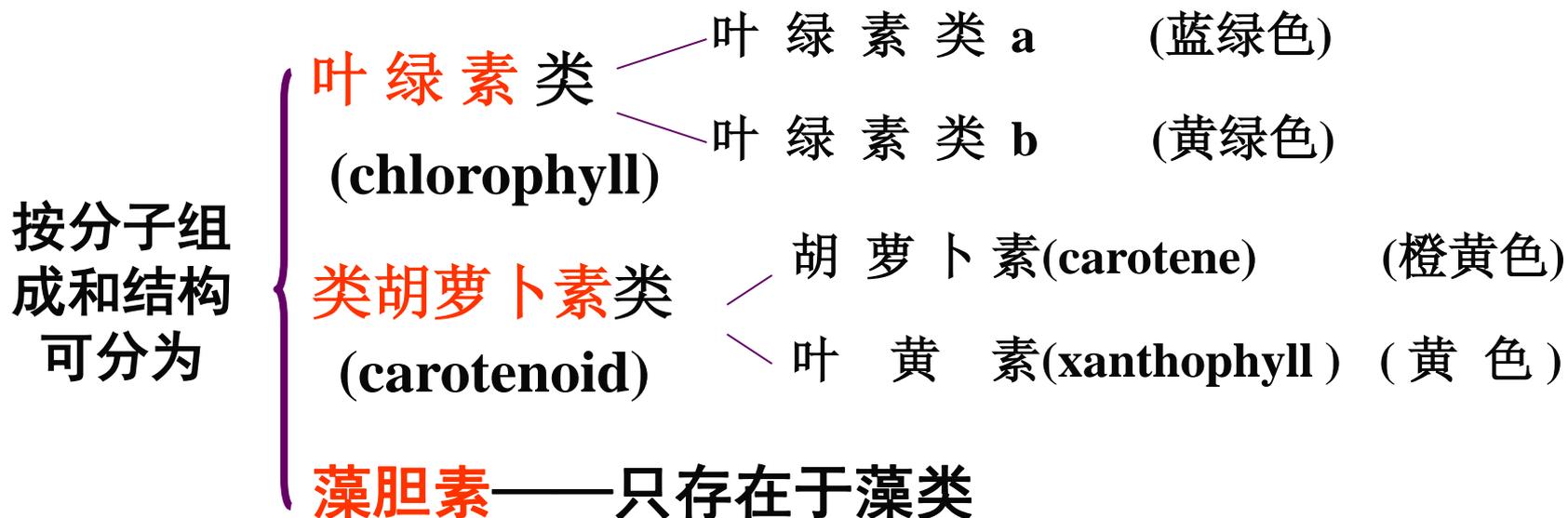
数量——栅栏组织>海绵组织

运动——叶绿体在细胞质中的位置随光照方向与强度发生移动

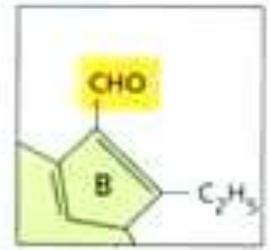
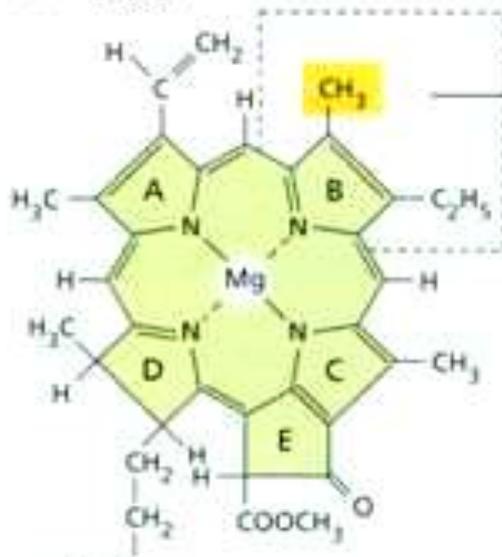


二、光合色素——植物吸收光能的受体

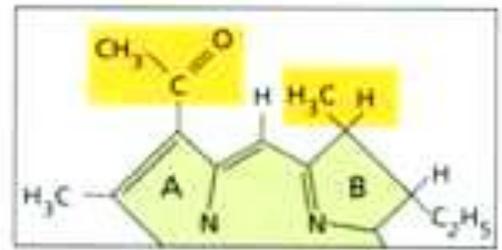
1、分类



(A) 叶绿素

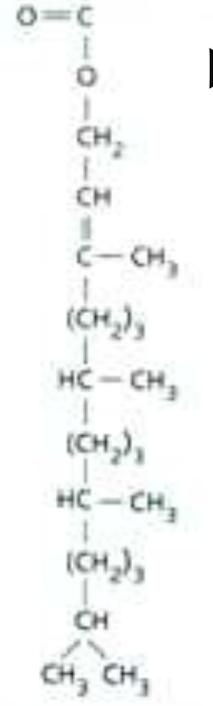


叶绿素 b



细菌叶绿素 a

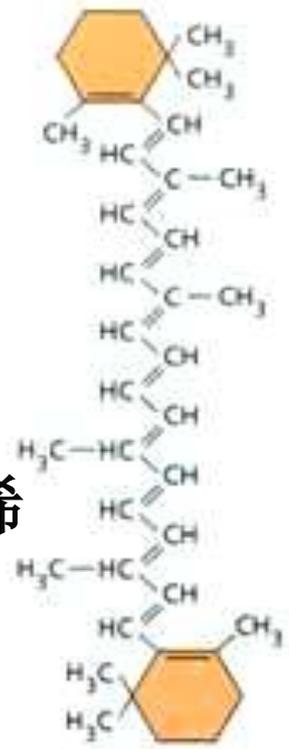
卟啉环



Chlorophyll a

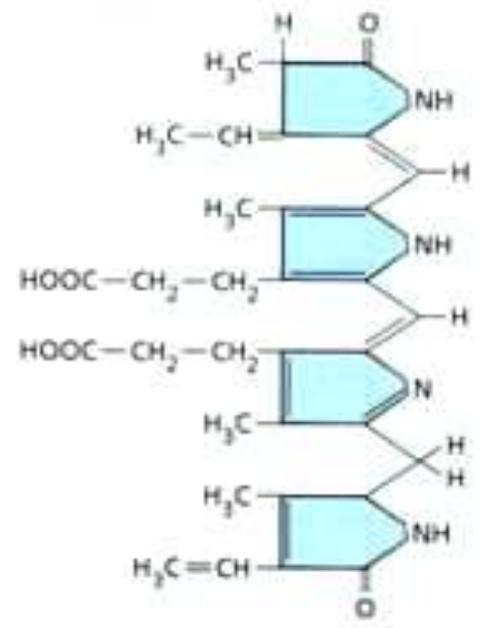
8个异戊二烯

(B) 类胡萝卜素



β-胡萝卜素

(C) 藻胆素



藻红素

4个吡咯环

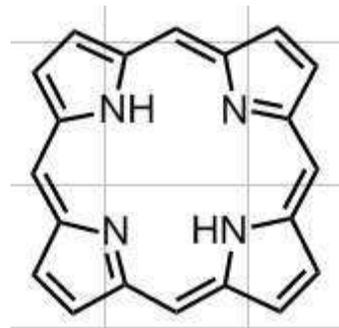
叶绿素

主要结构——卟啉环

叶绿素a——蓝绿色; CH_3

叶绿素b——黄绿色; CHO

特性——两性分子



卟啉环(4个吡咯环相连而成)

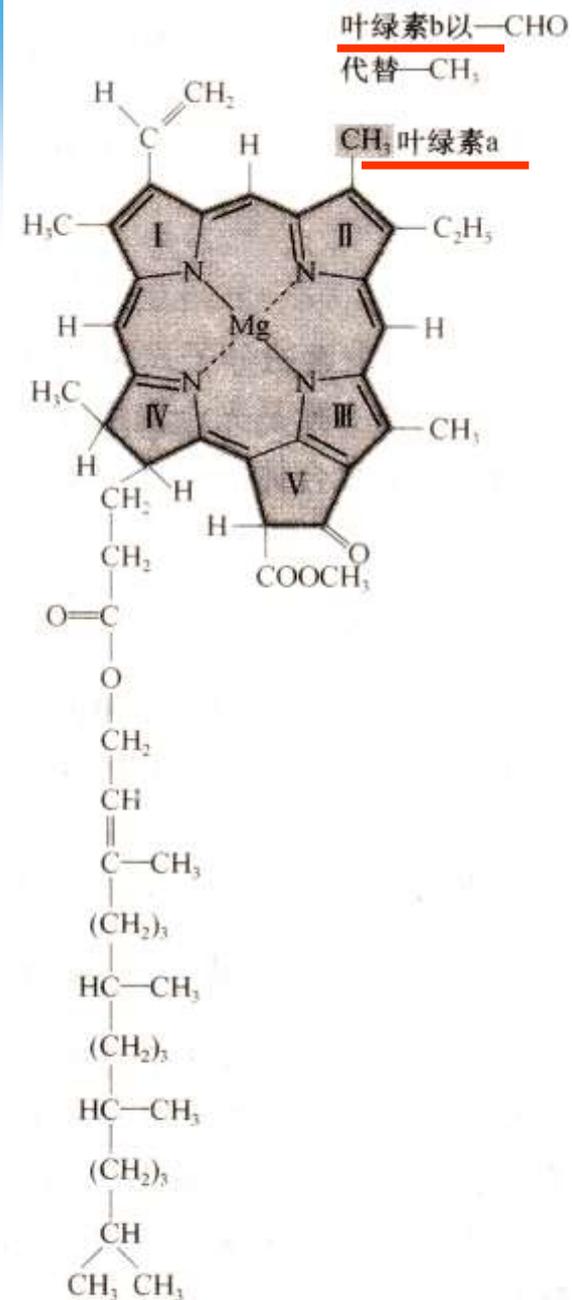


图 5-2 叶绿素 a、叶绿素 b 的结构式

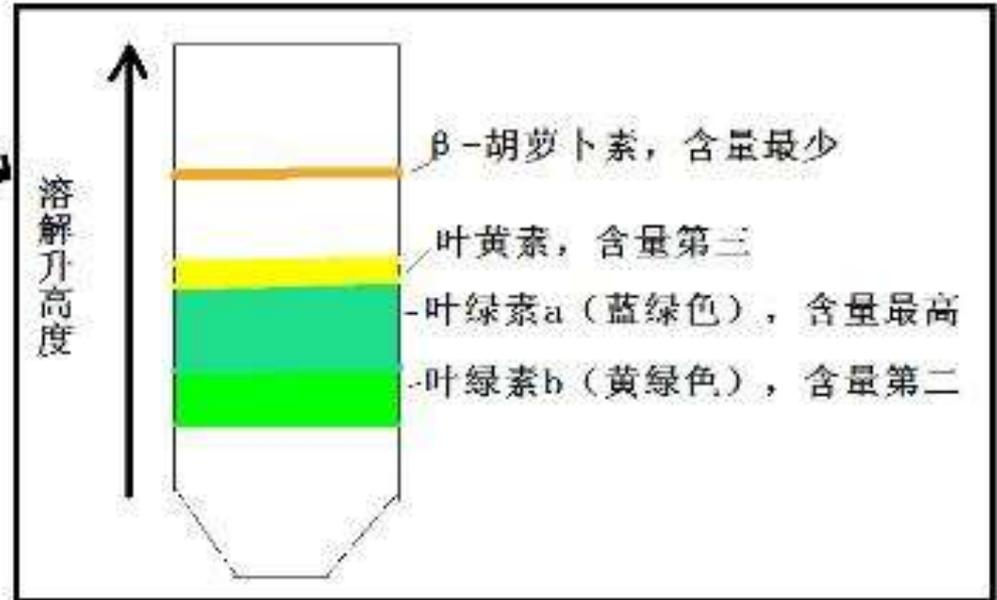
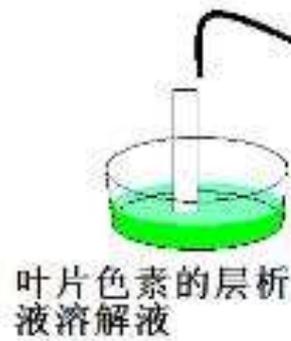
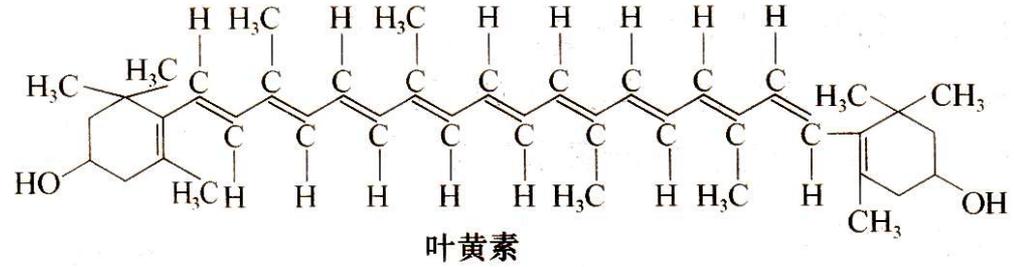
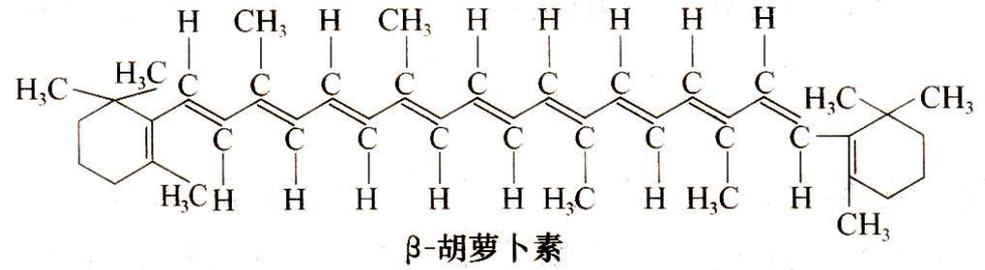
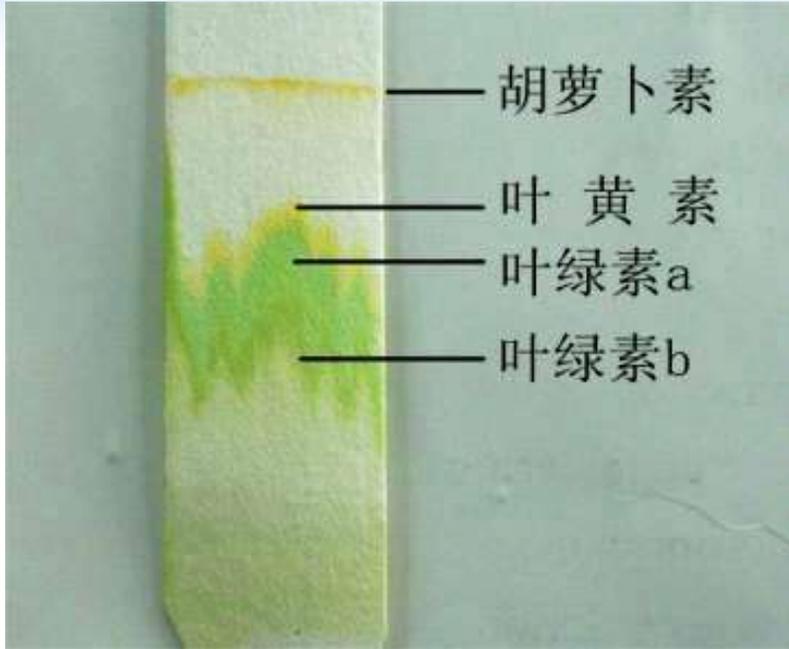
叶绿素的提取

叶绿素是一种酯。通常用含有少量水的有机溶剂如**80%的丙酮**，或者**95%乙醇**，或**丙酮：乙醇：水=4.5：4.5：1**的混合液来提取叶片中的叶绿素，用于测定叶绿素含量。



