

序

DOI: 10.12211/2096-8280.2025-035

合成之美：合成生物学到护肤的未来之路

康振^{1,2,3}, 李江华^{2,3}, 堵国成^{1,2,3}, 陈坚^{1,2,3}

(¹ 江南大学生物工程学院, 糖化学与生物技术教育部重点实验室, 江苏 无锡 214122; ² 江南大学未来食品科学中心, 江苏 无锡 214122; ³ 江南大学生物工程学院, 工业生物技术教育部重点实验室, 江苏 无锡 214122)

中图分类号: Q81 文献标志码: A

在人类探索生命本质与技术边界的征途中, 生命科学正在经历一场深刻的范式转变, 从被动观察自然生命系统到主动重构与创造新型生命形式的过程正在加速^[1-2]。而在这场变革的浪潮之中, 合成生物学 (synthetic biology) 以其高度模块化、程序化、工程化的思维方式, 正重新定义我们对“生命”的理解, 并深刻改变诸如医药、农业、能源、材料、食品与健康等多个领域的底层逻辑。在众多被影响的产业之中, 护肤科学作为连接生命健康与美学需求的重要交叉领域, 也正在迎来一次根本性的重构^[3]。

长期以来, 护肤品中的核心功能成分往往来源于自然采集, 例如植物提取物、动物组织衍生成分或矿物提炼物。这种路径不仅在原料供给端受到地域、气候和生态多样性限制, 在加工端也面临着效率低、标准化难度大、活性易失、资源不可持续等一系列问题^[4]。同时, 消费者对于护肤品功能的多样化、个性化、天然化以及环保友好化的需求持续增长, 而传统产业链的响应能力已难以满足现代护肤品的高阶迭代要求。因此, 亟须一种能够从源头上实现分子功能重构、合成路径优化与原料绿色制造的系统性解决方案^[5-6]。

合成生物学的兴起, 为这一产业提供了划时代的技术基础。通过对微生物底盘细胞的基因回路与代谢网络进行精准改造, 可以在特定微生物体内构建类似天然植物或动物细胞的代谢反应环境, 从而合成多种具有护肤活性的小分子、大分子化合物及其衍生物。更进一步, 合成生物学不仅可以模拟自然, 更能超越自然, 通过底物结构的精准设计与酶催化路径的模块化重构, 合成自然界中不存在但具有更优性能的“类天然”分子。相比传统的提取路线, 这种以微生物细胞工厂为核心的制造方式具有高产率、高稳定性、高一致性和高可控性等优势, 符合绿色低碳的发展理念, 可实现护肤产业链的绿色重构与高质量跃迁^[7]。

本专辑收录了多篇围绕化妆品活性原料合成生物学研究前沿的综述与进展, 涵盖从底物分子设计、合成路径优化、关键酶改造, 到细胞工厂构建与代谢调控的多个维度, 系统展示了合成生物学在化妆品原料制造中的多元化探索与应用。在基础代谢物合成方面, 天津科技大学王钰教授团队^[8]综述了微生物法生产L-精氨酸的合成途径与调控机制, 强调了合成生物学改造与生物传感器辅助筛选在高产菌株构建中的应用。山东大学孔健教授团队^[9]则总结了乳酸菌遗传操作系统的发展, 突出了其在保湿因子与抗氧化产物生物合成中的应用潜力。在天然产物合成路径优化方面, 中国科学院大连化学物理研究所周雍进研究员团队^[10]聚焦萜类的合成路径与酶挖掘进展, 探讨了数据驱动策略在合成生物学中的应用。天津大学肖文海教授团队^[11]则从代谢通量调控、关键酶改造与区室化表达等方面, 系统分析了酵母细胞合成单

