

评论

DOI: 10.12211/2096-8280.2026-009

合成生物学驱动非天然产物的光生物合成

许嘉凡^{1,2}, 周佳海^{2,3}, 高江涛^{1,4}, 古阳²

(¹ 福建农林大学生命科学学院, 福建 福州 350002; ² 中国科学院深圳先进技术研究院, 深圳合成生物学创新研究院, 定量合成生物学全国重点实验室, 广东 深圳 518055; ³ 南京师范大学微生物改造技术全国重点实验室, 江苏南京 210023; ⁴ 福建农林大学蜂学与生物医药学院, 福建 福州 350002)

摘要: 光生物催化是一种整合了光催化和生物合成的强大合成策略, 能够驱动许多非天然反应。然而, 其规模化应用受限于酶载量高、辅因子昂贵以及反应稳定性差等问题。近期, 伊利诺伊大学厄巴纳-香槟分校的赵惠民团队利用合成生物技术成功将光酶反应整合到细菌的代谢通路中, 构建了首个能够通过发酵放大生产非天然产物的大肠杆菌“生产工厂”。该技术成功实现了对苯酚-吡啶类化合物 4-[2-(3a,7a-二氢-1H-吡啶-3-基)乙基]苯酚(DIEP)的完全生物合成。该研究不仅展示了光酶反应在活细胞中实现完全生物合成和工程化放大的可能性, 还验证了所合成的非天然产物具有生物活性, 这表明该技术具有工业应用潜力。本文将介绍该研究成果, 并结合相关研究工作提出见解, 以期推动光生物催化从概念验证迈向工业生产。

关键词: 合成生物学; 烯还原酶; 光生物催化; 全生物合成; 双相-补料发酵策略

中图分类号: Q816 文献标志码: A

Synthetic biology drives photosynthetic production of unnatural compounds

XU Jiafan^{1,2}, ZHOU Jiahai^{2,3}, GAO Jiangtao^{1,4}, GU Yang²

(¹College of Life Sciences, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, Fujian, China; ²State Key Laboratory of Quantitative Engineering Biology, Shenzhen Institute of Synthetic Biology, Shenzhen Institutes of Advanced Technology, Chinese Academy of Sciences, Shenzhen 518055, Guangdong, China; ³State Key Laboratory of Microbial Technology, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, Jiangsu, China; ⁴College of Bee Science and Biomedicine, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, Fujian, China)

Abstract: Photobiocatalysis is a synthetic strategy that integrates photocatalysis and biosynthesis, which has a capacity to drive the biosynthesis of non-natural products. However, its large-scale application is constrained by challenges such as high enzyme loading, the consumption of expensive cofactors, and poor reaction stability. Recently, the research team led by Hui-Min Zhao at the University of Illinois Urbana-Champaign achieved a significant milestone in this regard by successfully integrating photoenzymatic reactions into bacterial metabolic pathways. This