研磨法提取光
合色素

薄层层析

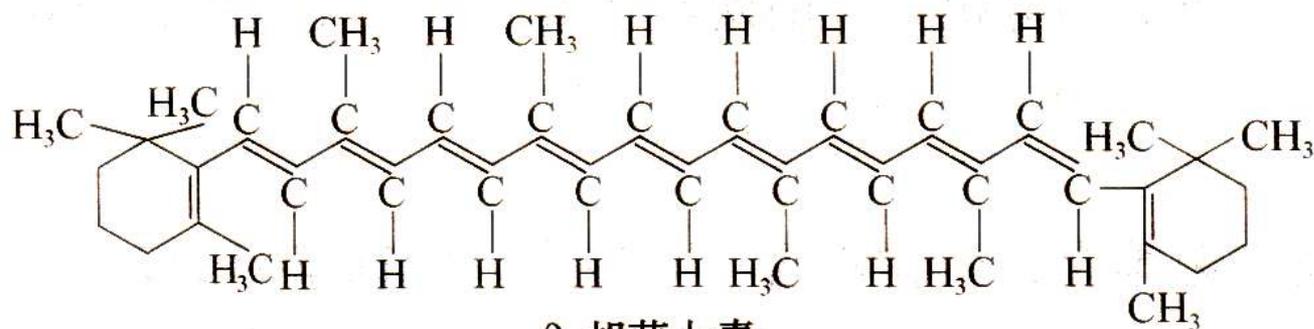


类胡萝卜素

叶绿体中的类胡萝卜素有两种：**胡萝卜素**和**叶黄素**。

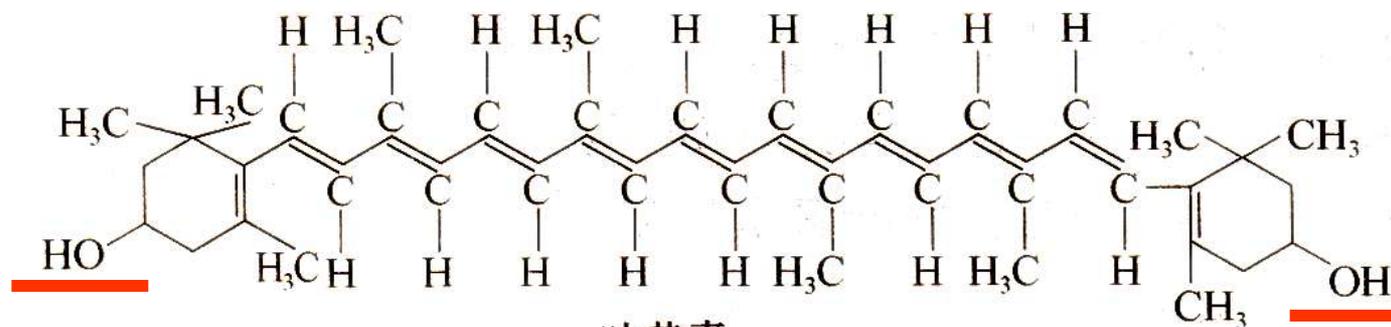
胡萝卜素——橙黄色

叶黄素——黄色



β -胡萝卜素

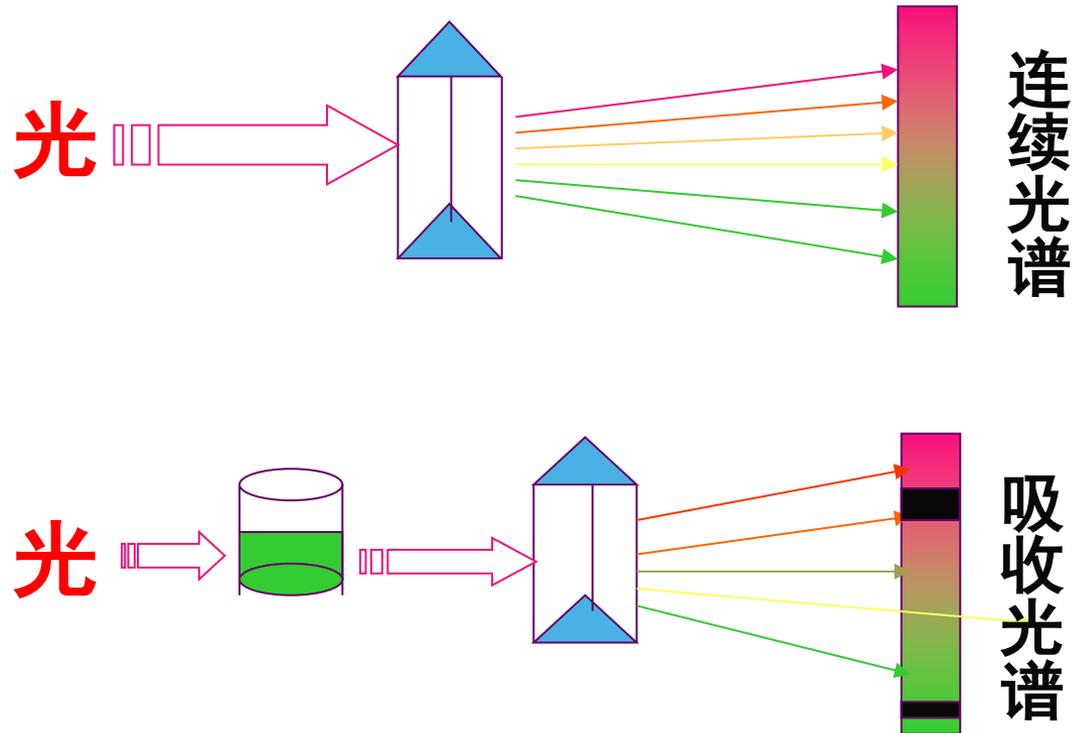
8个异戊二烯
衍生而成的四
萜分子



叶黄素

2 叶绿体色素光学特性

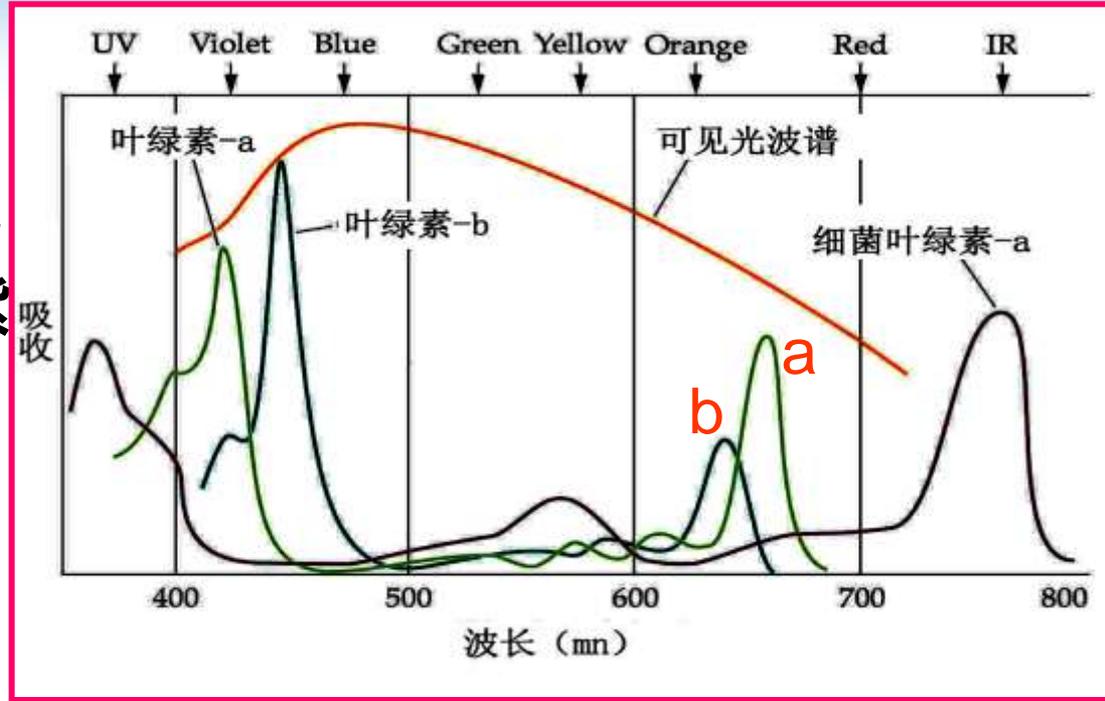
连续光谱与吸收光谱 (absorption spectrum)



叶绿素吸收光谱

有两个强吸收峰区

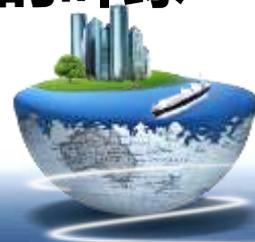
640 ~ 660nm的红光
430 ~ 450nm的蓝紫光
对橙光、黄光吸收较少，
尤以对绿光的吸收最少。



❖ 叶绿素a在红光区的吸收峰比叶绿素b的高，蓝紫光区的吸收

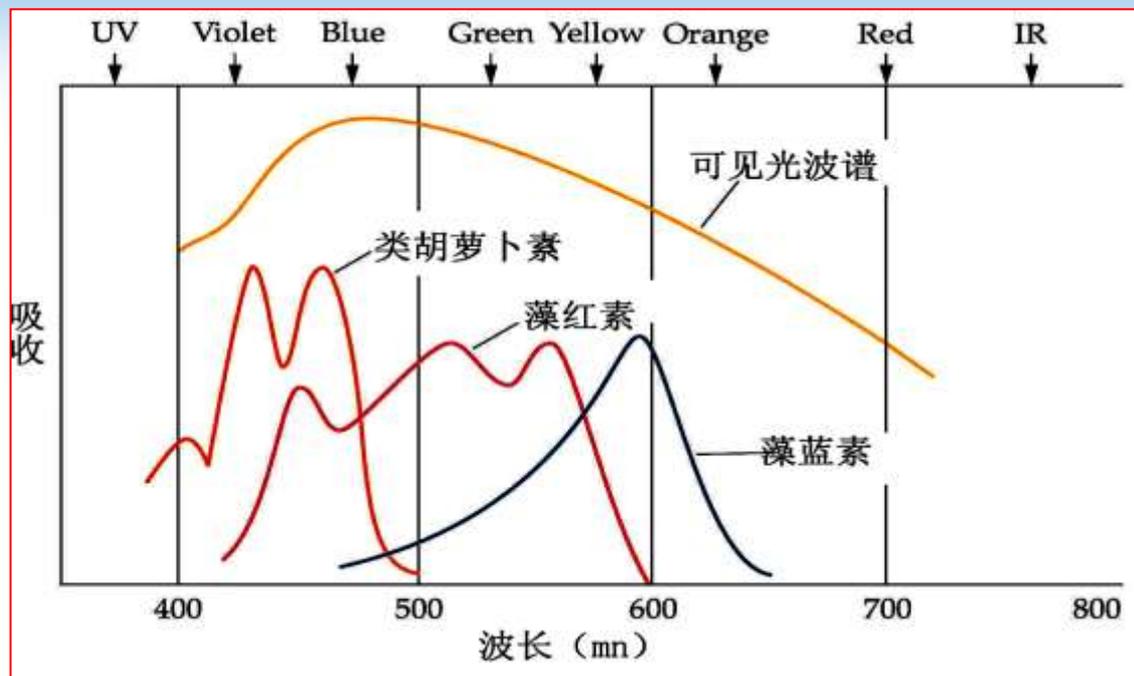
峰则比叶绿素b的低。

❖ 阳生植物叶片的叶绿素a/b比值约为3 : 1，阴生植物的叶绿素a/b比值约为2.3 : 1。



类胡萝卜素和藻胆素的吸收光谱

- 类胡萝卜素吸收带在400~500nm的蓝紫光区
- 基本不吸收黄光，从而呈现黄色。



- 藻蓝素的吸收光谱最大值是在橙红光部分
- 藻红素则吸收光谱最大值是在绿光部分
- 植物体内不同光合色素对光波的选择吸收是植物在长期进化中形成的对生态环境的适应，这使植物可利用各种不同波长的光进行光合作用。



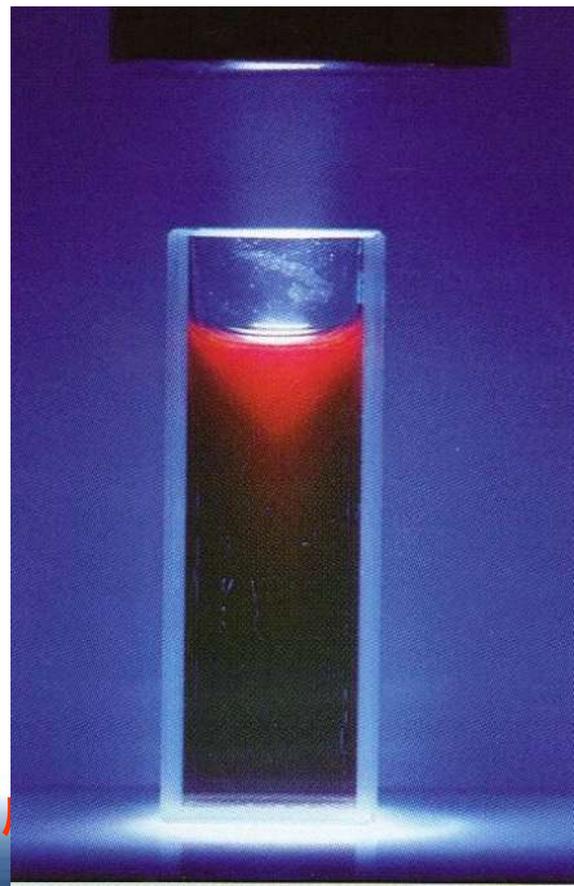
荧光 (fluorescence) 与磷光 (phosphorescence)

荧光现象:

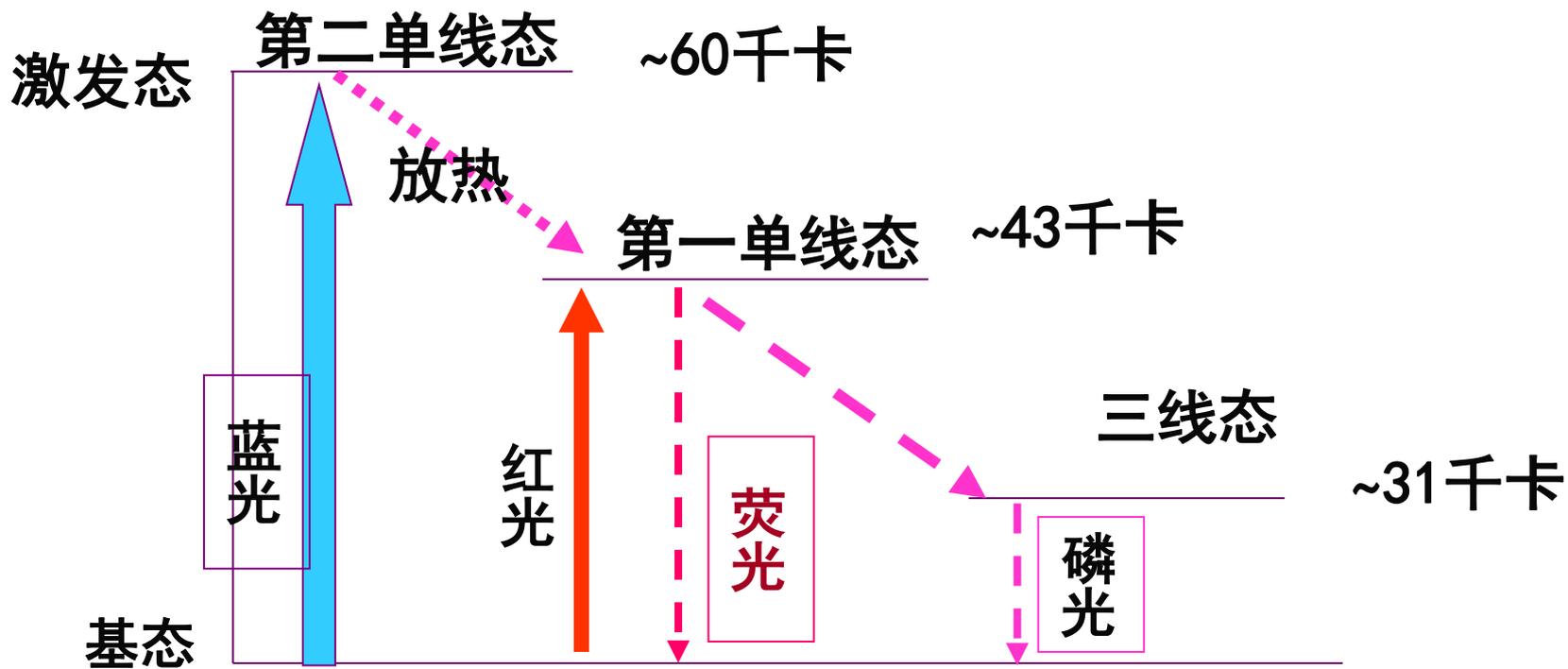
叶绿素提取液在透射光下为绿色，在反射光下为暗红色，这种现象叫荧光现象，发出的光叫荧光。

磷光现象:

当荧光出现后，立即中断光源，色素分子仍能持续短时间的“余辉”，这种现象，叫磷光现象，发出的光叫磷光。



荧光和磷光现象的产生



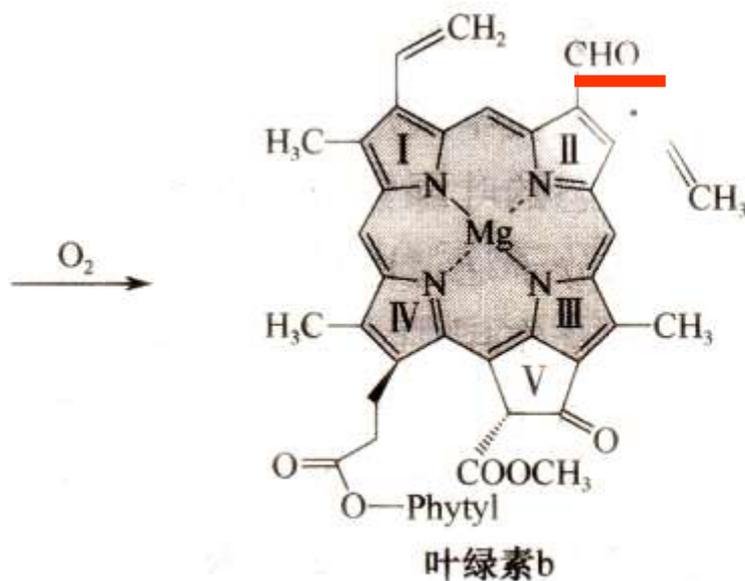
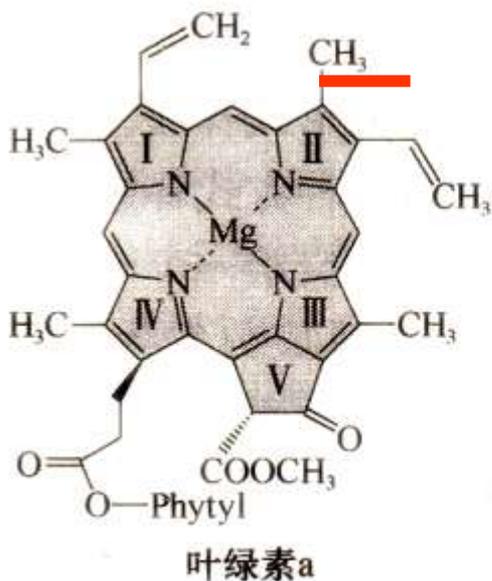
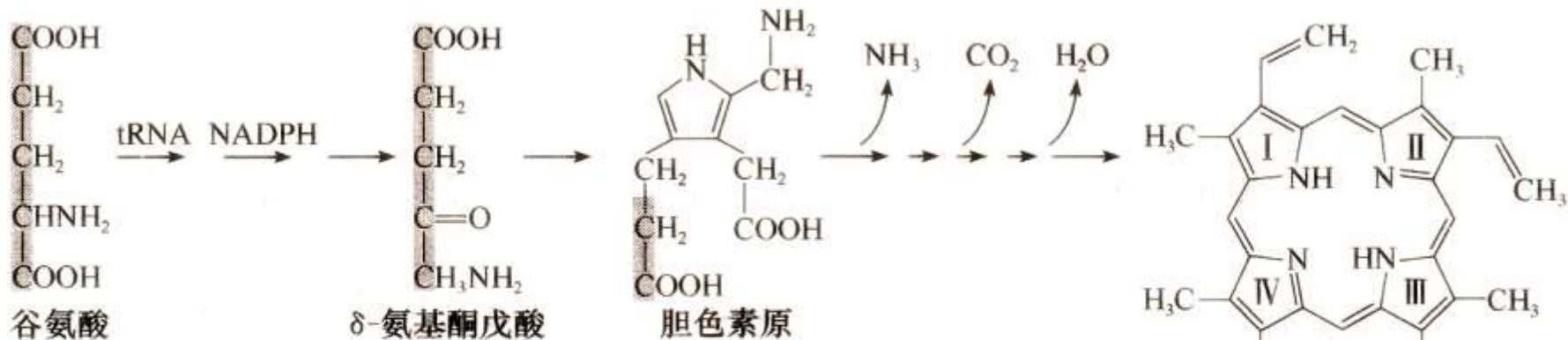
叶绿素分子受光激发时电子能量水平图解



