

第 6 课时 光合作用的原理

【课标要求】 说明植物细胞的叶绿体从太阳光中捕获能量，这些能量在二氧化碳和水转变为糖与氧气的过程中，转换并储存为糖分子中的化学能。

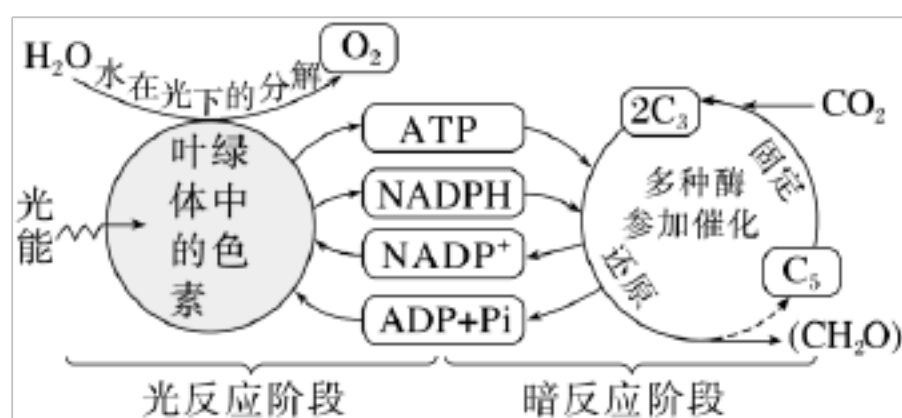
■ 梳理归纳 夯实必备知识

1. 探索光合作用原理的部分实验

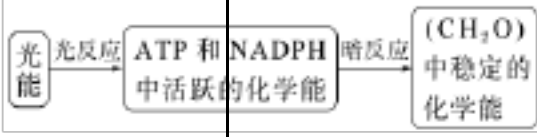
时间/发现者	内容
19 世纪末	科学界普遍认为，在光合作用中， CO_2 分子的 C 和 O 被分开， O_2 被释放，C 与 H_2O 结合成甲醛，然后甲醛分子缩合成糖
1928 年	科学家发现甲醛对植物有 <u>毒害</u> 作用，而且甲醛不能通过光合作用转化成糖
1937 年希尔 (英国)	在离体叶绿体的悬浮液中加入铁盐或其他氧化剂(悬浮液中有 H_2O ，没有 CO_2)，在光照下可以 <u>释放出氧气</u>
1941 年鲁宾、 卡门(美国)	用同位素示踪的方法，研究了光合作用中氧气的来源， $\text{H}_2^{18}\text{O} + \text{CO}_2 \rightarrow$ 植物 $\rightarrow ^{18}\text{O}_2$ ， $\text{H}_2\text{O} + \text{C}^{18}\text{O}_2 \rightarrow$ 植物 $\rightarrow \text{O}_2$ ，得出光合作用释放的氧全部来自 <u>水</u>
1954 年阿尔农 (美国)	在光照下，叶绿体可合成 ATP ，这一过程总是与 <u>水的光解</u> 相伴随

2. 光合作用过程

(1) 光合作用过程图解



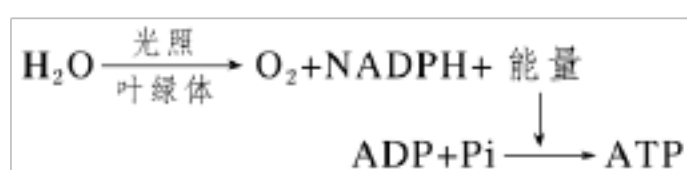
项目	光反应	暗反应
场所	叶绿体 <u>类囊体的薄膜</u>	<u>叶绿体基质</u>
条件	光、色素、酶	酶、 <u>NADPH、ATP</u> 等
物质变化	$(1)\text{H}_2\text{O} \xrightarrow[\text{酶}]{\text{光能}} \text{O}_2 + \text{H}^+$	$(1)\text{CO}_2 + \text{C}_5 \xrightarrow{\text{酶}} 2\text{C}_3$

	$(2)\text{NADP}^+ + \text{H}^+ \rightarrow \text{NADPH}$ $(3)\text{ADP} + \text{P}_i \xrightarrow[\text{色素、酶}]{\text{光能}} \text{ATP}$	$(2)2\text{C}_3 \xrightarrow[\text{酶}]{\text{ATP、NADPH}} (\text{CH}_2\text{O}) + \text{C}_5$
能量变化		
联系	光反应为暗反应提供 NADPH 和 ATP, 暗反应为光反应提供 NADP ⁺ 、ADP 和 P _i 。	

教材隐性知识

①源于必修 1 P₁₀₃ “思考·讨论”：尝试用示意图来表示 ATP 的合成与希尔反应的关系。

提示 如图所示



②源于必修 1 P₁₀₃ “相关信息”：水分解为氧和 H⁺ 的同时，被叶绿体夺去两个电子。电子经传递，可用于 NADP⁺ 与 H⁺ 结合形成 NADPH。NADPH 的作用是什么？