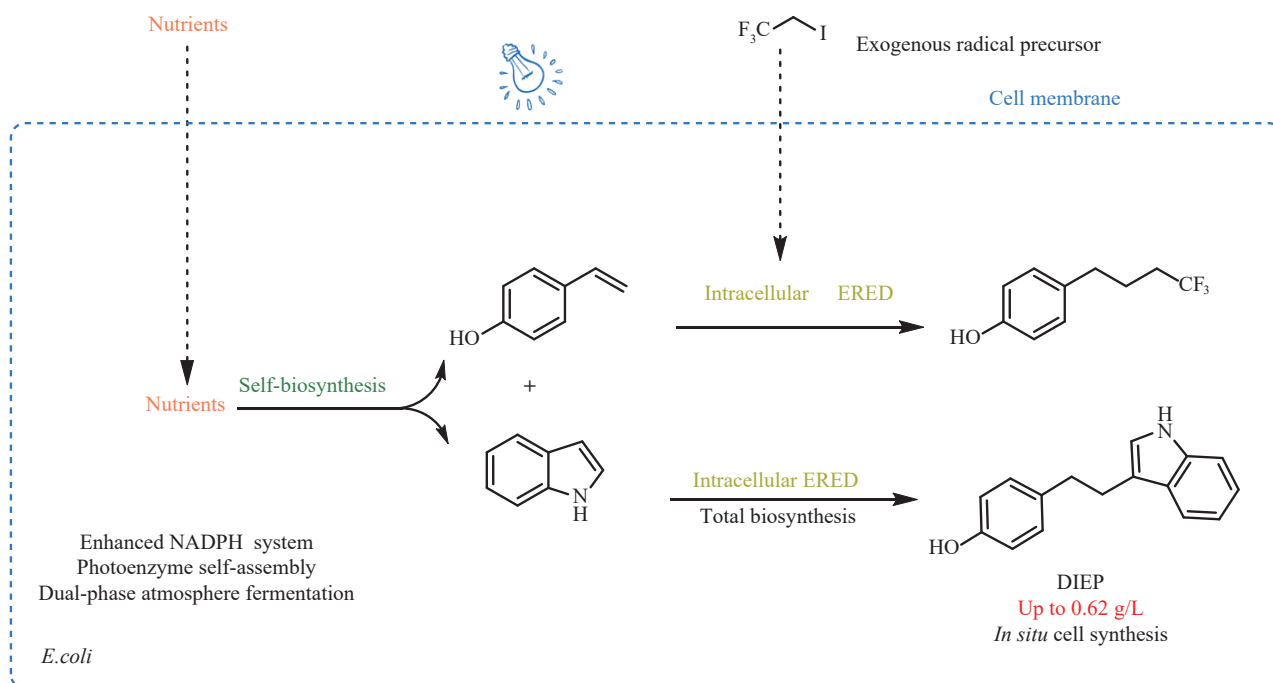
收稿日期: 2026-03-02 修回日期: 2026-03-18

基金项目: 广东省重点领域研发计划(2024B1111160007); 国家自然科学基金(22201295); 深圳市自然科学基金(JCYJ20220818100804010); 国家重点研发计划(2021YFA0910500)

引用本文: 许嘉凡, 周佳海, 高江涛, 古阳. 合成生物学驱动非天然产物的光生物合成[J]. 合成生物学, 2026, 7(2): 293-299

Citation: XU Jiafan, ZHOU Jiahai, GAO Jiangtao, GU Yang. Synthetic biology drives photosynthetic production of unnatural compounds[J]. Synthetic Biology Journal, 2026, 7(2): 293-299

pioneering advancement, responded highly in the scientific community, has established the first “*E. coli* production factory” capable of amplifying the production of unnatural products through the fermentation process, and has demonstrated to be capable of synthesizing the phenol-indole compound 4-[2-(3*a*,7*a*-dihydro-1*H*-indol-3-yl)ethyl]phenol (DIEP) in its complete biosynthetic route, which not only highlights the feasibility of achieving complete biosynthesis and engineered amplification of photoenzymatic reactions within living cells, but also validates the biological activity of the synthesized non-natural product, indicating its potential for industrial applications. The present paper comments on the research findings and offers insights on related studies, with a view to advancing photobiocatalysis from the proof-of-concept stage towards industrial production.



Keywords: synthetic biology; ene-reductases; photobiocatalysis; total biosynthesis; dual-phase fed-batch fermentation

生物合成能够精确组装复杂分子，但受限于自然界中酶的种类，而将非天然反应性整合到生物系统中则提供了一种强大的手段，能够扩展化学空间并实现非天然产物的理性设计^[1-3]。光酶催化通过耦合酶的选择性和光驱动自由基中间体，为这种反应性提供了一种变革性的途径，支持了一系列新的生物转化反应，例如氨基酸合成^[4-5]、多组分偶联反应^[6]以及环加成反应^[7-8]。这些转化反应利用了天然和人工合成的光活性组分，例如黄素辅因子、化学光催化剂和光活性非天然氨基酸^[9-13]。尽管前景广阔，当前的光酶催化平台仍面

临可扩展性方面的重大限制，例如酶高负载量、反应稳定性差等问题。大多数此前的研究集中于体外或全细胞系统中扩展反应类型，却并未解决如何将其转化为稳健且可扩展生产流程等问题^[14-16]。若想发挥光酶催化在合成生物学和工业生物技术中的应用潜力，必须克服这些限制。

合成生物学提供了一个强大的框架，用于设计和改造生物系统，以构建活性更高、反应性更强的酶、遗传通路和微生物细胞工厂^[17-21]。这种方法在可持续生产高价值天然产品（例如青蒿素^[22]、大麻素^[23]、紫杉醇^[24]）方面发挥了关键作用。若