3、叶绿素的生物合成

①谷氨酸是合成叶绿素的起始物质

②叶绿素a氧化即形成叶绿素b

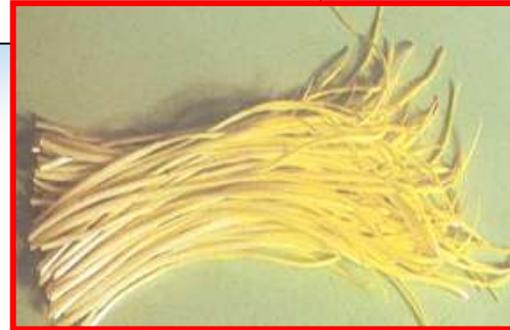


三、影响叶绿素合成的环境因素

(1) 光

光是影响被子植物叶绿素合成的一个主要条件。

- 一方面叶绿素的合成需要光，另一方面，叶绿素又会受光氧化而破坏。
- 黑暗中生长的幼苗呈黄白色，遮光或埋在土中的茎叶也呈黄白色。这种因缺乏某些条件而影响叶绿素形成，使叶子发黄的现象，称为黄化现象。
- 黑暗使植物黄化的原理常被应用于蔬菜生产中，如韭黄、白芦笋、豆芽菜、葱白、蒜白、大白菜等生产。



(2) 温度

- 叶绿素的生物合成是一系列酶促反应，受温度影响。
- 叶绿素形成的最低温度约 2°C ，最适温度约 30°C ，最高温度约 40°C 。
- 秋天叶子变黄和早春寒潮过后秧苗变白，都与低温抑制叶绿素形成有关。
- 高温下叶绿素分解大于合成，因而夏天绿叶蔬菜存放不到一天就变黄；相反，温度较低时，叶绿素解体慢，这也是低温保鲜的原因之一。

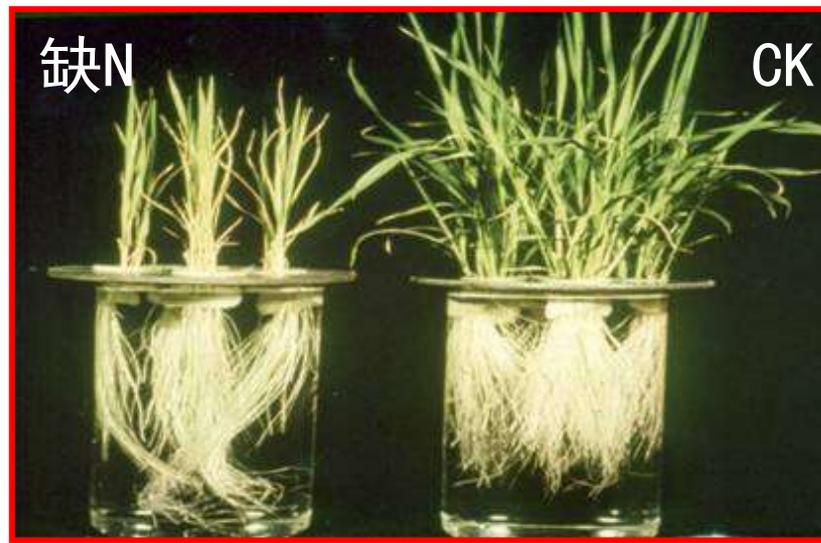


(3) 营养元素

- 叶绿素的形成必须有一定的**营养元素**。
- 氮和镁是叶绿素分子的组分，铁、锰、铜、锌等可能是叶绿素合成过程中某些酶的活化剂，缺乏时也会引起**缺绿病**。
- 其中尤以氮的影响最大，因而叶色的深浅可作为衡量植株体内氮素水平高低的标志。



萝卜缺N的植株老叶发黄



缺N老叶发黄枯死，新叶色淡，生长矮小，根系细长，分枝（蘖）减少。





棉花缺Mg网状脉



苹果缺Fe新叶脉间失绿



黄瓜缺锰叶脉间失绿



柑桔缺Zn小叶症 伴脉间失绿



(4) 水分

叶组织遇到干旱等条件而缺水时,不仅叶绿素的形成受抑制,而且叶片中已形成的叶绿素也会受到破坏,所以在叶片失水后最先出现的症状就是叶色失绿发黄。



遗传因素

叶绿素的形成受遗传因素控制，如水稻、玉米的白化苗以及花卉中的斑叶不能合成叶绿素。有些病毒也能引起斑叶。



四、叶色与各类光合色素的含量

一般而言：

叶绿素：类胡萝卜素 $\approx 3:1$

叶绿素a：叶绿素b $\approx 3:1$

叶黄素：胡萝卜素 $\approx 2:1$



由于叶绿素含量占优势,所以正常叶片呈现绿色。

当秋天来临时,叶绿素合成减少、降解增多,而类胡萝卜素比较稳定,所以叶片呈现黄色。

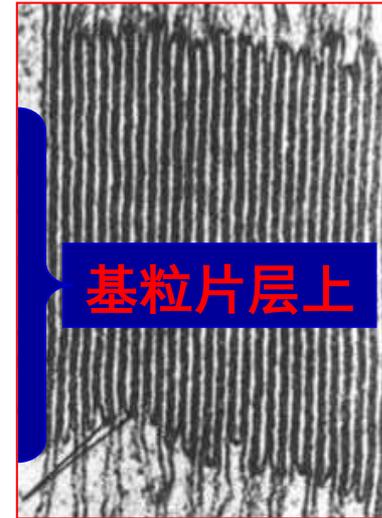


第三节 光合作用的机理

光反应

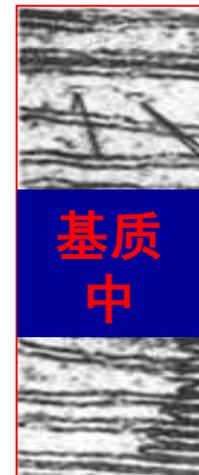
原初反应——光能的吸收、传递与转换
(光能转换成电能)

电子传递和光合磷酸化——(电能 → 活跃的的化学能)



暗反应

碳素同化——(活跃的的化学能 → 稳定的化学能)



一、原初反应(primary reaction)：

光能的**吸收**、

传递、

转换（光能转换成电能）



原初反应特点：

- ①**速度非常快**：可在 $10^{-15} \sim 10^{-9}$ 秒内完成；
- ②**与温度无关**：可在 -196°C (77K, 液氮温度)或 -271°C (2K, 液氦温度)下进行；
- ③**量子效率接近1**：由于速度快，散失的能量少，所以其量子效率接近1。



(一)光能的吸收

光具有波粒二重性：光量子的能量与其频率成正比,而与波长成反比。

$$E_{\text{蓝光}} > E_{\text{红光}}$$

叶绿素分子吸收一定能量的光量子后从基态转变为激发态。



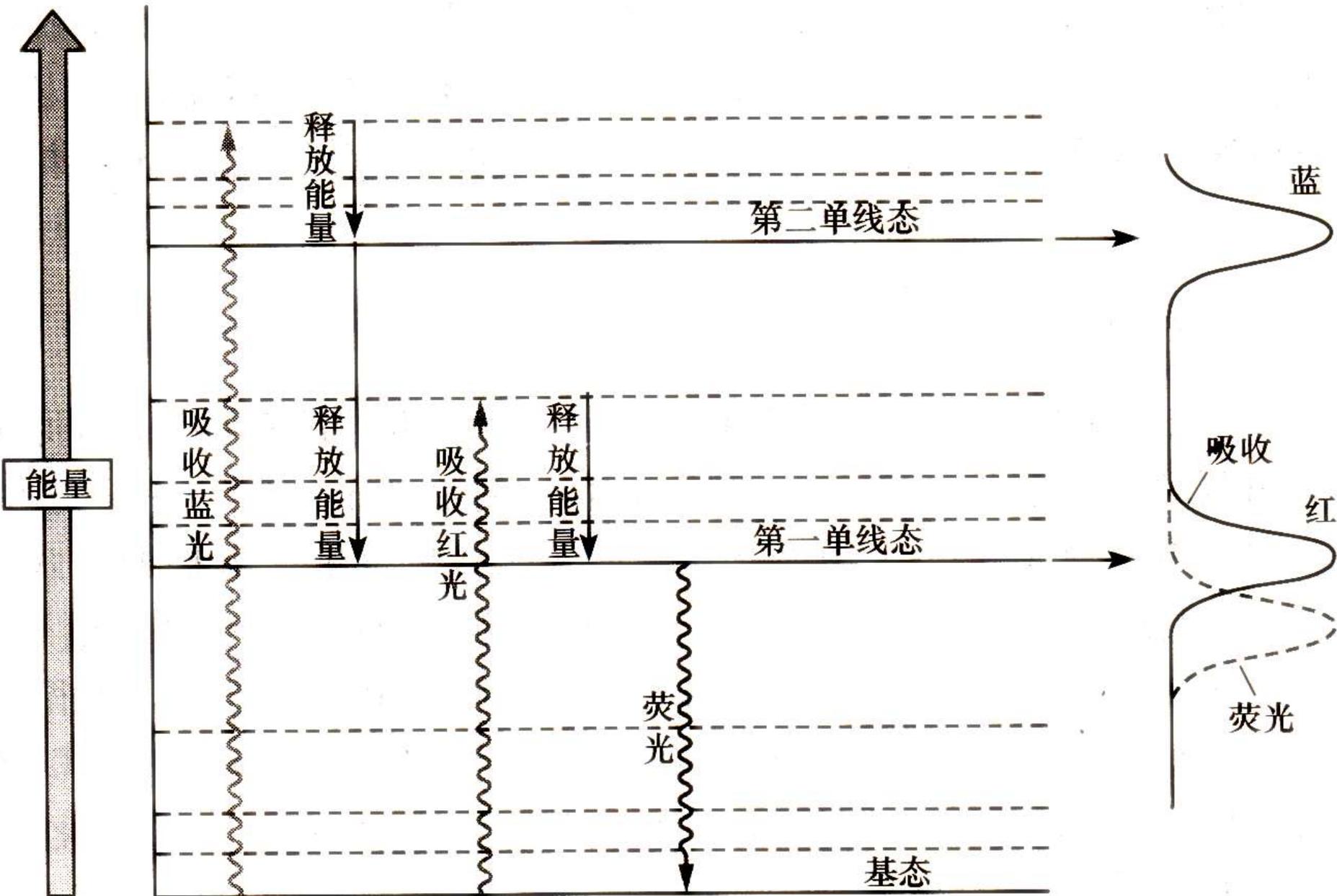


图 5-6 叶绿素的光能吸收及释放

(二)光能的传递

研究表明在饱和状态下,约2500个叶绿素分子产生1分子 O_2 。

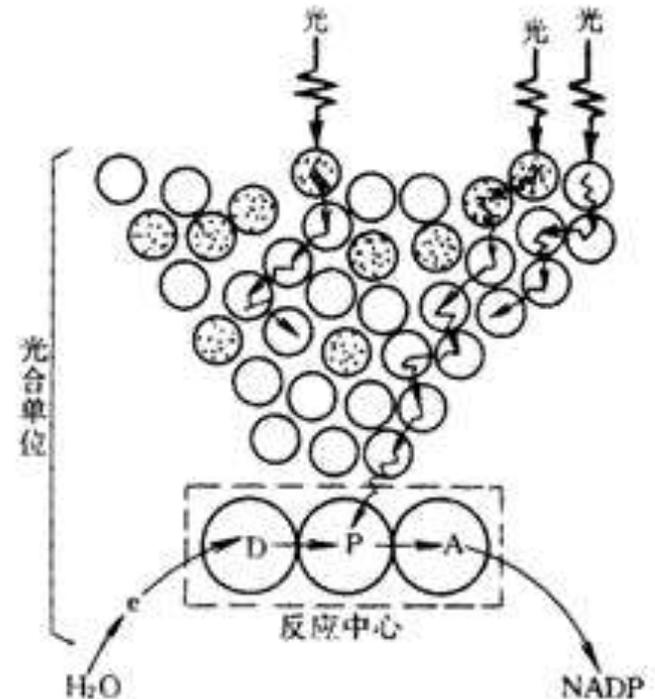
因此植物采取的策略是:许多色素(天线色素)将能量传递到少数公共中心(反应中心色素)。

传递特点:

①速率快

②效率高

类胡萝卜素传递至叶绿素a的效率是90%
叶绿素b传递至叶绿素a的效率是100%



反应中心色素：少数叶绿素a分子,与特定的蛋白质相结合,处于特殊状态,能进行光化学反应,将光能转换为电能。

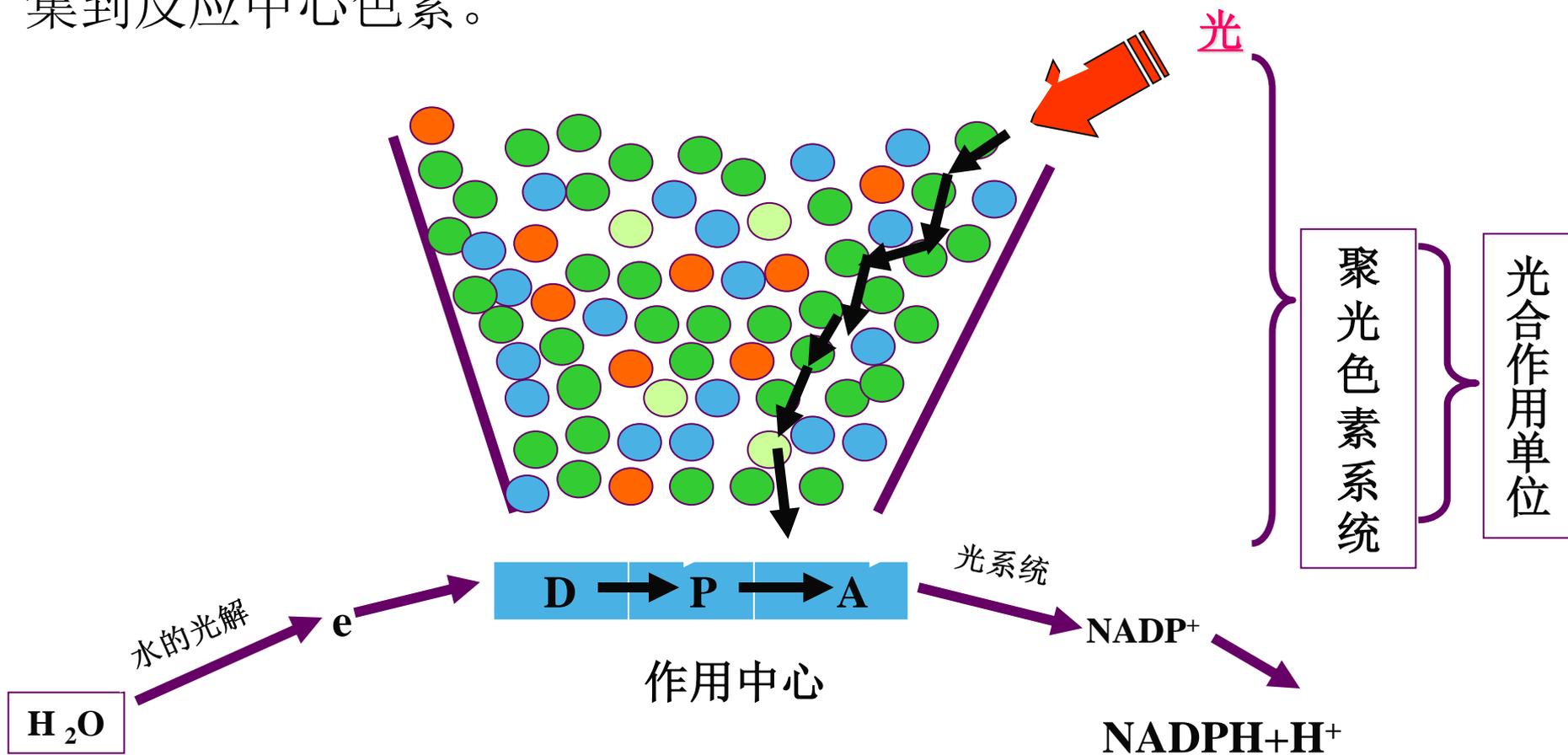
天线色素(聚光色素)：包括大部分叶绿素a分子、全部的叶绿素b、类胡萝卜素和藻胆素,它们没有光化学活性,不能转换光能,其作用是吸收光能并传递给反应中心色素。



光能传递方向:

① 能量既可在相同色素分子之间传递,亦可在不同色素分子之间传递。

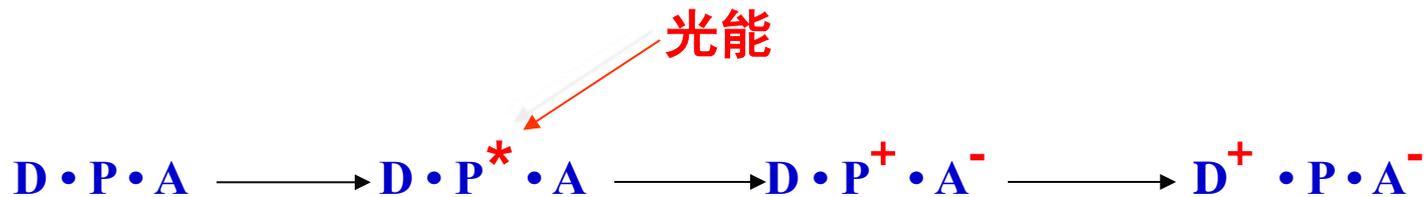
② 不同色素分子之间传递总体上光能沿着波长较长即能量水平降低的方向传递,即**类胡萝卜素**→**叶绿素b**→**叶绿素a**,最后把能量汇集到反应中心色素。



(三) 光化学反应：

原初反应的最后一步，即光能转换成电能，在**反应中心**完成，激活反应中心色素分子(P)。

反应中心：包括一个反应中心色素分子(P)、一个原初电子供体(D)和一个原初电子受体(A)。



在高等植物中,反应中心色素的最终电子受体是**NADP⁺**,最初电子供体是**H₂O**。

二、光合电子传递和光合磷酸化

过程:

(1)在光合作用的原初反应中,聚光色素吸收的光能在反应中心色素引起电荷分离,释放出高能电子,该电子沿着一定路径进行传递,最终**将氧化态的NADP⁺还原为NADPH**;

(2)与此过程相伴随的是H₂O光解氧化和H⁺的跨膜转运作用,形成跨类囊体膜的H⁺梯度,推动ATP合成酶**将ADP转化为ATP**。

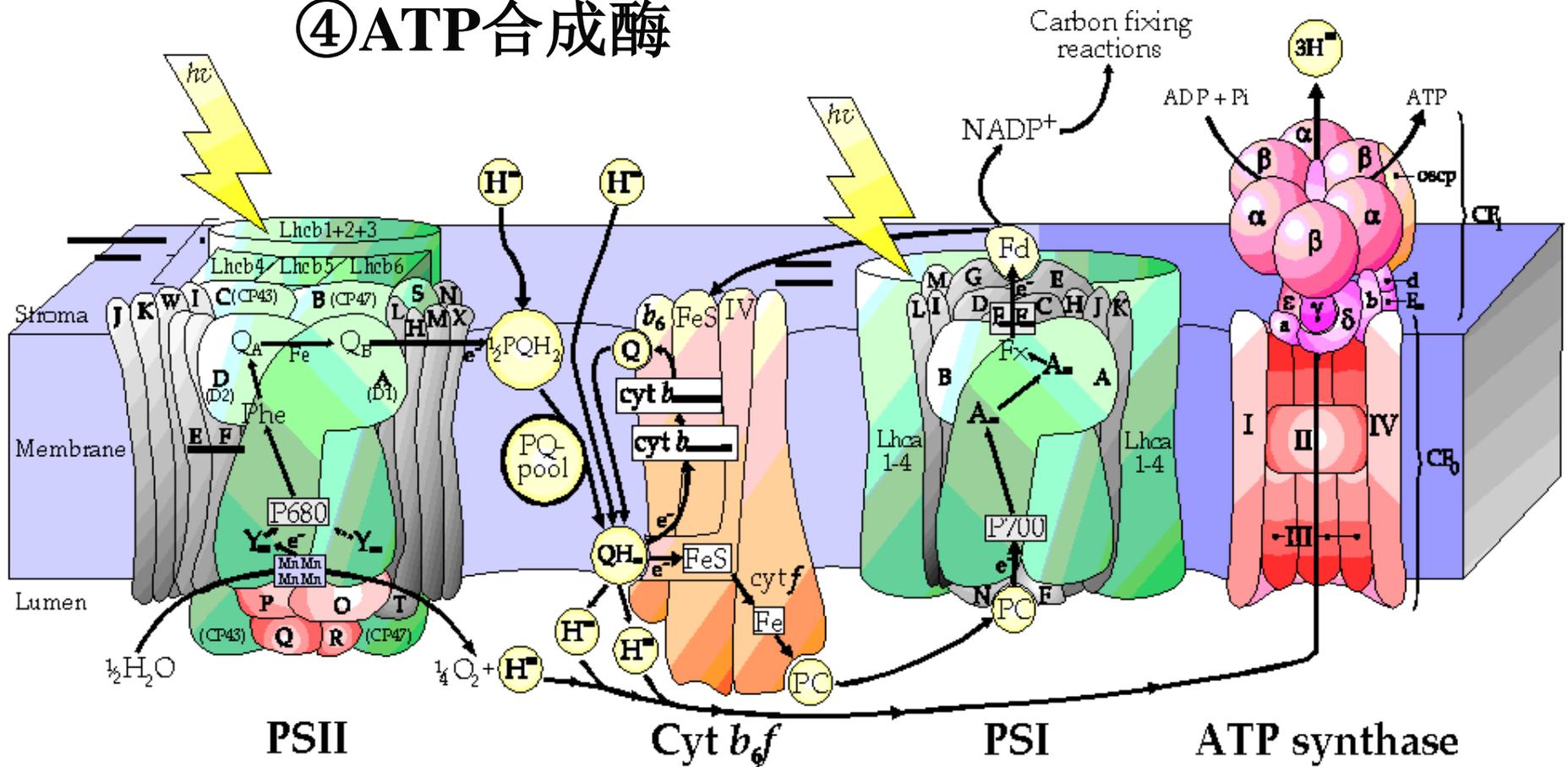
这样,光合色素捕获的能量就被贮存在NADPH和ATP中,形成了同化力,用于暗反应中CO₂的同化或硝酸盐的还原等。

将电能转换成活跃的的化学能的过程



成员:

- ①光系统II(PSII)复合体
- ②细胞色素 b_6/f 复合体
- ③光系统I(PSI)复合体
- ④ATP合成酶



两个光系统的发现:

红降(red drop): 当波长大于680nm(长波红光)时,虽然光量子仍被叶绿素大量吸收,光合效率却急剧下降的现象。

双光增益效应(爱默生效应): 在长波红光(>685nm)照射下补照短波红光(约650nm),则光合效率显著增加,大于两种波长光单独照射时的光合效率之和的现象。

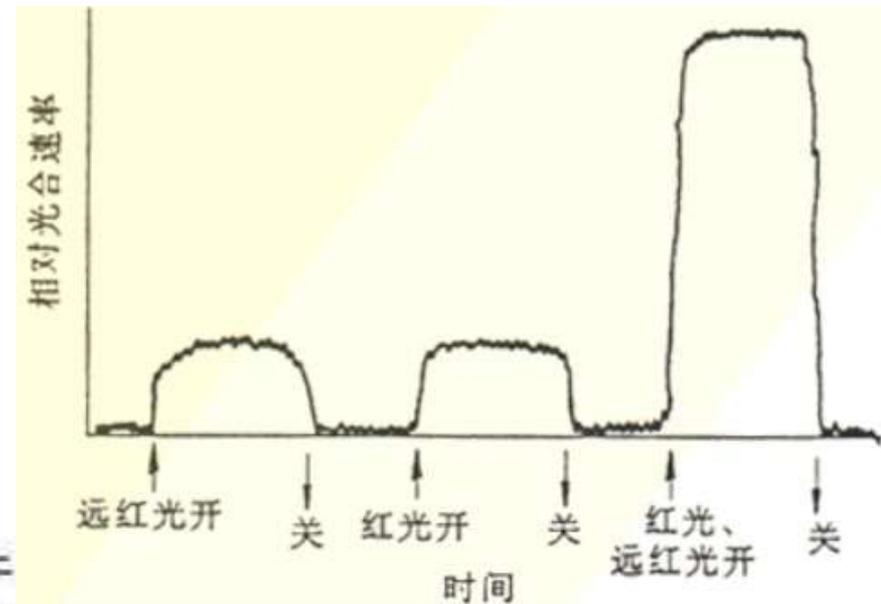
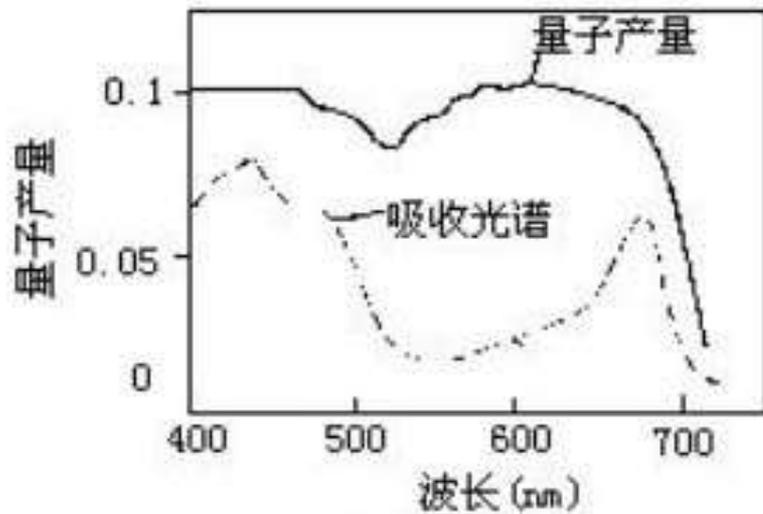
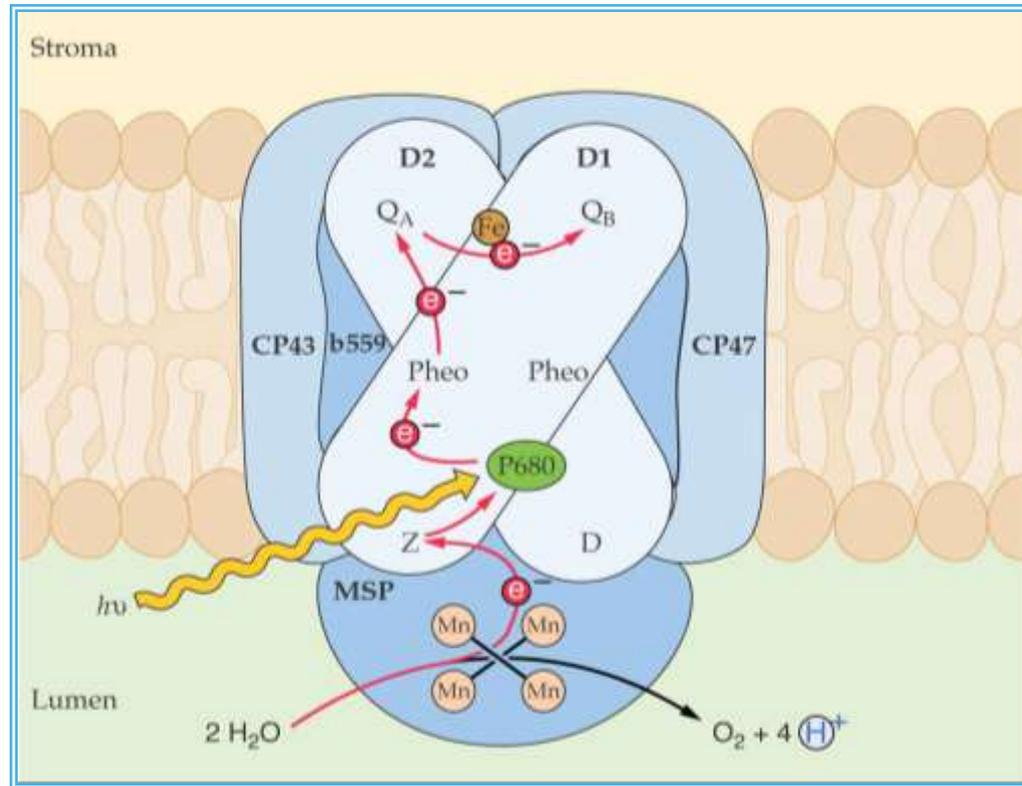


图 “红降”效应。光合作用的量子产量在波长大于680nm的远红光下显著下降,说明单独远红光对驱动光合作用是无效的。接近500nm波长,量子产量稍微下降是由于利用辅助色素,类胡萝卜素吸收的光进行的光合作用效率低些。虚线表示叶绿体的吸收光谱

PSII复合体

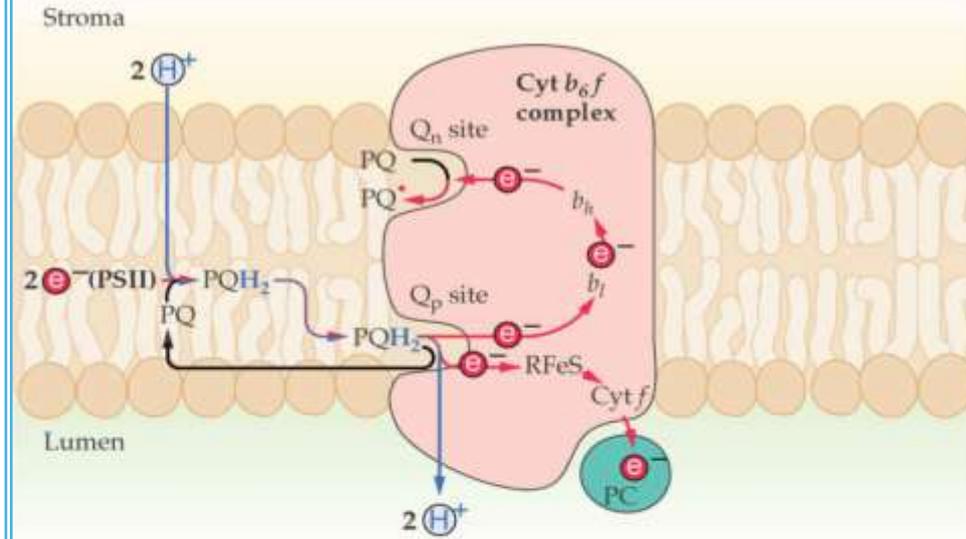
作用是吸收光能并在反应中心色素P680发生光化学反应,将光能转化为电能,同时进行水的光解产生质子和释放O₂。PSII复合体颗粒较大,直径175Å,存在于类囊体膜垛叠区的内侧,主要由反应中心复合体、捕光色素复合体(LHC)和放氧复合体(OEC)三个部分构成。



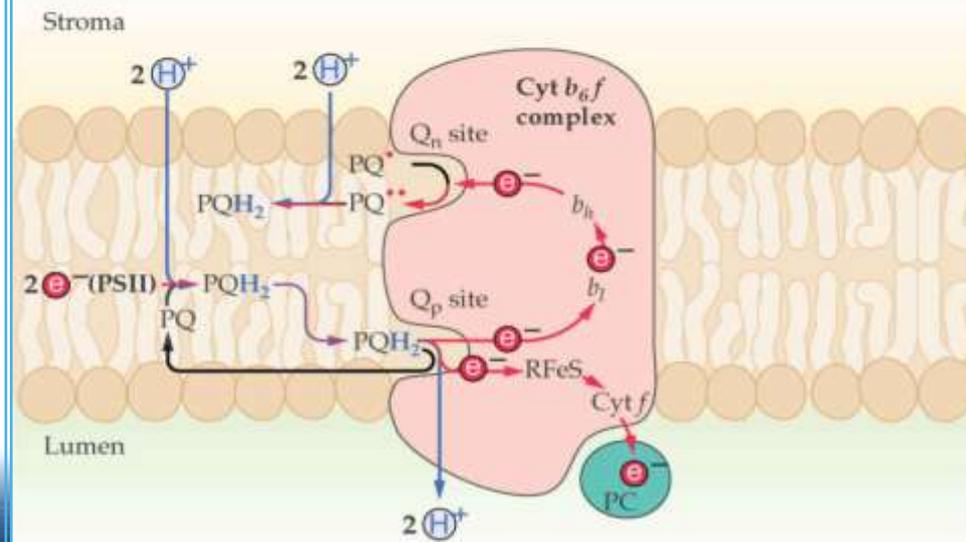
Cytb₆/f复合体

➤ Cyt b₆/f 复合体作为连接 PSII 与 PS I 两个光系统的中间电子载体系统，包含3个电子传递体，即 cytb₆、cytbf 和 2Fe-2S 铁硫蛋白。

(A) First turnover

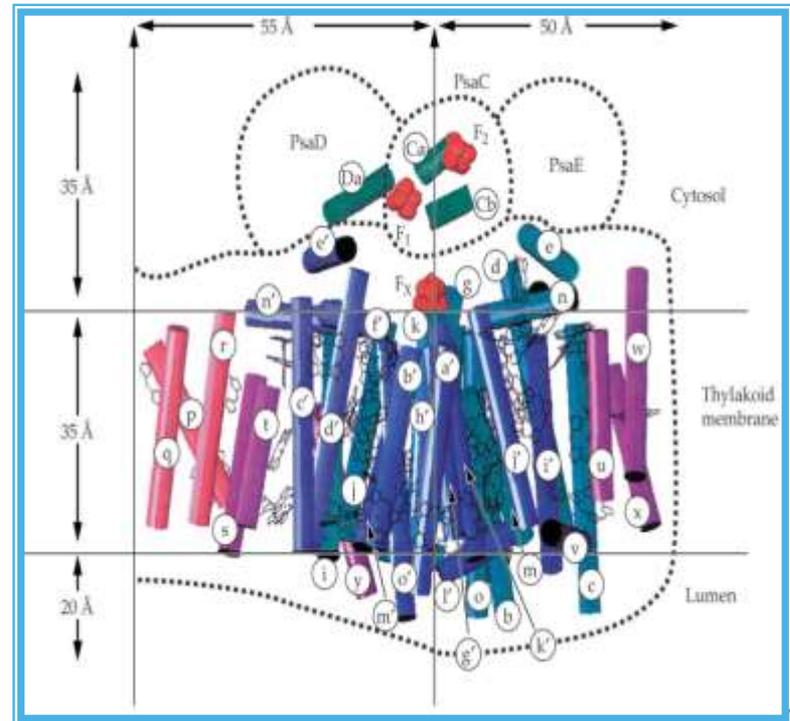
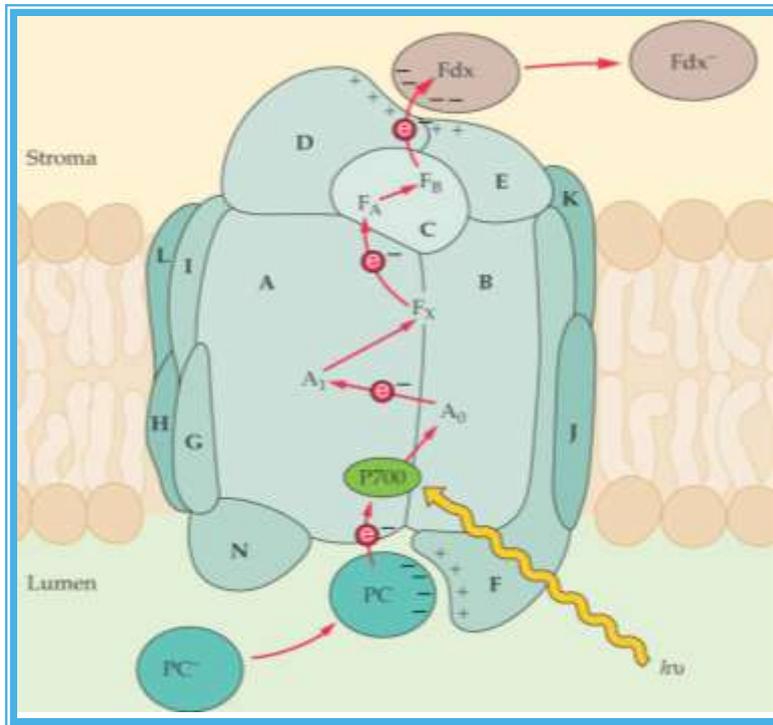


