

合成微生物与碳中和：从碳固定到高值创造专刊序言

王钦宏^{1*}, 李福利²

1 中国科学院天津工业生物技术研究所, 低碳合成工程生物学全国重点实验室, 天津

2 中国科学院青岛生物能源与过程研究所, 太阳能光电转化与利用全国重点实验室, 山东 青岛

王钦宏, 李福利. 合成微生物与碳中和：从碳固定到高值创造专刊序言[J]. 微生物学报, 2026, 66(9): 4291-4298.

WANG Qinhong, LI Fuli. Preface to the special issue on synthetic microbiology for carbon neutrality: from carbon fixation to high-value biomanufacturing[J]. *Acta Microbiologica Sinica*, 2026, 66(9): 4291-4298.

Preface to the special issue on synthetic microbiology for carbon neutrality: from carbon fixation to high-value biomanufacturing

WANG Qinhong^{1*}, LI Fuli²

1 State Key Laboratory of Engineering Biology for Low-Carbon Manufacturing, Tianjin Institute of Industrial Biotechnology, Chinese Academy of Sciences, Tianjin, China

2 Key Laboratory of Photoelectric Conversion and Utilization of Solar Energy, Qingdao Institute of Bioenergy and Bioprocess Technology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao, Shandong, China

实现碳达峰碳中和目标, 是我国应对全球气候变化、推动经济社会绿色转型的重大部署。在此背景下, 如何高效固定并转化二氧化碳等温室气体, 从源头重塑工业生产的碳流路径, 已成为学术界与产业界共同攻关的核心命题^[1-2]。合成生物学作为一门旨在通过“设计-构建-测试-学习”循环重构生命系统的颠覆性技术, 正为这一命题提供全新的解题思路: 将微生物细胞

从传统的“碳排放大户”改造为“碳固定工厂”乃至“高值创造平台”, 实现从 CO₂ 到燃料、材料、食品与化学品的直接转化。这不仅是生物制造范式的深刻变革, 更是衔接“碳中和”目标与“可持续生物经济”的关键技术桥梁^[3-4]。

CO₂ 的生物固定与转化, 在路径上可分为“直接路线”与“间接路线”两大层次^[5]。直接路线即以 CO₂ 为唯一碳源的蓝细菌、产乙酸菌、氢

资助项目: 天津市科技重大专项与工程项目(25ZXZSS00480)

This work was supported by the Tianjin Major Science and Technology Special Project and Engineering Project (25ZXZSS00480).

*Corresponding author. E-mail: wang_qh@tib.cas.cn

Received: 2026-08-17

氧化细菌等光合自养或化能自养微生物体系，通过天然或人工固碳途径将 CO_2 直接同化为生物物质或目标产物^[6-7]。间接路线则通过热化学催化或电化学先将 CO_2 还原为甲醇、甲酸、甲烷、乙酸等 C1、C2 等中间体，再以这些“低碳原料”作为微生物发酵的碳源与能源进行深加工^[8-9]。2 条路线各有优势：直接路线碳原子经济性最高、步骤最短，但受限于 CO_2 分子本身的热力学稳定性与固碳酶的动力学瓶颈；间接路线引入了“化学-生物”耦合的灵活性，可借助可再生能源电力将 CO_2 高效转化为易于储存和运输的 C1、C2 等化合物，再发挥微生物合成复杂分子的独特优势，实现“电/化学能-生物合成”的级联放大。甲醇、甲烷、乙酸等低碳原料，尤其是 CO_2 来源的“绿色甲醇”“电制甲烷”和“电制乙酸”，正是联结这 2 条路线的重要物质纽带，承载着“可再生能源电力→化学储能→生物转化→高值产品”的完整价值链^[10]。

为了集中展示该领域的最新进展，《微生物学报》特推出“合成微生物与碳中和：从碳固定到高值创造”专刊。本专刊邀请国内该领域活跃的研究团队撰稿，共收录 15 篇综述与 4 篇研究论文，围绕“基础与前沿研究”“关键技术与路径”及“高值创造与应用”3 个维度，系统梳理了从固碳元件挖掘、途径设计重构到产业化路径探索的科学脉络与技术前沿。以下按三大板块对本专刊的主要内容进行梳理与评述。