提示 可作为暗反应的还原剂；储备部分能量供暗反应利用。

③源于必修 1 P₁₀₄ “相关信息”：C₃ 是指三碳化合物——3-磷酸甘油酸，C₅ 是指五碳化合物——核酮糖-1,5-二磷酸(RuBP)。

(2)反应式

①产物为(CH₂O)： $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \xrightarrow[\text{叶绿体}]{\text{光能}} (\text{CH}_2\text{O}) + \text{O}_2$ 。

②产物为 C₆H₁₂O₆： $6\text{CO}_2 + 12\text{H}_2\text{O} \xrightarrow[\text{叶绿体}]{\text{光能}} \text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + 6\text{O}_2 + 6\text{H}_2\text{O}$ 。

③元素的转移途径

a. H： $3\text{H}_2\text{O} \xrightarrow{\text{光反应}} \text{NADPH} \xrightarrow{\text{暗反应}} (\text{C}_3\text{H}_2\text{O})$ 。

b. C： $14\text{CO}_2 \xrightarrow{\text{CO}_2\text{的固定}} 14\text{C}_3 \xrightarrow{\text{C}_3\text{的还原}} (14\text{CH}_2\text{O})$ 。

c. O： $\text{H}_2^{18}\text{O} \xrightarrow{\text{光反应}} 18\text{O}_2$ ； $\text{C}^{18}\text{O}_2 \xrightarrow{\text{CO}_2\text{的固定}} \text{C}_3 \xrightarrow{\text{C}_3\text{的还原}} (\text{CH}_2^{18}\text{O})$ 。

教材隐性知识

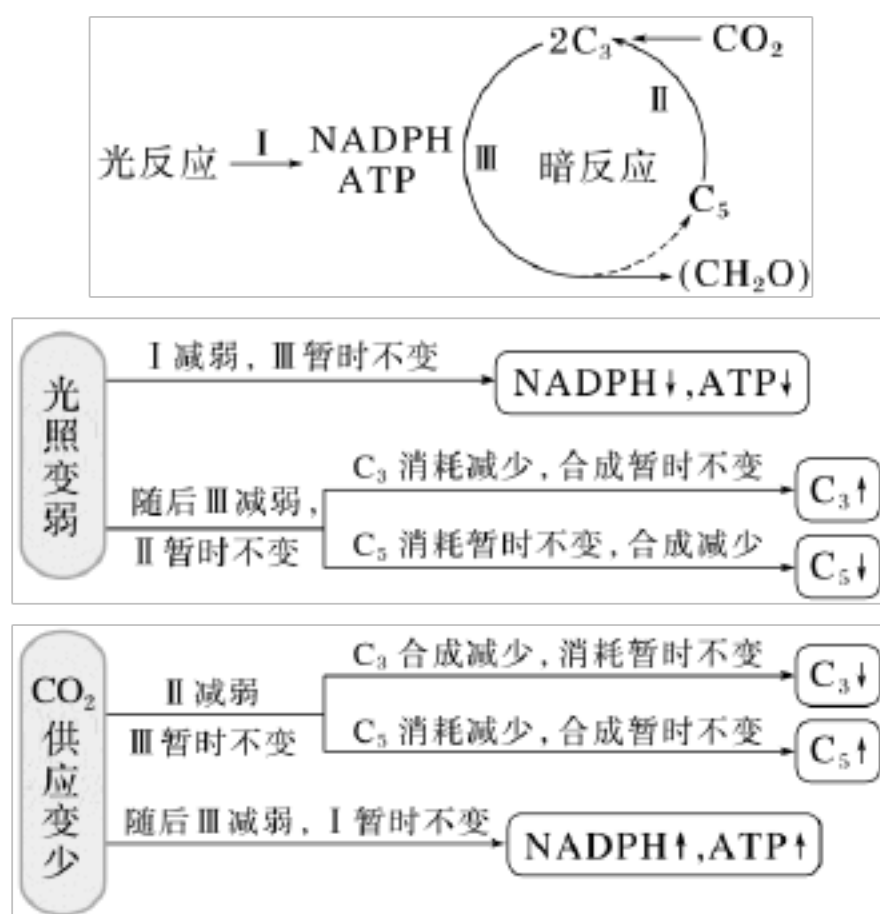
①源于必修 1 P₁₀₄ “相关信息”：光合作用的产物有一部分是淀粉，还有一部分是蔗糖。蔗糖可以进入筛管，再通过韧皮部运输到植株各处。

