

碳中和新旅程

许钟翰, 李玥嘉, 陈建成*

南京大学化学化工学院, 南京 210023

摘要: 随着全球气候变化的加剧与可持续发展的重要性日益提升, 碳中和成为了一个备受关注的话题。本文以碳元素为主角, 介绍了碳在不同形态下的转化和循环过程, 阐述了自然界固定二氧化碳的方式, 同时还科普了新的碳中和方法, 包括二氧化碳合成淀粉和生物质转化利用等内容, 这些研究成果是为了构建更加绿色、可持续的社会。

关键词: 碳中和; 碳循环; 淀粉合成; 生物质

中图分类号: G64; O6; Q42

New Journey towards Carbon Neutrality

Zhonghan Xu, Yuejia Li, Kin Shing Chan *

School of Chemistry and Chemical Engineering, Nanjing University, Nanjing 210023, China.

Abstract: With the intensification of global climate change and the growing importance of sustainable development, carbon neutrality has become a significant topic of concern. This article focuses on the element of carbon, introducing its transformation and recycling processes in various forms. It discusses how carbon dioxide is fixed in nature and highlights new methods for achieving carbon neutrality, including starch synthesis and biomass conversion, aimed at building a greener, more sustainable society.

Key Words: Carbon neutrality; Carbon cycling; Starch synthesis; Biomass.

1 碳的“自我介绍”

大家好, 我是小C, 想必你们都认识我了。我常常以各种面貌出现: 我可以是“暖男”二氧化碳, 可以是地下富藏的油气田, 还可以是你, 是他, 是我们每个人、每个细胞中最基础的元素和能量来源。我的身份妇孺皆知, 但一旦说到我是怎么在不同身份中相互转化的, 相信大多数人还是知之甚少。今天, 就让我自己来给你介绍一下我的故事。

2 二氧化碳的自然固定

我们现在进入大气层——此刻你看见的是我的第一个身份, 就是大名鼎鼎的二氧化碳。虽然我在空气中只占0.0304%的体积, 但你可不要因为这个不起眼的含量就小瞧我的本领——哺乳动物的呼吸系统需要我来刺激才可以运行; 我同时还是生物体内多种重要物质, 如核苷酸等的前体; 更为重要的是, 我是光合作用的原料, 是碳循环不可或缺的一环^[1]。我虽然在大气中占据万分之几的体积, 但我对维持地球的温度可至关重要——地球历史上几次大冰期都少不了我的身影, 我还可以让

海水酸化，当今让人类头疼的温室效应也主要是我的“功劳”。

现在，让我来带你去下一站，见识见识我小C的另一个身份。现在，我要进入植物体内进行光合作用了(图1)。水在叶绿体的类囊体薄膜上发生光解，产生氧气，同时还有还原型辅酶II和腺苷三磷酸(NADPH和ATP)——我们称之为光反应；与此同时，我——CO₂与C₅(1,5-二磷酸核酮糖，RuBP)反应而羧化，再立刻裂解生成两分子C₃(3-磷酸甘油酸)，后者一部分被光反应产生的NADPH还原，再生成其他糖类，另一部分参与C₅的再生。在植物叶绿体中无机的我转化为有机物的形态，从而进入碳循环的下一个环节^[2]。

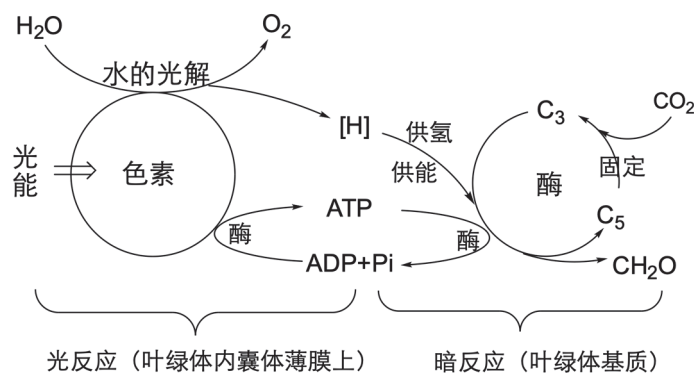


图1 光合作用原理示意图

Pi表示磷酸，ADP表示腺苷二磷酸

“啊！这是怎么回事？”大地剧烈地摇动，是地震！泥沙覆盖了我，随着时间的推移，我被掩埋得越来越深，长时间与空气隔绝，加之高温高压的历练，千百万年后，我逐渐变成了煤、石油、天然气。我沉睡在地底，不知过了多久……