1 基础与前沿研究：固碳元件的认知重塑与能量-碳流耦合

对微生物固碳本质的深刻理解，是开展一切工程化改造的基石。在本方向收录的多篇综述中，研究者不仅审视了天然固碳体系的固有限局，更从催化机制、能量经济学及系统代谢等层面提出了突破方向。

固碳酶的催化机制与工程化改造是提升碳固定效率的首要环节。自然界虽然进化出多条固碳途径，但核心固碳酶，如卡尔文循环中的 RubisCO，普遍存在催化速率慢或底物特异性低等“进化缺陷”，严重制约了 CO_2 的生物同化效率。重庆大学王丹和中国科学院天津工业生物研究所王钦宏团队在综述中指出，打破这一瓶颈的关键在于从结构生物学视角深入认识酶的静态构象与动态构象变化对催化效率的决定性作用。近年来，理性设计、定向进化与高通量筛选等蛋白质工程策略的迭代发展，特别是 AI 辅助预测工具的引入，使得针对固碳酶的催化口袋重塑与底物特异性改造成为可能。该文还介绍了 Greenase 等^[11]固碳酶数据库在新型酶元件挖掘中的支撑作用，并通过 RubisCO、碳酸酐酶、甲醛裂合酶及多酶级联系统等典型案例，展示了从单酶优化到多酶体系集成的工程化路径。

如果说固碳酶是碳固定的“引擎”，那么能量供给则是决定引擎转速的“燃料”。能量-碳流的系统失配是固碳效率难以实现量级提升的深层瓶颈。北京化工大学刘子鹤团队创造性地提出了能量转化链条框架，将固碳过程统一为“能量输入-电子传递-碳固定输出”的连续网络，并建立了涵盖能量输入效率、电子利用效率及能量-碳转化效率的定量评价体系。这一视角将研究焦点从单一的碳流路径拉升至全局能量经济学高度，揭示了辅因子失配与电子传递损耗对碳通量的根本性限制。在工程层面，该综述系统总结了底盘宿主选择、外源供能模块构建及内源能量网络重构等策略，并提出了多尺度能量-碳流协同设计框架，为实现能量供给与固碳需求的精准匹配提供了可操作的理论基础^[12]。

天然固碳途径的多样性为合成生物学改造提供了丰富的“设计蓝图”。中国科学院微生物

研究所朱华伟团队系统回顾了自然界已发现的 6 条天然固碳途径, 包括卡尔文循环、还原性三羧酸循环、Wood-Ljungdahl 途径、3-羟基丙酸循环、3-羟基丙酸/4-羟基丁酸循环以及二羧酸/4-羟基丁酸循环, 并重点阐述了合成生物学在天然途径改造与人工途径设计方面的重要进展。该文指出, 尽管天然途径在固碳速率、氧耐受性和能量效率等方面各有利弊, 但尚需系统优化和设计以达到工业应用的全部要求。与此同时, 人工途径的设计(如 CETCH 循环、巴豆酰辅酶 A/乙醛酸循环等)为打破天然途径的进化束缚提供了全新可能^[13]。

在具体底盘微生物的研究层面, 产乙酸菌与嗜甲烷菌作为两类天然固碳能力突出的微生物, 其研究进展备受关注。中国科学院青岛生物能源与过程研究所李福利团队系统综述了产乙酸菌通过 Wood-Ljungdahl 途径高效同化 CO/CO₂ 的生化基础。Wood-Ljungdahl 途径以其高碳原子经济性著称, 该途径中 2 个 CO₂ 分子分别通过甲基支路与羧基支路进入乙酰辅酶 A, 整个过程不伴随碳损失, 是自然界碳原子利用效率最高的固碳途径之一。该文重点介绍了近年来在产乙酸菌能量守恒机制以及代谢流调控方面的突破性进展。值得关注的是, 以 CRISPR-Cas 为代表的先进遗传操作系统的开发, 正有力推动产乙酸菌从生产乙酸、乙醇等天然代谢产物向合成丁醇、3-羟基丁酸等高附加值化学品的“定制化底盘”转变^[14]。西安交通大学费强团队则聚焦嗜甲烷菌, 展示了多组学技术如何加速该领域的范式变革, 从单一基因功能鉴定迈向系统代谢过程的精准解析, 尤其是在好氧嗜甲烷菌碳同化通量分配、厌氧甲烷氧化新型代谢路径的发现以及菌群间跨界互动与电子传递机制的阐明等方面取得了重要进展^[15]。