②源于必修 1 P₁₀₆ “小字部分”：光合作用和化能合成作用的比较

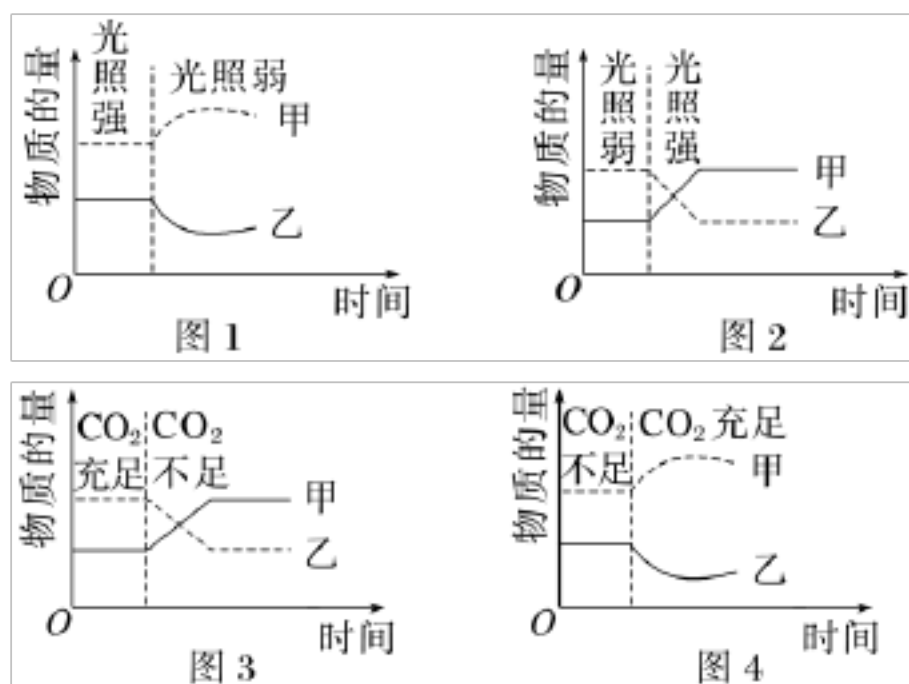
项目		光合作用	化能合成作用
区别	能量来源	光能	无机物氧化释放的能量
	代表生物	绿色植物	硝化细菌
相同点		都能将 CO_2 和 H_2O 等无机物合成有机物	

3. 环境改变时光合作用各物质含量的变化

(1) “来源—去路”法



(2) “模型法”



①图 1 中曲线甲表示 C_3 ，曲线乙表示 C_5 、NADPH、ATP。

②图 2 中曲线甲表示 C_5 、NADPH、ATP，曲线乙表示 C_3 。

③图 3 中曲线甲表示 C_5 、NADPH、ATP，曲线乙表示 C_3 。

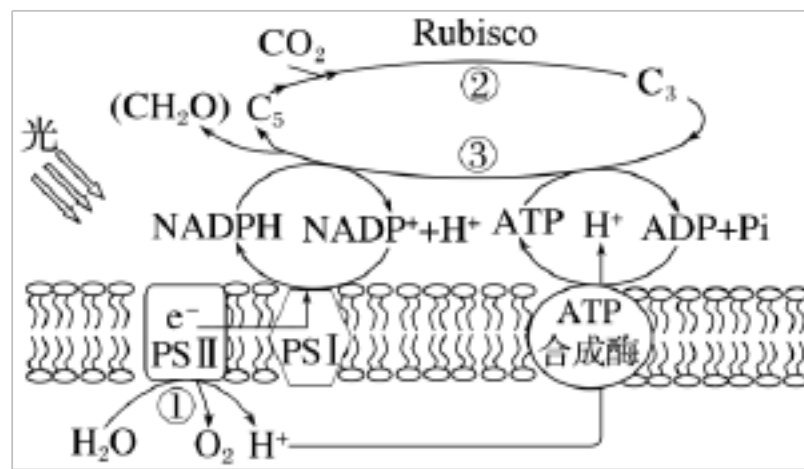
④图 4 中曲线甲表示 C_3 ，曲线乙表示 C_5 、NADPH、ATP。

考向突破

强化关键能力

考向一 光合作用过程的综合考查

1. 下图是番茄植株的叶肉细胞中进行光合作用的示意图，PS II 和 PS I 是由蛋白质和光合色素组成的复合物，是吸收、传递、转化光能的光系统。下列叙述错误的是()

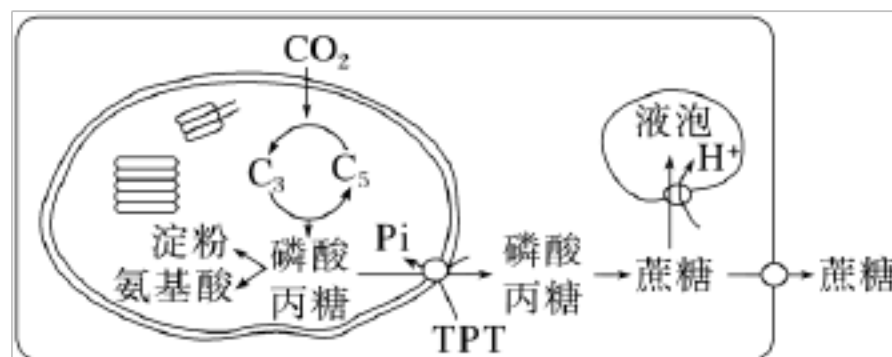


- A. 自然界中能发生光合作用的生物，不一定具备 PS II 和 PS I 系统
- B. 光反应过程将吸收的光能转换为活跃的的化学能全部储存在 ATP 中
- C. 在 ATP 合成酶的作用下，H⁺顺浓度梯度转运提供分子势能，促进 ADP 和 Pi 合成 ATP
- D. PS II 中的色素吸收光能后，将 H₂O 分解为 O₂ 和 H⁺，产生电子传递给 PS I 将 NADP⁺和 H⁺结合形成 NADPH

