

序

DOI: 10.12211/2096-8280.2026-049

一碳生物制造：新质生产力的绿色引擎

费强¹，周雍进²，李寅³，谭天伟⁴

(¹ 西安市一碳化合物生物转化技术重点实验室，西安交通大学化学工程与技术学院，陕西 西安 710049；² 大连市能源生物技术重点实验室，中国科学院大连化学物理研究所生物技术研究部，辽宁 大连 116023；³ 国家开发投资集团有限公司，北京 100034；⁴ 绿色生物制造全国重点实验室，北京化工大学生命科学与技术学院，北京 100029)

中图分类号：Q939.9；Q789 文献标志码：A

One carbon biomanufacturing: a green engine for new quality productive forces

FEI Qiang¹, ZHOU Yongjin², LI Yin³, TAN Tianwei⁴

(¹Xi'an Key Laboratory of C₁ Compound Bioconversion Technology, School of Chemical Engineering and Technology, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, Shaanxi, China; ²Dalian Key Laboratory of Energy Biotechnology, Division of Biotechnology, Dalian Institute of Chemical Physics, Chinese Academy of Sciences, Dalian 116023, Liaoning, China; ³State Development and Investment Group Co., Ltd., Beijing 100034, China; ⁴National Key Laboratory of Green Bio-Manufacturing, College of Life Science and Technology, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

1 时代呼唤：一碳生物制造的兴起

人类文明正站在从“化石碳”向“循环碳”跨越的历史关口。全球能源结构加速转型、气候治理持续深化，碳达峰、碳中和已成为关乎国家可持续发展与民族未来的重大战略。传统制造业与化学工业高度依赖化石资源，不仅导致巨大能源消耗与碳排放，也使产业链供应链易受外部波动与地缘政治影响。向绿色低碳、循环自主方向转型，已不是“要不要做”的选择题，而是“如何做”的必答题。

21世纪兴起的合成生物学已成为重塑未来产业格局的颠覆性关键技术，也是各国争夺科技与产业制高点的核心方向^[1]。习近平总书记指出，科技创新精度显著提升，生物大分子与基因研究已进入精准调控阶段，从认识生命、改造生命迈向设计生命、合成生命^[2]。这一判断，为以合成生物学为核心的生物制造指明了方向，也赋予了它前所未有的时代使命。特别是，以合成生物学为技术核心、以一碳化合物为原料的一碳生物制造，正突破传统石化路线与传统生物质路线的双重局限，为高碳产业低碳转型、低值资源高值化、工业气体资源化提供革命性方案^[3]。这不仅是技术路线的更替，更是工业文明底层逻辑的重构。

近年来，中国生物工程学会一碳生物技术专业委员会成立^[4]、《中国一碳生物技术发展路线图》编制工作稳步推进，从学术组织、技术路径、产业协同等层面系统引领一碳生物技术创新，为我国一碳

收稿日期：2026-06-02 修回日期：2026-06-03

引用本文：费强，周雍进，李寅，谭天伟. 一碳生物制造：新质生产力的绿色引擎[J]. 合成生物学，2026，7(3)：485-490

Citation: FEI Qiang, ZHOU Yongjin, LI Yin, TAN Tianwei. One carbon biomanufacturing: a green engine for new quality productive forces[J]. Synthetic Biology Journal, 2026, 7(3): 485-490

生物制造高质量发展筑牢根基。为呈现这一领域的最新进展和成果,本期《合成生物学》推出“一碳合成生物学”学术专辑,聚焦一碳资源高效利用、微生物代谢工程改造、电-生物耦合合成、过程工程放大、技术经济评价与全生命周期分析等关键科学与技术问题,集中刊发高水平综述与原创论文,致力搭建从基础研究、技术攻关、工程示范到产业化应用的完整创新链条,以学术和创新之力,助推绿色变革。