2 关键技术与路径: 从天然途径重构到人工体系创制

在对固碳元件与底盘代谢有了深入认知之后, 合成生物学的核心驱动力在于“重构”与“创制”。本方向收录的论文涵盖了光合体系、氢能驱动、人工途径设计及合成群落等多个技术维度, 展现了从单一途径改造到系统级整合的技术演进脉络。

光合生物制造被视为最接近自然碳中和逻辑的技术路径, 它直接利用太阳能驱动 CO₂ 固定与产物合成, 无需外加有机碳源或化学能源。中国科学院青岛生物能源与过程研究所栾国栋团队综述了以蓝细菌为底盘的光驱固碳细胞工厂构建策略。蓝细菌凭借高效的光合能力、清晰的遗传背景与成熟的操作体系, 已成为光合生物制造领域最具潜力的模式底盘。该文从 2 个维度展开论述: 在光合固碳效率提升方面, 重点探讨了内源途径优化、外部材料赋能及底盘挖掘重塑等策略; 在碳流定向与产物合成方面, 围绕单菌株代谢工程和多菌株模块化协同, 系统分析了碳资源精准导向的实现路径^[16]。

为了突破光合作用的光能转换效率限制, 氢能驱动固碳提供了另一种技术思路。中国科学院天津工业生物技术研究所朱之光团队综述了以氢氧化细菌(hydrogen-oxidizing bacteria, HOB)为代表的氢能驱动固碳底盘细胞的代谢基础与研究进展。HOB 是一类能以 H₂ 为电子供体、O₂ 为电子受体、CO₂ 为碳源的化能自养微生物, 其固碳过程与“绿氢”耦合后可在不依赖光能的条件下实现 CO₂ 固定; 该文详细介绍了代表性 HOB 菌株的代谢特征、遗传工具箱构建进展以及代谢通路重构与微生物-材料耦合等工程改造策略^[17]。

人工固碳途径的设计集中体现了合成生物学“造物致用”的核心理念。中国科学院天津工

业生物技术研究所在王钰团队系统总结了以 CO₂、甲醇和甲酸为一碳底物的人工同化途径研究进展。相较于天然途径，人工途径在设计理念上追求更短的反应步骤、更高的能量效率与更简洁的调控网络。代表性案例包括以甲醛为节点的缩合循环、以乙酰辅酶 A 为节点的体外多酶途径等。该文重点围绕一碳同化途径的设计原则、关键酶元件的创制改造以及人工途径在微生物底盘中的构建与应用三大核心环节展开论述，并前瞻性地讨论了人工智能辅助的新途径与新元件设计方向^[18]。

在单一菌株面临代谢负担过重、碳流分配失衡等瓶颈时，合成微生物群落提供了“分散化”的系统解决方案。中国科学院天津工业生物研究所黄志勇/韩一凡团队综述了合成微生物群落在 CO₂ 转化体系中的应用进展。其核心理念是通过理性组合不同功能微生物实现“代谢分工”，将固碳模块、产物合成模块和能量供给模块分配至不同菌株，以分担代谢负担、提升固碳效率与产物多样性。该文系统介绍了光能驱动、氢能驱动以及化能驱动等 3 类合成群落模式的设计原则与应用案例^[19]。

此外，北京化工大学陈必强团队提出的混合碳源协同代谢策略，从碳原子利用经济性的角度拓宽了固碳技术的研究视野。该文指出，传统发酵工艺中，糖类底物在中心碳代谢中约有 1/3 的碳以 CO₂ 形式损失。通过理性耦联糖类有机底物与甲醇、甲酸、合成气等 C1 碳源或乙酸等 C2 碳源，可构建底物碳架互补、能量供给协同及还原力平衡的混合营养代谢系统，实现碳得率的跨越式提升^[20]。

3 高值创造与应用：从低碳原料到高价值产品

技术与路径的最终落脚点在于应用。本专

刊收录的综述与研究论文展示了如何将工业尾气、CO₂ 衍生的低碳原料转化为高价值产品，并开始触及经济可行性与产业化路径等深层问题。

需要特别指出的是，专刊中大量工作涉及以 CO₂ 来源的低碳原料为底物的生物转化。甲醇可通过 CO₂ 加氢大规模制备，已成为连接“电化学还原”与“生物合成”的核心枢纽；甲烷可通过 CO₂ 与绿氢的 Sabatier 反应合成(即“电制甲烷”)，也可直接来源于厌氧消化产生的沼气；乙酸则可通过 CO₂ 电化学还原或产乙酸菌的气体发酵获得。上述低碳原料承载着“可再生能源→化学能载体→生物制造”的价值链跃升，是间接固碳路线不可或缺的物质基础。