答案 B

解析 分析图示可知，光反应过程将吸收的一部分光能转换为活跃的的化学能储存在 ATP 中，还有一部分储存在 NADPH 中，B 错误。

2. 下图为光合作用暗反应的产物磷酸丙糖的代谢途径，研究表明，磷酸丙糖转移蛋白(TPT)的活性是限制光合速率大小的重要因素，CO₂充足时，TPT 活性降低。下列有关叙述错误的是()



- A. Pi 输入叶绿体减少时，磷酸丙糖从叶绿体输出减少
- B. 暗反应中磷酸丙糖的合成需要消耗光反应产生的 ATP
- C. 叶肉细胞的光合产物主要是以蔗糖形式运出细胞的
- D. 农业生产上可通过增加 CO₂ 浓度来提高作物中蔗糖的含量

答案 D

解析 据图示信息，磷酸丙糖通过 TPT 从叶绿体输出的同时伴随着 Pi 进入叶绿体，因此 Pi 输入叶绿体减少，说明磷酸丙糖从叶绿体中的输出过程受阻，即输出减少，A 正确；光反应产生的 ATP 能用于暗反应中 C₃ 的还原过程，由图示可知，该过程能合成磷酸丙糖，B 正确；由图示可知，叶肉细胞的光合产物磷酸丙糖会在细胞质基质中用于合成蔗糖，然后以蔗糖形

式运出细胞，C 正确；根据题意可知， CO_2 充足时，TPT 活性降低，则磷酸丙糖运出叶绿体合成蔗糖的过程会受到影响，作物中淀粉含量会上升，而蔗糖含量下降，D 错误。

考向二 不同条件下光合作用过程中物质含量的变化分析

3. (2022 天津河东高三模拟)正常生长的小球藻，照光培养一段时间后，改为在绿光下继续培养，此后小球藻细胞的叶绿体内会发生的变化是()

- A. H_2O 在光下分解速率不变
- B. 卡尔文循环增强
- C. ADP/ATP 比值上升
- D. C_3/C_5 比值下降

答案 C

解析 改为在绿光下继续培养，导致光反应减弱， H_2O 在光下分解速率下降，A 错误；光反应减弱，产生的 NADPH 和 ATP 减少，导致卡尔文循环减弱，ADP/ATP 比值上升，B 错误、C 正确； C_3 还原成 C_5 的量减少，但 C_5 的消耗量暂时不变，所以 C_5 含量减少， C_3/C_5 比值上升，D 错误。

4. 为了探究不同光照处理对植物光合作用的影响，科学家以生长状态相同的某种植物为材料设计了 A、B、C、D 四组实验。每组处理的总时间均为 135 s，处理结束时测定各组材料中光合作用产物的含量。处理方法和实验结果如下：

A 组：先光照后黑暗，时间各为 67.5 s；光合作用产物的相对含量为 50%。

B 组：先光照后黑暗，光照和黑暗交替处理，每次光照和黑暗时间各为 7.5 s；光合作用产物的相对含量为 70%。

C 组：先光照后黑暗，光照和黑暗交替处理，每次光照和黑暗时间各为 3.75 ms(毫秒)；光合作用产物的相对含量为 94%。

D 组(对照组)：光照时间为 135 s；光合作用产物的相对含量为 100%。回答下列问题：

(1)单位光照时间内，C 组植物合成有机物的量_____ (填“高于”“等于”或“低于”)D 组植物合成有机物的量，依据是_____

_____；

C 组和 D 组的实验结果可表明光合作用中有些反应不需要_____。

(2)比较 A、B、C 三组处理可以推知，随着光照和黑暗交替频率的增加，使光下产生的

_____能够及时利用与及时再生，从而提高了光合作用中_____

答案 (1)高于 C 组只用了 D 组一半的光照时间,其光合作用产物的相对含量却是 D 组的 94% 光照 (2)ATP 和 NADPH CO_2 的同化量

解析 (2)光合作用过程有两个阶段:光反应阶段和暗反应阶段。光反应阶段必须在光下进行,其将水分解,产生 ATP 和 NADPH 用于暗反应。A、B、C 三组处理相比,随着光照时间间隔的减少,光照频率的增加,使光下产生的 ATP 和 NADPH 能够及时被利用与再生,从而提高了光合作用中 CO_2 的同化量。

