

糖酵解和丙酮酸氧化过程中生成的 [H] 是在线粒体内膜上继续氧化的。^{NADPH} [H] 在酶的催化下释放电子和 H^+ ，电子被镶嵌在线粒体内膜上的一系列特殊蛋白质捕获和传递，最终与 O_2 和 H^+ 结合，生成了 H_2O ，而线粒体内膜上的这些特殊蛋白质则利用电子给予的能量将线粒体基质中的 H^+ 泵入内膜和外膜的间隙，构建了跨膜的 H^+ 浓度梯度。最终， H^+ 沿着线粒体内膜上 ATP 合成酶内部的通道流回线粒体基质，推动了 ATP 的合成（图 4-21）。这一阶段被称为有氧呼吸的第三阶段，需要 O_2 的参与，是有氧呼吸过程中产生 ATP 的主要阶段。

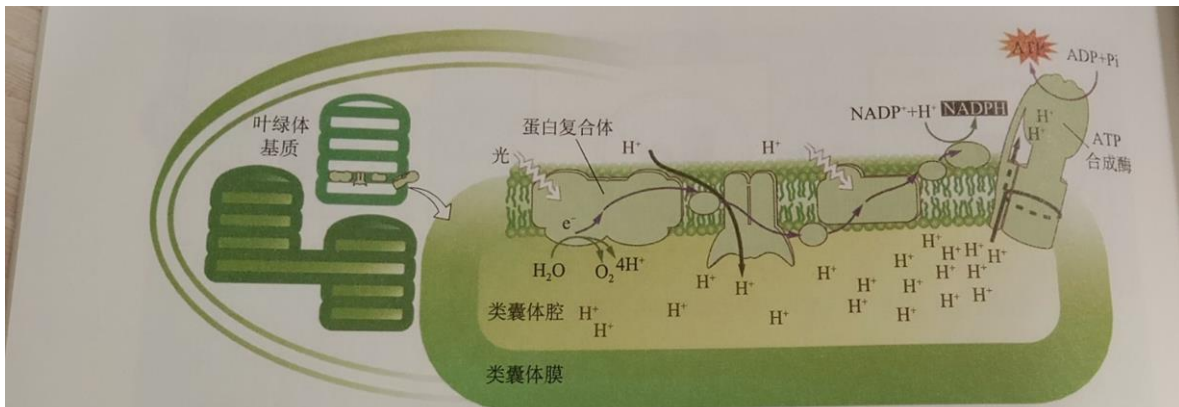
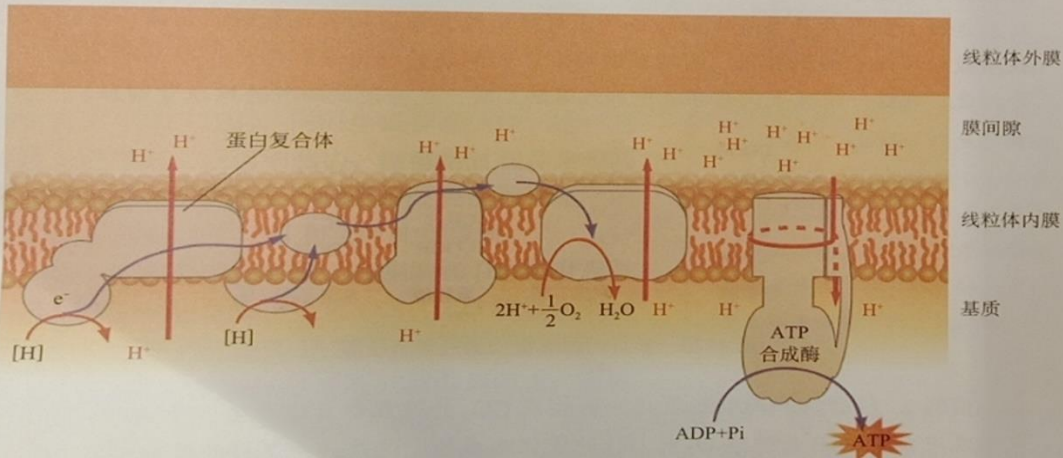
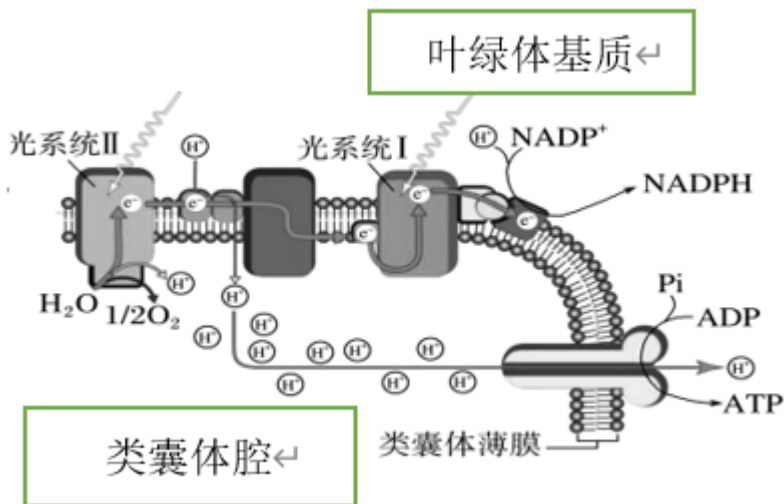