3 化石燃料的破土而出

突然间，一阵刺耳的嘈杂声打破了地下的宁静，我打了个哈欠，揉了揉眼睛说道：“这是什么情况？”在嘈杂声中，我努力地睁开双眼，探了探外面的世界。原来是石油工人把我们从小C从地下挖了出来，正运往各个工厂，作为燃料来为机器供能。

于是，在氧气的帮助下，我小C又氧化变回了CO₂，我像往常一样寻找着光合工厂的入口。

哎，不对，怎么通往光合工厂的入口排了这么长的队？让我们去问问看。

小C问：“你好！我的朋友，请问通往光合工厂的路怎么排了这么长的队？”

另一个CO₂分子播放了一个视频并介绍：“人类的活动——首先是对煤、石油、天然气的大量开采，随后是它们在各处消耗和燃烧。”沉积了亿万斯年的碳元素在火力发电厂的锅炉下燃烧、在大街上汽车的引擎中燃烧、在工厂的炼钢炉里燃烧……燃烧产生的大量二氧化碳如汹涌的人潮向我们涌来，排在这个长队逐渐望不到头的队尾。

“哎，不仅如此，光合工厂也是越来越少喽！”一个CO₂分子叹着长气，振动着的双臂指向隔壁在油锯的淫威下一颗颗倒下的树，同时油锯的尾气里又跑出好多CO₂分子加入了队伍。

“咦，怎么感觉越来越热了？”另一个CO₂分子问道。“是温室效应，”小C解释道，“我们二氧化碳是一种温室气体，能够吸收绝大多数地球表面发出的长波辐射，阻碍地球向宇宙散热。我们的增加就像是把塑料大棚换成了玻璃温室，保温效果更好——自然也就更热了。据研究，人类活动使地球平均升温1.1℃，对人类和生态系统带来的影响远超预期——海平面上升、极端气候增加、生物多样性丧失等影响威胁着地球^[3]”。

“哎呀，这样下去可不行。”一个CO₂分子说道，“那我们该怎么办呢？”

另一个CO₂分子说道：“除了我们现在在排队的传统路线——光合作用，我听说人类正在研究许多新的办法来减少二氧化碳，平衡二氧化碳的产生和消耗，这就是实现‘碳中和’。不如小C你去人类世界做一次旅行吧？”

4 有机物诞生的新旅程

听从了建议，我离开了拥挤的光合工厂，来到了人类科学家的实验室里一探究竟。除了复杂但精妙的光合作用，怎样才能降低空气中的二氧化碳含量呢？

突然，我被捕获到了钢瓶中，随后，就进入了实验室的反应器。在那里，我遇到了H₂，他与我一起在催化剂的作用下生成了甲醇，再在酶的氧化下生成了甲醛。这让我大失所望——我本以为这次与我曾经在化工厂的经历一样，都只是人类为了制造普通化学品和用品的一个过程。但下一步，我的感受开始不一样——身为甲醛的我经过了酶的催化，转化为了DHA（二羟基丙酮）。随后，我居然在这个没有细胞的环境里遇见了以前几乎只会在生物细胞里遇见的ATP分子。在酶的催化下，我得到了它的磷酸基团，并且进一步转化为了GAP（3-磷酸甘油醛）。我开始意识到这段旅程的特殊之处——我正在人类的化学实验室里尝试重走生物体内合成糖类的路径！又在各种酶的催化下经过了一系列转化，我终于变成了G-6-P（6-磷酸葡萄糖），并经过异构化，与ATP反应得到ADPG（ADP-葡萄糖）——此刻，我知道我离淀粉只差一步。终于，在淀粉合成酶的催化下，我聚合成了淀粉(图2)^[4]。

原来，科学家们是想复刻我在生物体内合成淀粉的旅程。在生物体内，糖的合成主要通过糖异生——由多种酶催化，经历多次与ATP相关的磷酸化和去磷酸化进行的，从三碳化合物(如丙酮酸等)逐渐合成六碳糖，再合成多糖，是由ATP提供所需的多个能量势垒的过程。在实验室里，科学家们不仅借鉴了生命体内这一三碳化合物到六碳糖再到多糖的路径，还把这一过程工业化了，或许在不远的将来还会搬到真正的“光合工厂”里。

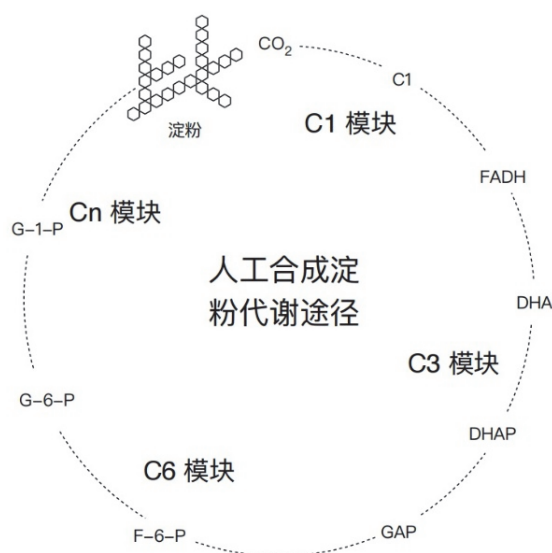


图2 从CO₂开始人工合成淀粉的部分代谢途径(顺时针)