【归纳总结】 连续光照和间隔光照下的有机物合成量分析

(1)光反应为暗反应提供的 NADPH 和 ATP 在叶绿体基质中有少量的积累,在光反应停止时,暗反应仍可持续进行一段时间,有机物还能继续合成。

(2)在总光照时间、总黑暗时间均相同的条件下,光照和黑暗间隔处理比一直连续光照处理有机物的积累量要多。

重温高考 真题演练

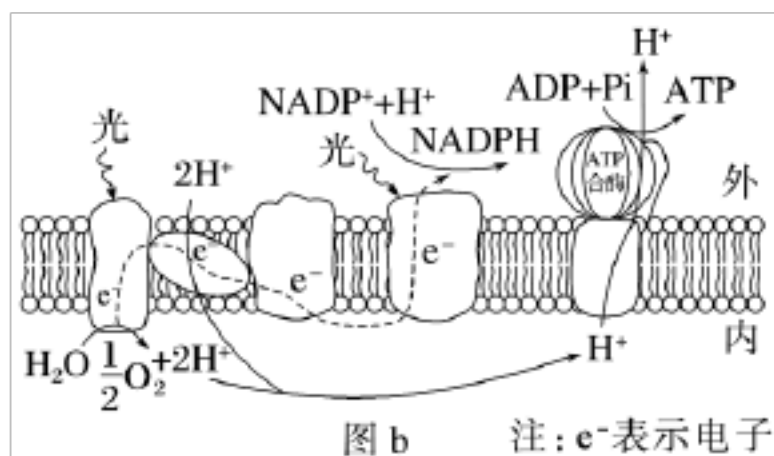
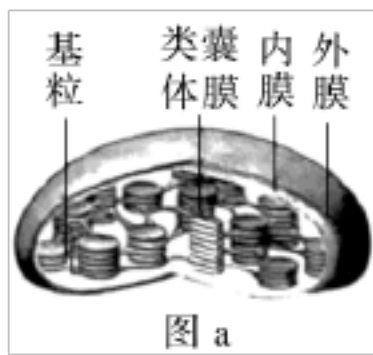
1. (2021 广东, 12)在高等植物光合作用的卡尔文循环中,唯一催化 CO_2 固定形成 C_3 的酶被称为 Rubisco, 下列叙述正确的是()

- A. Rubisco 存在于细胞质基质中
- B. 激活 Rubisco 需要黑暗条件
- C. Rubisco 催化 CO_2 固定需要 ATP
- D. Rubisco 催化 C_5 和 CO_2 结合

答案 D

解析 Rubisco 参与植物光合作用过程中的暗反应,暗反应场所在叶绿体基质,故 Rubisco 存在于叶绿体基质中, A 错误;暗反应在有光和无光条件下都可以进行,故参与暗反应的酶 Rubisco 的激活对光无要求, B 错误; Rubisco 催化 CO_2 固定不需要 ATP, C 错误; Rubisco 催化二氧化碳的固定,即 C_5 和 CO_2 结合生成 C_3 的过程, D 正确。

2. (2021 湖南, 18)图 a 为叶绿体的结构示意图,图 b 为叶绿体中某种生物膜的部分结构及光反应过程的简化示意图。回答下列问题:



(1)图 b 表示图 a 中的_____结构，膜上发生的光反应过程将水分解成 O_2 、 H^+ 和 e^- ，光能转化成电能，最终转化为_____和 ATP 中活跃的化学能。若 CO_2 浓度降低，暗反应速率减慢，叶绿体中电子受体 $NADP^+$ 减少，则图 b 中电子传递速率会_____ (填“加快”或“减慢”)。

(2)为研究叶绿体的完整性与光反应的关系，研究人员用物理、化学方法制备了 4 种结构完整性不同的叶绿体，在离体条件下进行实验，用 Fecy 或 DCIP 替代 $NADP^+$ 为电子受体，以相对放氧量表示光反应速率，实验结果如表所示。

叶绿体类型 相对值 实验项目	叶绿体 A: 双层膜结构 完整	叶绿体 B: 双层 膜局部受损, 类 囊体略有损伤	叶绿体 C: 双层 膜瓦解, 类囊体 松散但未断裂	叶绿体 D: 所有 膜结构解体破裂 成颗粒或片段
实验一: 以 Fecy 为电 子受体时的放氧量	100	167.0	425.1	281.3
实验二: 以 DCIP 为电 子受体时的放氧量	100	106.7	471.1	109.6

注: Fecy 具有亲水性, DCIP 具有亲脂性。

据此分析:

①叶绿体 A 和叶绿体 B 的实验结果表明, 叶绿体双层膜对以_____ (填“Fecy”或“DCIP”) 为电子受体的光反应有明显阻碍作用, 得出该结论的推理过程是

