

序

DOI: 10.12211/2096-8280.2022-049

合成生物学助力碳中和：新底盘、新策略与新技术

孙韬^{1,2,3}, 张卫文^{1,2,3}, 胡章立^{4,5}, 元英进^{1,3}

(¹ 天津大学化工学院, 天津 300072; ² 天津大学生物安全战略研究中心, 天津 300072; ³ 教育部系统生物工程重点实验室和合成生物学前沿科学中心, 天津 300072; ⁴ 深圳大学生命与海洋科学学院, 广东 深圳 518055; ⁵ 广东省海洋藻类工程技术研究中心, 广东 深圳 518055)

中图分类号: Q81

文献标志码: A

2020年9月22日, 国家主席习近平在第七十五届联合国大会上宣布: 中国力争2030年前二氧化碳排放达到峰值, 努力争取2060年前实现碳中和目标。“双碳”目标既体现大国担当, 又为构建人类命运共同体贡献了中国智慧。除了传统的植树造林外, 未来实现碳中和, 更需: ①借助光伏、风电等技术, 实现清洁发电; ②用新工艺、新设备提高煤等传统能源的使用效率; ③通过催化工艺, 将二氧化碳转化为有用的产品和资源; ④技术加持能源结构转型^[1]。其中, CO₂的转化代表着其资源化再利用和绿色制造的新方式, 既能减少CO₂的总量, 又能变废为宝。2021年4月, 中美双方联合发表的《中美应对气候危机联合声明》中同样包含“碳捕集利用和封存”的相关内容^[2], 再次表明CO₂转化对碳中和的重要作用。为促进CO₂转化, 我国科技部在“十三五”“十四五”国家重点研发计划部署的“合成生物学”“绿色生物制造”等重点专项中, 多个项目聚焦CO₂的高效利用和转化, 表明对这一问题关键性的顶层认可。

CO₂是自养生物尤其是光合自养生物的天然碳源, 每年经由光合作用约有2580亿吨CO₂被固定为有机物, 展示了光合作用的巨大能力。而合成生物学的快速发展则赋予了CO₂转化的无限可能。2009年, 美国James C. Liao团队在光合聚球藻中实现了CO₂到异丁醇和异丁醇的转化^[3], 引领了CO₂转化为生物燃料和化学品这一研究方向, 随后各种转化技术如雨后春笋般出现^[4-6]。2022年2月21日, 碳回收公司LanzaTech和美国西北大学的研究人员合作, 利用合成生物学改造一种梭菌(*Clostridium autoethanogenum*), 可将包含CO₂在内的工业废气转化为两种有用的化合物——丙酮和异丙醇, 以一个工业规模的先导性试验实现了化学品的负碳制造^[7]。除了生物固碳, 光电无机催化CO₂转化为一碳化合物如甲酸、甲醇等日益成熟^[8-9], 合成生物学作为一个交叉学科, 越来越多的新型生物-无机固碳方式得以实现, 我国科研团队先后完成了从CO₂到淀粉、脂肪酸等合成的重大突破^[10-11], 为CO₂转化拓宽了思路。必须注意的是, 一方面现有的合成生物学驱动的CO₂转化效率和能力仍需提升, 另一方面产学研相结合才能真正促进相关技术的应用, 切实让合成生物学助力碳中和的实现。为此, 本刊汇集领域内一线专家, 聚焦新底盘、探索新策略、汇总新技术, 从多个角度总结CO₂转化的现有进展并论述在未来提升CO₂转化效力的可行方案。

植物每年所固定的碳约占大气中碳总量的20%, 在生态碳汇中发挥重要作用。因此, 围绕植物底盘积极开展碳减排技术研发和创新, 可提高生态碳汇能力。为此, 中国科学院分子植物科学卓越创新中心朱新广团队^[12]系统总结了近年来在多个植物底盘中逐步建成并完善的标准化元件体系、基因线路的设计