收稿日期: 2025-04-24 修回日期: 2025-04-25

引用本文: 康振, 李江华, 堵国成, 陈坚. 合成之美: 合成生物学到护肤的未来之路[J]. 合成生物学, 2025, 6(2): 229-232

喆的策略。在芳香与多酚类化合物研究方面,北京化工大学袁其朋教授团队^[12]梳理了黄酮类生物合成路径,强调了结构多样性调控策略;天津大学罗云孜教授团队^[13]聚焦红景天苷,综述了其合成机制、关键酶挖掘与异源表达研究进展。在糖类物质合成方面,张彦研究员等^[14]总结了酵母甘露糖蛋白的结构与功能,展示其在调节肠道、抗氧化等方面的应用价值。江南大学康振教授团队综述了透明质酸^[15-17]、类菌孢素氨基酸^[18]及功能肽^[19]等的微生物合成研究,分析了关键酶元件优化与表达调控瓶颈。在功能性脂类与护肤原料方面,江南大学刘延峰教授团队^[20]系统综述了神经酰胺的合成路径与在皮肤功能恢复中的作用。浙江大学连佳长研究员团队^[21]则总结了酿酒酵母基因编辑与工程策略在化妆品原料合成中的应用进展,提出其作为平台菌株的发展潜力。此外,天津科技大学谢希贤教授团队^[22]围绕氨基酸衍生物在化妆品中的应用,综述了酶转化与发酵工艺及其在细胞工厂构建中的工程化策略。

这些进展共同标志着护肤活性成分的获取方式正发生范式转移,从以自然界为资源端的“采集-提取-分离”路径,跃迁至以设计驱动为核心的“编程-表达-合成”体系,从而实现分子级安全性保障、功能性精准调控与制造过程的系统性绿色重构^[23]。更值得关注的是,合成生物学不仅仅是一个制造工具,其核心竞争力在于系统性设计的能力^[24]。通过构建由酶工程、底物通路、传感调控、反馈模块等共同组成的合成调控网络,研究人员可以对功能成分的产量、结构与功能进行动态调控,使其更适应不同肤质状态和应用场景^[25]。与此同时,材料科学、人工智能与微生态工程的融合也正在助力合成生物护肤系统从实验室平台走向实际应用^[26]。智能响应材料可用于功能成分的精准递送与时序释放,机器学习算法可加速功能蛋白序列的设计优化,皮肤微生物组研究为合成微生物提供宿主环境适配指导,共同推动护肤系统的可编程化、智能化和平台化演进^[27]。

总体而言,合成生物学不仅为护肤产业提供了全新的分子库与制造路径,更重构了从功能识别到系统设计的全流程认知逻辑。它让护肤不再依赖自然馈赠的偶然性,而成为人类对生命系统的理性设计成果。对科研人员而言,这是合成生物技术向产业转化的绝佳场景;对产业界而言,这是构建护肤新物种与新价值体系的重大机遇;而对每一位用户而言,这是一次从功效诉求向生物共生认知层次的跃迁。在这一背景下,我们正迈入一个合成生物驱动的“功能定义型”护肤新时代,在未来,肌肤之美,不再依赖自然馈赠,而是源于对生命语言的精准编译。

参 考 文 献

- [1] 张先恩. 中国合成生物学发展回顾与展望[J]. 中国科学: 生命科学, 2019, 49(12): 1543-1572.
ZHANG X E. Synthetic biology in China: review and prospects[J]. *Scientia Sinica (Vitae)*, 2019, 49(12): 1543-1572.
- [2] MENG F K, ELLIS T. The second decade of synthetic biology: 2010 - 2020[J]. *Nature Communications*, 2020, 11: 5174.
- [3] 申桂英. 化妆品原料市场现状与发展趋势[J]. 精细与专用化学品, 2014, 22(10): 16-20.
SHEN G Y. Market situation and development trend of cosmetics raw materials[J]. *Fine and Specialty Chemicals*, 2014, 22(10): 16-20.
- [4] 张璐鸥, 徐丽, 胡晓旭, 等. 合成生物学助力化妆品走进生物制造新时代 [J]. 合成生物学, 2025, 6(2): 479-491.
ZHANG L O, XU L, HU X X, et al. Synthetic biology ushers cosmetic industry into the “bio-cosmetics” era[J]. *Synthetic Biology Journal*, 2025, 6(2): 479-491.
- [5] 刘丽. 中国化妆品的未来发展之路将走向何方(五): 合成生物技术篇[J]. 中国化妆品, 2024(2): 24-33.
LIU L. Where will the future development of cosmetics in China go (5): synthetic biotechnology[J]. *China Cosmetics Review*, 2024(2): 24-33.
- [6] 孙韬, 张卫文, 胡章立, 等. 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): 821-825.
SUN T, ZHANG W W, HU Z L, et al. Synthetic biology helps carbon neutralization: new chassis, new strategies and new technologies[J]. *Synthetic Biology Journal*, 2022, 3(5): 821-825.
- [7] 张小芳, 杨梦琦. 生物制造技术: 开启化妆品原料创新新时代[J]. 中国战略新兴产业, 2025(11): 61-63.
ZHANG X F, YANG M Q. Bio-manufacturing technology: opening a new era of cosmetic raw material innovation[J]. *China Strategic Emerging Industry*, 2025(11): 61-63.