_____。

②该实验中, 光反应速率最高的是叶绿体 C, 表明在无双层膜阻碍、类囊体又松散的情况下, 更有利于_____，从而提高光反应速率。

③以 DCIP 为电子受体进行实验, 发现叶绿体 A、B、C 和 D 的 ATP 产生效率的相对值分别

为 1、0.66、0.58 和 0.41。结合图 b 对实验结果进行解释：_____。

答案 (1)类囊体膜 NADPH 减慢 (2)①Fecy 实验一中叶绿体 B 双层膜局部受损时，以 Fecy 为电子受体的放氧量明显大于双层膜完整时，实验二中叶绿体 B 双层膜局部受损时，以 DCIP 为电子受体的放氧量与双层膜完整时无明显差异，可推知叶绿体双层膜对以 Fecy 为电子受体的光反应有明显阻碍作用 ②类囊体上的色素吸收、转化光能 ③ATP 的合成依赖于水光解的电子传递和氢离子顺浓度梯度通过类囊体膜上的 ATP 合酶，叶绿体 A、B、C、D 类囊体膜的受损程度依次增大，因此 ATP 的产生效率逐渐降低

解析 (1)光反应发生在叶绿体的类囊体的薄膜上，即图 b 表示图 a 的类囊体膜，光反应过程中，色素吸收的光能最终转化为 ATP 和 NADPH 中活跃的化学能，若二氧化碳浓度降低，暗反应速率减慢，叶绿体中电子受体 NADP^+ 减少，则图 b 中的电子去路受阻，电子传递速率会减慢。

(2)②在无双层膜阻碍、类囊体松散的条件下，更有利于类囊体上的色素吸收、转化光能，从而提高光反应速率，所以该实验中，光反应速率最高的是叶绿体 C。③根据图 b 可知，ATP 的合成依赖于水光解的电子传递和氢离子顺浓度梯度通过类囊体薄膜上的 ATP 合酶，叶绿体 A、B、C、D 类囊体膜的受损程度依次增大，因此 ATP 的产生效率逐渐降低。

3. (2021 全国乙, 29)生活在干旱地区的一些植物(如植物甲)具有特殊的 CO_2 固定方式。这类植物晚上气孔打开吸收 CO_2 ，吸收的 CO_2 通过生成苹果酸储存在液泡中；白天气孔关闭，液泡中储存的苹果酸脱羧释放的 CO_2 可用于光合作用。回答下列问题：

(1)白天叶肉细胞产生 ATP 的场所有_____，光合作用所需的 CO_2 来源于苹果酸脱羧和_____释放的 CO_2 。

(2)气孔白天关闭、晚上打开是这类植物适应干旱环境的一种方式，这种方式既能防止_____，又能保证_____正常进行。

(3)若以 pH 作为检测指标，请设计实验来验证植物甲在干旱环境中存在这种特殊的 CO_2 固定方式。(简要写出实验思路和预期结果)

答案 (1)细胞质基质、线粒体(线粒体基质和线粒体内膜)、叶绿体类囊体的薄膜 细胞呼吸

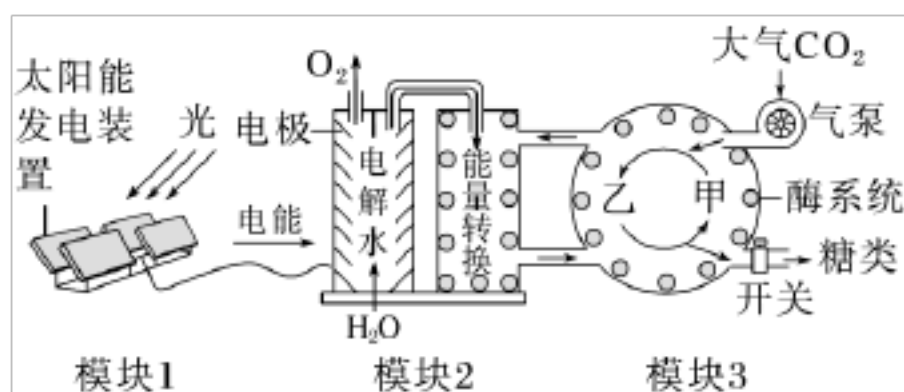
(2)蒸腾作用过强导致水分散失过多 光合作用

(3)实验思路：取生长状态相同的植物甲若干株随机均分为 A、B 两组；A 组在(湿度适宜的)正常环境中培养，B 组在干旱环境中培养，其他条件相同且适宜，一段时间后，分别检测两组植株夜晚同一时间液泡中的 pH，并求平均值。预期结果：A 组 pH 平均值高于 B 组。