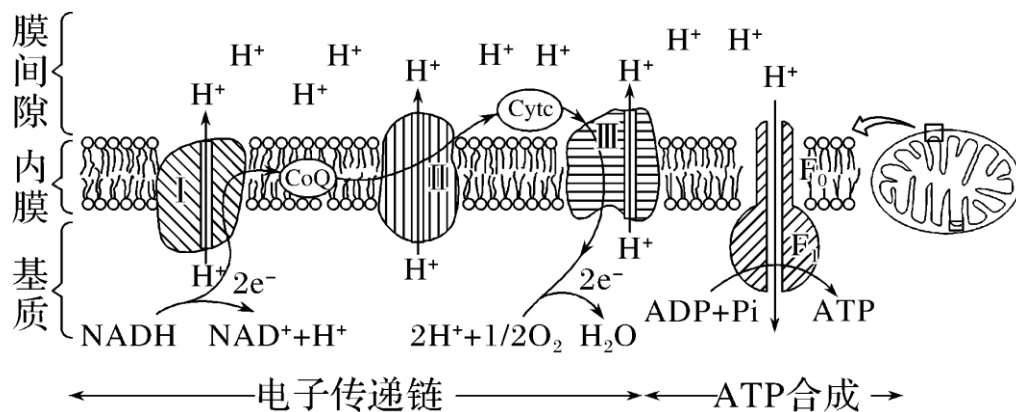
图 4-34 光反应的过程

总之，光反应可概括为水的光解、[H] 的生成和 ATP 的生成这 3 组反应。光能在光反应中被捕获，转变成了 ATP 和 [H] 中活跃的化学能。

光反应的过程如图 4-34 所示。镶嵌在类囊体膜上的光合色素分子整齐地排列在一起，它们能够捕获光能，将光能传递给位于反应中心的色素分子，该色素分子被激发，释放出一个高能电子。失去电子的色素分子有很强的夺电子能力，它们从水分子中夺取电子，使水分解成 H^+ 和 O_2 ， O_2 扩散进入大气。色素分子失去的电子被类囊体膜上的特殊蛋白质捕获，这些蛋白质利用电子携带的能量将 H^+ 从叶绿体基质泵入类囊体腔，并最终把电子传递给了 $NADP^+$ ， $NADP^+$ 获得电子后与 H^+ 结合，生成 [H]。类囊体膜上镶嵌有 ATP 合成酶，类囊体腔中的 H^+ 顺浓度梯度经 ATP 合成酶返回叶绿体基质，^{NADPH} 推动了 ATP 的生成。



- ①光系统 II 进行水的光解，产生氧气、 H^+ 和电子(e^-)，光系统 I 主要是介导 NADPH 产生。
- ②电子传递过程中释放能量，利用这部分能量将质子(H^+)逆浓度从类囊体的基质侧泵入囊腔侧，从而建立了质子浓度(电化学)梯度。光系统 II 通过在类囊体的囊腔侧进行的水的光解产生质子(H^+)以及在类囊体的基质侧 H^+ 和 $NADP^+$ 形成 NADPH 的过程，建立质子浓度(电化学)梯度。
- ③类囊体腔内的高浓度 H^+ 通过 ATP 合成酶顺浓度梯度流出，而 ATP 合成酶利用 H^+ 顺浓度梯度中的能量来合成 ATP。
- ④电子的最初供体是水，最终受体是 $NADP^+$
- ⑤光系统上含有叶绿素和类胡萝卜素。这些色素的主要功能是吸收、传递、转化光能。吸收的光能转化成化学能储存在 ATP 、 $NADPH$ 物质中