甲醇生物制造在本专刊中获得了 2 篇综述的集中关注。南京工业大学陈可泉团队从宏观视角比较了天然与非天然甲醇同化路径的优势与局限，总结了以天然甲基营养菌为底盘以及在大肠杆菌、谷氨酸棒杆菌等工业模式菌中导入异源甲醇同化路径的设计策略。该文指出，甲醇具有储存运输方便、还原力高、可通过 CO₂ 加氢大规模制备等优势，是理想的非粮生物制造原料，并梳理了近年来利用甲醇合成有机酸、氨基酸、萜类、聚羟基脂肪酸酯等高值化学品的代表性案例^[21]。中国农业科学院北京畜牧兽医研究所罗会颖团队则聚焦于扭脱甲基杆菌 AM1 这一模式底盘，系统探讨了其甲醇代谢途径的调控特征与适配的合成生物学工具，盘点了通过代谢工程改造 AM1 实现甲醇向重组蛋白、可降解材料、有机酸和萜类化合物等产物转化的研究成果^[22]。

甲烷生物转化利用方面，西安交通大学费强团队在基础研究板块中已系统论述了嗜甲烷菌的代谢机制与组学研究成果。嗜甲烷菌以甲烷为唯一碳源和能源，其关键酶——甲烷单加氧酶可在常温常压下将甲烷氧化为甲醇，这一反应在化学工业中需要高温高压条件才能实现。

在应用层面,嗜甲烷菌已被探索用于生产聚羟基脂肪酸酯、单细胞蛋白、虾青素等高值产品。该综述指出,通过单细胞多组学与人工智能的深度融合,嗜甲烷菌细胞工厂有望在碳减排与低碳生物合成的双重目标下发挥更大作用^[15]。

乙酸转化利用方面,乙酸既是产乙酸菌气体发酵的主要天然产物,也可通过 CO₂ 电化学还原高效制得。乙酸作为 C₂ 底物,其碳架可直接进入乙醛酸循环或 TCA 循环,绕过糖酵解途径中的碳损失步骤。中国科学院天津工业生物技术研究所戴宗杰团队在单细胞蛋白生产的相关论述中指出,乙酸是一种高效的低碳底物,其同化效率优于甲醇和 CO₂,且对多数微生物的细胞毒性较低。重点聚焦单细胞蛋白(single cell protein, SCP),系统综述了以 CO₂、甲醇、乙酸等低碳底物生产 SCP 的研究进展。该文指出,低碳原料来源广泛、成本低廉、碳足迹小,但其同化效率与蛋白高效积累仍受底盘细胞适配性不足、代谢通量分配失衡以及能量供给效率低下的制约。该文从底盘挖掘与理性改造、代谢工程驱动以及工艺优化 3 个层面系统梳理了最新进展,指出多种基于低碳原料的 SCP 生产工艺正逐步向中试及规模化应用推进^[23]。

气体发酵是最直接利用 CO₂/CO 工业尾气的技术路线,也是本专刊“高值创造与应用”板块的重要组成部分。北京首钢朗泽科技股份有限公司晁伟团队系统综述了利用工业尾气、生物质气化气等原料进行气体发酵生产燃料与化学品的产业化进展。该文分析了三代生物质发酵原料的应用特性,阐明了气体发酵在碳原子经济性与非粮化方面的技术优势;全面梳理了原料气预处理、气液传质强化、多级连续发酵、原位产物回收等核心工艺的技术要点。文章还梳理了国内外产业化案例,标志着气体发酵技术已跨越中试门槛、步入商业化验证阶段^[24]。