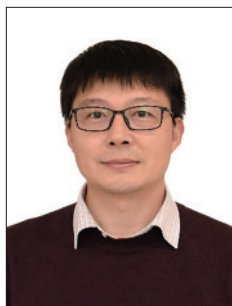
- [8] 王倩, 果士婷, 辛波, 等. L-精氨酸的微生物合成研究进展 [J]. 合成生物学, 2025, 6(2): 290-305.
WANG Q, GUO S T, XIN B, et al. Advances in biosynthesis of L-arginine using engineered microorganisms[J]. Synthetic Biology Journal, 2025, 6(2): 290-305.
- [9] 郭婷婷, 韩湘凝, 黄熙婷, 等. 乳酸菌的合成生物学工具及在合成益肤因子中的应用 [J]. 合成生物学, 2025, 6(2): 320-333.
GUO T T, HAN X N, HUANG X T, et al. Advances in synthetic biology tools for lactic acid bacteria and their application in the development of skin beneficial products[J]. Synthetic Biology Journal, 2025, 6(2): 320-333.
- [10] 张梦瑶, 蔡鹏, 周雍进. 合成生物学助力萜类香精香料可持续生产 [J]. 合成生物学, 2025, 6(2): 334-356.
ZHANG M Y, CAI P, ZHOU Y J. Synthetic biology drives the sustainable production of terpenoid fragrances and flavors[J]. Synthetic Biology Journal, 2025, 6(2): 334-356.
- [11] 高琪, 肖文海. 酵母合成单萜类化合物的研究进展 [J]. 合成生物学, 2025, 6(2): 357-372.
GAO Q, XIAO W H. Advances in the biosynthesis of monoterpenes by yeast[J]. Synthetic Biology Journal, 2025, 6(2): 357-372.
- [12] 韦灵珍, 王佳, 孙新晓, 等. 黄酮类化合物生物合成及其在化妆品中应用的研究 [J]. 合成生物学, 2025, 6(2): 373-390.
WEI L Z, WANG J, SUN X X, et al. Biosynthesis of flavonoids and their applications in cosmetics[J]. Synthetic Biology Journal, 2025, 6(2): 373-390.
- [13] 黄姝涵, 马赫, 罗云孜. 生物合成红景天苷的研究进展 [J]. 合成生物学, 2025, 6(2): 391-407.
HUANG S H, MA H, LUO Y Z. Research progress in the biosynthesis of salidroside[J]. Synthetic Biology Journal, 2025, 6(2): 391-407.
- [14] 盛周煌, 陈智仙, 张彦. 酵母甘露糖蛋白的研究进展 [J]. 合成生物学, 2025, 6(2): 408-421.
SHENG Z H, CHEN Z X, ZHANG Y. Research progress of yeast mannoproteins[J]. Synthetic Biology Journal, 2025, 6(2): 408-421.
- [15] 肖森, 胡立涛, 石智诚, 等. 可控分子量透明质酸的生物合成研究进展 [J]. 合成生物学, 2025, 6(2): 445-460.
XIAO S, HU L T, SHI Z C, et al. Research advances in biosynthesis of hyaluronic acid with controlled molecular weights[J]. Synthetic Biology Journal, 2025, 6(2): 445-460.
- [16] 康振. 基于合成生物学的糖胺聚糖及其寡聚糖的生物合成[C]//中国生物工程学会第十一届学术年会暨2017年全国生物技术大会论文集. 宜昌, 2017: 232.
KANG Z. Biosynthesis of glycosaminoglycans and their oligosaccharides based on synthetic biology[C]//Proceedings of the 11th Annual Academic Conference of the Chinese Society of Biotechnology and 2017 National Biotechnology Conference. Yichang, 2017: 232.