(B) Second turnover



PSI复合体

PS I复合体的颗粒较小。位于类囊体非垛叠区膜外侧，约由15种不同的蛋白亚基组成，由反应中心和捕光色素复合体构成。



(三) 光合电子传递

发生部位：类囊体膜上

过程：由一系列氧化还原反应组成

三种类型：

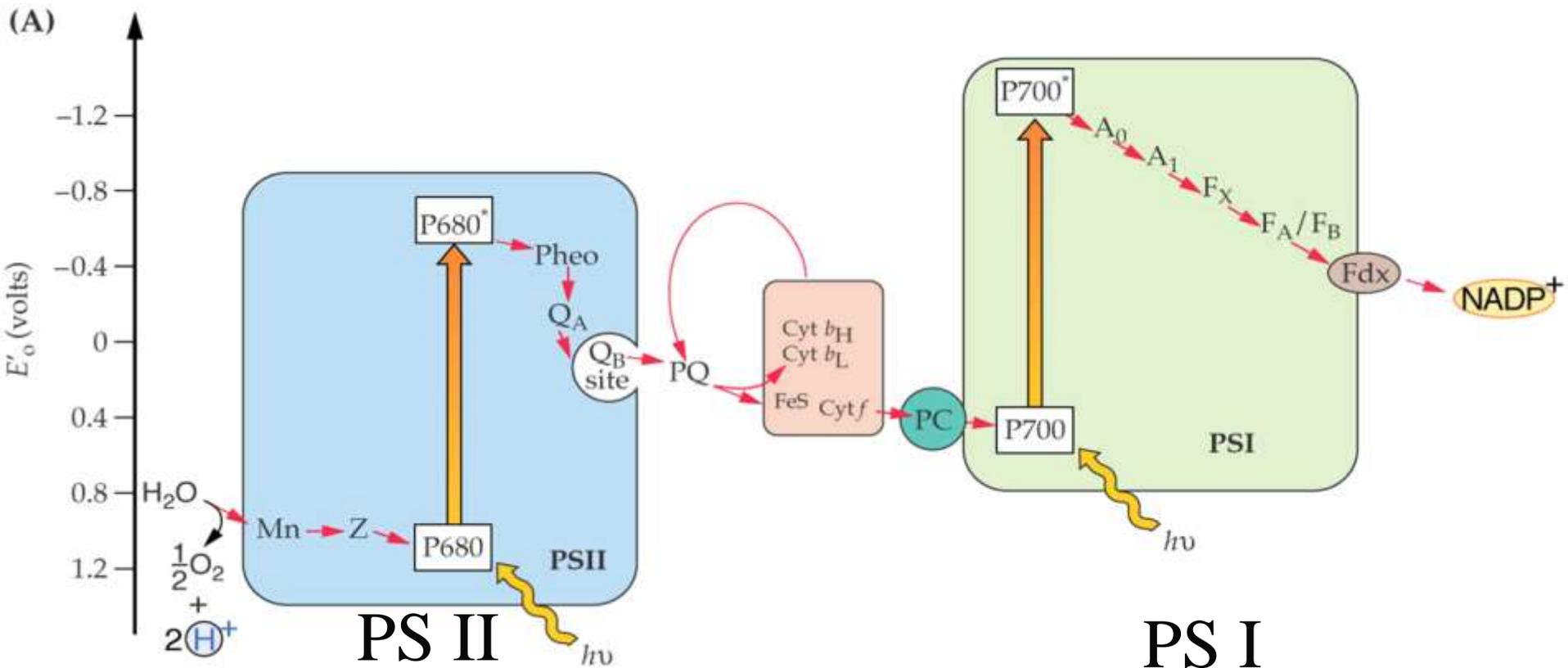
- ①非环式电子传递
- ②环式电子传递
- ③假环式电子传递



1. 非环式电子传递 (线性电子传递)

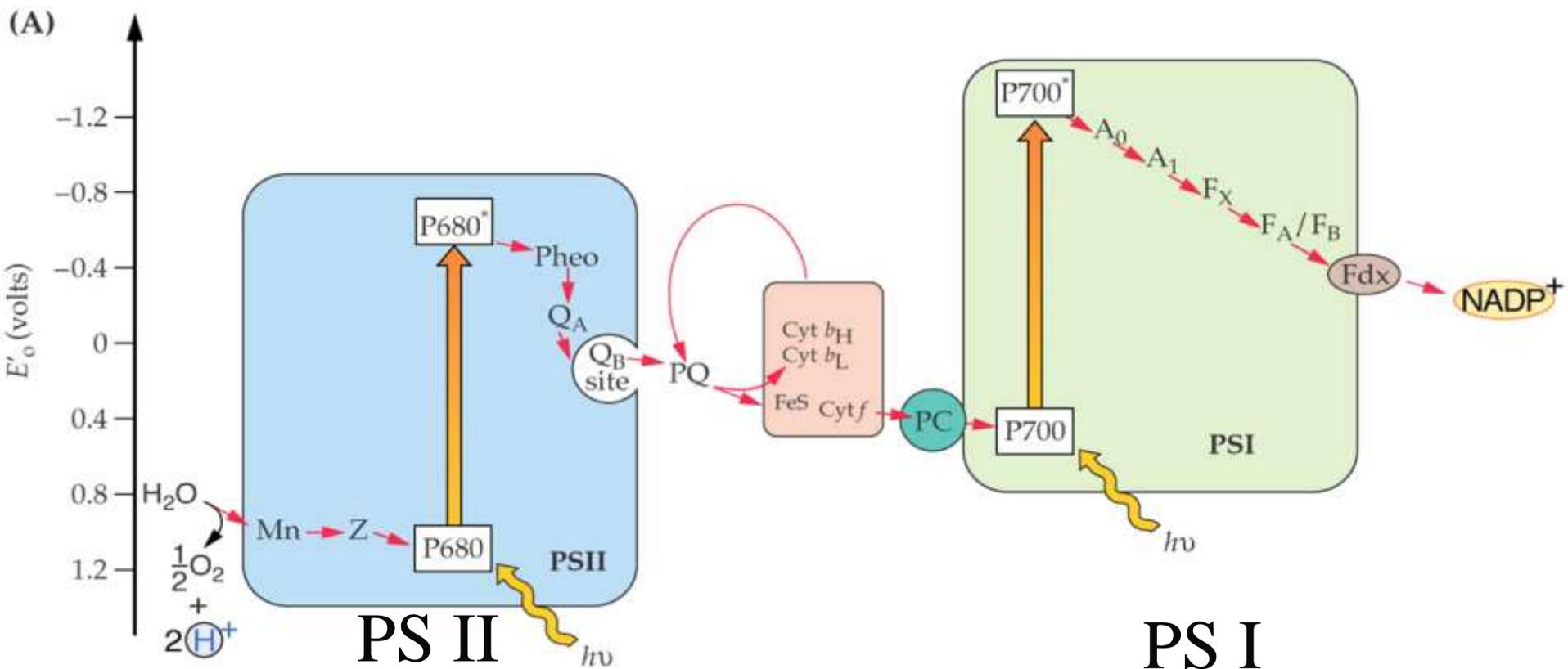
光合电子传递的主要形式

过程：水光解产生的电子经过PSII、细胞色素 b_6/f 复合体、PS I, 最终还原 NADP^+ 。



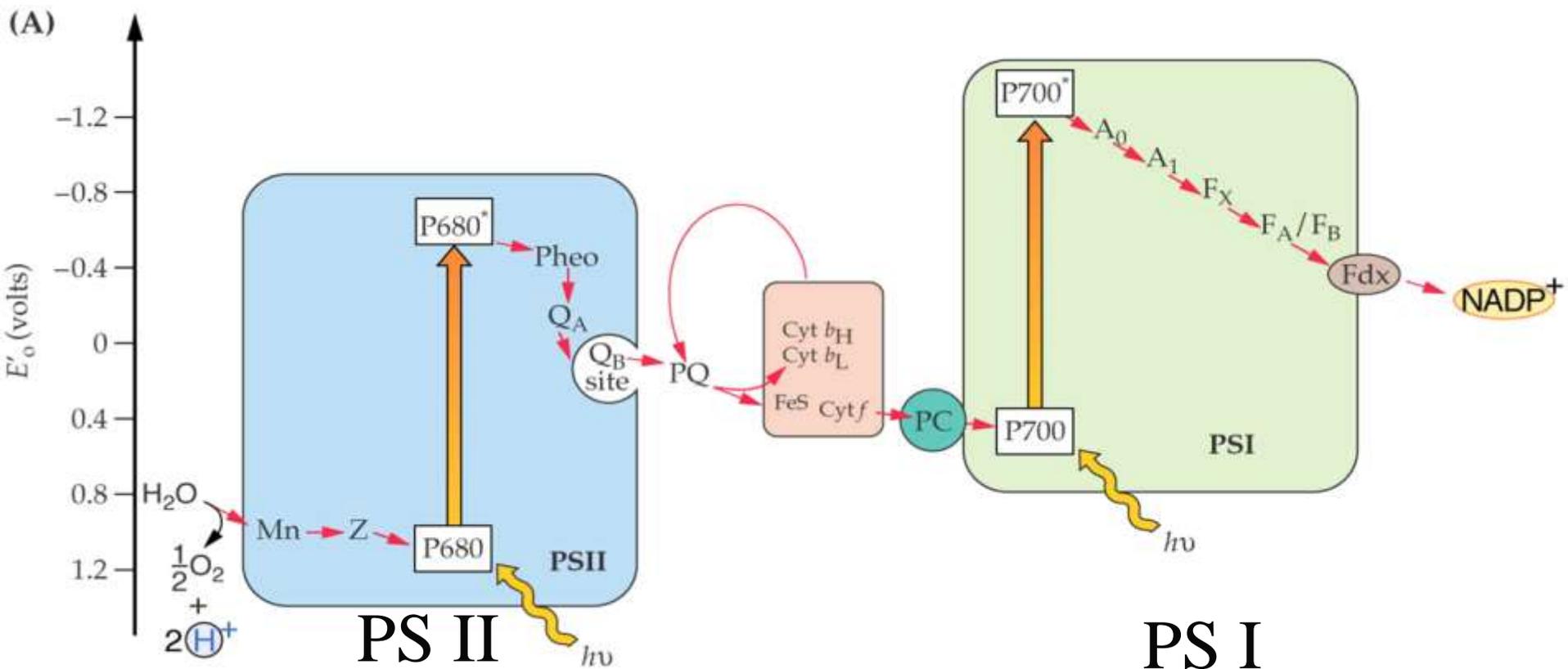
1. 非环式电子传递 (线性电子传递)

在这个电子传递中,各种电子传递体依据在传递过程中的顺序及氧化还原电位的高低,排列的图案类似英文字母“Z”,故称为**“Z”链**(Z scheme)。



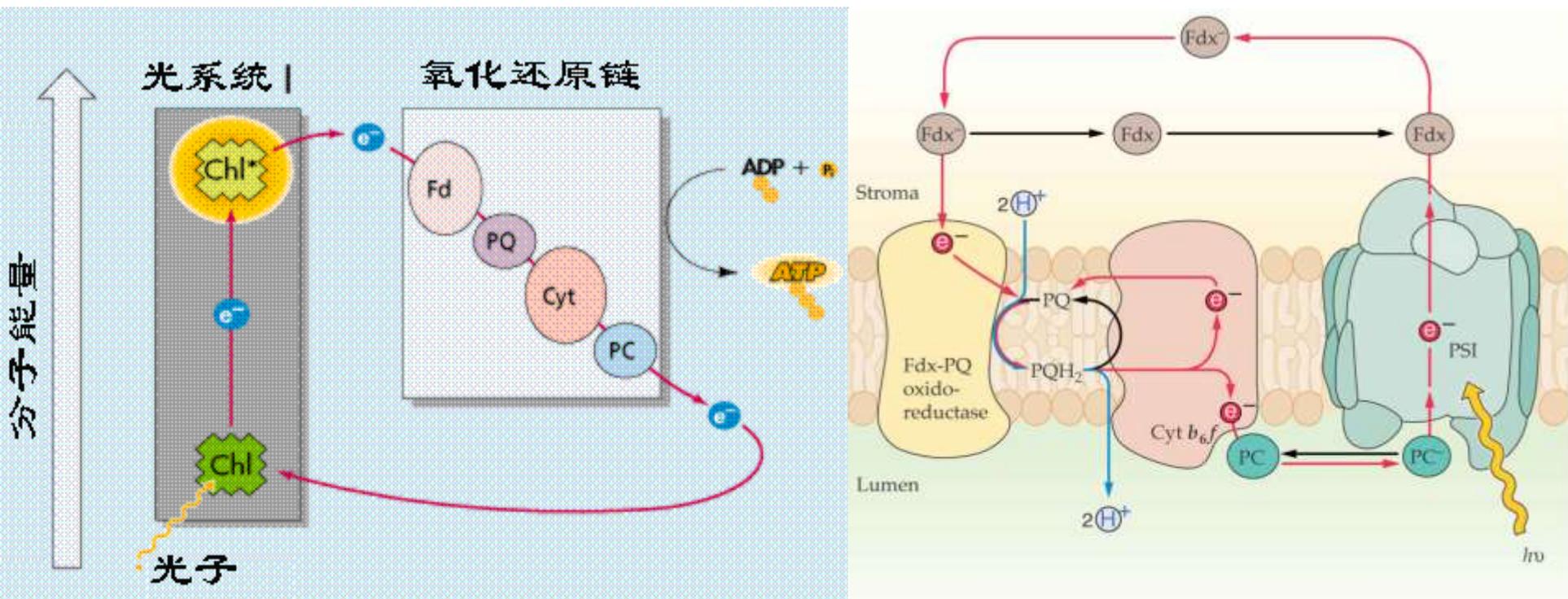
1. 非环式电子传递 (线性电子传递)