在更具体的产品案例层面,本专刊收录了

多篇研究论文展示了从低碳原料到高值化学品的多样化转化路径。中国科学院天津工业生物技术研究所朱蕾蕾团队以甲醛(甲醇氧化产物)为底物,通过多酶级联催化合成药物中间体 L-苏糖醇,经系统优化后产率达 166.76 mmol/L^[25]。中国科学院天津工业生物技术研究所杨建刚团队设计了“体外多酶级联+全细胞催化”的酶-菌协同路线,先将甲醇转化为甘油,再在谷氨酸棒状杆菌中完成甘油到 1,3-丙二醇的转化,总碳转化率达 90.2%,展示了“化学-生物”级联策略在甲醇高值化中的有效性^[26]。中国科学院青岛生物能源与过程研究所吕明/苏航团队以永达尔梭菌为底盘,异源表达脂肪酶基因,打通了从 CO/CO₂ 到乙酸乙酯的完整生物合成通路,通过“气-糖”混合营养发酵使乙酸乙酯产量提升至 36.25 mg/L。这一工作尤其值得关注,它实现了从气体原料直接到酯类产品的“一步发酵”,将固碳与高值合成在单一菌株中偶联,代表了自养底盘定向改造的前沿方向^[27]。江南大学邓禹团队以乙二醇为底物,通过全细胞催化合成乙醇酸。经条件优化,摇瓶产量达 19.3 g/L;进一步紫外诱变结合生物传感器筛选,获突变株 GSUV-7,5 L 罐产量达 117.6 g/L、转化率 100%,为乙醇酸生物合成提供了高效菌株与工艺方案^[28]。

最后,沈群团队通过对 CO₂ 合成淀粉、蛋白、微藻、乙醇 4 条技术路径的碳足迹与技术经济性评估,从系统层面回答了“固碳技术是否经济可行”这一关键问题。研究发现,微生物碳固定与利用技术的减碳潜力高度依赖能量供给方式与产品价值定位,在碳税政策驱动下,CO₂ 基乙醇有望在特定条件下实现与传统路线的成本平价;而合成生物学与电催化技术的深度融合正在重塑碳利用的经济性边界。这一分析视角提醒我们,从实验室的“科学正确”到工业界的“经济正确”,仍需克服能量供给效率、气液

传质强化、产物分离纯化等系统性工程挑战^[29]。

4 结语

站在“碳中和”目标的历史节点上，合成微生物技术正处于从“概念验证”迈向“规模化应用”的关键转折期。从碳固定的角度来看，专刊清晰地呈现了 2 条路线——直接固碳与间接固碳的并行发展与相互交融。直接固碳路线以产乙酸菌的气体发酵、蓝细菌的光合固碳为代表，追求最短的 CO₂ 到产品路径；间接固碳路线以甲醇、甲烷、乙酸等 CO₂ 来源的低碳原料为枢纽，发挥化学催化与生物转化的各自优势，在灵活性与产品多样性方面更具潜力。2 条路线殊途同归，共同指向从碳固定到高值创造的完整价值链条。

本专刊收录的 19 篇文章，从固碳酶的微观催化机制到气体发酵工厂的宏观产业化布局，全方位勾勒了这一创新链条的现状与未来。我们相信，随着人工智能辅助的酶设计与途径预测、基因编辑工具的迭代升级以及电/光-酶耦合等跨学科技术的深度融合，合成微生物将不仅仅是实验室中的科学创造，更将成为驱动我国乃至全球碳中和进程的“绿色细胞工厂”。期待本专刊能为该领域的研究者提供有益的参考与启发，共同推动合成生物学驱动微生物创新为可持续发展贡献更大的力量。