2 战略使命:一碳生物制造是合成生物学服务国家战略的核心战场

传统化工与制造体系支撑了现代工业文明快速发展,但长期遵循“资源开采-生产加工-消费使用-废弃处置”的线性发展模式,在创造物质财富的同时,引发资源枯竭、碳排放攀升、生态环境承压等深层矛盾。这种“采-用-弃”的线性模式,已难以为继。顺应全球绿色转型趋势,摆脱化石资源依赖、发展可再生制造模式、构建高效循环的生物经济体系,已成为全球产业竞争的主流方向。

生物制造以微生物、酶等生物系统为核心催化单元,以温和反应条件替代高温高压高能耗过程,以可再生碳源替代化石原料,在生产关键化学品、功能材料、能源产品的过程中同步实现碳减排与碳循环,是推动传统产业去石化化转型、提升生产安全性与可持续性的核心支撑^[5]。《“十四五”生物经济发展规划》将合成生物学列为前沿生物技术重点发展方向,明确提出加快发展绿色低碳、温室气体资源化利用、生物基材料与化学品等关键技术,推动生物经济成为高质量发展的新增长极。《“十五五”规划纲要》将生物制造列为国家未来产业,并强调采取超常规措施,全链条推进关键核心技术攻关。这标志着生物制造正处在从科技创新迈向产业创新的关键历史阶段。

在各类生物制造技术路线中,以一碳化合物为原料的第三代生物制造最具战略价值与变革意义。一碳化合物主要包括二氧化碳、甲烷、一氧化碳、甲醇等,具备来源广泛、储量充足、不与粮争地、不与民争水、不受气候条件限制、低碳与负碳特征突出等独特优势^[6-7]。对一碳化合物进行高效生物转化,既能实现温室气体减排与资源化利用,又能构建不依赖进口油料与粮食作物的自主可控产业体系,兼具生态安全、能源安全、产业安全与经济安全四重价值。因此,一碳生物制造已成为合成生物学服务国家“双碳”战略、支撑未来产业升级的核心主战场。

3 战略价值:一碳化合物作为生物制造核心原料的独特优势

一碳化合物成为未来生物制造最具潜力核心碳源,核心在于其相较传统生物质、石化原料的不可替代优势。一碳化合物来源多元、分布广泛,可取自钢铁、化工等行业尾气,也可来自分布式沼气、煤层气等分散气源,供给稳定且不受耕地、淡水、气候及国际供应链波动影响,具备支撑万亿级产业稳定发展的资源基础^[8]。利用生物技术将一碳化合物定向转化为高价值产品,可直接实现碳捕获、利用与封存,推动制造过程从高碳转向低碳乃至负碳,为双碳目标落地提供关键技术路径。

一碳原料可就地取材、就近转化,省去传统生物质路线中原料收集、破碎、预处理等高成本环节;分布式气源还能大幅降低气体压缩、长距离管网运输等基础设施投入,提升产业链自主可控水平与抗风险能力^[9]。这是一碳生物制造区别于其他绿色技术的核心竞争力之一。同时,一碳生物转化技术可与可再生电力、绿氢、电化学还原、生物电解等深度耦合,构建“光-电-碳-生物”协同驱动的绿色制造系统,高度契合未来能源与产业融合发展趋势^[10-11]。不难预见,率先攻克高效一碳生物制造核心技术的主体,将牢牢占据下一代绿色制造产业发展的战略主动权。

4 技术引擎：合成生物学驱动一碳生物制造从实验室走向工业化

合成生物技术是推动一碳生物制造从实验室走向工业化、从原理验证迈向规模化应用的核心动力。近年来，我国在一碳化合物代谢机制解析、底盘微生物改造、人工路径设计、集成化过程工程等方面取得了一系列具有国际影响力的标志性成果^[12]。科研人员系统解析天然碳固定途径，设计构建人工固碳路径，重构微生物中心碳代谢与能量代谢网络，显著提升底物利用效率、产物合成选择性与菌株环境稳定性。这些基础突破，为一碳生物制造进入工程化奠定了科学基础。