解析 (1)白天有光照，叶肉细胞能利用液泡中储存的苹果酸脱羧释放的 CO_2 进行光合作用，

也能利用光合作用产生的氧气和有机物进行有氧呼吸，光合作用光反应阶段能将光能转化为化学能储存在 ATP 和 NADPH 中，有氧呼吸三阶段都能产生能量合成 ATP，因此叶肉细胞能产生 ATP 的场所所有细胞质基质、线粒体(线粒体基质和线粒体内膜)、叶绿体类囊体的薄膜。光合作用为有氧呼吸提供有机物和氧气，反之，细胞呼吸产生的二氧化碳也能用于光合作用暗反应，故光合作用所需的 CO_2 可来源于苹果酸脱羧和细胞呼吸释放的 CO_2 。(2)由于环境干旱，植物吸收的水分较少，为了维持机体的平衡适应这一环境，气孔白天关闭能防止白天因温度较高、蒸腾作用较强导致植物体水分散失过多，晚上气孔打开吸收二氧化碳储存固定以保证光合作用等生命活动的正常进行。(3)该实验自变量是植物甲所处的生存环境是否干旱，由于夜间气孔打开吸收二氧化碳，生成苹果酸储存在液泡中，导致液泡 pH 降低，故可通过检测液泡的 pH 验证植物甲存在该特殊方式，即因变量检测指标是液泡中的 pH。实验思路及预期结果见答案。

4. (2020 山东, 21)人工光合作用系统可利用太阳能合成糖类，相关装置及过程如下图所示，其中甲、乙表示物质，模块 3 中的反应过程与叶绿体基质内糖类的合成过程相同。



(1)该系统中执行相当于叶绿体中光反应功能的模块是_____，模块 3 中的甲可与 CO_2 结合，甲为_____。

(2)若正常运转过程中气泵突然停转，则短时间内乙的含量将_____ (填“增加”或“减少”)。若气泵停转时间较长，模块 2 中的能量转换效率也会发生改变，原因是_____。

(3)在与植物光合作用固定的 CO_2 量相等的情况下，该系统糖类的积累量_____ (填“高于”“低于”或“等于”)植物，原因是_____。

(4)干旱条件下，很多植物光合作用速率降低，主要原因是_____。

人工光合作用系统由于对环境中水的依赖程度较低，在沙漠等缺水地区有广阔的应用前景。

答案 (1)模块 1 和模块 2 五碳化合物(或 C_5)

(2)减少 模块 3 为模块 2 提供的 ADP、Pi 和 NADP^+ 不足 (3)高于 人工光合作用系统没有

或植物呼吸作用消耗糖类) (4)叶片气孔开放程度降低, CO_2 的吸收量减少

1 将光能转换为电能, 模块 2 电解水, 同时转换能量供模块 3 还原 CO_2 产生糖类, 比较这一过程与光合作用的全过程可知, 模块 1 和模块 2 相当于光合作用的光反应阶段, 模块 3 相当于光合作用的暗反应阶段。(1)根据上面的分析可知, 该系统中执行相当于叶绿体中光反应功能的模块, 即吸收和转化光能的模块是模块 1 和模块 2。光合作用的暗反应包括两步反应, 一是 CO_2 的固定: CO_2 在特定酶的作用下, 与 C_5 结合, 形成 C_3 。二是 C_3 的还原: C_3 接受 ATP 和 NADPH 释放的能量, 在酶的作用下最终转化为糖类和 C_5 。比较该过程与模块 3 的反应过程可知, 甲与 CO_2 反应产生乙, 这一阶段为 CO_2 的固定, 那么甲为 C_5 , 即五碳化合物, 乙为 C_3 , 即三碳化合物。(2)若正常运转过程中气泵突然停转, 相当于光合作用过程中突然停止供应 CO_2 , CO_2 的固定受阻, 进而导致乙(C_3)的合成量减少, 短时间内 C_3 的还原正常进行, 消耗量不变, C_3 含量减少。光合作用的暗反应为光反应提供 ADP、Pi 和 NADP^+ , 若气泵停转时间较长, 相当于暗反应无法进行, 就无法为模块 2 提供 ADP、Pi 和 NADP^+ , 从而影响了模块 2 中的能量转换效率。(3)植物有机物的积累量称为净光合作用量, 即有机物的制造量(真正光合作用量)减去呼吸作用消耗的有机物量。这个人工光合作用系统中只有有机物的制造, 没有呼吸作用的消耗, 所以在固定的 CO_2 量(即真正光合作用量)相等的情况下, 有机物(糖类)的积累量将高于植物。(4)干旱条件下, 植物为降低蒸腾作用对水分的过度散失, 气孔的开放程度降低, 进而影响 CO_2 的吸收, 会间接影响光合作用速率。

5. (2021 辽宁, 22)早期地球大气中的 O_2 浓度很低, 到了大约 3.5 亿年前, 大气中 O_2 浓度显著增加, CO_2 浓度明显下降。现在大气中的 CO_2 浓度约 $390 \mu\text{mol mol}^{-1}$, 是限制植物光合作用速率的重要因素。核酮糖二磷酸羧化酶/加氧酶(Rubisco)是一种催化 CO_2 固定的酶, 在低浓度 CO_2 条件下, 催化效率低。有些植物在进化过程中形成了 CO_2 浓缩机制, 极大地提高了 Rubisco 所在局部空间位置的 CO_2 浓度, 促进了 CO_2 的固定。回答下列问题:

(1)真核细胞叶绿体中, 在 Rubisco 的催化下, CO_2 被固定形成_____ , 进而被还原生成糖类, 此过程发生在_____ 中。

(2)海水中的无机碳主要以 CO_2 和 HCO_3^- 两种形式存在, 水体中 CO_2 浓度低、扩散速度慢, 有些藻类具有图 1 所示的无机碳浓缩过程, 图中 HCO_3^- 浓度最高的场所是_____ (填“细胞

”或“细胞质基质”或“叶绿体”，可为图示过程提供 ATP 的生理过程有

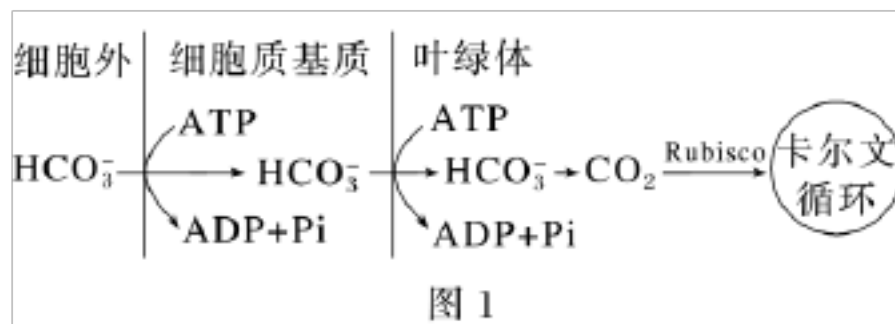


图 1

(3)某些植物还有另一种 CO_2 浓缩机制，部分过程见图 2。在叶肉细胞中，磷酸烯醇式丙酮酸羧化酶(PEPC)可将 HCO_3^- 转化为有机物，该有机物经过一系列的变化，最终进入相邻的维管束鞘细胞释放 CO_2 ，提高了 Rubisco 附近的 CO_2 浓度。

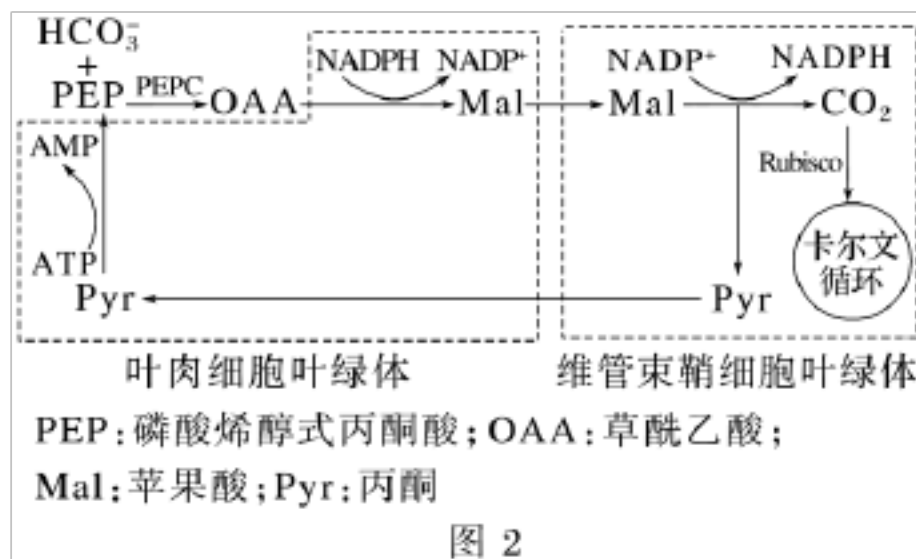


图 2

①由这种 CO_2 浓缩机制可以推测，PEPC 与无机碳的亲合力_____ (填“高于”“低于”或“等于”)Rubisco。

②图 2 所示的物质中，可由光合作用光反应提供的是_____。

图中由 Pyr 转变为 PEP 的过程属于_____ (填“吸能反应”或“放能反应”)。

③若要通过实验验证某植物在上述 CO_2 浓缩机制中碳的转变过程及相应场所，可以使用_____技术。

(4)通过转基因技术或蛋白质工程技术，可能进一步提高植物光合作用的效率，以下研究思路合理的有_____。

- A. 改造植物的 HCO_3^- 转运蛋白基因，增强 HCO_3^- 的运输能力
- B. 改造植物的 PEPC 基因，抑制 OAA 的合成
- C. 改造植物的 Rubisco 基因，增强 CO_2 固定能力
- D. 将 CO_2 浓缩机制相关基因转入不具备此机制的植物

案 (1)三碳化合物 叶绿体基质 (2)叶绿体 呼吸作用和光合作用 (3)①高于
②NADPH 和 ATP 吸能反应 ③同位素示踪 (4)AC

解析 (2) 1 可知， HCO_3^- 运输需要消耗 ATP，说明 HCO_3^- 是通过主动运输进入叶绿体的，主动运输一般是逆浓度运输，由此推断图中 HCO_3^- 浓度最高的场所是叶绿体。该过程中

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/737020132144006152>