收稿日期: 2022-09-09 修回日期: 2022-09-19

引用本文: 孙韬, 张卫文, 胡章立, 元英进. 合成生物学助力碳中和: 新底盘、新策略与新技术[J]. 合成生物学, 2022, 3(5): 821-824

以及定向进化等合成生物学技术,创造性提出建立数字植物(ePlant)实现对植物全方位生命活动的模拟来指导其改造的理念。而针对具体改造的靶点、途径,河南大学张立新团队^[13]着重讨论了如何提高Rubisco酶的羧化活性、引进CO₂浓缩机制、降低光呼吸等几个方面,提出通过合成生物学对光合作用碳同化模块进行设计、改造、优化和重组,以提升植物的固碳能力。对此,中国科学院天津工业生物技术研究所赵磊团队^[14]则突破常规,系统分析评价了不同途径的CO₂固定能力和限制因素,由此探讨了人工设计、合成植物CO₂代谢通路的可能性,进而讨论了基于零碳排放的新型物质生产策略。中国科学院微生物研究所李寅团队^[15]则总结天然固碳途径改造和人工固碳途径设计合成方面取得的进展,重点讨论了人工生物固碳过程中的还原力和能量输入问题,以期提升固碳的效率。

相比植物底盘,光合微生物如微藻和蓝细菌等,生长速度更快且更易基因操作,近些年来利用合成生物学已经实现了从CO₂到数十种化学品的转化^[16],因而对促进碳中和同样具有巨大潜力。由于现阶段微藻相关遗传操作工具不够完善,南京工业大学赵权宇团队^[17]认为可借助并优化传统的定向进化策略,深入挖掘耐受基因、光合和活性组分生物合成的元件,为微藻基因改造打下基础。为促进微藻的进一步开发和利用,河南大学王强团队^[18]总结了微藻作为细胞工厂生产平台化合物、生物能源和高附加值化合物的途径、底盘改造策略等最新进展,提出微藻亟需从建立标准化的基因组编辑技术、理解合成物质的代谢流和控制机制、提高生物量及光合作用效率等环节进行攻关。对此,中国科学院青岛生物能源与过程研究所吕雪峰团队^[19]形象地提出了“拆盲盒”“挤海绵”“动刀子”三种策略来应对微藻光驱固碳合成技术在应用中面临的挑战;而深圳大学胡章立团队^[20]则重点针对光合作用过程,提出通过外源代谢途径的导入和背景代谢网络的改造,设计构建微藻高效固碳工程株的技术流程。另一方面,针对蓝细菌,上海交通大学陶飞团队^[21]从碳固定、光能捕捉和生物多样性的层面讨论了其代谢潜能并系统地总结了基因编辑、适应性进化、多元抗逆和光驱动细胞工厂这些蓝细菌合成生物学的热点研究领域近期的重要研究进展。为促进蓝细菌底盘的进一步改造,天津大学张卫文团队^[22]归纳了蓝细菌中的双组分信号转导系统、调控小RNA和σ因子等主要调控系统,提出可通过调控工程来提高底盘鲁棒性、优化产品生产等。

除了光能细胞外,部分电能细胞也可进行CO₂转化,天津大学宋浩团队^[23]聚焦近五年电能细胞合成生物学改造,通过分析双向电子传递的分子机制,分类汇总产电细胞和噬电细胞的合成生物学改造策略。不同于传统的生物固碳,非生物系统的CO₂光电催化、酶催化等新技术不断发展,有望大幅简化CO₂固定过程并提升其转化效率。对此,中国科学院天津工业生物技术研究所朱之光团队^[24]总结了酶促生物电催化技术在酶燃料电池、生物传感器、化学品酶电合成等合成生物学相关领域的前沿应用。而西湖大学曾安平团队^[25]围绕近期James C. Liao团队利用人工设计开发的新型多酶复合分子机器建立的CO₂固定的闭合循环反应-还原型乙醛酸-丙酮酸合成路径展开讨论,聚焦辅因子工程以及利用多酶分子机器固定CO₂所面临的挑战。

“双碳”目标是我国统筹国内国际两个大局作出的重大决策,也是实现中华民族永续发展的必然选择。合成生物学推动的CO₂转化有助于加快形成绿色制造方式,历经底盘、策略与技术的持续革新,相信通过我国合成生物学界同仁的共同努力,无论是基于光能细胞、电能细胞还是无机、生物-无机的CO₂转化,都将不断提升效力,最终助力国家碳中和目标的实现。

参 考 文 献

- [1] 央视新闻. 碳达峰与碳中和[EB/OL] (2021-03-10)[2022-09-09]. <https://weibo.com/2656274875/K5uDvFAXP>.
- [2] 央视. 中美发表应对气候危机联合声明[EB/OL] (2021-04-18)[2022-09-09]. <https://tv.cctv.com/2021/04/18/ARTIOxxJ8YEBvVHjs-rEqEr6L210418.shtml>.
- [3] ATSUMI S, HIGASHIDE W, LIAO J C. Direct photosynthetic recycling of carbon dioxide to isobutyraldehyde[J]. *Nature Biotechnology*, 2009, 27(12): 1177-1180.