- [17] HU L T, XIAO S, SUN J Y, et al. Regulating cellular metabolism and morphology to achieve high-yield synthesis of hyaluronan with controllable molecular weights[J]. Nature Communications, 2025, 16: 2076.
- [18] 张萍, 张维娇, 胥睿睿, 等. 防晒化合物类菌孢素氨基酸的生物合成 [J]. 合成生物学, 2025, 6(2): 306-319.
ZHANG P, ZHANG W J, XU R R, et al. Research advances on the biosynthesis of mycosporine-like amino acids[J]. Synthetic Biology Journal, 2025, 6(2): 306-319.
- [19] 汤传根, 王璟, 张烁, 等. 功能肽合成和挖掘策略研究进展 [J]. 合成生物学, 2025, 6(2): 461-478.
TANG C G, WANG J, ZHANG S, et al. Advances in synthesis and mining strategies for functional peptides [J]. Synthetic Biology Journal, 2025, 6(2): 461-478.
- [20] 鲁锦畅, 武耀康, 吕雪芹, 等. 神经酰胺类鞘脂的绿色生物制造 [J]. 合成生物学, 2025, 6(2): 422-444.
LU J C, WU Y K, LV X Q, et al. Green biomanufacturing of ceramide sphingolipids[J]. Synthetic Biology Journal, 2025, 6(2): 422-444.
- [21] 左一萌, 张姣姣, 连佳长. 酿酒酵母使能技术在化妆品原料合成中的应用 [J]. 合成生物学, 2025, 6(2): 233-253.
ZUO Y M, ZHANG J J, LIAN J Z. Enabling technology for the biosynthesis of cosmetic raw materials with *Saccharomyces cerevisiae*[J]. Synthetic Biology Journal, 2025, 6(2): 233-253.
- [22] 伊进行, 唐宇琳, 李春雨, 等. 氨基酸衍生物在化妆品中的应用及其生物合成研究进展 [J]. 合成生物学, 2025, 6(2): 254-289.
YI J H, TANG Y L, LI C Y, et al. Applications and advances in the research of biosynthesis of amino acid derivatives as key ingredients in cosmetics[J]. Synthetic Biology Journal, 2025, 6(2): 254-289.
- [23] 吕雪峰, 宋浩. 从生物能源到能源合成生物学: 创新合成生物技术, 助力能源安全体系建设 [J]. 合成生物学, 2023, 4(6): 1051-1054.
LYU X F, SONG H. From bioenergy to synthetic biology of energy: innovating synthetic biotechnology to help the construction of energy security system[J]. Synthetic Biology Journal, 2023, 4(6): 1051-1054.
- [24] 史硕博, 张翀, 成喜雨, 等. 挑战造物主: 合成生物学使能工具 [J]. 合成生物学, 2023, 4(1): 1-4.
SHI S B, ZHANG C, CHENG X Y, et al. Challenging the creator: an enabling tool for synthetic biology[J]. Synthetic Biology Journal, 2023, 4(1): 1-4.
- [25] AL-SMADI K, LEITE-SILVA V R, FILHO N A, et al. Innovative approaches for maintaining and enhancing skin health and managing skin diseases through microbiome-targeted strategies[J]. Antibiotics, 2023, 12(12): 1698.