要进一步拓展生物合成,使其超越天然反应性,一个有效的策略是将体外的非天然酶反应整合到体内的生物合成途径中,从而高效地生产高附加值的非天然化合物。一个突出的例子是Hartwig和Keasling团队最近开发出的微生物平台,该平台成功地将非天然的卡宾转移反应整合到了生物合成过程中^[25-27]。

近期,美国伊利诺伊大学厄巴纳-香槟分校(UIUC)的赵惠民教授团队^[28]在*Nature Catalysis*杂志上发表了一篇研究论文,题为“Harnessing photoenzymatic reactions for unnatural biosynthesis in microorganisms”。该研究首次将光激发的烯炔还原酶(ene-reductases, ERED)所催化的反应整合进工程化改造后的大肠杆菌细胞中,实现了光驱动非天然反应与细胞代谢的耦合;并使用合成生物学策略,在大肠杆菌细胞工厂中实现了反应底物(4-乙烯基苯酚、苯乙烯和吡啶)的内源性合成、辅因子(FMN和NADPH)的原位再生,以及最终复杂的非天然产物苯酚-吡啶类化合物4-[2-(3a,7a-二氢-1H-吡啶-3-基)乙基]苯酚(DIEP)的全生物合成。本文将对该研究成果进行介绍,并结合相关研究工作提出一些见解,以期推动光生物催化从“理念验证”向“工业生产”的转化。

作者首先进行了大肠杆菌胞内光生物合成平台的构建与优化,结果表明,烯还原酶在体外反应中表现出了广泛的底物普适性,能够催化不同的自由基反应。因此,该研究以ERED为切入点,以4-乙烯基苯酚(4-vinylphenol)和三氟碘乙烷(TFIE)为模型底物进行了筛选。结果表明,OYE3^{N194Y}在蓝光照射下对该反应表现出了较高的催化活性(48%)。作者接下来在大肠杆菌中重构了4-乙烯基苯酚的合成通路,使细胞能够从葡萄糖中自养合成4-乙烯基苯酚。随后,作者将光酶表达途径整合至上述包含4-乙烯基苯酚合成途径的工程化大肠杆菌中(图1)。该光生物合成菌株(PBS6)在蓝光照射和无氧条件下,使用TFIE进行发酵,产生了2.14 mg/L的4-(4,4,4-三氟丁基)苯酚(TFBP)产物。还原型烟酰胺腺嘌呤二核苷酸磷酸(NADPH)是ERED中还原性FMN再生的关键辅因子,引入异源的葡萄糖脱氢酶(GDH)或过表达内源的异柠檬酸脱氢酶(ICD)可显著提

高产量。作者在光酶合成系统中使用强Trc启动子,并在NADPH再生系统中使用弱Lac启动子,从而显著提高了TFBP的产量(13.78 mg/L)。此外,作者通过调整质粒的复制起始位点来控制基因的拷贝数,以评估底物供应和光酶的产生情况。当底物合成使用中拷贝质粒,而光合酶生产使用高拷贝质粒时,产率提高到了41.41 mg/L。这充分证明,可以通过胞内辅因子供应以及生物合成途径的优化,显著提高胞内原位光反应的效率。

为了验证该光生物平台的普适性,作者重新构建了苯乙烯(styrene)的生物合成途径,并测试了多种外源性自由基前体(烷基、对磺酰基和酰基)。首先,作者在工程化大肠杆菌中重构了苯乙烯的合成通路,实现了该光生物合成菌株(PBS32)在LB培养基中高效生产苯乙烯(75.17 mg/L)。接着作者评估了该光生物平台与各种酶促反应的兼容性,包括吡啶-1-基苯甲酸酯、2-溴苯乙酮、对甲苯磺酰氯、4-(溴甲基)吡啶与2,2-二氯-1-吡咯烷-1-基-乙酮,产量在4.5~98.3 mg/L之间。特别是氮杂芳烃(azaarene)类型的自由基加成反应,其产量最高,达到98.3 mg/L。其中,手性产物 α -氯代酰胺与体外反应的立体选择性存在差距[86% e.e.(体内)vs. 91% e.e.(体外)],降低的立体选择性可能归因于大肠杆菌内源性光酶在催化反应时催化活性相对较低。该结果表明,该微生物工程平台能够催化多种类型的自由基反应,极大地拓宽了微生物合成的化学空间。

