

光合作用如何在清晨苏醒？

Hope Townsend, Avery Imes 和 Xin Wang*

迈阿密大学文理学院, 微生物学系 (美国, 俄亥俄州, 牛津)

少年审稿人



COLEGIO
ALTOS DEL
CERRO
GRANDE
年龄: 11-12

在光合作用的奇妙世界里, 植物利用阳光的能量, 将二氧化碳气体中的碳转化为它们需要的固态碳, 从而构建出自己的植物体。光合作用主要分为两大部分: 第一部分是植物吸收阳光能量, 第二部分则是进行一个复杂的化学反应, 这个反应被称为卡尔文-本森-巴沙姆 (CBB) 循环。当一夜的黑暗过后, 植物在早晨开始“苏醒”, 但这两个过程并不是同时启动的。这种不同步的情况可能对植物细胞产生不良影响, 但幸运的是, 植物细胞能够巧妙地调节这两个过程, 有效避免了这个问题。科学家们为了更深入地理解光合生物是如何从夜晚过渡到白天的, 对一种名为蓝细菌的光合细菌进行了研究。他们重点探究了氧化戊糖磷酸途径 (OPP 途径), 以了解这一途径如何帮助植物从黑暗环境适应到光照环境。研究发现, OPP 途径不仅可以帮助植物在光照条件下迅速恢复光合作用, 还能有效防止植物细胞因为过度光照而受到损伤。

光合作用是什么? 如何研究光合作用?

植物不吃饭, 但它们也需要食物来生长。那么, 植物是怎么获取食物的呢? 答案就在于光合作用。通过光合作用, 植物能够利用阳光的能量, 把空气中的二氧化碳气体转换成固态的碳, 这就是它们的“食物”。这些固态碳用来构建植物体, 比如我们常吃的莴苣叶或土豆根等部分。作为我们的食物来源之一, 植物需要高效地生长, 而这就是

蓝细菌 (Cyanobacteria)

一种进行光合作用时会产生氧气(类似于植物)的微观生物,科学家们利用它们来研究光合作用。

卡尔文-本森-巴沙姆 (CBB) 循环 (Calvin-benson-bassham (cbb) cycle)

这一循环利用光合作用中的光反应能量,将二氧化碳转化为固态碳。

酶 (Enzymes)

细胞中的蛋白质“工人”,帮助进行化学反应。

中间体 (Intermediates)

酶用于完成反应的化合物。

活性氧 (ROS) (Reactive oxygen species)

由于吸收过多电子形式的能量而产生毒性的氧气。

通过制造固态碳来实现的。深入了解植物的生长过程对我们提高农业产量,满足全球日益增长的人口需求至关重要。但是,研究植物并非易事。有时候,植物体积太大,无法放入实验室;有时候,它们生长太慢,在多数情况下都不是合适的实验对象;而且改变它们的基因也颇具挑战。面对这些难题,我们如何研究光合作用呢?这时,我们可以借助一种名为**蓝细菌**的细菌。蓝细菌能进行光合作用,它们的行为类似于简单的植物,因此可以在实验室里替代植物进行实验。由于蓝细菌与植物有许多相似之处,我们可以把在蓝细菌上得到的实验结果应用于植物。

蓝细菌虽然只是微小的光合作用生物,但它们在地球生态史上扮演着举足轻重的角色!事实上,它们是地球上最早进行光合作用并制造氧气的生命形式。这种光合作用,正是我们今天在植物中观察到的那样。大约 24 亿多年前,很可能就是蓝细菌首次将氧气引入了地球的无空气大气层 [1]。蓝细菌简单而又重要,是实验室里研究光合作用的理想模型生物。

光合作用如何在清晨苏醒

在蓝细菌和植物中,光合作用主要包括两个过程:利用阳光进行能量制造的光反应,以及**卡尔文-本森-巴沙姆 (CBB) 循环**。光反应的任务是利用细胞机器从太阳光中吸收光能,并将其转化为高能电子形式的化学能。这些高能电子就像是一个个小能量包,它们随后被传递到 CBB 循环中,这一环节使用这些能量包来制造碳分子。蓝细菌或植物再利用这些碳分子来构建自己的身体。CBB 循环的运行依赖于一种称为**酶**的活性蛋白质。这些酶的功能是将空气中的碳转化为固态的碳。同时,这些酶还需要依赖其他被称为**中间体的**细胞物质来制造最终的产品。