[26] 刘海燕. 人工智能: 开启生物体系计算设计的新篇章[J]. 合成生物学, 2023, 4(3): 419-421.

LIU H Y. Artificial intelligence: opening a new chapter in computational design of biological systems[J]. Synthetic Biology Journal, 2023, 4(3): 419-421.

[27] 朱华伟, 李寅. 合成生物制造 2025[J]. 生物工程学报, 2025, 41(1): 1-78.

ZHU H W, LI Y. Biomanufacturing driven by engineered organisms[J]. Chinese Journal of Biotechnology, 2025, 41(1): 1-78.



康振(1982—),男,教授,博士生导师,国家级青年人才计划入选者。主持包括国家重点研发课题、国家自然科学基金、江苏省科技支撑等在内的省部级纵向项目,研究方向为微生物合成生物学与生物制造研究。近年在 *Nature Communications*、*ACS Catalysis*、*Green Chemistry*、*Metabolic Engineering* 等主流杂志发表研究论文 102 篇,出版专著(或教材)5 部;授权中国发明专利 79 件,美国发明专利 4 件;转让透明质酸酶、低分子量透明质酸、硫酸软骨素等 12 项生物制造技术。获教育部科技进步一等奖(1/12)、山东省科技进步一等奖(2/12)、中国轻工业联合会技术发明二等奖(1/6)等。

E-mail: zkang@jiangnan.edu.cn



李江华(1966—),男,教授,博士生导师。中国食品科技学会有机酸分会理事。长期从事发酵工程和酶工程等领域的研究,主要承担“发酵工程原理与技术”“酶工程”等课程的讲授工作;主持包括国家重点研发计划、国家自然科学基金、国家高技术研究发展计划等在内的国家及省部级科研项目 6 项。联合发表 SCI 论文 200 余篇;授权发明专利 80 余项;获得国家技术发明二等奖、教育部科技进步二等奖、中国轻工业联合会技术发明和科技进步一等奖等的省部级或行业协会奖励 6 项。享受国务院政府特殊津贴。

E-mail: lijianhua@jiangnan.edu.cn



堵国成(1965—),男,教授,博士生导师。教育部长江学者特聘教授、国家“万人计划”教学名师。 *Microbial Cell Factories* 副主编, *Journal of the Science of Food and Agriculture*、*Bioresource Technology* 编委。长期从事工业微生物发酵领域的科研和教学工作。主持或完成国家“十三五”重点研发计划项目、国家自然科学基金重点项目、教育部创新团队项目、国家高技术研究发展计划项目等国家和省部级项目 16 项。近年来共发表高水平研究论文 80 篇,出版专著(或教材)4 部;申请发明专利 80 项,授权发明专利 70 项,其中国际发明专利 9 项。获国家技术发明二等奖 2 项、国家科技进步二等奖 1 项,省部级科技成果一等奖 5 项,中国专利金奖 1 项。

E-mail: gcd@jiangnan.edu.cn



陈坚(1962—),男,教授,博士生导师,中国工程院院士。兼任国务院学位委员会轻工技术与工程学科评议组召集人、教育部科技委农林学部副主任、粮食发酵工艺与技术国家工程实验室主任; *Food Bioscience* 主编、国际食品科学院(IAFoST) Fellow、国际生物加工学会(IBA) Fellow。长期从事发酵工程和食品生物技术的教学与研究,包括从细胞工厂构建体系与方法、发酵过程工程理论与技术两方面进行深入研究,改进发酵微生物高通量筛选系统、DNA 多区域快速组合编辑和组装方法,发展氮代谢阻遏效应、酶表达与分泌偶联和代谢网络动态平衡等理论,开发多参数分析建模、在线检测、实时评估的发酵优化控制技术,实施典型有机酸、酶制剂和功能糖等工业发酵生产的过程强化、单元替代和流程重构。以第一完成人身份获国家技术发明二等奖 2 项、国家科技进步二等奖 1 项,并曾获何梁何利基金科学与技术奖、中国专利奖金奖;曾担任国家重点基础研究发展计划项目首席科学家,获国家杰出青年基金项目资助。

E-mail: jchen@jiangnan.edu.cn