为了实现完全不依赖外源前体的全生物合成,作者在大肠杆菌的代谢通路中,共同表达了自由基前体(吡啶)合成系统、4-乙烯基苯酚合成系统以及光酶合成系统(图2),实现了非天然代谢产物的全生物合成,即4-[2-(3a,7a-二氢-1H-吡啶-3-基)乙基]苯酚(DIEP)。作者首先设计了一条模型光酶催化途径,其中吡啶与4-乙烯基苯酚耦合表达。在大肠杆菌细胞内,光酶催化吡啶与4-乙烯基苯酚的偶联,产生DIEP。随后,作者通过优化外源核黄素磷酸钠(FMN-Na)的添加、调控质粒拷贝数以及结合定向进化策略,得到了发酵催化效力最佳的光生物合成菌株(PBS46),其产量达到94.06 mg/L。为进一步提高发酵产量,作者采用了分阶段补料和双相发酵的过程(图3)。通过

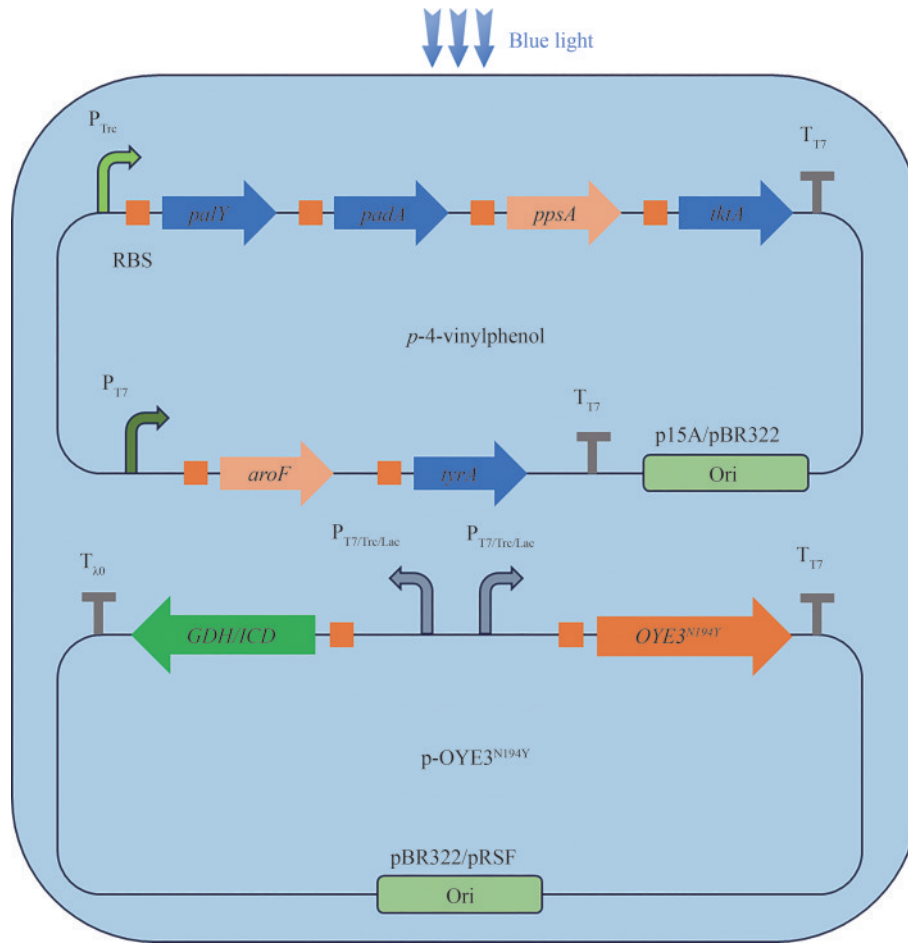


图1 光生物合成菌株示意图

[质粒 $p\text{-OYE3}^{N194Y}$ 包含 GDH 或 ICD 。 $aroF$ —3-脱氧-D-阿拉伯糖-庚糖酸-7-磷酸 (DAHP) 合成酶基因; Ori—复制起点; $palY$ —苯丙氨酸氨裂酶基因 (来自圆红冬孢酵母); $padA$ —脱羧酶基因 (来自植物乳杆菌); P_{Lac} —乳糖启动子; $ppsA$ —磷酸烯醇式丙酮酸合成酶基因; P_{T7} —T7 启动子; P_{Trc} —Trc 启动子; RBS—核糖体结合位点; $T_{\lambda 0}$ — $\lambda 0$ 终止子; $tktA$ —转酮醇酶基因; T_{T7} —T7 终止子; $tyrA$ —酪氨酸合成酶基因]