在非环式电子传递中,每释放1分子 O_2 ,分解2分子 H_2O ,分离出4个电子,PSII和PS I各需要吸收4个光量子,最终还原2分子 $NADP^+$ 。



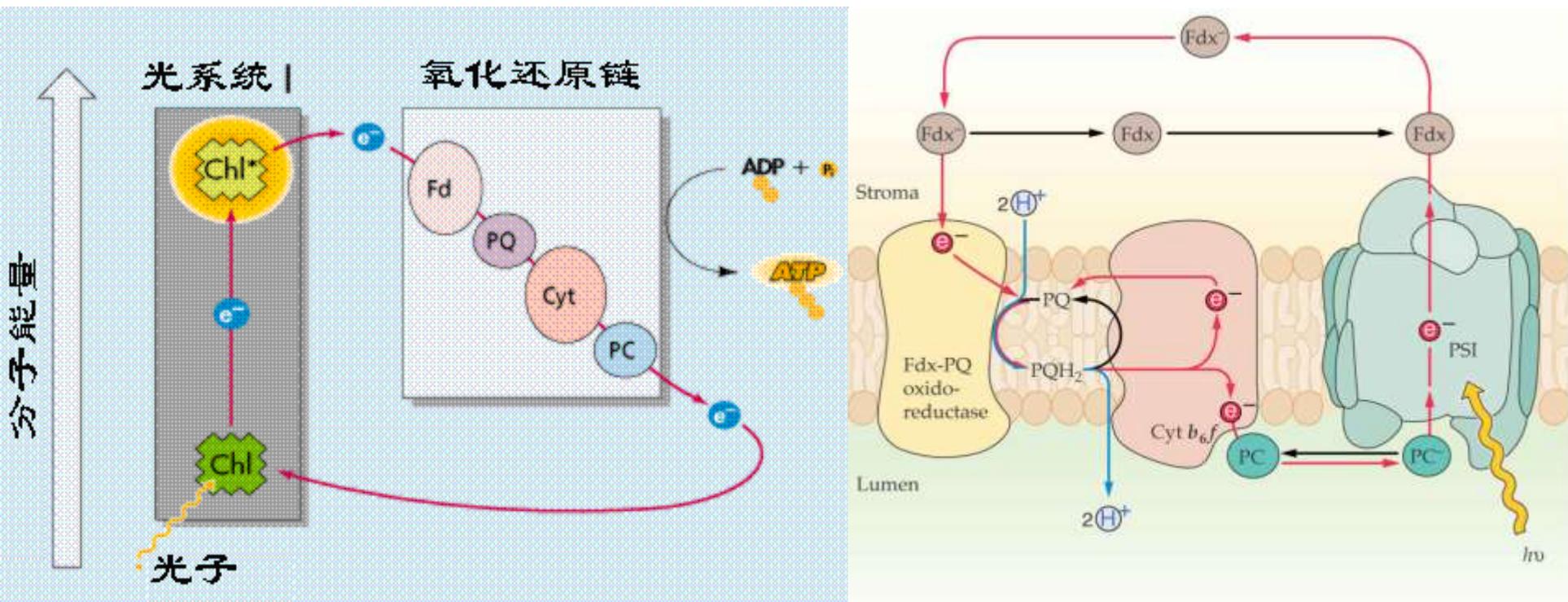
2. 环式电子传递

主要是指PS I吸收光量子分离出来的电子,经过细胞色素 b_6/f 复合体,再经过PC,返回PS I的过程。



2. 环式电子传递

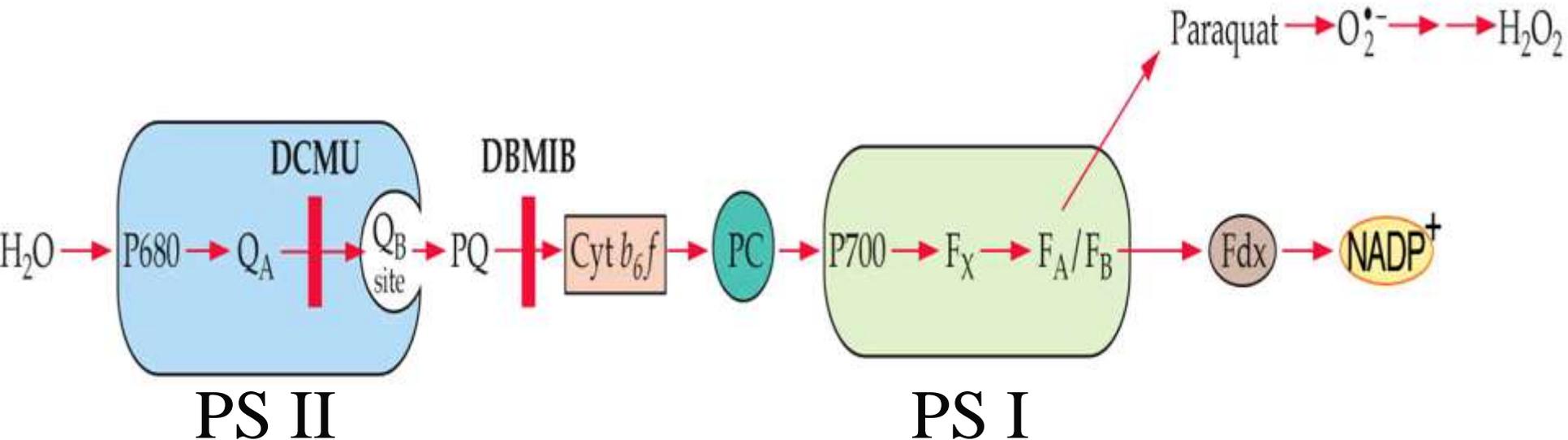
环式电子传递形成一闭合的回路,因此既不引起水的光解,也不产生NADPH,但能够引起跨膜质子梯度的形成,合成ATP。在植物需要较多ATP的情况下,这条途径具有重要的意义。



3. 假环式电子传递

指水分解产生的电子经过**PS II**、细胞色素 b_6/f 复合体、**PS I**还原 O_2 的过程。该途径与非环式传递的区别只是最终的电子受体是 O_2 ,而不是 $NADP^+$ 。

这一过程往往在强光下 $NADP^+$ 供应不足时发生。



(四)光合磷酸化

光合磷酸化：指叶绿体利用光能驱动电子传递，建立跨类囊体膜的质子动力势(PMF)，然后利用质子动力势将ADP和Pi合成为ATP的过程。

根据光合电子传递途径,光合磷酸化也相应地分为三种类型:①非环式光合磷酸化、②环式磷酸化和③假环式光合磷酸化。



三种光合磷酸化比较：

非环式光合磷酸化： 通过PSI和PSII进行的，电子传递是单向的开放通路，合成ATP及NADPH，并伴有H₂O的光解和O₂的释放。

环式光合磷酸化： 电子传递只经过PSI，是一个闭合的回路，合成ATP，但没有H₂O的光解和NADPH的形成。

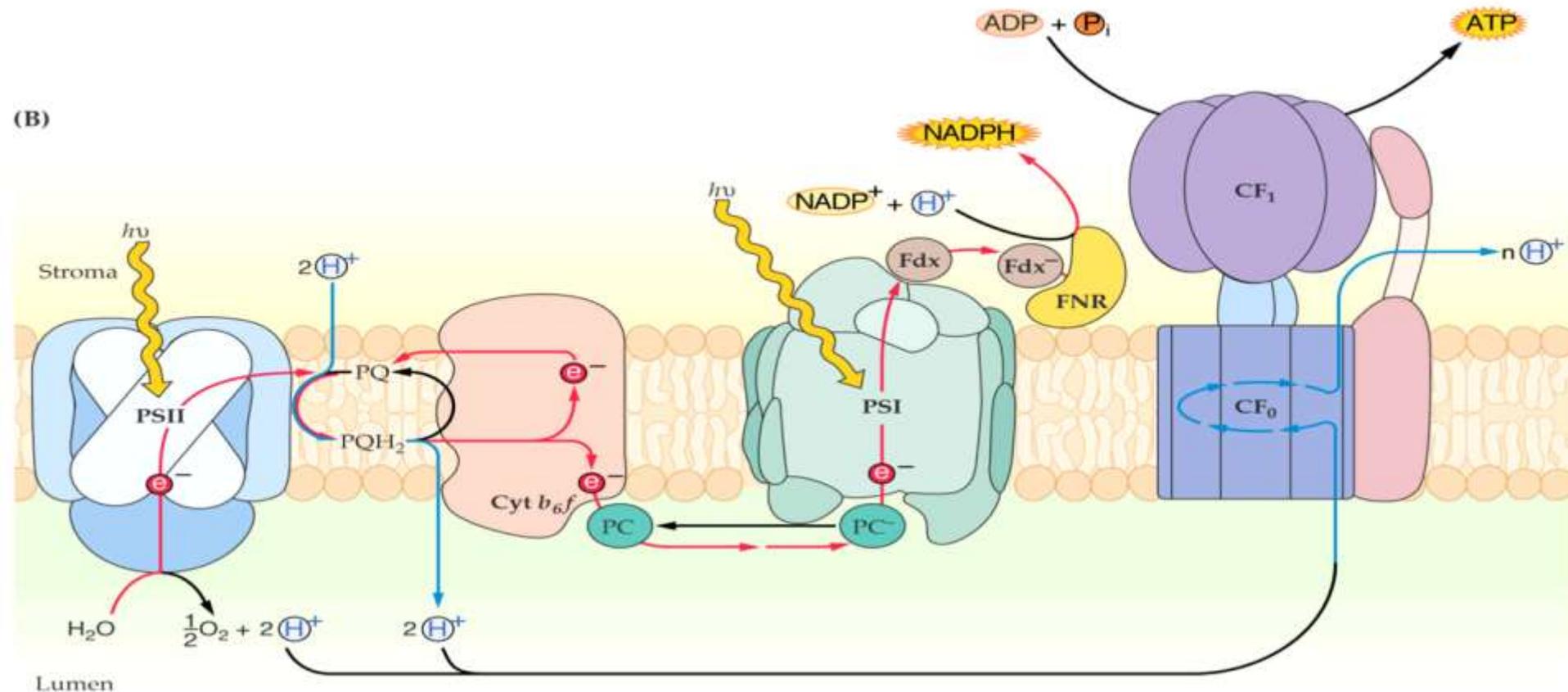
假环式光合磷酸化： 类似于非环式光合磷酸化，合成ATP，伴有H₂O的光解和O₂的释放，但不能形成NADPH。（NADP⁺不足）



1.化学渗透机制

根据化学渗透机制,光合磷酸化过程可分为两个阶段:

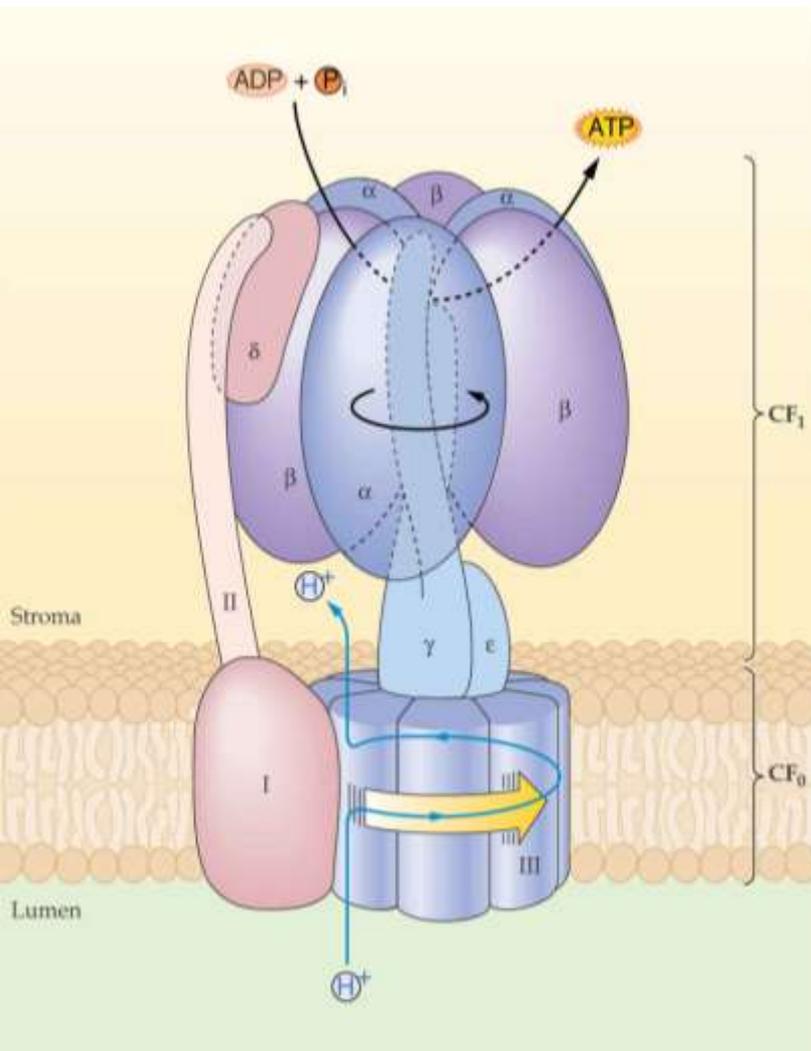
- ①光能驱动电子传递,在该过程中,在类囊体膜内侧积累 H^+ 形成跨膜的质子梯度;
- ②类囊体膜上ATP合成酶利用 H^+ 跨膜梯度驱动ATP的合成。



红线表示电子传递, 黑线表示质子传递, 蓝线质子越膜运输

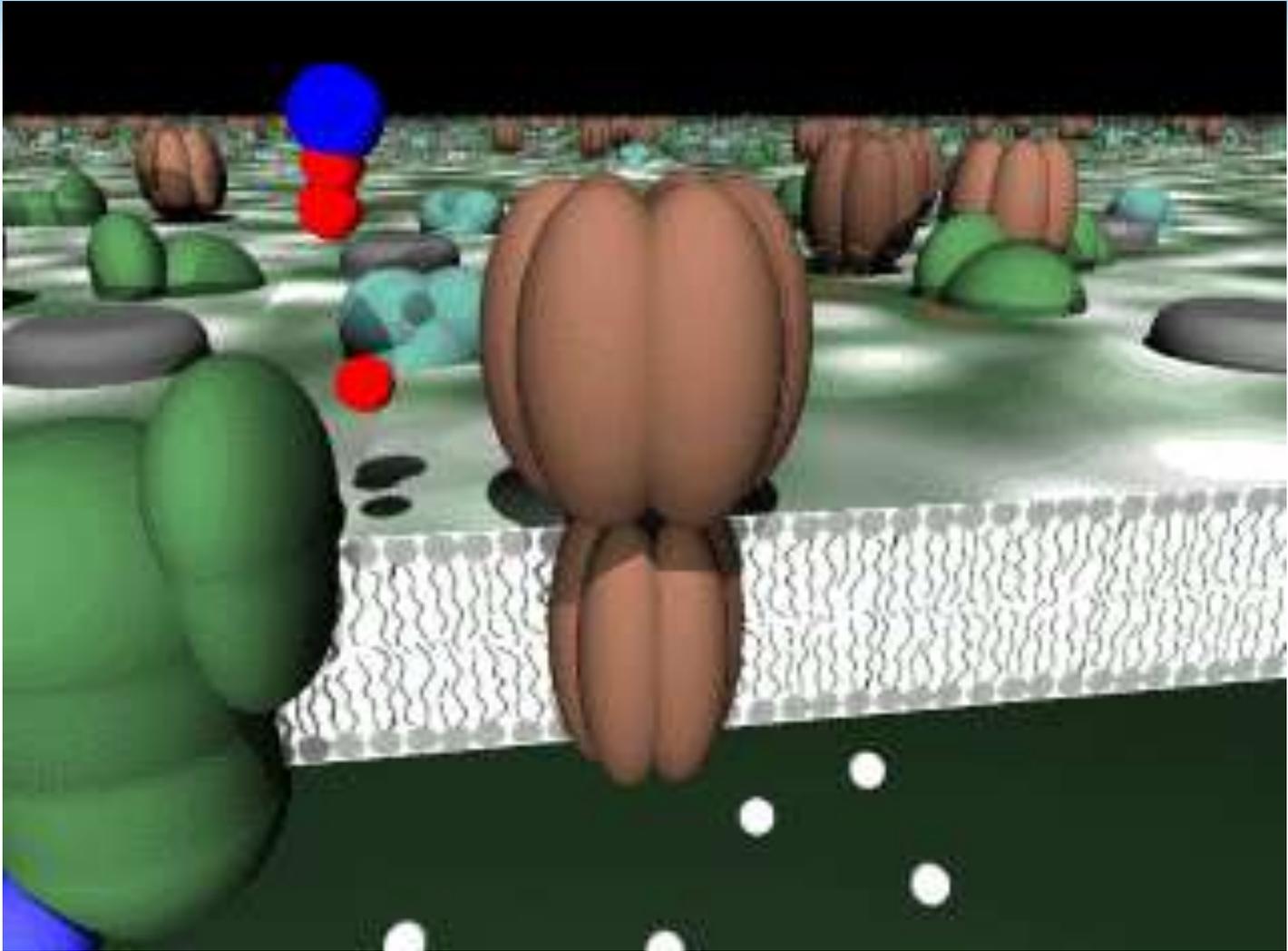
2. ATP合成酶

位于基质类囊体膜和基粒类囊体膜的非垛叠区



- 质子反向转移和合成ATP是在ATP酶 (ATPase)上进行的。ATP酶又叫ATP合成酶，也称偶联因子或CF₁-CF₀复合体（它将ATP的合成与电子传递和H⁺跨膜转运偶联起来）
- 叶绿体的ATP酶与线粒体、细菌膜上的ATP酶结构十分相似，都由两个蛋白复合体组成：一个是突出于膜表面的亲水性的“CF₁”；另一个是埋置于膜中的疏水性的“CF₀”。
- ATP酶由九种亚基组成，分子量为550 000左右，催化的反应为磷酸酐键的形成，即把ADP和P_i合成ATP。另外ATP酶还可以催化逆反应，即水解ATP，并偶联H⁺向类囊体膜内运输。





ATP合成酶工作原理

海南大学应用科技学院



三、CO₂同化

CO₂同化: CO₂的固定和还原,也称为暗反应和碳固定。

将无机物转化为有机物

将光反应形成的活跃化学能转化为稳定化学能

NADPH和ATP

CO₂



**蔗糖、淀粉、
脂肪、蛋白质**



三条途径:

- ❖ **C₃途径**（还原的戊糖磷酸途径、卡尔文循环The Calvin cycle）：**C₃植物**



- ❖ **C₄途径**(C₄ pathway)（四碳二羧酸途径）：
C₄植物



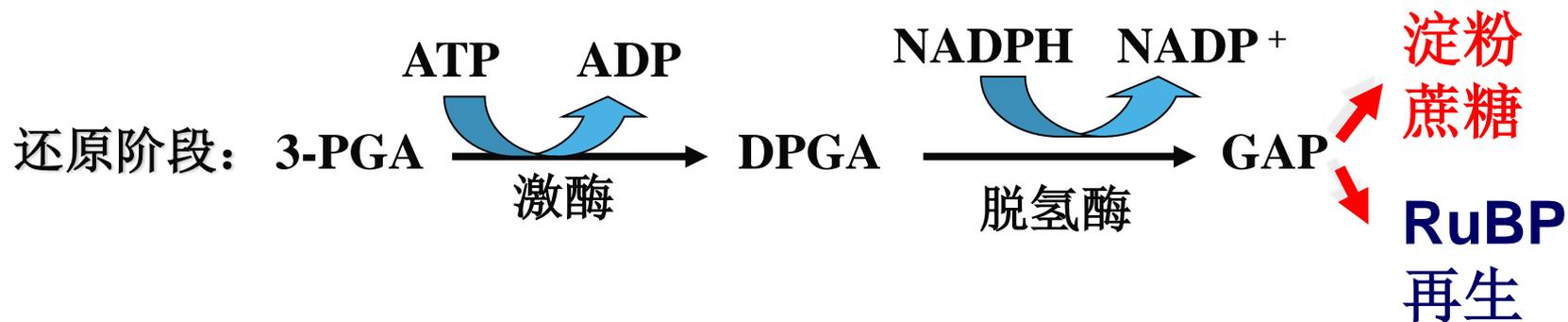
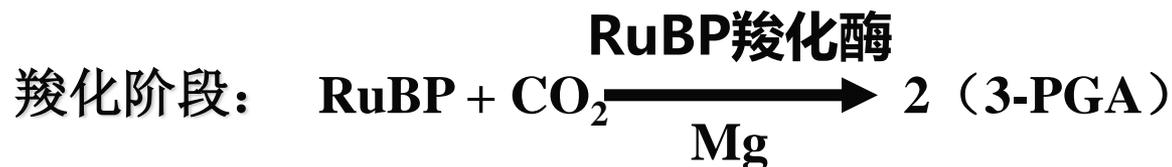
- ❖ **CAM途径**（景天酸代谢途径crassulacean acid metabolism pathway）：