依托基因编辑、高通量筛选、人工智能辅助设计、动态调控等前沿技术，研究团队对甲基营养菌、甲烷氧化菌、梭菌、光合微生物等底盘微生物进行理性设计与系统改造，成功构建高耐受、高效率、低副产物的高性能细胞工厂，突破天然微生物转化效率低、底物亲和力和力弱、产物毒性耐受差等长期瓶颈^[13-14]。电-生物耦合合成、膜生物反应器、原位分离耦合发酵、智能化过程控制等集成技术快速发展，有效打通底物输运、能量供给、胞内代谢到产物分泌的全流程壁垒^[15-17]。以食气梭菌为代表的厌氧气体发酵底盘、以甲基营养酵母为代表的甲醇利用底盘、以钩虫贪铜菌为代表的化能自养底盘，以及电生物耦合、微生物电合成、生物-材料杂化催化体系等交叉方向均实现重要突破^[18-21]。这些进展表明，我国在一碳生物制造领域已从“跟跑”进入“并跑”乃至部分“领跑”的新阶段。

围绕底物成本、能耗、水耗、碳足迹、投资回报等关键指标的技术经济可行性与全生命周期评价体系持续完善，逐步建立科学规范的一碳生物制造评价框架，为工艺路线优选、示范工程布局、政策体系设计提供坚实依据^[22]。当前，一碳气体发酵、甲醇高效生物转化、二氧化碳电生物合成等技术已完成多轮中试验证，部分技术进入产业化前期阶段，为“十五五”时期规模化落地与商业化应用奠定基础，技术成熟度与产业准备度正逐步形成共振。

5 专辑概览：汇聚前沿成果，构建一碳生物制造完整创新体系

本专辑以一碳化合物生物转化与合成生物学创新为主线，收录国内相关领域科研工作者的高质量学术成果，覆盖基础理论、关键技术、工程应用、产业前景全链条，力求呈现一幅从“0到1”突破到“1到100”产业化的完整创新图谱。专辑系统收录一碳生物制造领域政策规划、产业布局、国际比较、技术路线图等研究，全面梳理全球主要国家在一碳化合物生物转化、合成生物学、低碳生物制造等方面的顶层设计与政策体系，提出契合我国国情的产学研用一体化协同创新路径，为技术突破与产业化落地提供决策参考。

专辑多篇论文聚焦一碳代谢机制、关键酶挖掘与改造、中心碳代谢重构、环境胁迫响应调控、人工基因组设计等基础科学问题，深入解析一碳底物同化、能量耦合、产物合成的分子机制，开发一系列高性能元件与模块化工具，为构建一碳化合物高效利用细胞工厂提供理论与技术支撑。同时覆盖食气梭菌气体发酵、合成气发酵装备与工艺、微生物电合成、电-微生物协同转化、功能框架材料助力一碳化合物生物转化、细胞-材料杂化体系低碳合成等前沿方向，展示了技术路线的多元可能性。

专辑集中报道电生物耦合合成、一碳气体发酵、甲醇高效转化、甲烷生物利用、厌氧与好氧发酵过程优化、绿色分离纯化、过程智能化控制等工程技术突破，着力解决转化率偏低、能耗偏高、系统稳定性不足、规模化放大困难等行业共性痛点，推动关键技术从实验室快速走向中试与示范应用。此外，专辑高度关注技术经济性、全生命周期评价、碳足迹核算、供应链韧性、市场前景、监管体系与标准规范等产业落地关键问题，结合国内外典型示范案例，提出适配我国资源禀赋与产业基础的一碳生物制造规模化发展路径。整体而言，本专辑坚持“四个面向”，兼顾基础研究与应用研究、技术创新与产业规划，