想象一下,当日落降临,植物或蓝细菌如何度过它们的夜晚。由于光反应依赖于阳光来提供能量,缺少太阳光时,它们就无法产生高能电子,这意味着这些反应在黑暗中基本上处于“休眠”状态。同样地,CBB 循环在夜间也会进入休眠状态,因为它需要光照来激活其中的一些酶(图 1A)。在白天,这两个过程共同为细胞提供所需的能量和碳,支持细胞的生长。虽然这些循环在夜间并不活跃,但光合细胞能够通过消耗白天产生的一些中间体来维持生存。这里就出现了一个问题:在没有新的补充的情况下,这些细胞材料会逐渐被耗尽。

紧接着太阳就升起来啦!进行光反应的细胞机制开始苏醒,进而产生高能电子。然而,CBB 循环此时还没有完全准备好——尽管它的酶会随着光照逐渐苏醒,但苏醒速度较慢,而且为酶工作提供能量的中间产物也相对较少(见图 1B)。在 CBB 循环尚未活跃的情况下,由光反应产生的高能电子找不到合适的去处,因此开始积聚并转移到氧分子上。但氧分子并不能有效地处理这些高能电子,结果形成了一种名为**活性氧 (ROS)**的有害物质,这种物质可能损坏光系统原件,甚至可能导致细胞

图 1

(A) 由于夜间缺乏光照, 光合作用的活动性降低, 细胞便需要依赖消耗中间物来维持生命。(B) 当细胞重新接受到光照时, 光反应便开始启动, 但是, CBB 循环的启动速度相对较慢。如果细胞中缺少中间物, CBB 循环就无法正常运行。这种情况下, 光反应产生的电子 (e^-) 无法有效进入 CBB 循环, 而是最终将氧气转化为有害的活性氧 (ROS)。(C) 随着时间的推移, 光合作用会恢复正常运行, 但目前科学家们还未完全明白这一过程的转变是如何发生的。