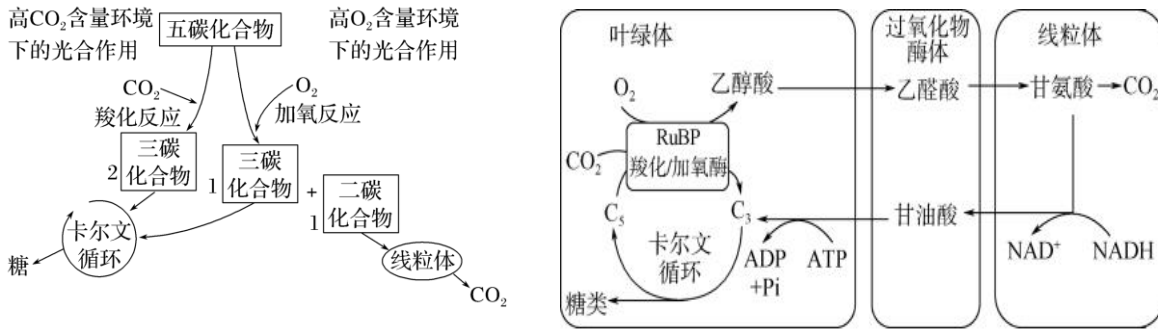
电子的最初供体是 NADH，最终受体是 O_2

糖酵解(有氧呼吸第一阶段)和丙酮酸氧化过程(有氧呼吸第二阶段)(也称三羧酸循环阶段)中生成的[H](NADH)是在线粒体内膜上继续氧化的。

[H] (NADH)在酶的催化下释放电子(e^-)和 H^+ ，电子(e^-)被镶嵌在线粒体内膜上的一系列特殊蛋白质捕获和传递，最终与 O_2 、 H^+ 结合，生成了 H_2O ，而线粒体内膜上的这些特殊蛋白质则利用电子(e^-)给予的能量将线粒体基质中的 H^+ 泵入内膜和外膜的膜间隙，构建了跨膜的 H^+ 浓度差。最终， H^+ 沿着线粒体内膜上 ATP 合成酶内部的通道流回线粒体基质，推动 ATP 的合成。

光呼吸

催化 CO_2 固定的 Rubisco 是一种双功能酶，同时具有羧化和加氧两种功能。光照条件下，叶肉细胞中 O_2 与 CO_2 竞争性结合 C_5 ， O_2 与 C_5 结合后经一系列反应释放 CO_2 的过程称为光呼吸，其过程如图所示：



- ①与光呼吸有直接关系的细胞器为叶绿体、线粒体。光呼吸产生的条件是光照、高 O_2 含量和低 CO_2 含量等。
- ②在干旱天气和过强光照下，因为温度很高，蒸腾作用很强，气孔大量关闭。由于光反应速率大于暗反应速率，此时光呼吸可以消耗光反应阶段生成的多余的 NADPH 和 ATP，防止强光对叶绿体的破坏，又可以为暗反应阶段提供原料 (CO_2)，因此光呼吸对植物有重要的正面意义。

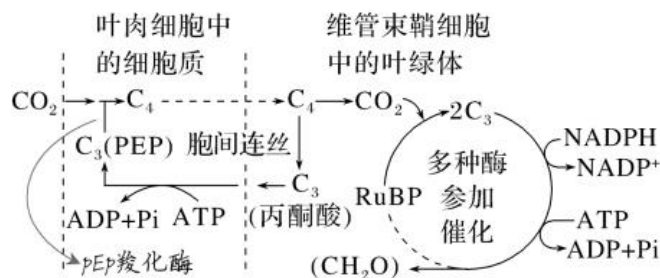
比较项目	光呼吸	细胞呼吸
底物	C_2 化合物	糖类等有机物
发生部位	叶绿体、线粒体等	细胞质基质、线粒体
反应条件	光照	光照或黑暗都可以
能量	消耗能量	产生能量
共同点	消耗 O_2 、释放 CO_2	