Fig. 1 Schematic diagram for the photobiological synthesis strain

[$p\text{-OYE3}^{N194Y}$ contains GDH or ICD . $aroF$ —3-deoxy-D-arabino-heptulosonate-7-phosphate (DAHP) synthetase gene; Ori—origin of replication; $palY$ —phenylalanine ammonia lyase gene (from *R. toruloides*); $padA$ —decarboxylase gene (from *L. plantarum*); P_{Lac} —Lac promoter; $ppsA$ —phosphoenolpyruvate synthase gene; P_{T7} —T7 promoter; P_{Trc} —Trc promoter; RBS—ribosome-binding site; $T_{\lambda 0}$ — $\lambda 0$ terminator; $tktA$ —transketolase gene; T_{T7} —T7 terminator; $tyrA$ —tyrosine synthase gene]

优化溶氧比例、光照时间和诱导代谢途径, DIEP 的生产量得到了显著提高。进一步的调控结果表明, 通过解耦不同底物诱导的代谢物, 可以有效缓解代谢竞争, 从而显著提高发酵效率, 使 DIEP 的滴度达到 0.62 g/L。此外, 对 DIEP 的生物活性评估表明, 其具有广谱抗菌活性, 能够有效杀伤革兰氏阳性和革兰氏阴性菌。

综上所述, 该研究建立了一个理性且可调控的微生物光生物合成框架, 突破了生命体的合成能力限制。这一发现将光酶反应从体外整合到活细胞内, 实现了非天然产物的半生物合成甚至全

生物合成, 为未来可持续生产高附加值药物和复杂天然产物奠定了工业化应用的基础。然而, 光酶催化的工业化进程仍面临着多重技术瓶颈, 主要体现在以下两个方面:

(1) 在工业化生产的高密度发酵中, 光在浑浊发酵体系中的穿透深度有限。光生物合成系统的光穿透性将成为限制其高浓度发酵的关键因素之一。目前已报道的策略包括: 优化细胞膜成分 (使用尾长更短的磷脂, 因为其吸光度比长尾链磷脂更低, 光衰减更小); 降低光衰减效应^[29]; 引入“光控放大器”, 使细胞对微弱的光信号产生强烈