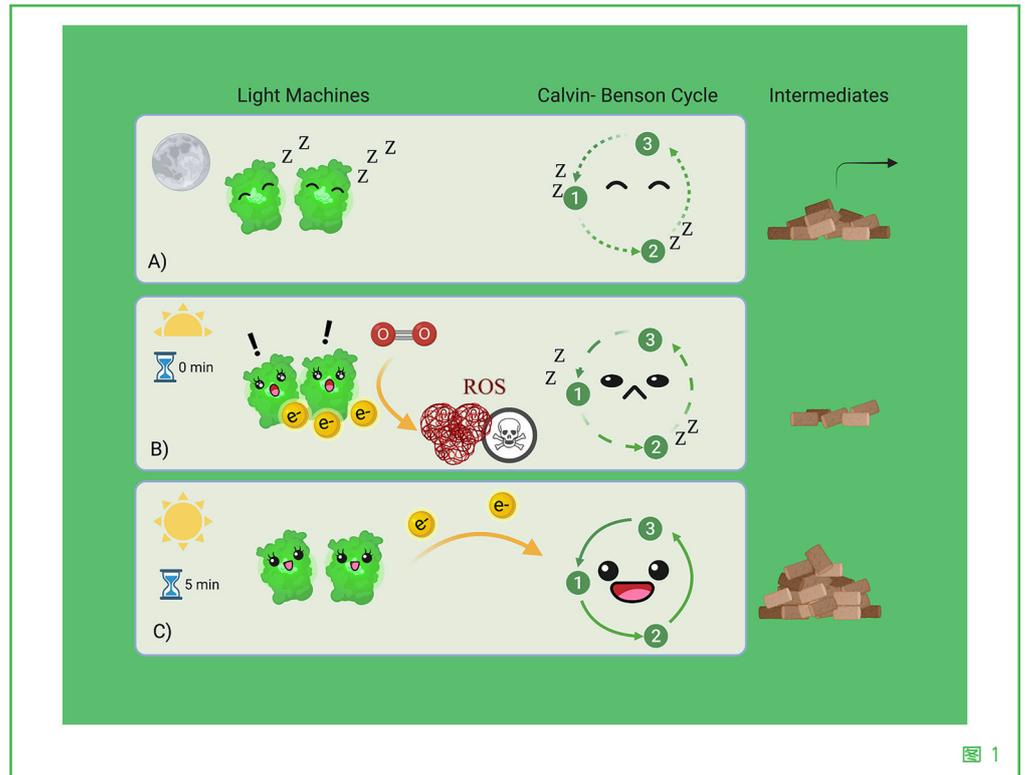


图 1

死亡。然而, 光合生物在这种日复一日的夜晚到白天的过渡中已经存活了数百万代。不知何故, CBB 循环能够足够快地苏醒, 并在造成重大损害之前使光合作用恢复正常运行 (见图 1C)。其背后的原因到底是什么呢?

是什么让光合作用苏醒?

除了光合作用, 蓝细菌还有许多其他的化学途径, 帮助它们在夜间保持活力。例如, 它们可以将白天产生的一部分碳以大量糖分子的形式储存起来, 这些糖分子随后可以分解成小片段, 供细胞使用 (见图 2)。这些小片段被引入一系列称为氧化戊糖磷酸途径 (OPP 途径) 的化学反应中。当光合作用不活跃时, OPP 途径就会分解糖分, 为细胞提供能量。科学家们曾经认为, 光合作用主要在白天进行, 而 OPP 途径则在夜间发挥作用, 且两者不会同时活跃 [2]。但随后的研究发现, OPP 途径在白天也是活跃的, 尽管它并不像在夜间那样产生能量。在白天, 当 CBB 循环缓慢启动且无法从光反应中获取足够的电子时, OPP 途径就会发挥作用, 帮助生物体从夜晚平稳过渡到白天。

OPP 途径的帮助在于什么呢? 当大糖分子的碎片用于 OPP 途径时, 这个过程会消耗掉电子。因此, 当电子还不能进入尚未完全苏醒的 CBB 循环时, 活跃的 OPP 途径可以在光反应产生有害的活性氧之前吸收这些电子。这意味着, OPP 途径通过在高能电子对细胞造成损害之前将它们带走, 从而有助于保护光系统原件 (参见图 2, 黄色箭头)。

氧化戊糖磷酸途径 (OPP 途径) (Oxidative pentose phosphate (Opp) pathway)

将糖分子转化为可用于多种过程的其他分子的途径, 在本文中就是帮助光合作用。

图 2

OPP 途径在光合作用从暗到明的转变过程中起着支持作用。在夜间, 作为细胞燃料的糖分子片段会被送入 OPP 途径中。当 OPP 途径分解这些糖分, 它利用光反应机制产生的高能电子, 因此不会形成有害的活性氧 (见黄色箭头指示)。此外, OPP 途径还会“唤醒”一些 CBB 循环中的酶 (见橙色箭头指示), 并为 CBB 循环 (见红色箭头指示) 提供必要的中间体。