- [4] KANNO M, CARROLL A L, ATSUMI S. Global metabolic rewiring for improved CO₂ fixation and chemical production in cyanobacteria[J]. *Nature Communications*, 2017, 8: 14724.
- [5] LAN E I, LIAO J C. ATP drives direct photosynthetic production of 1-butanol in cyanobacteria[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2012, 109(16): 6018-6023.
- [6] SUN T, LI S B, SONG X Y, et al. Toolboxes for cyanobacteria: Recent advances and future direction[J]. *Biotechnology Advances*, 2018, 36(4): 1293-1307.
- [7] LIEW F E, NOGLE R, ABDALLA T, et al. Carbon-negative production of acetone and isopropanol by gas fermentation at industrial pilot scale[J]. *Nature Biotechnology*, 2022, 40(3): 335-344.
- [8] WU Y S, JIANG Z, LU X, et al. Domino electroreduction of CO₂ to methanol on a molecular catalyst[J]. *Nature*, 2019, 575(7784): 639-642.
- [9] SCHUCHMANN K, MÜLLER V. Direct and reversible hydrogenation of CO₂ to formate by a bacterial carbon dioxide reductase[J]. *Science*, 2013, 342(6164): 1382-1385.
- [10] ZHENG T T, ZHANG M L, WU L H, et al. Upcycling CO₂ into energy-rich long-chain compounds via electrochemical and metabolic engineering[J]. *Nature Catalysis*, 2022, 5(5): 388-396.
- [11] CAI T, SUN H B, QIAO J, et al. Cell-free chemoenzymatic starch synthesis from carbon dioxide[J]. *Science*, 2021, 373(6562): 1523-1527.
- [12] 杨健钊, 朱新广. 面向碳达峰与碳中和的植物合成生物学[J]. *合成生物学*, 2022, 3(5): 847-869.
YANG J Z, ZHU X G. Plant synthetic biology for carbon peak and carbon neutrality[J]. *Synthetic Biology Journal*, 2022, 3(5): 847-869.
- [13] 盛阳阳, 徐秀美, 张巧红, 等. 光合作用碳同化的合成生物学研究进展[J]. *合成生物学*, 2022, 3(5): 870-883.
SHENG Y Y, XU X M, ZHANG Q H, et al. Advances in synthetic biology for photosynthetic carbon assimilation[J]. *Synthetic Biology Journal*, 2022, 3(5): 870-883.
- [14] 史梦琳, 周琳, 王庆, 等. 植物二氧化碳代谢途径改造研究进展[J]. *合成生物学*, 2022, 3(5): 985-1005.
SHI M L, ZHOU L, WANG Q, et al. Advances in the study on the modification of carbon dioxide metabolic pathways in plants[J]. *Synthetic Biology Journal*, 2022, 3(5): 985-1005.
- [15] 肖璐, 李寅. 生物固碳: 从自然生物到人工合成[J]. *合成生物学*, 2022, 3(5): 833-846.
XIAO L, LI Y. Biological carbon fixation: from natural to synthetic[J]. *Synthetic Biology Journal*, 2022, 3(5): 833-846.
- [16] JAISWAL D, SAHASRABUDDHE D, WANGIKAR P P. Cyanobacteria as cell factories: The roles of host and pathway engineering and translational research[J]. *Current Opinion in Biotechnology*, 2022, 73: 314-322.
- [17] 赵权宇. 面向碳中和的微藻适应性实验室进化研究进展[J]. *合成生物学*, 2022, 3(5): 901-914.
ZHAO Q Y. Research progress in carbon neutrality oriented adaptive laboratory evolution of microalgae[J]. *Synthetic Biology Journal*, 2022, 3(5): 901-914.
- [18] 孙中亮, 陈辉, 王强. 从CO₂到有机物——碳中和的微藻绿色生物制造[J]. *合成生物学*, 2022, 3(5): 953-965.
SUN Z L, CHEN H, WANG Q. From CO₂ to value-added products—carbon neutral microalgal green biomanufacturing[J]. *Synthetic Biology Journal*, 2022, 3(5): 953-965.
- [19] 崔金玉, 张爱娣, 栾国栋, 等. 微藻光驱固碳合成技术的发展现状与未来展望[J]. *合成生物学*, 2022, 3(5): 884-900.
CUI J Y, ZHANG A D, LUAN G D, et al. Engineering microalgae for photosynthetic biosynthesis: progress and prospect[J]. *Synthetic Biology Journal*, 2022, 3(5): 884-900.
- [20] 王松, 吴莎, 江亚男, 等. 微藻光合作用的优化升级助力“双碳”目标[J]. *合成生物学*, 2022, 3(5): 915-931.
WANG S, WU S, JIANG Y N, et al. Optimization and upgradation of microalgal photosynthesis for carbon peaking and carbon neutrality goals[J]. *Synthetic Biology Journal*, 2022, 3(5): 915-931.
- [21] 陶飞, 孙韬, 王钰, 等. “双碳”背景下聚球藻底盘研究的挑战与机遇[J]. *合成生物学*, 2022, 3(5): 932-952.
TAO F, SUN T, WANG Y, et al. Challenges and opportunities in the research of *Synechococcus* chassis under the context of carbon peak and neutrality[J]. *Synthetic Biology Journal*, 2022, 3(5): 932-952.
- [22] 董正鑫, 孙韬, 陈磊, 等. 调控工程在光合蓝细菌中的应用[J]. *合成生物学*, 2022, 3(5): 966-984.
DONG Z X, SUN T, CHEN L, et al. Applications of regulatory engineering in photosynthetic cyanobacteria[J]. *Synthetic Biology Journal*, 2022, 3(5): 966-984.
- [23] 由紫暄, 李锋, 宋浩. 电能细胞的合成生物学设计构建[J]. *合成生物学*, 2022, 3(5): 1031-1059.
YOU Z X, LI F, SONG H. Design and construction of electroactive cells by synthetic biology strategies[J]. *Synthetic Biology Journal*, 2022,