其中,**C₃途径是最基本的CO₂同化途径**,因为只有**C₃途径具有合成蔗糖、淀粉、脂肪和蛋白质等稳定光合产物的能力**,另外两条途径只起**固定、转运或暂存CO₂**的作用,不能单独形成稳定的光合产物。



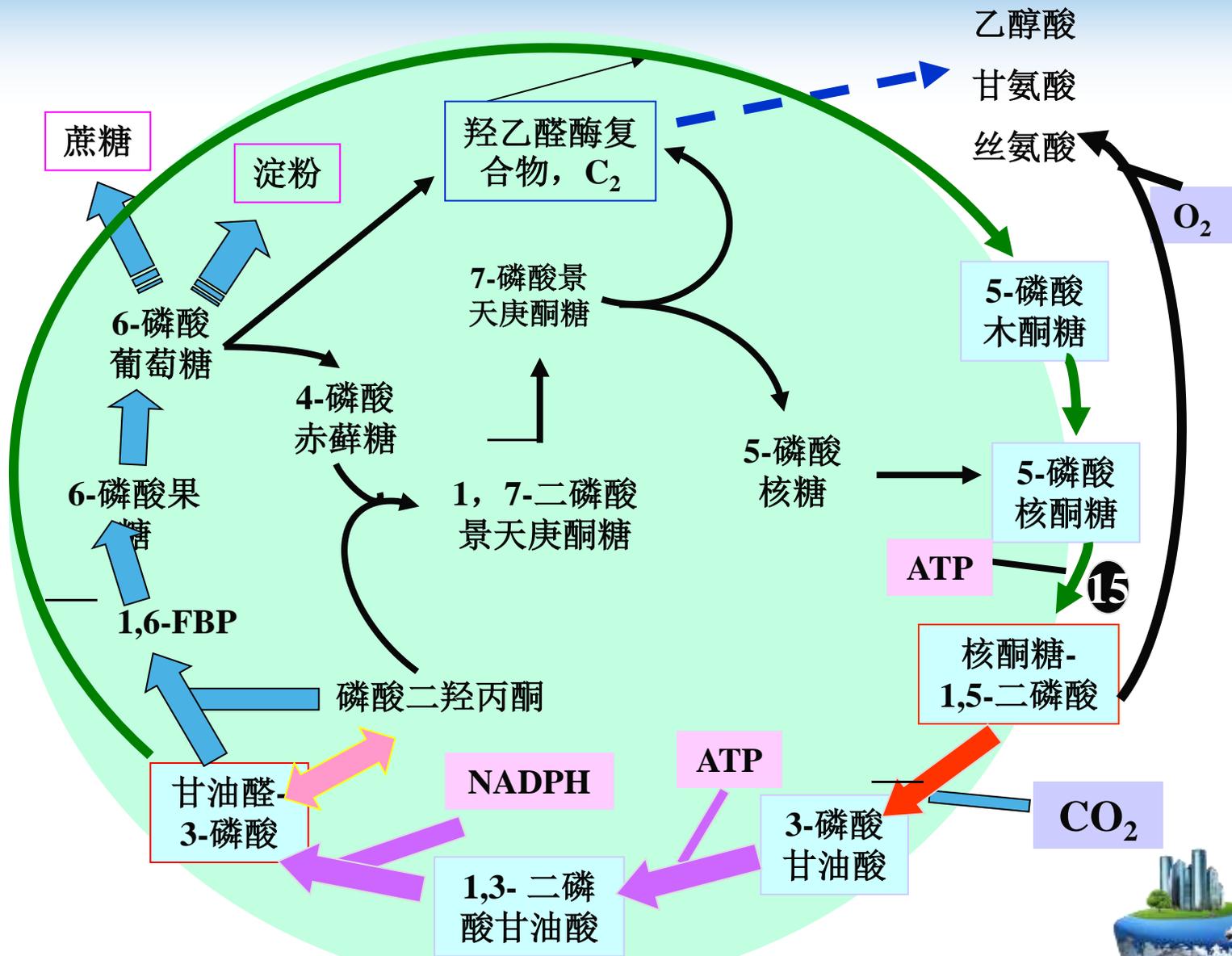
C₃ 途径（还原的戊糖途径）



再生阶段：CO₂受体RuBP再生。

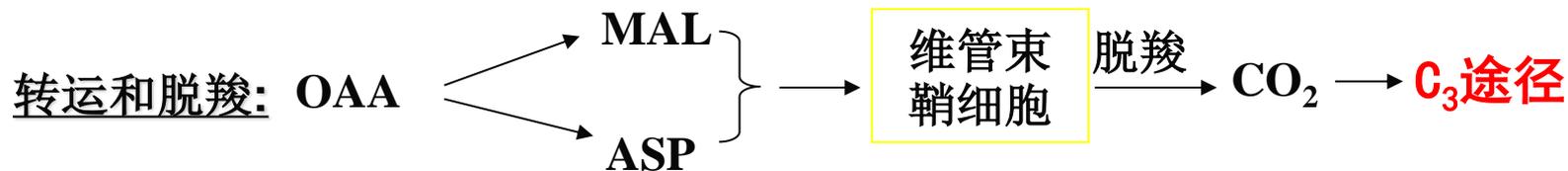
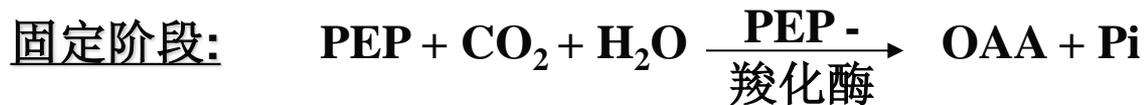
核酮糖-1,5-二磷酸(RuBP)； 3-磷酸甘油酸(3-PGA)； 甘油醛-3-磷酸(GAP)

卡尔文循环示意图

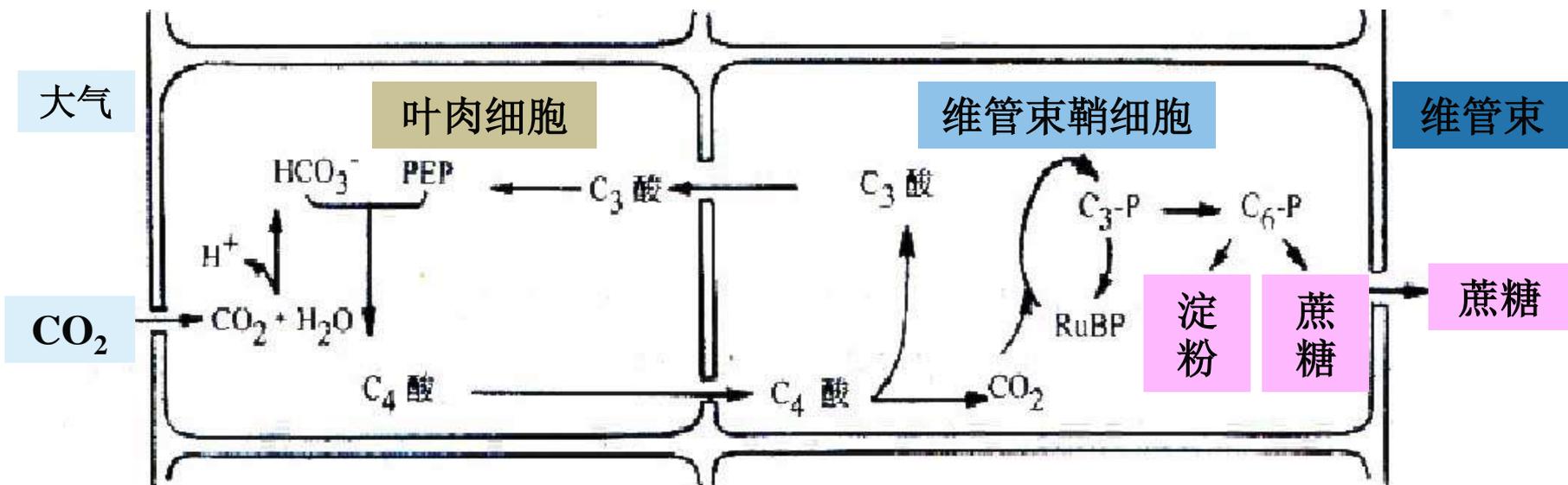


C₄途径（四碳二羧酸途径）

空气中含有约0.03%二氧化碳



再生阶段: PEP的再生



磷酸烯醇式丙酮酸(PEP); 草酰乙酸(OAA); 苹果酸(MAL); 天冬氨酸(ASP)

C₄植物



粟(millet)的穗形，“谷子”，去皮后称“小米”

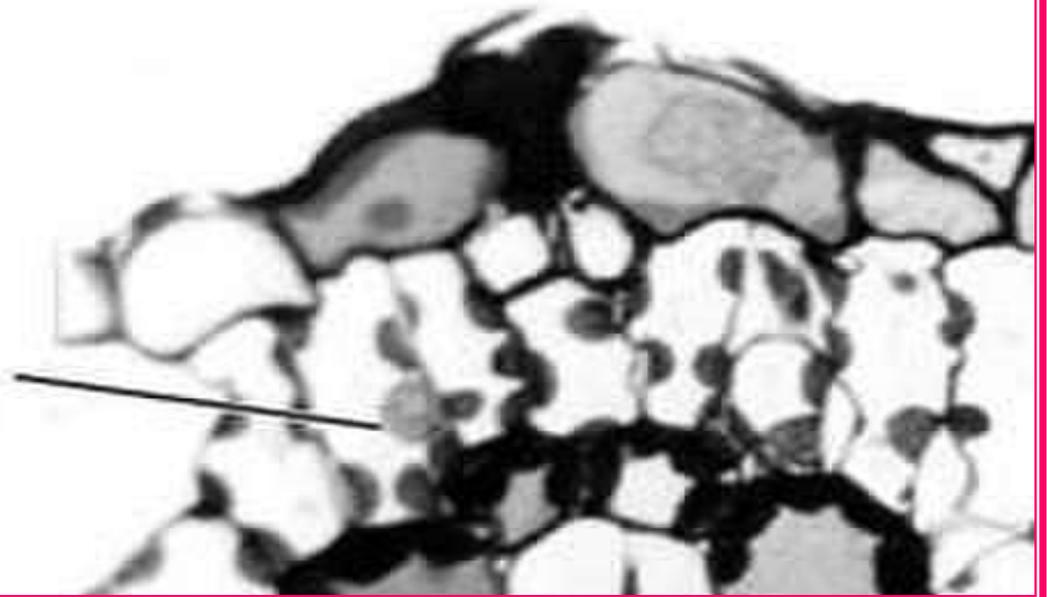


空气中含有约0.03%二氧化碳

海南大学应用科技学院



叶肉细胞



C₄植物玉米花环状维管束细胞的解剖结构图。

紧密的维管束鞘四周被大的维管束鞘细胞环绕包围。在这类作物中大的叶绿体分布在维管束鞘细胞的外围，维管束细胞被叶肉细胞包围。



三、C₃植物与C₄植物的光合效率

结构特征: C₃: 维管束鞘细胞不发达（无叶绿体），周围叶肉细胞排列疏松，无胞间连丝。

C₄: 鞘细胞发达（有叶绿体），叶肉细胞排列紧密，胞间连丝发达。

生理特征: C₃: 固定CO₂的酶是RuBPCase,

C₄: 固定CO₂的酶是PEPCase, PEPCase活性>RuBPCase

PEPCase与CO₂亲和力 >RuBPCase, 可利用低浓度CO₂（补偿点低）

CO₂泵效应: C₄ + CO₂ → OAA → 鞘细胞
→ 脱羧 → CO₂/O₂ 高 → 羧化强

光呼吸: C₄ 低, 消耗少

回 收: 光呼吸酶在鞘细胞内, 放出的CO₂ 被叶肉细胞捕获。



CAM途径（景天酸代谢途径）

- 景天酸代谢途径(CAM途径)是在C₄途径之后,于景天科植物中首先发现的,后来发现龙舌兰科、凤梨科、苦杏科、大戟科、仙人掌科等19科23000多种植物均存在这一途径。
- CAM植物多属于肉质植物或半肉质植物,在适应干热环境的进化过程中,气孔运动为夜开昼闭,因而CO₂固定途径也很特殊。
- 在夜晚,气孔张开,吸入CO₂,与PEP结合生成OAA,进一步还原为苹果酸,积累于液泡中。白天气孔关闭,液泡中的苹果酸运输到细胞质中氧化,放出的CO₂进入卡尔文循环。



磷酸烯醇式丙酮酸(PEP); 草酰乙酸(OAA)