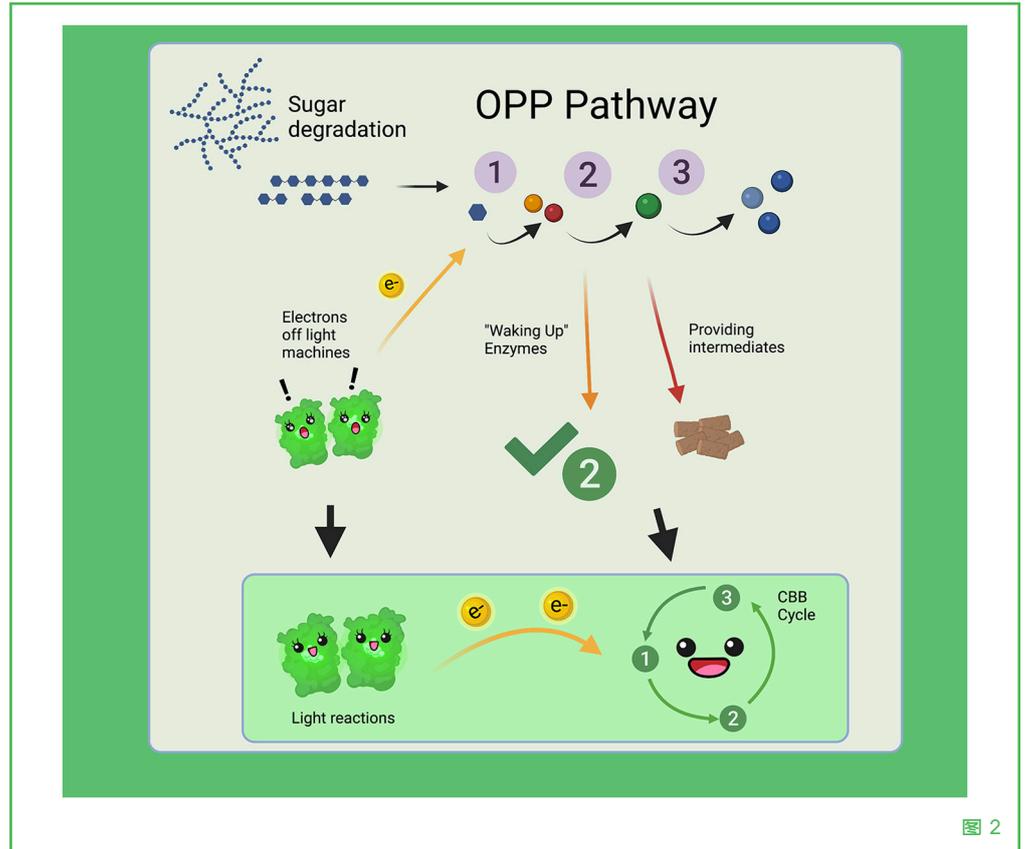


图 2

在从暗到亮的转变过程中, 第二个挑战是唤醒 CBB 循环中的酶。这些酶相比于光反应中的酶苏醒速度较慢。不过, 我们可以利用一种类似化学闹钟的方法来唤醒它们。OPP 途径正是负责产生这些类似闹钟的分子, 用以激活 CBB 循环中的酶 (参见图 2, 橙色箭头)。

重新启动 CBB 循环面临的最后一个障碍是缺少必要的中间体。这些中间体在整个夜晚可能被耗尽, 因为生物体在没有光反应的情况下仍需维持生存。OPP 途径通过分解大糖分子帮助补充一些这样的缺失中间体 (参见图 2, 红色箭头)。然而, 还有许多其他中间体并未通过 OPP 途径得到补充。生物体如何获取这些必需的中间体呢? 这个问题还没有得到完全的解答。尽管如此, 有一种理论提出, 一种称为恩特纳-杜多罗夫途径 (ED 途径) 的替代过程可能在蓝细菌中补充这些中间体 [3]。研究表明, 破坏 ED 途径会降低蓝细菌的生长速度, 这暗示了该途径可能在补充缺失的中间体方面发挥作用。然而, 植物补充中间体的方式尚未被发现, 因为植物并不具有 ED 途径。

恩特纳-杜多罗夫途径 (Entner-doudoroff pathway)

主要存在于细菌中的一种途径, 使细菌能够利用独特的反应分解糖类。

总的来说, OPP 途径不仅在夜晚帮助光合生物维持活力, 还通过促进生物体的快速“重启”, 帮助它们从夜晚顺利过渡到白天。这使得 OPP 途径具有保护光合作用机制的作用, 即它能够保护光合作用免受光线的潜在破坏性影响, 同时确保细胞过程的高效运作。

长远意义

之前，关于 OPP 途径能够稳定光合作用的观点主要停留在理论层面 [4]。然而，这项新的研究工作提供了实验证据，证实了 OPP 途径如何帮助蓝细菌应对从夜间到白天转换过程中面临的挑战 [2]。这项研究的主要影响在于，由于蓝细菌和植物共有相同的 CBB 循环，其结果可被应用于植物。未来基于蓝细菌的研究将有助于我们深入理解如何优化 OPP 途径与 CBB 循环之间的相互作用，从而探索出能够改进光合作用的方法。通过这些研究成果应用于植物，我们可能能够提高农作物的生长效率，这对于养活全球日益增长的人口将具有重要意义。

研究资金支持

本研究由美国国家科学基金会 (National Science Foundation) 提供的 2042182 号基金支持。文章中的图表是通过 [BioRender.com](https://www.biorender.com) 制作的。

原文

Shinde, S., Zhang, X., Singapuri, S., Kalra, I., Liu, X., Morgan-Kiss, R. M., et al. 2020. Glycogen metabolism supports photosynthesis start through the oxidative pentose phosphate pathway in cyanobacteria. *Plant Physiol.* 182:507–17. doi: 10.1104/pp.19.01184