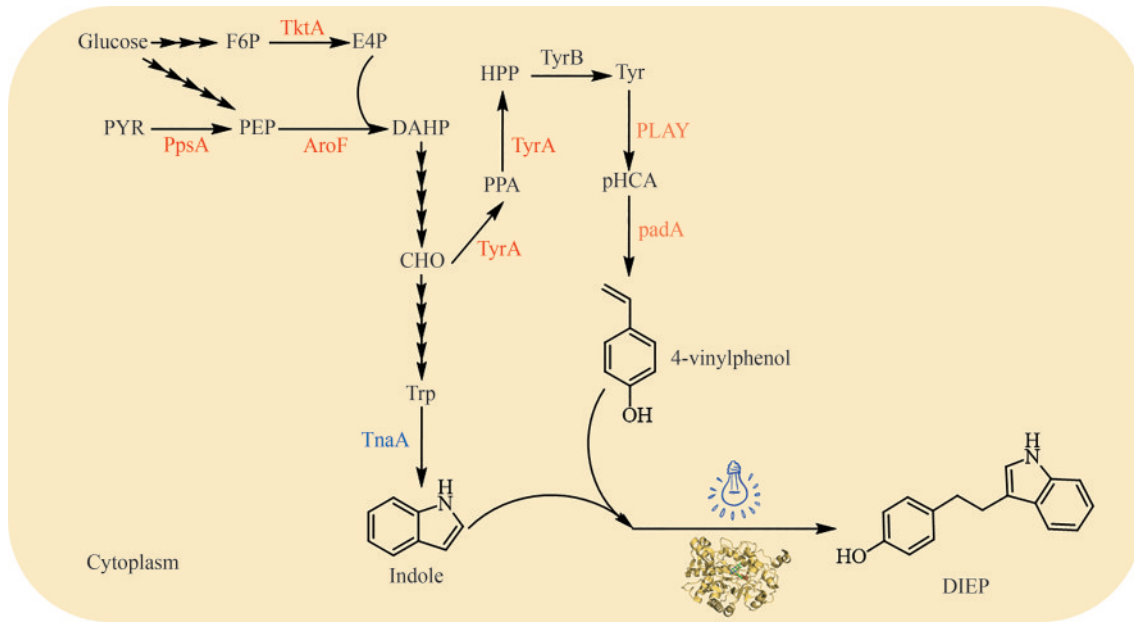


图2 完全光生物合成菌株示意图

(多箭头代表多步催化过程; CHO—糠醛酸; E4P—赤藓糖-4-磷酸; F6P—果糖-6-磷酸; PYR—丙酮酸; PEP—磷酸烯醇式丙酮酸; DAHP—D-阿拉伯糖-7-磷酸己糖酸; PPA—预苯酸; HPP—4-羟基苯乙酰酮; pHCA—对羟基肉桂酸; Trp—色氨酸; Tyr—酪氨酸)

Fig. 2 Schematic diagram of the fully photosynthetic bacterial strain

(multiple arrows indicate multi-step catalytic processes; CHO—chorismate; E4P—erythrose 4-phosphate; F6P—fructose 6-phosphate; PYR—pyruvate; PEP—phosphoenolpyruvate; DAHP—D-arabino-heptulose-7-phosphate; PPA—prephenate; HPP—4-hydroxyphenylacetone; pHCA—*p*-hydroxy-cinnamic acid; Trp—Tryptophan; Tyr—tyrosine)

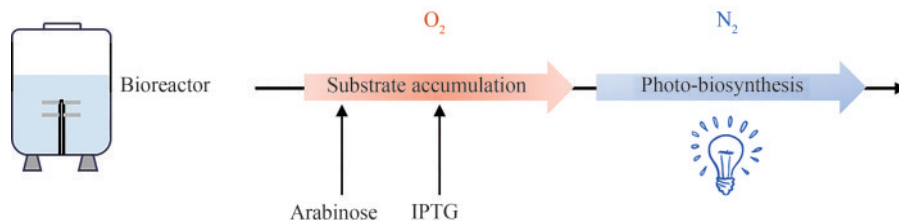


图3 双相-补料发酵示意图

(IPTG—异丙基-β-D-硫代半乳糖苷)

Fig. 3 Schematic diagram of the dual-phase fed-batch fermentation

(IPTG—Isopropyl-beta-D-thiogalactopyranoside)

的响应^[30]; 此外, 还可以通过改变光的供给方式, 使细胞自身发光, 从而解决光穿透性的问题^[29]。

(2) 部分非天然底物或产物对发酵底盘细胞具有较强的毒害作用。当其浓度较高时, 会显著抑制细胞生长, 从而限制细胞的生产产量。可以在底盘细胞的细胞膜上增加外排泵, 将细胞表达的、对其自身具有毒副作用的非天然产物排出, 从而有效提高菌株对有毒化学品的耐受性^[31]; 还可以将菌株置于浓度逐渐增加的有毒物质环境中进行长期培养, 使其在进化压力下自发产生有益的突变^[32]。

光酶催化融合了光化学的高反应性与酶催化

的精准选择性, 正成为合成生物学变革的重要驱动力。展望未来, 光酶催化技术在合成生物学领域的发展将专注于解决大规模生产中的光传递和物料传递问题, 同时结合蛋白质工程和代谢通路优化, 致力于将其应用于高附加值药物、手性化学品以及生物燃料的可持续生产。

参 考 文 献

- [1] YANG Y, ARNOLD F H. Navigating the unnatural reaction space: directed evolution of heme proteins for selective carbene and nitrene transfer[J]. Accounts of Chemical