参考文献

- [1] Liu L, Wang X, Wang ZG. Recent progress and emerging strategies for carbon peak and carbon neutrality in China[J]. *Greenhouse Gases: Science and Technology*, 2023, 13(5): 732-759.
- [2] Agrawal D, Awani K, Ali Nabavi S, Balan V, Jin MJ, Aminabhavi TM, Dubey KK, Kumar V. Carbon emissions and decarbonisation: The role and relevance of fermentation industry in chemical sector[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 475: 146308.
- [3] Bachleitner S, Ata Ö, Mattanovich D. The potential of CO₂-based production cycles in biotechnology to fight the climate crisis[J]. *Nature Communications*, 2023, 14: 6978.
- [4] Zhang CY, Fei Q, Fu RZ, Lackner M, Zhou YJ, Tan TW. Economic and sustainable revolution to facilitate one-carbon biomanufacturing[J]. *Nature Communications*, 2025, 16: 4896.
- [5] Zhao CL, Zhu P, Chai TT, Zhang J, Chen XL. Biological conversion of CO₂ for bioproduction: beyond natural limitations[J]. *Chemical Society Reviews*, 2026, 55(14): 7487-7548.
- [6] Chen PR, Xia PF. Carbon recycling with synthetic CO₂ fixation pathways[J]. *Current Opinion in Biotechnology*, 2024, 85: 103023.
- [7] Devi NB, Pugazhenth G, Pakshirajan K. Synthetic biology approaches and bioseparations in syngas fermentation[J]. *Trends in Biotechnology*, 2025, 43(1): 111-130.
- [8] Bi HR, Wang K, Xu CC, Wang M, Chen BQ, Fang YM, Tan XY, Zeng J, Tan TW. Biofuel synthesis from carbon dioxide via a bio-electrocatalysis system[J]. *Chem Catalysis*, 2023, 3(3): 100557.
- [9] Favoino G, Puiggené Ò, Nikel PI. A blueprint for designing the next-generation of synthetic C1 microbes[J]. *Nature Communications*, 2025, 16: 8843.
- [10] Liu GY, Zhong Y, Liu ZH, Wang G, Gao F, Zhang C, Wang YJ, Zhang HW, Ma J, Hu YG, Chen AB, Pan JY, Min YZ, Tang ZY, Gao C, Xiong YJ. Solar-driven sugar production directly from CO₂ via a customizable electrocatalytic-biocatalytic flow system[J]. *Nature Communications*, 2024, 15: 2636.
- [11] 彭祉尧, 肖开兴, 方霞, 宗继锴, 袁云艳, 余艳婷, 梁山泉, 王钦宏, 王丹. 微生物固碳酶的结构、功能与定向进化: 从催化机制到工程化应用[J]. *微生物学报*, 2026, 66(9): 4299-4319.
Peng ZY, Xiao KX, Fang X, Zong JK, Yuan YY, Yu YT, Liang SQ, Wang QH, Wang D. Structures, functions, and directed evolution of microbial carbon-fixing enzymes: from catalytic mechanisms to engineering applications[J]. *Acta Microbiologica Sinica*, 2026, 66(9): 4299-4319 (in Chinese).
- [12] 吴龙昊, 王源, 刘子鹤. 微生物固碳能量-碳流耦合定量评价及多尺度协同设计[J]. *微生物学报*, 2026, 66(9): 4320-4340.
Wu LH, Wang Y, Liu ZH. Quantitative evaluation of energy-carbon flux coupling and multi-scale synergistic design for microbial carbon fixation[J]. *Acta Microbiologica Sinica*, 2026, 66(9): 4320-4340 (in Chinese).
- [13] 张佳音, 张延平, 李寅, 朱华伟. 合成生物学赋能微生物碳固定途径设计构建[J]. *微生物学报*, 2026, 66(9): 4341-4361.
Zhang JY, Zhang YP, Li Y, Zhu HW. Design and construction of microbial carbon fixation pathways empowered by synthetic biology[J]. *Acta Microbiologica Sinica*, 2026, 66(9): 4341-4361 (in Chinese).
- [14] 徐子涵, 李煜真, 张俊哲, 文志琼, 刘自勇, 马小清, 李福利. 产乙酸菌与一碳气体生物转化: 从基础到应用[J]. *微生物学报*, 2026, 66(9): 4362-4379.
Xu ZH, Li YZ, Zhang JZ, Wen ZQ, Liu ZY, Ma XQ, Li FL. Acetogenic bacteria and one-carbon gas biotransformation: from fundamental research to