为什么要费这么大的周章在生物体外合成淀粉呢？看到我的疑问，科学家骄傲地向我介绍了他们的成果：“我们这一人工途径的淀粉合成速率是玉米中淀粉合成速率的8.5倍！这个成果不仅为我们用二氧化碳为原料合成复杂分子提供了新的技术路线，更有价值的是，说不定在不远的将来，会彻底改变人类的粮食生产模式，人类将不再需要现在那么多的耕地，耕地与森林的矛盾也会缓和许

多。实际上，按照现在的技术参数推算，在能量供给充足条件下，1立方米大小的反应器年产淀粉量相当于5亩土地玉米种植的淀粉年平均产量(按我国玉米淀粉平均亩产量计算)。我为这样的成果由衷地感到高兴，或许未来我们二氧化碳想变成淀粉，就不必再在植物的“光合工厂”门口“人挤人”，而是多了一扇新的大门，新的旅程。

一阵微风将我卷起，告别了这间实验室，我又踏上了碳循环的旅程。不知过了多久，我又转化为了二氧化碳，挤进了一家光合工厂。在这里，我再次经历了一系列反应被固定——这次，我成为了木质素分子的一部分，与其他分子一起支撑着这颗大树的结构。突然，大树在锯子的轰鸣中轰然倒塌。随后——我被送进了一家造纸厂，在这里，我的兄弟纤维素被送去造纸，我不幸地混入了造纸废料，我又被送进了一间实验室，看见科学家正在对我的转化——也是各类生物质的转化进行研究。

科学家向我介绍道：“生物质是一个范围非常广的概念，包括来自于生物体的植物纤维(纤维素、半纤维素、木质素)、油脂、蛋白、几丁质等物质，可以从木材、藻类甚至农业废弃物等原料提取，具有再生能源和可持续化学品生产的潜力。”

“你还记得你曾经变成过煤、石油和天然气，亲眼见识过过度开采的状况吗？有了我们的研究，或许这个问题会得到部分解决。”科学家继续说道。原来，化石燃料除了作为能源供应外，还是化学工业长期依赖的原料——因此即使广泛开发清洁能源，也无法使人类彻底摆脱对化石原料的依赖。而生物质衍生的平台分子，也有作为各类化工原料的潜质。而且相比化石燃料，它们容易获得，可以方便地再生，甚至可以来源于许多工农业生产过程的“废物”，如造纸废料、秸秆，甚至龙虾壳等，因此，对它们的利用具有很高的潜在价值。

通过科学家的进一步介绍，我了解到，通过各种技术的综合应用，科学家们正在尝试释放生物质生产生物燃料和化工产品的潜力。由生物质生产燃料发展较早，已经形成了多条技术路线，如油脂的脱氧、木质素的加氢脱氧、纤维素基平台化合物的偶联-加氢等。“考考你，你知道另一方面——也就是生产化工产品的方向，利用你们生物质有什么优势吗？”科学家向我提问。我说：“这我知道。你看我，身为木质素，我的身体有大量的苯环结构，这使得以我为基础可以获得之前主要从化石燃料获取的芳香类分子。此外，我复杂的结构里含有大量的官能团——羟基、甲基、羰基等，从这个角度说，我在化学家的眼里一定长得很‘漂亮’，因为我丰富的官能团结构使得化学家们不用再绞尽脑汁如何引入新官能团，而可以直接关注于如何对我的官能团进行进一步的转化和利用，实现更少的反应步骤和更好的原子经济性^[5]。”

科学家对我的说法十分赞同，“以木质纤维素类分子(纤维素、半纤维素、木质素等)为例，由于其结构，它们已经被视为最大的可再生芳烃资源。人们已经能够基于它们生产一系列衍生平台分子，如糠醛、5-羟甲基糠醛(HMF)、苯酚等，并对这些平台分子的进一步转化开发出了热催化、电催化等多条赛道来生产精细化学品。对整个过程，我们有一个称呼，叫做‘生物炼油’(图3)。”