- Research, 2021, 54(5): 1209-1225.
- [2] HANEFELD U, HOLLMANN F, PAUL C E. Biocatalysis making waves in organic chemistry[J]. Chemical Society Reviews, 2022, 51(2): 594-627.
- [3] BULLER R, LUTZ S, KAZLAUSKAS R J, et al. From nature to industry: harnessing enzymes for biocatalysis[J]. Science, 2023, 382(6673): eadh8615.
- [4] CHENG L, CHEN J, BO Z Y, et al. Engaging unstabilized alkyl radicals with pyridoxal radical biocatalysis: enantiodivergent synthesis of aliphatic non-canonical amino acids[J]. Journal of the American Chemical Society, 2026, 148(5): 5092-5101.
- [5] ZHANG C, ZHOU J, MAI B K, et al. A pyridoxal radical carboligase and imine reductase photobiocatalytic cascade for stereoselective synthesis of unnatural prolines[J]. Nature Chemistry, 2026, 18(1): 101-108.
- [6] MING Y, WU Z P, XU Y Y, et al. Photobiocatalytic radical repositioning for enantioselective acylation of remote C—C/C—H bonds[J]. Nature Catalysis, 2025, 8(11): 1198-1207.
- [7] YANG X J, GUO J, QIAN J Y, et al. Enantioselective energy transfer catalysis compartmentalized by triplet photoenzymes[J]. Nature Catalysis, 2025, 8(11): 1178-1187.
- [8] YANG X J, HUANG J J, GUO J, et al. Bridging chemistry and biology for light-driven new-to-nature enantioselective photoenzymatic catalysis[J]. Chemical Society Reviews, 2025, 54(11): 5157-5188.
- [9] EMMANUEL M A, BENDER S G, BILODEAU C, et al. Photobiocatalytic strategies for organic synthesis[J]. Chemical Reviews, 2023, 123(9): 5459-5520.
- [10] HARRISON W, HUANG X Q, ZHAO H M. Photobiocatalysis for abiological transformations[J]. Accounts of Chemical Research, 2022, 55(8): 1087-1096.
- [11] 夏孔晨, 徐维华, 吴起. 光酶催化混乱性反应的研究进展[J]. 合成生物学, 2024, 5(5): 997-1020.
- XIA K C, XU W H, WU Q. Recent advances in photo-induced promiscuous enzymatic reactions[J]. Synthetic Biology Journal, 2024, 5(5): 997-1020.
- [12] 付雨, 钟芳锐. 化学原理驱动的光生物不对称催化研究进展[J]. 合成生物学, 2024, 5(5): 1021-1049.
- FU Y, ZHONG F R. Recent advances in chemically driven enantioselective photobiocatalysis[J]. Synthetic Biology Journal, 2024, 5(5): 1021-1049.
- [13] 明阳, 陈彬, 黄小强. 光酶催化合成进展[J]. 合成生物学, 2023, 4(4): 651-675.
- MING Y, CHEN B, HUANG X Q. Recent advances in photoenzymatic synthesis[J]. Synthetic Biology Journal, 2023, 4(4): 651-675.
- [14] GUO J, QIAN J Y, CAI D H, et al. Chemogenetic evolution of diversified photoenzymes for enantioselective [2+2] cycloadditions in whole cells[J]. Journal of the American Chemical Society, 2024, 146(28): 19030-19041.
- [15] GU J H, LI Q S, CAO M T, et al. NIR light-promoted whole-cell catalysis based on a light-harvesting blackbody bioreactor[J]. Journal of Analysis and Testing, 2023, 7(3): 237-244.
- [16] FU Y, LIU X H, XIA Y, et al. Whole-cell-catalyzed hydrogenation/deuteration of aryl halides with a genetically repurposed photodehalogenase[J]. Chem, 2023, 9(7): 1897-1909.
- [17] SESHADRI K, ABAD A N D, NAGASAWA K K, et al. Synthetic biology in natural product biosynthesis[J]. Chemical Reviews, 2025, 125(7): 3814-3931.
- [18] 刘知非, 关丹, 乔郅钠, 等. 大肠杆菌细胞工厂合成L-苏氨酸研究进展[J]. 中国生物工程杂志, 2025, 45(12): 78-90.
- LIU Z F, GUAN D, QIAO Z N, et al. Research progress on the construction of *Escherichia coli* cell factory for L-threonine production[J]. China Biotechnology, 2025, 45(12): 78-90.
- [19] 吴弘轩, 杨金花, 沈培杰, 等. 利用大肠杆菌细胞工厂生产吡啶-3-乙酸的研究[J]. 中国生物工程杂志, 2021, 41(1): 12-19.
- WU H X, YANG J H, SHEN P J, et al. Study on the production of indole-3-acetic acid using *E. coli* cell factory[J]. China Biotechnology, 2021, 41(1): 12-19.
- [20] 于勇, 朱欣娜, 张学礼. 大宗化学品细胞工厂的构建与应用[J]. 合成生物学, 2020, 1(6): 674-684.
- YU Y, ZHU X N, ZHANG X L. Construction and application of microbial cell factories for production of bulk chemicals[J]. Synthetic Biology Journal, 2020, 1(6): 674-684.
- [21] 丁明珠, 李炳志, 王颖, 等. 合成生物学重要研究方向进展[J]. 合成生物学, 2020, 1(1): 7-28.
- DING M Z, LI B Z, WANG Y, et al. Significant research progress in synthetic biology[J]. Synthetic Biology Journal, 2020, 1(1): 7-28.
- [22] RO D K, PARADISE E M, OUELLET M, et al. Production of the antimalarial drug precursor artemisinic acid in engineered yeast[J]. Nature, 2006, 440(7086): 940-943.
- [23] LUO X Z, REITER M A, D'ESPAUX L, et al. Complete biosynthesis of cannabinoids and their unnatural analogues in yeast[J]. Nature, 2019, 567(7746): 123-126.
- [24] GAO J C, ZUO Y M, XIAO F, et al. Biosynthesis of catharanthine in engineered *Pichia pastoris*[J]. Nature Synthesis, 2023, 2(3): 231-242.
- [25] HUANG J, LIU Z N, BLOOMER B J, et al. Unnatural biosynthesis by an engineered microorganism with heterologously expressed natural enzymes and an artificial metalloenzyme[J]. Nature Chemistry, 2021, 13(12): 1186-1191.
- [26] BLOOMER B J, CLARK D S, HARTWIG J F. Progress, challenges, and opportunities with artificial metalloenzymes in biosynthesis[J]. Biochemistry, 2023, 62(2): 221-228.
- [27] HUANG J, QUEST A, CRUZ-MORALES P, et al. Complete integration of carbene-transfer chemistry into biosynthesis[J]. Nature, 2023, 617(7960): 403-408.