搭建从基础研究、技术攻关、工程示范到产业生态培育的完整逻辑链条，兼具学术引领价值与现实指导意义。

6 战略展望：协同创新，走向一碳生物制造强国

面向“十五五”及更长时期国家高质量发展需求，一碳生物制造正处于技术集中突破、产业化加速落地的关键窗口期。但需清醒认识到，一碳生物制造从实验室走向大规模工业化，仍面临底盘性能、转化效率、系统集成、成本控制、标准规范、政策衔接等多重挑战，亟需科技界、产业界、金融界与政府部门协同发力、系统推进^[23]。

面向未来，我们需要在四个维度上集中发力。

一是夯实创新基础：系统解析一碳化合物代谢与调控机制，研发人工固碳新路径、超高效率细胞工厂与精准动态调控新系统，持续夯实底层技术根基。

二是突破工程技术：大力发展电生物耦合、节能分离、智能发酵、分布式现场制造等集成技术，持续降低全流程成本，提升工业化可行性。

三是攻克装备体系：加快攻克气体发酵装备、合成气规模化工艺、微生物电合成系统、功能材料-生物杂化体系等工程难题，完善电-生物协同转化、多菌种耦合、产物高效分离等核心技术。

四是构建产业生态：加快构建高效成果转化体系，布局国家级示范工程、培育具有国际竞争力龙头企业、完善政策支持与技术标准体系，形成基础研究、技术攻关、中试放大、产业化应用紧密衔接的高效创新链。

一碳生物制造，不仅是技术变革，更是发展范式的革命。我们坚信，在合成生物制造技术持续突破与国家战略强力支持下，以一碳化合物为核心原料的新一代生物制造，必将成为新质生产力的绿色引擎和标志性领域，为我国实现“双碳”目标、推动产业体系高质量转型、建设科技强国与美丽中国提供强大支撑。本专辑的出版，旨在凝聚行业创新共识、引领前沿技术方向、促进产学研用深度融合，助力我国一碳生物制造与合成生物学事业迈向世界前列，为人类应对气候变化、实现可持续发展贡献中国智慧与中国方案。

参 考 文 献

- [1] 元英进. 创刊词[J]. 合成生物学, 2020, 1(1): 6.
YUAN Y J. Inaugural editorial[J]. Synthetic Biology Journal, 2020, 1(1): 6.
- [2] 习近平. 在中国科学院第二十次院士大会、中国工程院第十五次院士大会、中国科协第十次全国代表大会上的讲话[J]. 当代党员, 2021(12): 3-7.
XI J P. Speech at 20th academician conference of China Academy of Sciences, 15th academician conference of China Academy of Engineering and 10th National Congress of China Association for Science and Technology[J]. Contemporary Communist Party Member, 2021 (12): 3-7.
- [3] ZHANG C Y, FEI Q, FU R Z, et al. Economic and sustainable revolution to facilitate one-carbon biomanufacturing[J]. Nature Communications, 2025, 16: 4896.
- [4] 中国生物工程学会. 首届中国一碳生物技术和低碳产业发展大会在京召开[EB/OL]. [2026-05-31]. <https://www.biotechchina.org.cn/news/a784.html>.
Chinese Society of Bioengineering. The First China Conference on One Carbon Biotechnology and Low Carbon Industry Development was held in Beijing[EB/OL]. [2026-05-31]. <https://www.biotechchina.org.cn/news/a784.html>.
- [5] 云慧敏, 陈必强, 谭天伟. 中国生物制造关键技术进展与未来趋势[J]. 科技导报, 2025, 43(23): 24-32.
YUN H M, CHEN B Q, TAN T W. Technology advances and future trends in China's biomanufacturing technologies[J]. Science &