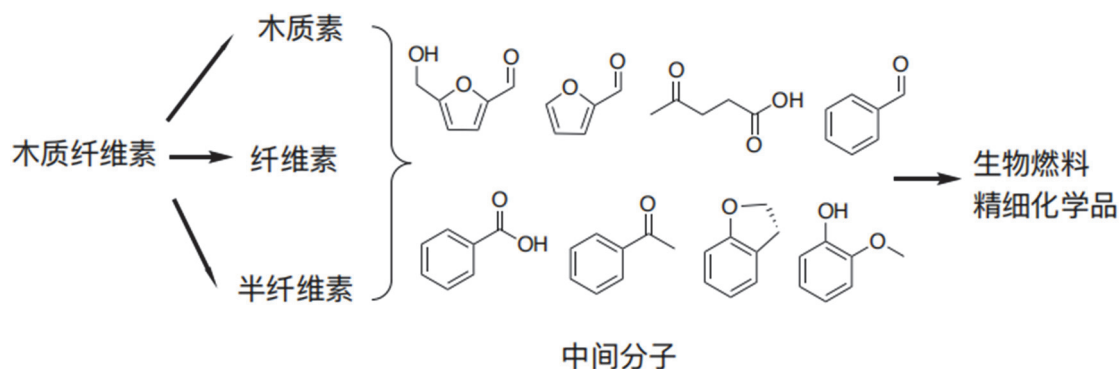


图3 木质纤维素类生物质部分转化路径示意图

“很贴切的名字。”我赞叹道。

“不过，这整个过程也仍然面临着许多问题。首先，大部分待利用、待开发的生物质往往是高分子，如木质素、纤维素、几丁质等。而需要开发就首先面临着将它们解聚的问题——它们的单体手拉手结合在一起，十分紧密，使得它难被化学降解——对于这个问题，我们决定到自然界中寻找答案。自然界中这些大分子的降解——无论是树木腐朽，还是食草动物的消化，都离不开各种微生物的分解。以木质素为例，顺着这个思路，我们已经在微生物中发现了许多酶，能够高效帮助木质素降解，并产生各种平台分子，如多种细菌漆酶^[6]”。

“这些成就真了不起！”我为科学家们的成绩点赞。

5 结语

我离开了实验室，又加入了碳循环的队伍，围绕着这颗因为我们碳元素而生机勃勃的星球继续着我的旅程。回顾这段旅程，我再一次看到了到了碳循环是一个多么庞大的系统(图4)。从生产、消费到废弃，我在人类的生活中无处不在，而人类的行为也直接影响着碳在大气、海洋和陆地之间的流动。经过这样一段旅程，我看到了人类在促进碳中和上的许多新努力，我也相信，随着人们的努力，未来，我还会有其他新的方式走过我的循环之旅，它一定会更加顺畅！

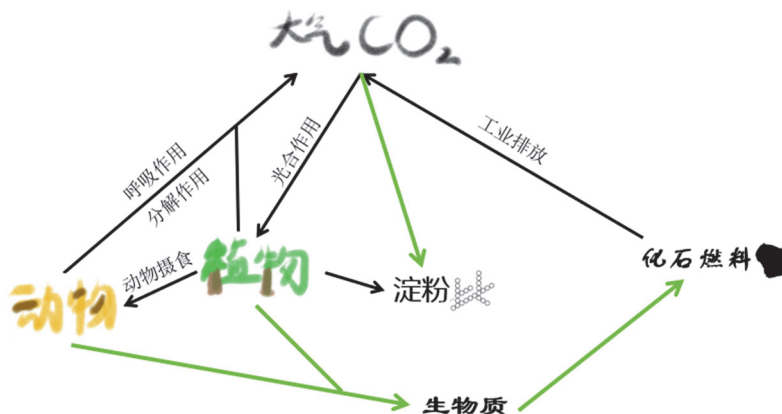


图4 “碳中和新旅程”示意图

绿色箭头为“新旅程”；电子版为彩图

参 考 文 献

- [1] 刘要生. 生物学通报, 1998, 10, 20.
- [2] 陈阅增. 普通生物学. 第4版. 北京: 高等教育出版社, 2014.
- [3] IPCC. *AR6 Synthesis Report: Climate Change 2023*. [2025-02-25]. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/>
- [4] Cai, T.; Sun, H.; Qiao, J.; Zhu, L.; Zhang, F.; Zhang, J. *Science* 2021, 373, 1523.
- [5] Ragauskas, A. J.; Beckham, G. T.; Biddy, M. J.; Chandra, R.; Chen, F.; Davis, M. F.; Davison, B. H.; Dixon, R. A.; Gilna, P.; Keller, M.; *et al.* *Science* 2014, 344, 6185.
- [6] Liu, Z. H.; Li, B. Z.; Yuan, J. S.; Yuan, Y. J. *Trends Biotechnol.* 2022, 40 (12), 1551.