- [28] YUAN Y J, LI M L, HARRISON W, et al. Harnessing photoenzymatic reactions for unnatural biosynthesis in microorganisms[J]. *Nature Catalysis*, 2026, 9: 62-72.
- [29] ADIR O, ALBALAK M R, ABEL R, et al. Synthetic cells with self-activating optogenetic proteins communicate with natural cells[J]. *Nature Communications*, 2022, 13: 2328.
- [30] ZHANG X Y, FENG Z J, LI H X, et al. Ingestible optoelectronic capsules enable bidirectional communication with engineered microbes for controllable therapeutic interventions[J]. *Nature Microbiology*, 2025, 10(8): 1841-1853.
- [31] LV L C, WAN M, WANG C Z, et al. Emergence of a plasmid-encoded resistance-nodulation-division efflux pump conferring resistance to multiple drugs, including tigecycline, in *Klebsiella pneumoniae*[J]. *mBio*, 2020, 11(2): e02930-19.
- [32] 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.



通讯作者: 周佳海(1972—),男,研究员,博士生导师。研究方向为工业生物技术、合成生物学相关的微生物酶学以及活性天然产物的化学生物学,通过会聚酶学、结构生物学及蛋白质理性设计等技术方法,重点研究酶的结构与催化机理、定向进化酶的科学规律、分子智能设计等。

E-mail: jiahai@nnu.edu.cn



共同通讯作者: 高江涛(1978—),男,福建农林大学蜂学与生物医药学院副院长,闽江学者特聘教授,博士生导师。研究方向为天然药物的合成生物学及化学生物学。

E-mail: jgaotao@gmail.com



共同通讯作者: 古阳(1989—),男,副研究员,博士生导师。研究方向为将化学合成的多样性与生物合成的精准性相结合,通过跨学科的研究方法,设计并改造具有非天然反应活性的人工金属酶,以突破天然酶的化学反应空间,从而实现对功能分子的精准构建。

E-mail: yang.gu@siat.ac.cn



第一作者: 许嘉凡(2001—),男,硕士研究生。研究方向为光酶催化的非天然反应。

E-mail: xujiafan2023@163.com