自然界中的绿色植物根据光合作用暗反应过程中 CO_2 的固定途径不同可以分为 C_3 、 C_4 和 CAM 三种类型。

1. C_3 途径：也称卡尔文循环，整个循环由 RuBP(C_5)与 CO_2 的羧化开始到 RuBP(C_5)再生结束，在叶绿体基质中进行，可合成蔗糖、淀粉等多种有机物。常见 C_3 植物有大麦、小麦、大豆、菜豆、水稻、马铃薯等。

2. C_4 途径：研究玉米的叶片结构发现，叶肉细胞中的叶绿体有类囊体能进行光反应，同时， CO_2 被整合到 C_4 化合物中，随后 C_4 化合物进入维管束鞘细胞，维管束鞘细胞中没有完整的叶绿体（无类囊体），在维管束鞘细胞中， C_4 化合物释放出的 CO_2 参与卡尔文循环，进而生成有机物。PEP 羧化酶可利用低浓度的 CO_2 ，被形象地称为“ CO_2 泵”，它提高了 C_4 植物固定 CO_2 的能力，使 C_4 植物比 C_3 植物具有较强光合作用。常见 C_4 植物有玉米、甘蔗、高粱等。

C_4 植物



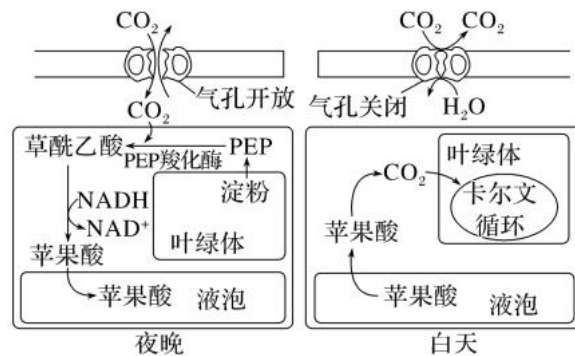
- ① C_4 植物叶肉细胞中的叶绿体有类囊体能进行光反应，而维管束鞘细胞中没有完整的叶绿体，所以 C_4 植物光反应发生在叶肉细胞的叶绿体类囊体薄膜上。
- ② C_4 植物 PEP 羧化酶对 CO_2 具有高亲和力，能利用低浓度的 CO_2 ，当外界环境干旱（特别是在高温、光照强烈、干旱

条件下), 导致植物气孔导度减小时, C_4 植物比 C_3 植物有较强光合作用能力, 并且无光合“午休”现象。

比较 类型	维管束鞘细胞		叶肉细胞	
	细胞大小	叶绿体	排	列
C_3 植物	小	不含	排列疏松	含有
C_4 植物	大	含有	“花环状”环绕在维管束鞘细胞外	含有

景天科植物(CAM植物)

景天科植物在夜间, 大气中 CO_2 从气孔进入, 被磷酸烯醇式丙酮酸(PEP)羧化酶催化, 与PEP结合形成草酰乙酸(OAA), 再经苹果酸脱氢酶作用还原为苹果酸, 储存于液泡中。在白天, 苹果酸从液泡中释放出来, 经脱羧酶作用形成 CO_2 和丙酮酸, CO_2 产生后用于卡尔文循环。



- ① 仙人掌、菠萝和许多肉质植物都进行这种类型的光合作用。这类植物特别适合于干旱地区, 其特点是气孔夜间开放, 白天关闭。
- ② 该类植物叶肉细胞夜间淀粉减少, 苹果酸增加, 细胞液 pH 下降; 白天淀粉增加, 苹果酸减少, 细胞液 pH 上升。
- ③ 其叶肉细胞中能起到固定 CO_2 作用的物质是 PEP、 C_5 。
- ④ 夜间景天科植物叶绿体中卡尔文循环不能(填“能”或“不能”)进行, 这是因为没有光照, 不能进行光反应, 缺少暗反应所需的 NADPH 和 ATP; 白天, 叶绿体中卡尔文循环能(填“能”或“不能”)进行, 这是因为呼吸作用和苹果酸分解可以为暗反应提供 CO_2 。