剑麻



龙舌兰



落地生根



绯牡丹



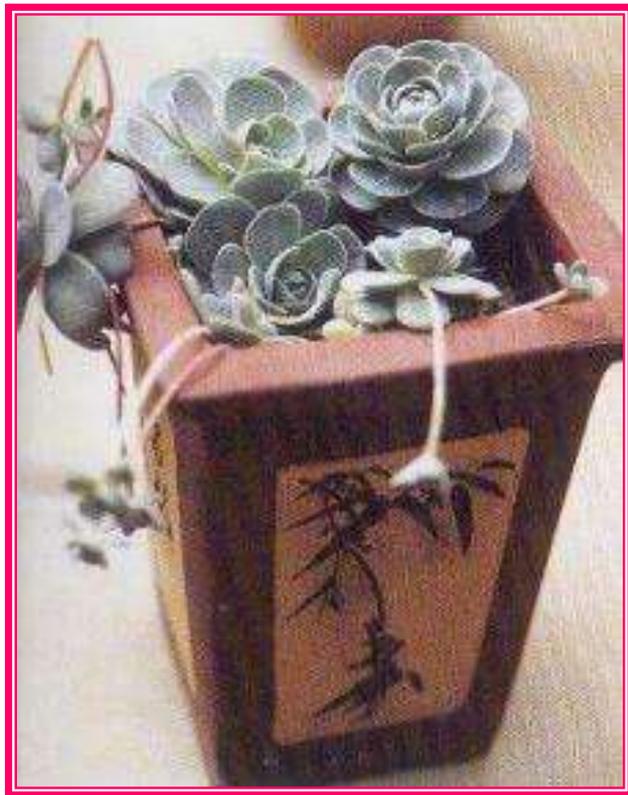
芦荟



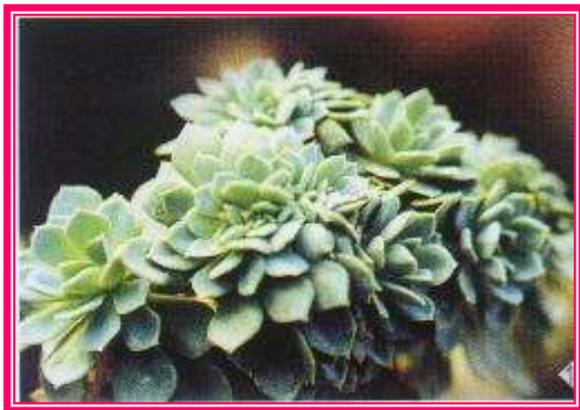
昙花



CAM植物-瓦松属



多肉植物



鸡冠掌



静夜

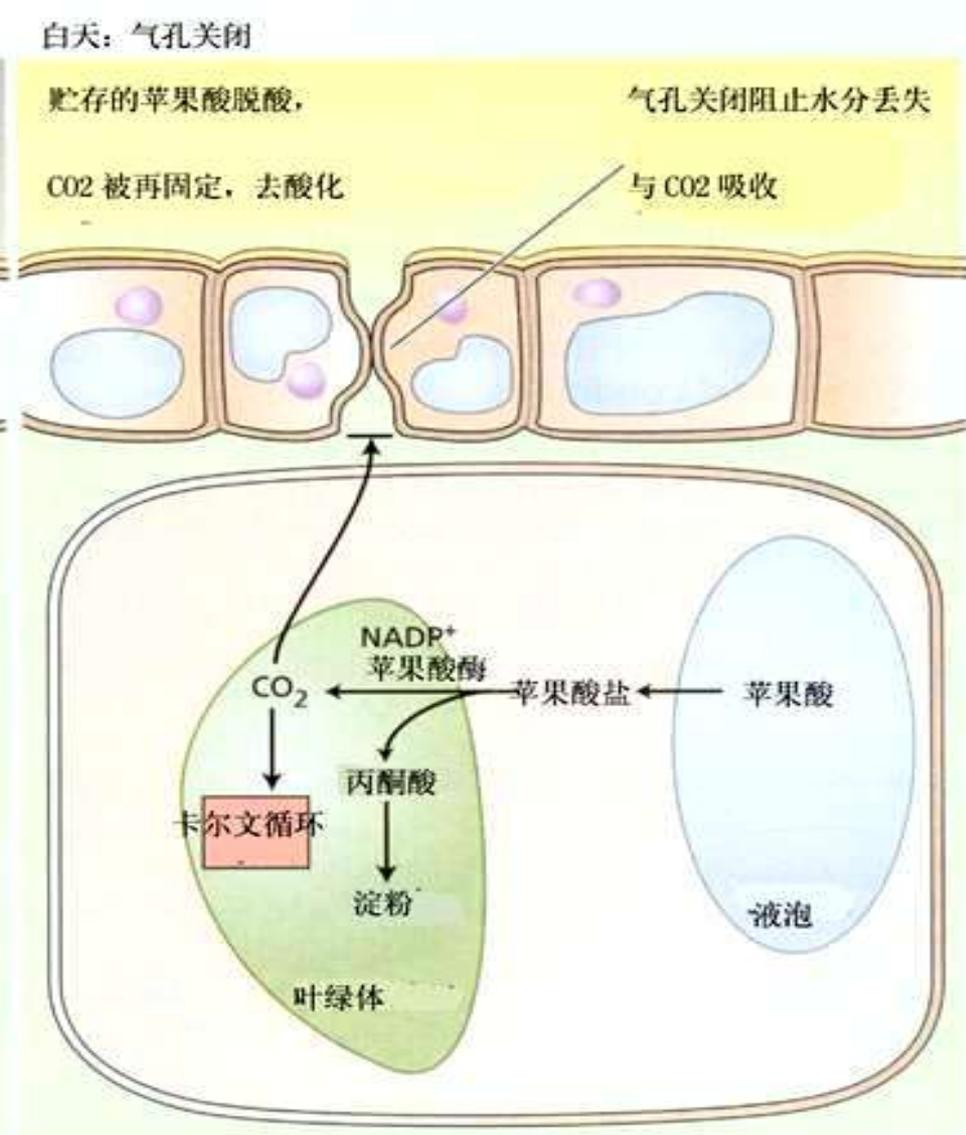
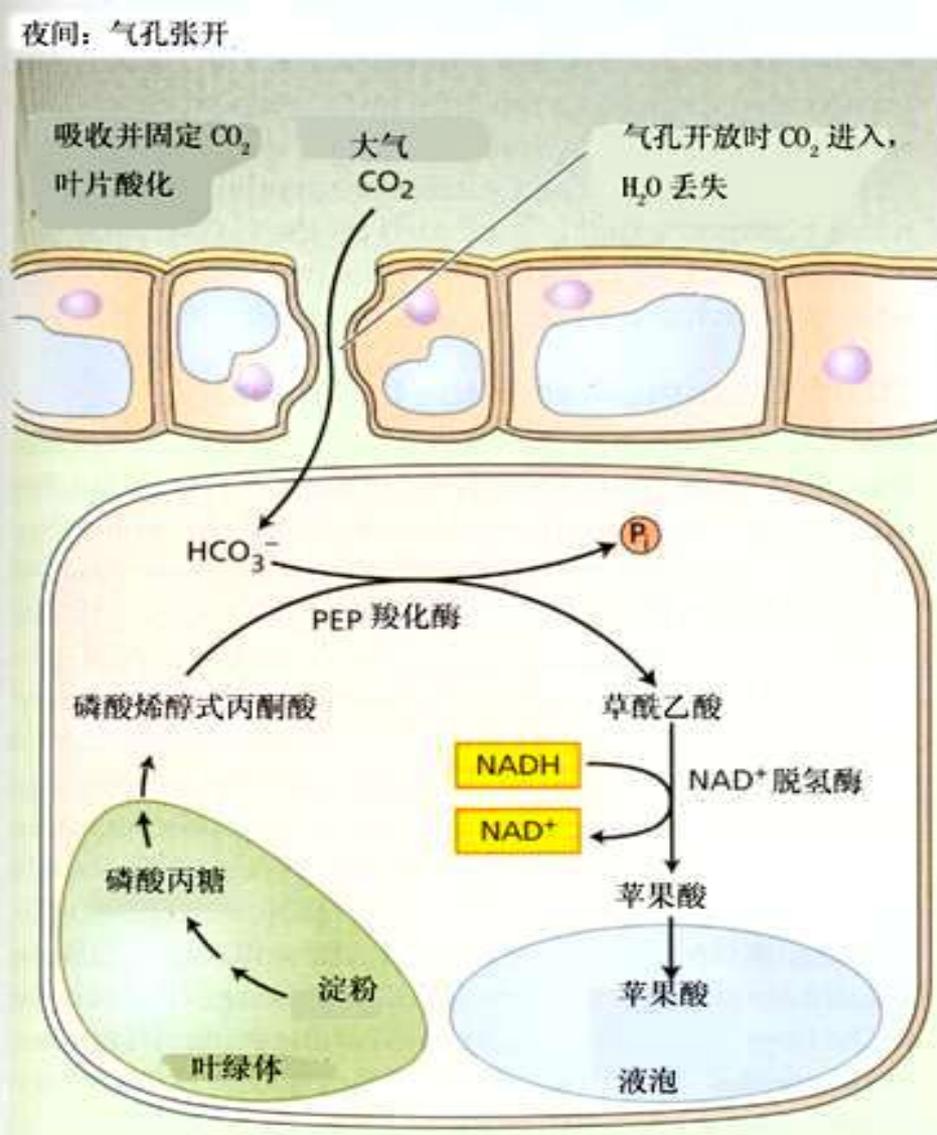


红司



锦晃星





景天科酸代谢途径 (CAM)。光合反应吸收的 CO_2 暂时的分离：夜间 CO_2 的吸收和固定，白天内部释放的 CO_2 进行脱酸和再固定。



四、 C_3 、 C_4 、CAM植物的特性比较

- C_3 植物， C_4 植物和CAM植物的光合作用与生理生态特性有较大的差异。见表4-4。

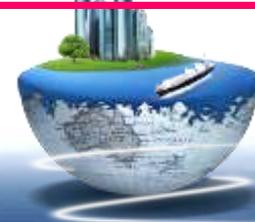


表 4-4 C₃、C₄、CAM 植物的光合和生理生态特性的比较

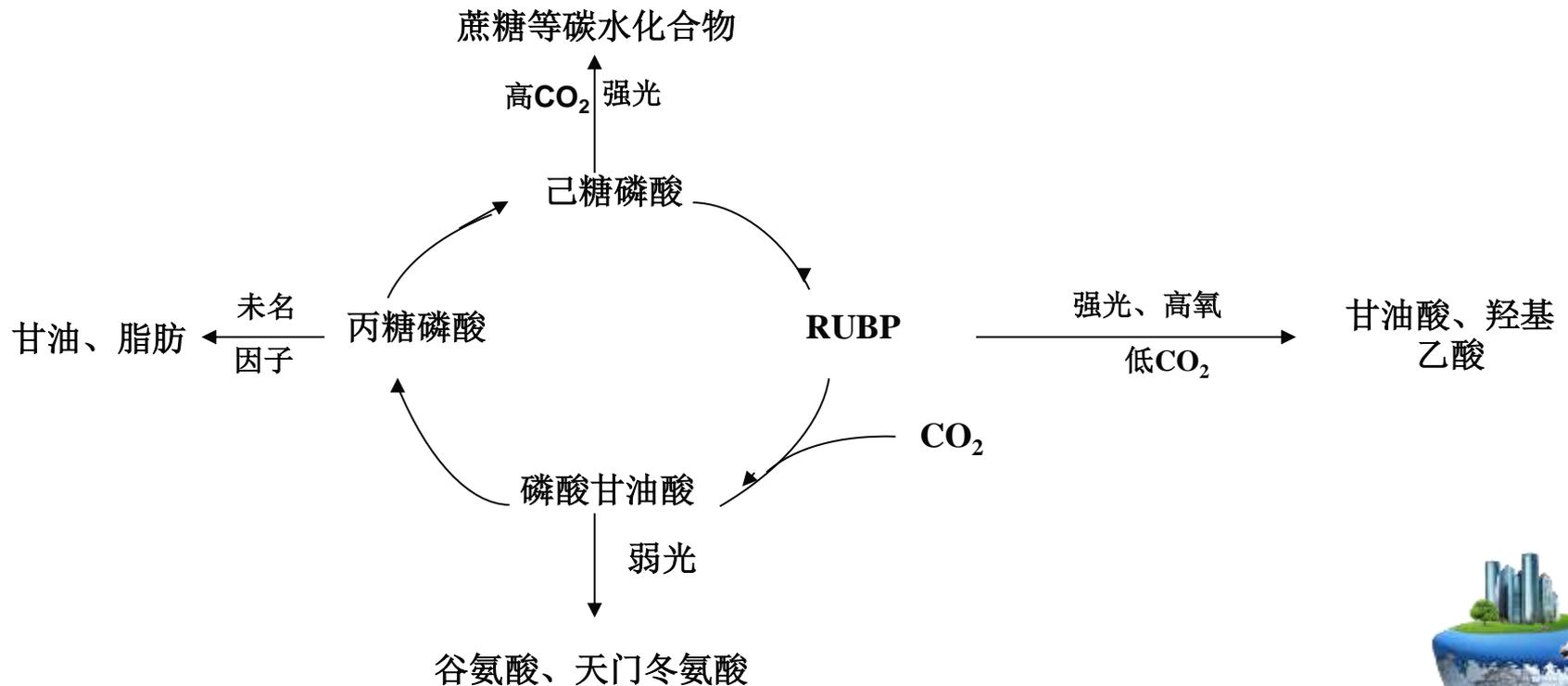
特 性	C ₃ 植物	C ₄ 植物	CAM 植物
1. 叶结构	BSC 不发达, 内无叶绿体, 无“花环”结构	BSC 发达, 内有叶绿体, 有“花环”结构	BSC 不发达, 叶肉细胞的液泡大, 无“花环”结构
2. CO ₂ 固定酶	Rubisco	PEPC、Rubisco	PEPC、Rubisco
3. 最初 CO ₂ 受体	RuBP	PEP	光下 RuBP, 暗中 PEP
4. 光合初产物	PGA	OAA	光下 PGA, 暗中 OAA
5. 同化力需求理论值 (CO ₂ :ATP:NADPH)	1:3:2	1:5:2	1:6.5:2
6. 最大光合速率 (CO ₂ 吸收量) ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	低 (10~25)	高 (25~50)	极低 (1~3)
7. CO ₂ 补偿点 ($\mu\text{l}\cdot\text{L}^{-1}$)	高 (40~70)	低 (5~10)	暗期 (5), 光下 (0~200)
8. Warburg 效应	明显	不明显	明显
9. 光呼吸	高, 易测出	低, 难测出	低, 难测出
10. 叶绿素 a/b	2.8±0.4	3.9±0.6	2.5~3.0
11. 光饱和点	最大日照的 1/4~1/2	最大日照以上	不定
12. 光合最适温度 (°C)	低 (13~30)	高 (30~47)	宽 (~35)
13. 生长最适温度	低	高	宽
14. 耐旱性	弱	强	极强
15. 光合产物运输速率	小	大	—
16. 最大干物生长率 ($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$)	低 (19.5±3.9)	高 (30.3±13.8)	—
17. 最大纯生产量 ($\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{y}^{-1}$)	少 (22.0±3.3)	多 (38.6±16.9)	变动大
18. 蒸腾系数	大 (450~950)	小 (250~350)	极小 (50~150)
19. 增施 CO ₂ 对干物重的促进	大	小	—

五、光合作用的产物

1. 光合作用的直接产物：碳水化合物

(淀粉、蔗糖、葡萄糖、果糖)

2. 环境条件对光合产物的影响

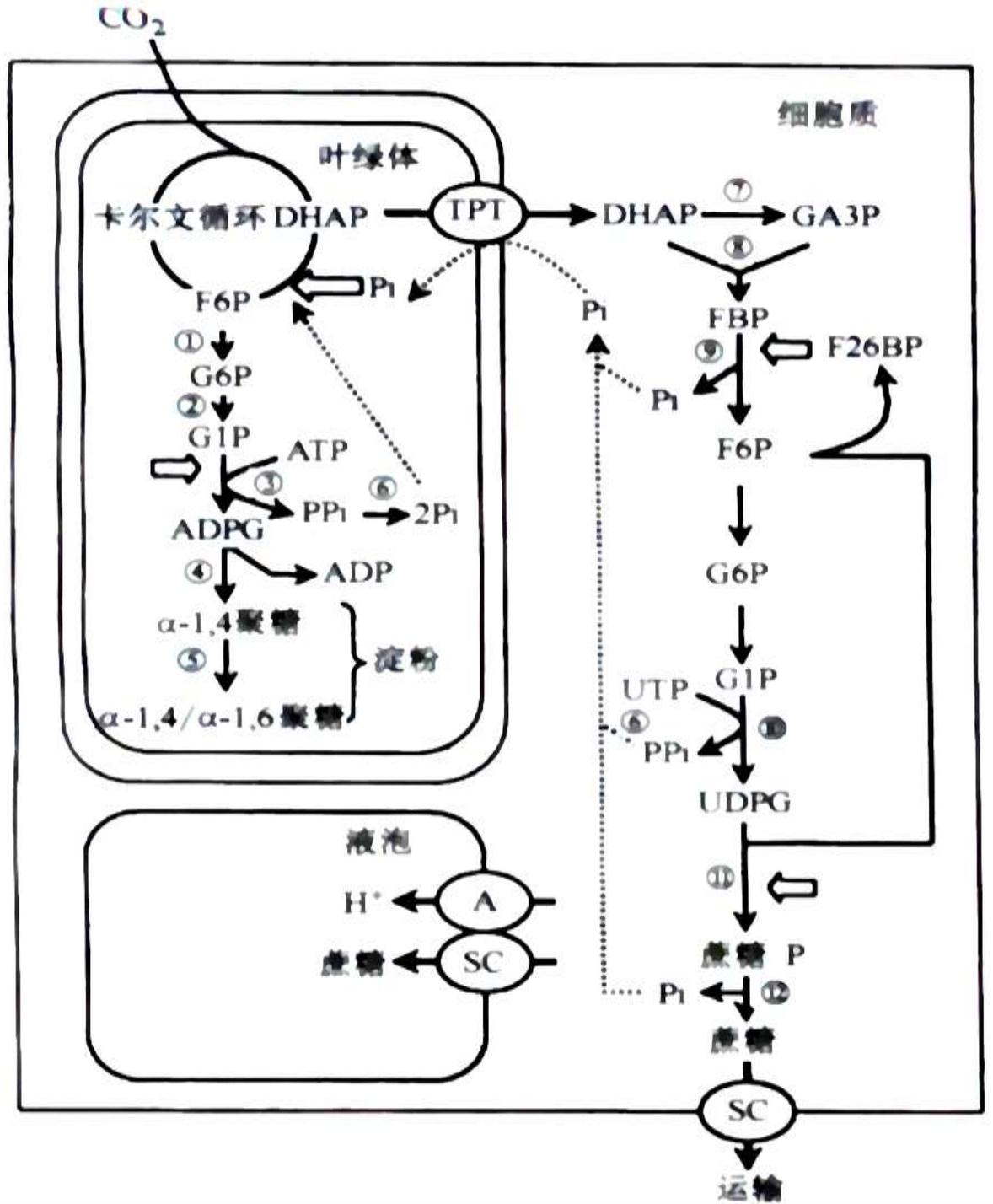


3. 蔗糖与淀粉的合成

合成部位：

蔗糖：细胞质

淀粉：叶绿体



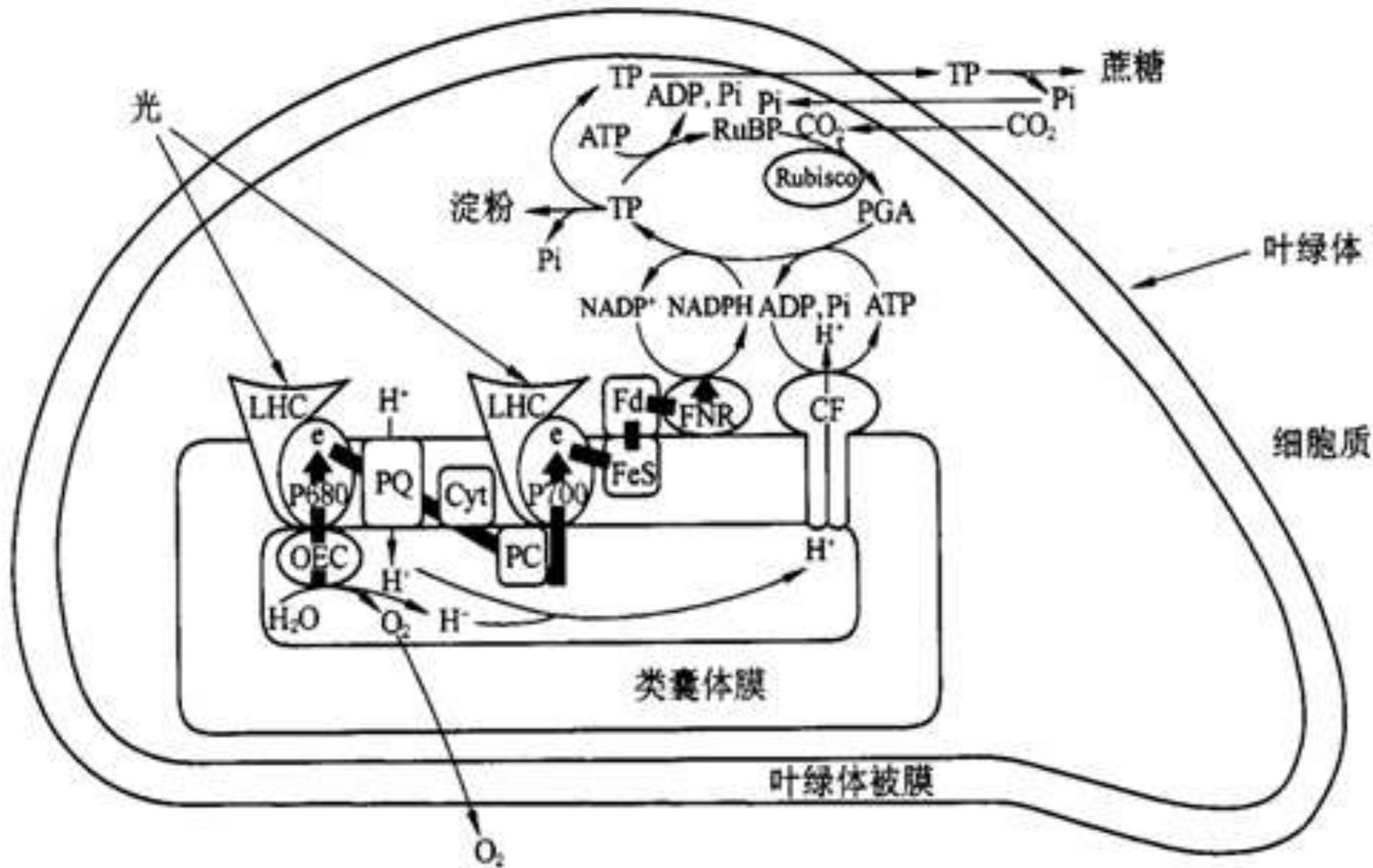


图 1-2 光合作用的反应过程和部位示意图