- Technology Review, 2025, 43(23): 24-32.
- [6] CAI T, SUN H B, QIAO J, et al. Cell-free chemoenzymatic starch synthesis from carbon dioxide[J]. Science, 2021, 373(6562): 1523-1527.
- [7] 汪淑贤, 方嘉煜, 张延平, 等. 天然甲醇化学品细胞工厂改造进展与展望[J]. 生物工程学报, 2024, 40(8): 2747-2760.
- WANG S X, FANG J Y, ZHANG Y P, et al. Progress and perspectives of natural cell factories for chemical production from methanol[J]. Chinese Journal of Biotechnology, 2024, 40(8): 2747-2760.
- [8] 禹伟, 高教琪, 周雍进. 一碳生物转化合成有机酸的研究进展[J]. 合成生物学, 2024, 5(5): 1169-1188.
- YU W, GAO J Q, ZHOU Y J. Bioconversion of one carbon feedstocks for producing organic acids[J]. Synthetic Biology Journal, 2024, 5(5): 1169-1188.
- [9] 高子熹, 费强. 生物转化甲烷制备微生物蛋白的机遇与挑战[J/OL]. 科学通报[2026-06-02]. <https://doi.org/10.1360/CSB-2025-5238>.
- GAO Z X, FEI Q. Bioconversion of methane into microbial protein: opportunities and challenges[J/OL]. Chinese Science Bulletin[2026-06-02]. <https://doi.org/10.1360/CSB-2025-5238>.
- [10] 刘艳辉, 周明芳, 马铭, 等. 可再生能源驱动的生物催化固定 CO₂ 的研究进展[J]. 化工进展, 2023, 42(1): 1-15.
- LIU Y H, ZHOU M F, MA M, et al. Recent advances on the bio-fixation of CO₂ driven by renewable energy[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2023, 42(1): 1-15.
- [11] 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.
- [12] 国家发展和改革委员会创新驱动发展中心(数字经济研究发展中心), 中国生物工程学会. 中国生物经济发展报告 2025[M]. 北京: 科学出版社, 2025: 392-411.
- National Development and Reform Commission Innovation Driven Development Center (Digital Economy Research and Development Center), Chinese Society of Bioengineering. Report on the development of China's bioeconomy 2025[M]. Beijing: Science Press, 2025: 392-411.
- [13] BARONE G D, SOMVILLA I, MEIER H P F, et al. Industrial applicability of enzymatic and whole-cell processes for the utilization of C₁ building blocks[J]. Nature Communications, 2025, 16: 7066.
- [14] GAO Z X, LIU Y, JIAO S Y, et al. Biological valorization of methane and nitrogen gas-derived ammonia *via* methanotrophic bacteria for gut-beneficial nutrients[J]. Nature Communications, 2026, 17(1): 3803.
- [15] 焦子悦, 黄小涵, 郭树奇, 等. 微生物固碳的电子供给策略研究进展[J]. 生物工程学报, 2022, 38(7): 2396-2409.
- JIAO Z Y, HUANG X H, GUO S Q, et al. Electron supply strategies for microbial carbon fixation: a review[J]. Chinese Journal of Biotechnology, 2022, 38(7): 2396-2409.
- [16] 李诗浩, 吴振华, 赵展烽, 等. 化工过程中的电子传递、质子传递和分子传递[J]. 化工学报, 2024, 75(3): 1052-1064.
- LI S H, WU Z H, ZHAO Z F, et al. Electron transfer, proton transfer and molecule transfer in chemical processes[J]. CIESC Journal, 2024, 75(3): 1052-1064.
- [17] LI Y L, ZHANG B, WU Y Z, et al. Ultrafast conversion of CO₂ into C₃-C₄ diols in a synergistic electrochemical and AI-assisted biosynthesis system[J]. Journal of the American Chemical Society, 2025, 147(43): 39827-39837.
- [18] 郭姝媛, 吴良焕, 刘香健, 等. 微生物中一碳代谢网络构建的进展与挑战[J]. 合成生物学, 2022, 3(1): 116-137.
- GUO S Y, WU L H, LIU X J, et al. Developing C₁-based metabolic network in methylotrophy for biotransformation[J]. Synthetic Biology Journal, 2022, 3(1): 116-137.
- [19] 姚伦, 周雍进. 一碳化合物生物利用和转化研究进展[J]. 化工进展, 2023, 42(1): 16-29.
- YAO L, ZHOU Y J. Progress in microbial utilization of one-carbon feedstocks for biomanufacturing[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2023, 42(1): 16-29.
- [20] GAO J Q, LI Y X, YU W, et al. Rescuing yeast from cell death enables overproduction of fatty acids from sole methanol[J]. Nature Metabolism, 2022, 4(7): 932-943.
- [21] TIAN J Z, DENG W, ZHANG Z W, et al. Discovery and remodeling of *Vibrio natriegens* as a microbial platform for efficient formic acid biorefinery[J]. Nature Communications, 2023, 14: 7758.
- [22] FU R Z, KANG L X, ZHANG C Y, et al. Application and progress of techno-economic analysis and life cycle assessment in biomanufacturing of fuels and chemicals[J]. Green Chemical Engineering, 2023, 4(2): 189-198.
- [23] 谭天伟. 打造生物制造新增长引擎 加快发展新质生产力[J]. 新型工业化, 2025(7): 51-56.
- TAN T W. Building a new growth engine for biomanufacturing and accelerating the development of new quality productivity[J]. Xin Xing Gong Ye Hua, 2025(7): 51-56.