3(5): 1031-1059.

- [24] 崔馨予, 吴冉冉, 王园明, 等. 酶促生物电催化系统的设计构建与强化[J]. 合成生物学, 2022, 3(5): 1006-1030.

CUI X Y, WU R R, WANG Y M, et al. Construction and enhancement of enzymatic bioelectrocatalytic systems[J]. *Synthetic Biology Journal*, 2022, 3(5): 1006-1030.

- [25] 刘建明, 曾安平. 无细胞多酶分子机器赋能二氧化碳的高值利用及其挑战[J]. 合成生物学, 2022, 3(5): 825-832.

LIU J M, ZENG A P. Cell-free multi-enzyme machines for CO₂ capture, utilization and its associated challenges[J]. *Synthetic Biology Journal*, 2022, 3(5): 825-832.



孙韬: 博士, 天津大学生物安全战略研究中心讲师, 硕士生导师, 从事微生物合成生物学及生物安全相关研究。已在 *Cell Reports*, *Metabolic Engineering*, *ACS Nano* 等专业杂志发表论文 47 篇, 主持国家自然科学基金青年科学基金项目及 2 项国家重点研发计划子课题。



张卫文: 天津大学教授、生物安全战略研究中心主任, 教育部“科学技术委员会”委员, 国家重点研发计划首席科学家, 中国科协决策咨询重点项目首席专家, 牵头中美合成生物学生物安全“二轨”战略对话。研究领域主要包括: (1) 合成生物学; (2) 生物化工; (3) 生物安全。



胡章立: 深圳大学教授、生命与海洋科学学院院长, 广东省海洋藻类工程技术研究中心主任, 深圳市海洋藻类开发与应用工程实验室主任。研究领域主要包括: (1) 微藻基因工程与合成生物学; (2) 微藻及植物逆境生物学。



元英进: 天津大学教授, 中国科学院院士, 教育部“珠峰计划”合成生物学前沿科学中心主任, 系统生物工程教育部重点实验室主任。研究领域主要包括: (1) 合成生物学; (2) 生物化工。