特征	C_3 植物	C_4 植物	CAM植物
与 CO_2 结合的物质	RuBP(C_5)	PEP	PEP
CO_2 固定的最初产物	C_3	C_4	草酰乙酸
CO_2 固定的时间	白天	白天	夜晚和白天
光反应的场所	叶肉细胞类囊体薄膜	叶肉细胞类囊体薄膜	叶肉细胞类囊体薄膜

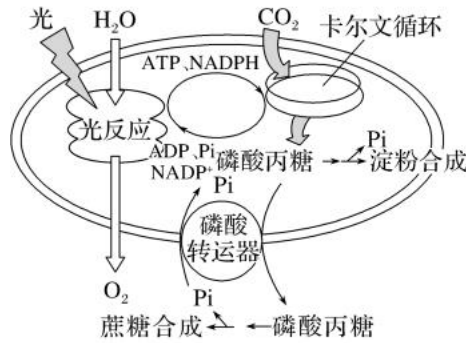
卡尔文循环的场所	叶肉细胞的叶绿体基质	维管束鞘细胞的叶绿体基质	叶肉细胞的叶绿体基质
有无光合午休	有	无	无

C_3 途径是碳同化的基本途径, C_4 途径和CAM途径都只起固定 CO_2 的作用, 最终还是通过 C_3 途径合成有机物。

小结：(1) C₃途径是碳同化的基本途径，C₄途径和CAM途径都只起固定CO₂的作用，最终还是通过C₃途径合成有机物。C₃、C₄、CAM植物都能在暗反应过程中将CO₂固定为C₃化合物，并利用类囊体（场所）产生ATP、NADPH中的化学能，合成糖类有机物。

(2) C₄植物是在不同细胞进行CO₂的固定，而CAM植物是在不同时间进行CO₂固定。

光合产物及运输



- ①磷酸丙糖是光合作用中最先产生的糖，也是光合作用产物从叶绿体运输到细胞质基质的主要形式。
 - ②光合作用产生的磷酸丙糖既可以在叶绿体中形成淀粉，暂时储存在叶绿体中，又可以通过叶绿体膜上的磷酸转运器运出叶绿体，在细胞质基质中合成蔗糖。合成的蔗糖或临时储藏于液泡内，或从光合细胞中输出，经韧皮部装载长距离运输到其他部位。
 - ③卡尔文循环中C₃还原的产物是磷酸丙糖，需进一步转化为淀粉在叶绿体中储存，以淀粉形式储存的优点是避免叶绿体渗透压过高，吸水涨破，减少磷酸丙糖的积累，避免对光合作用的抑制，维持叶绿体内渗透压。
- 部分磷酸丙糖运出叶绿体合成为蔗糖，进入维管束运输，试分析以蔗糖形式运输的优点是分子量小，易溶于水，有利于运输；非还原糖，化学性质较稳定；蔗糖为二糖，对渗透压影响较小。

[易错提醒] 与植物色素有关的几个易错点分析

- (1) 可进行光合作用的细胞不一定都含有叶绿体(如蓝细菌等)，但是都含有光合色素(叶绿素和藻蓝素)。
- (2) 叶绿素对红光和蓝紫光的吸收量大，类胡萝卜素对蓝紫光的吸收量大，对其他波段的光并非不吸收，只是吸收量较少。
- (3) 植物叶片呈现绿色的原因是叶片中的色素对绿光的吸收少，绿光被反射出来。
- (4) 植物的液泡中含有的色素不参与光合作用。
- (5) 利用纸层析法分离色素时，如果滤纸条只呈现胡萝卜素、叶黄素色素带，可能是忘记加碳酸钙导致叶绿素被破坏或所用叶片为“黄叶”。

细胞呼吸的场所及其物质能量转换的四点提醒

- (1) 线粒体是进行有氧呼吸的主要场所，但部分原核生物无线粒体，也能进行有氧呼吸。
- (2) 无线粒体的真核生物(或细胞)只能进行无氧呼吸，如蛔虫、哺乳动物成熟的红细胞等。
- (3) 细胞有氧呼吸释放的能量，大部分以热能的形式散失，少部分以化学能的形式储存在ATP中。无氧呼吸的能量大部分储存在酒精或乳酸中。无氧呼吸第二阶段不生产ATP。
- (4) 人体内产生的CO₂只来自有氧呼吸，人体无氧呼吸的产物是乳酸，无CO₂。