- applications[J]. *Acta Microbiologica Sinica*, 2026, 66(9): 4362-4379 (in Chinese).
- [15] 景亚敏, 焦子悦, 郭树奇, 费强. 多组学技术揭示嗜甲烷菌代谢调控与生态功能的研究进展[J]. *微生物学报*, 2026, 66(9): 4380-4402.
- Jing YM, Jiao ZY, Guo SQ, Fei Q. Research progress in metabolic regulatory and ecological functions of methanotrophs driven by multi-omics[J]. *Acta Microbiologica Sinica*, 2026, 66(9): 4380-4402 (in Chinese).
- [16] 贾玥丰, 宋锦仪, 张彦, 崔金玉, 栾国栋, 吕雪峰. 面向碳中和的蓝细菌光合固碳与碳流定向调控策略[J]. *微生物学报*, 2026, 66(9): 4403-4419.
- Jia YF, Song JY, Zhang Y, Cui JY, Luan GD, Lu XF. Strategies for photosynthetic carbon fixation and carbon flux regulation in cyanobacteria towards carbon neutrality[J]. *Acta Microbiologica Sinica*, 2026, 66(9): 4403-4419 (in Chinese).
- [17] 张飘, 卢子康, 李飞, 马春玲, 朱之光. 氢氧化细菌设计构建研究进展[J]. *微生物学报*, 2026, 66(9): 4420-4442.
- Zhang P, Lu ZK, Li F, Ma CL, Zhu ZG. Research progress in the design and engineering of hydrogen-oxidizing bacteria[J]. *Acta Microbiologica Sinica*, 2026, 66(9): 4420-4442 (in Chinese).
- [18] 凡立稳, 黄妍, 王钰. 人工固碳途径的设计及在微生物底盘中的适配研究进展[J]. *微生物学报*, 2026, 66(9): 4443-4455.
- Fan LW, Huang Y, Wang Y. Research advances in design and microbial implementation of artificial carbon fixation pathways[J]. *Acta Microbiologica Sinica*, 2026, 66(9): 4443-4455 (in Chinese).
- [19] 赵维, 成婷婷, 赵晨菲, 史邓飞, 刘思奇, 柴清圆, 班美玲, 董继焕, 黄志勇, 韩一凡. 合成微生物群落驱动的二氧化碳固定转化体系设计与构建[J]. *微生物学报*, 2026, 66(9): 4456-4470.
- Zhao W, Cheng TT, Zhao CF, Shi DF, Liu SQ, Chai QY, Ban ML, Dong JH, Huang ZY, Han YF. Design and construction of carbon dioxide fixation and transformation systems driven by synthetic microbial consortia[J]. *Acta Microbiologica Sinica*, 2026, 66(9): 4456-4470 (in Chinese).
- [20] 赵全禄, 张维强, 吴灼恒, 王凯, 陈必强, 谭天伟. 混合碳源协同代谢驱动高值化学品生物合成的研究进展[J]. *微生物学报*, 2026, 66(9): 4471-4495.
- Zhao QL, Zhang WQ, Wu ZH, Wang K, Chen BQ, Tan TW. Research progress in high-value chemical biosynthesis driven by synergistic metabolism of mixed carbon sources[J]. *Acta Microbiologica Sinica*, 2026, 66(9): 4471-4495 (in Chinese).
- [21] 孙晓梅, 王昕, 陈可泉. 甲醇生物转化合成化学品的代谢工程策略与研究进展[J]. *微生物学报*, 2026, 66(9): 4496-4519.
- Sun XM, Wang X, Chen KQ. Metabolic engineering strategies and research advances in synthesis of chemicals through bioconversion of methanol[J]. *Acta Microbiologica Sinica*, 2026, 66(9): 4496-4519 (in Chinese).
- [22] 崔林, 王晓雨, 何洋, 姚斌, 罗会颖, 王晓璐. 扭托甲基红杆菌 AM1 代谢工程改造及甲醇基化学品合成研究进展[J]. *微生物学报*, 2026, 66(9): 4520-4544.
- Cui L, Wang XY, He Y, Yao B, Luo HY, Wang XL. Metabolic engineering of *Methylobacterium extorquens* AM1 and its applications in methanol-based chemical biosynthesis: a review[J]. *Acta Microbiologica Sinica*, 2026, 66(9): 4520-4544 (in Chinese).
- [23] 邱靖, 王钦宏, 戴宗杰, 马延和. 从 C1/C2 底物到单细胞蛋白: 生物制造路径与挑战[J]. *微生物学报*, 2026, 66(9): 4545-4566.
- Qiu J, Wang QH, Dai ZJ, Ma YH. From C1/C2 feedstocks to single-cell proteins: biomanufacturing routes and challenges[J]. *Acta Microbiologica Sinica*, 2026, 66(9): 4545-4566 (in Chinese).
- [24] 马跃超, 岳群华, 吕子健, 佟淑环, 晁伟. 气体发酵技术研究进展与产业化展望[J]. *微生物学报*, 2026, 66(9): 4567-4589.
- Ma YC, Yue QH, Lyu ZJ, Tong SH, Chao W. Advances and industrial prospects of gas fermentation technology[J]. *Acta Microbiologica Sinica*, 2026, 66(9): 4567-4589 (in Chinese).
- [25] 张如珂, 谭子城, 魏金霞, 朱蕾蕾. 甲醛多酶级联合成 L-苏糖醇的反应体系优化[J]. *微生物学报*, 2026, 66(9): 4601-4613.
- Zhang RK, Tan ZJ, Wei JX, Zhu LL. Optimization of the multi-enzyme cascade for synthesis of L-threitol from formaldehyde[J]. *Acta Microbiologica Sinica*, 2026, 66(9): 4601-4613 (in Chinese).
- [26] 郭志茹, 李娇, 王玉瑶, 王钰, 陈朋, 孙媛霞, 杨建刚. 酶-菌协同转化甲醇合成 1,3-丙二醇[J]. *微生物学报*, 2026, 66(9): 4614-4625.
- Guo ZR, Li J, Wang YY, Wang Y, Chen P, Sun YX, Yang JG. Enzyme-bacteria synergistic conversion of methanol to 1,3-propanediol[J]. *Acta Microbiologica Sinica*, 2026, 66(9): 4614-4625 (in Chinese).
- [27] 郭昕宇, 司传煜, 张金刚, 王来发, 冯骏, 李绍冲, 陈景燕, 李慧慧, 李福利, 吕明, 苏航. 代谢改造永达尔氏梭菌生产乙酸乙酯[J]. *微生物学报*, 2026, 66(9): 4626-4637.
- Guo XY, Si CY, Zhang JG, Wang LF, Feng J, Li SC, Chen JY, Li HH, Li FL, Lyu M, Su H. Metabolic engineering of *Clostridium ljungdahlii* for ethyl acetate production[J]. *Acta Microbiologica Sinica*, 2026, 66(9): 4626-4637 (in Chinese).
- [28] 陈菲菲, 刘梦婷, 陈烨, 王蒙, 李国辉, 邓禹. 基于乙二醇全细胞催化的乙醇酸高效合成[J]. *微生物学报*, 2026, 66(9): 4638-4651.
- Chen FF, Liu MT, Chen Y, Wang M, Li GH, Deng Y. Efficient synthesis of glycolic acid from ethylene glycol by whole-cell biocatalysis[J]. *Acta Microbiologica Sinica*, 2026, 66(9): 4638-4651 (in Chinese).
- [29] 沈国飞, 顾佳名, 唐涛, 胡钰珂, 沈群, 魏伟. 微生物碳捕集与利用技术路径碳足迹与经济性分析展望[J]. *微生物学报*, 2026, 66(9): 4590-4600.
- Shen GF, Gu JM, Tang T, Hu YK, Shen Q, Wei W. Carbon footprint and techno-economic analysis of microbial carbon capture and utilization technology pathways: a prospective review[J]. *Acta Microbiologica Sinica*, 2026, 66(9): 4590-4600 (in Chinese).