参考文献

1. Blankenship, R. E. 2010. Early evolution of photosynthesis. *Plant Physiol.* 154:434–38. doi: 10.1104/pp.110.161687
2. Makowka, A., Nichelmann, L., Schulze, D., Spengler, K., Wittmann, C., Forchhammer, K., et al. 2020. Glycolytic shunts replenish the calvin-benson-bassham cycle as anaplerotic reactions in cyanobacteria. *Mol Plant.* 13:471–82. doi: 10.1016/j.molp.2020.02.002
3. Sharkey, T., and Weise, S. 2016. The glucose 6-phosphate shunt around the Calvin-Benson cycle. *J. Exp. Bot.* 67:4067–77. doi: 10.1093/jxb/erv484
4. Shinde, S., Zhang, X., Singapuri, S., Kalra, I., Liu, X., Morgan-Kiss, R. M., et al. 2020. Glycogen metabolism supports photosynthesis start through the oxidative pentose phosphate pathway in cyanobacteria. *Plant Physiol.* 182:507–17. doi: 10.1104/pp.19.01184

线上发布: 2024 年 2 月 08 日

编辑: [Suhas Kumar](#)

科学导师: [Carlos Henríquez-Castillo](#)

引用: Townsend H, Imes A 和 Wang X (2024) 光合作用如何在清晨苏醒? *Front. Young Minds*. doi: 10.3389/frym.2022.785172-zh

英文原文: Townsend H, Imes A and Wang X (2022) How Does Photosynthesis Wake up in the Morning? *Front. Young Minds* 10:785172. doi: 10.3389/frym.2022.785172

利益冲突声明: 作者声明, 该研究是在没有任何可能被解释为潜在利益冲突的商业或财务关系的情况下进行的。

版权 © 2022 © 2024 Townsend, Imes 和 Wang. 这是一篇依据 [Creative Commons Attribution License \(CC BY\)](#) 条款发布的开放获取文章。根据公认的学术惯例, 在注明原作者和版权所有者, 及在标明本刊为原始出处的前提下, 允许使用、传播、复制至其他平台。如违反以上条款, 则不得使用、传播或复制文章内容。

少年审稿人



COLEGIO ALTOS DEL CERRO GRANDE, 年龄: 11 - 12

这些 11 岁和 12 岁的学童虽然以西班牙语为母语, 但他们同样喜欢英语, 并且英语水平也相当不错。最重要的是, 他们对学习新事物充满热情。这群孩子充满活力、性格开朗, 他们不拘泥于常规, 总是寻求新的挑战, 对世界充满好奇心。

作者



HOPE TOWNSEND

Hope 是迈阿密大学微生物学专业的大四学生, 同时辅修地质学和生物信息学。她小时候并不喜欢科学, 直到高中时, 她开始认识到科学意味着对生命复杂性的敬畏, 并能够利用生命的机制来改善生活。这种认识让她对科学产生了浓厚的兴趣。在本科学习期间, 她参与了几个不同的科研项目, 其中包括担任国际基因工程机器 (iGEM) 竞赛的领队, 主要研究蓝细菌的光合作用。她很高兴能在研究生阶段作为独立研究员进一步挑战自己。



AVERY IMES

Avery Imes 是迈阿密大学微生物学专业的本科生。她与其他同学一起参与了一个国际基因工程机器 (iGEM) 项目, 该项目专注于通过卡尔文循环的代谢工程来提高光合作用的效率。Avery 计划明年继续她的学业, 攻读博士学位。她对光合作用的兴趣不仅局限于实验室的研究; 在日常生活中, 她还养了一些盆景树, 希望这些树能够从更高效的光合作用中获益。



XIN WANG

王鑫是迈阿密大学微生物学系的助理教授。他的职业生涯起初集中于海洋微生物生态学, 后来扩展到微生物合成生物学领域。目前, 他的研究重点是探索蓝细菌光合作用的改善方式, 他的目标是在不久的将来将这些研究成果应用于植物学, 以提高农作物的效率。王教授认为传播科学知识是研究的重要部分, 他希望这篇文章能成为年轻一代理解和热爱光合作用及科学的一个窗口。*wangx98@miamioh.edu