费强(1980—),男,教授,博士生导师。国家重点研发计划项目首席科学家,陕西省杰青基金获得者,兼任中国沼气学会理事,中国生物工程学会一碳生物技术专委会秘书长、陕西高校创新团队负责人。主要从事一碳气体的微生物固定及其高值化平台开发,攻关解决高效生物转化甲烷等一碳化合物合成饲料、食品、能源、天然产物等产品的关键技术。作为第一作者/通讯作者在*Nat. Commun.* (4篇)、*Angew. Chem. Int. Ed.* (4篇)、*Chinese J. Catal.*、*Green Chem.*、《科学通报》等国内外主流期刊发表学术论文80余篇。曾获中国化工学会基础研究二等奖、陕西省创新成果展高质量成果奖、王宽诚教育基金会育才奖及中国国际大学生创新大赛、“互联网+”创新创业大赛、“挑战杯”创业计划竞赛等全国性赛事金奖。

E-mail: feiqiang@xjtu.edu.cn



周雍进(1984—),男,长聘研究员,博士生导师。“张大煜”优秀学者,国家自然科学基金委杰出青年基金与优秀青年基金获得者、国家人才计划青年项目入选者。主要从事合成生物技术以及甲醇生物转化研究。曾在*Cell*、*Nat. Energy*、*Nat. Metab.*、*Nat. Chem. Biol.* (5篇)、*PNAS* (5篇)、*Nat. Commun.* (3篇)、*JACS*等期刊发表论文100余篇,被引用9500余次。曾获中国药学会科学技术奖一等奖,“伦世仪”基金会杰出青年学者奖,以及安捷伦 ACT-UR 研究奖。

E-mail: zhoyongjin@dicp.ac.cn



李寅(1974—),男,研究员,博士生导师。国家开发投资集团有限公司首席科学家,中国生物工程学会一碳生物技术专委会主任,中国科学院微生物研究所客座研究员。从事合成生物学与代谢工程研究,发表论文300余篇,获专利30余项。

E-mail: yli@im.ac.cn



谭天伟(1964—),男,教授,博士生导师,中国工程院院士。国家教学名师,中国可再生能源学会理事长。主要从事生物化工研究,实现了脂肪酶生产和酶工业催化的应用;建立了基于标志代谢物控制的发酵放大新方法,并用于酵母发酵产品的工业生产;开发了发酵废菌丝体综合利用工业化应用新工艺。先后获国内外发明专利40余项,发表SCI收录论文500余篇。获2项国家技术发明二等奖和5项省部级科技进步一等奖(第一完成人)。曾获得何梁何利科学与技术创新奖、谈家桢生命科学奖、亚洲青年生物技术杰出贡献奖(YABEC award)、赢创-Friedrich Bergius Lecture奖等。

E-mail: twtan@mail.buct.edu.cn