王钦宏,男,中国科学院天津工业生物技术研究所以研究员/博士生导师。曾任中国科学院天津工业生物技术研究所副所长,现任中国食品科学技术学会新质蛋白专业委员会副主任委员兼干事长、《生物工程学报》《中国生物工程杂志》副主编及*mLife*、《合成生物学》《微生物学报》等学术刊物编委。致力于通过合成生物学手段重塑微生物碳代谢网络,设计构建了系列芳香类分子、微生物蛋白高效细胞工厂。完成10余项技术许可或转让,推进产业应用。积极推动二氧化碳人工合成淀粉等碳固定与生物转化关键技术研发,相关成果入选国家“十三五”科技创新成就展及2021年度中国科学十大进展。在*Science*、*Trends Biotech*等期刊发表论文200余篇,申请专利90余项,获授权专利60余项。



李福利,男,中国科学院青岛生物能源与过程研究所研究员/博士生导师。兼任一碳炼制山东省工程研究中心主任,国际能源署(IEA)任务39脱碳运输燃料中国代表,*Front Bioeng Biotechnol*副主编,*Appl Environ Microbiol*、《生物工程学报》编委,青岛市藻类产业学会理事长。主要以厌氧梭菌、酵母为底盘,发展合成生物学技术,聚焦生物能源领域技术创新与产业发展。主持国家重点研发、国家自然科学基金委、省部级等科研项目。发表科研论文200余篇,获授权专利40余件。