

序

DOI: 10.12211/2096-8280.2023-076

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

吕雪峰^{1, 2, 3}, 宋浩^{4, 5}

(¹ 中国科学院青岛生物能源与过程研究所, 山东省合成生物学重点实验室, 山东 青岛 266101; ² 山东能源研究院, 山东 青岛 266101; ³ 青岛新能源山东省实验室, 山东 青岛 266101; ⁴ 天津大学化工学院, 天津 300072; ⁵ 天津大学, 合成生物学前沿科学中心, 系统生物工程教育部重点实验室, 天津 300072)

中图分类号: Q81 文献标志码: A

能源是人类社会发展的基础和动力, 能源供应关系到国家安全和社会稳定, 建立能源安全体系对保证国家繁荣发展、人民生活改善、社会长治久安至关重要。化石能源在过去200年间支撑了人类文明的巨大发展, 然而其资源储量有限、不可再生, 且利用过程中伴随着大量温室气体排放和其他环境污染, 难以满足未来可持续型能源结构体系的建设需求。可再生能源是指自然界中能够循环再生、不随人类利用而减少的能源, 具有清洁、低碳的特点, 是能源供应技术的重要发展方向。生物能源是指以生物质为原料或者由生物体合成的能源, 是可再生能源的重要形式, 其生产和使用全周期中可以实现对地球大气存量碳资源的“净零”利用, 在保障能源供给、改善生态环境、支撑双碳目标达成等方面具有不可替代的独特优势。国际能源署(International Energy Agency)预测, 至2050年, 生物能源将成为全球范围内支撑净零排放能源新系统的三大核心支柱之一, 其在全球一次能源消费中占比将达到18.8%^[1]; 能源转型委员会(Energy Transitions Commission)预测, 生物能源在2050年中国能源供应中占比同样将达到18%, 而其中航空燃料、化工、发电以及生物能源碳捕集与封存将是做出主要贡献的产业领域^[2]。生物能源技术与产业长期以来得到我国政府、学术界和产业界的关注和重视。国家发改委在2022年出台的《“十四五”生物经济发展规划》中, 强调要“推动生物能源与生物环保产业发展”“积极推进先进生物燃料在市政、交通等重点领域替代推广应用, 推动化石能源向绿色低碳可再生能源转型”, 在《“十四五”现代能源体系规划》中, 强调“大力发展纤维素燃料乙醇、生物柴油、生物航空煤油等非粮生物燃料”; 科技部在国家重点研发计划“可再生能源与氢能”“绿色生物制造”等重点专项中, 设置了多个项目聚焦先进生物燃料制备、生物质资源高效利用等关键问题, 以期夯实我国生物能源发展的科学与技术基础, 推动相关产业技术跨越式发展。

本质上, 生物能源技术是以生物为平台, 通过时空尺度压缩, 将低能量密度的太阳能转化为高能量密度的燃料、电和热, 物质层面则伴随低能态二氧化碳分子向高能态多碳分子的转化。该过程由反应、途径、细胞、个体、群体层面的生命代谢活动驱动; 从技术链条上分析, 则包括生物质生产与采集、生物质解聚与分离、生物质转化与燃料合成等环节。然而, 受制于木质纤维素利用效率低、生物燃料产品合成效率低、全技术周期经济效益低等缺陷, 生物能源技术的产业化应用长期以来面临严重的限制和挑

收稿日期: 2023-11-06 修回日期: 2023-11-09

引用本文: 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

战。合成生物技术的迅速发展为生物能源技术与产业的“破局”提供了新的支点^[3]。通过元件、途径、底盘、群体的人工构建,有望突破天然生物系统在结构与功能上的固有局限,在生物质的转化与利用、细胞工厂与生物催化剂的开发与优化、全新能量转化路线的设计与构建等方面实现变革性突破^[4]。本专辑聚焦合成生物技术在生物能源领域的发展和应用,汇集了领域内一线优势团队,从新技术创制、新应用拓展、新路线探索等层面总结能源合成生物技术的发展现状并展望未来发展方向。

生物质资源同时具备“能源”和“物质”的双重属性,在替代化石原料方面具有巨大的潜力。利用生物质原料,以微生物为平台转化合成能源分子的技术体系,代表了经典的生物燃料制造路线。在原料端,木质纤维素是可供量最大、最具代表性的生物质资源,建立低成本、高效率的纤维素燃料生产技术体系的关键在于实现对木质纤维素的高效降解、转化和利用^[5]。热纤梭菌是一类能够高效降解木质纤维素的嗜热厌氧菌,中国科学院青岛生物能源与过程研究所崔球团队^[6],综述了热纤梭菌合成生物技术工具开发应用的最新进展,并介绍了应用该底盘转化生物质资源进行糖、燃料以及化学品合成方面的代表性成果。在产品合成端,需要构建高效的微生物细胞工厂,实现生物质糖向能源产品的高效定向转化。湖北大学杨世辉团队^[7]着眼生物燃料高效合成细胞工厂的构建过程,从物质代谢、能量代谢、生理代谢和信息代谢四个方面,介绍应用合成生物技术认识、改造、开发微生物底盘细胞使其成为生物燃料细胞工厂的研究进展,并提出在酶元件挖掘、合成途径创建、底盘细胞优化、发酵工艺改善等基础上,通过“信息技术+生物技术(IT+BT)”深度融合来实现生物能源技术的跨越式提高,加速实现技术的产业化应用。此外,北京化工大学秦培勇和蔡的等^[8]综述了生物燃料合成领域应用广泛的醇脱氢酶(ADH)的研究进展,特别是以生物基呋喃化合物合成为例,梳理了基于分子设计和定向改造获得的高效能ADH在绿色生物催化系统构筑方向的应用情况。

木质纤维素之外,二氧化碳、一氧化碳、甲醇、甲烷、甲酸等一碳物质也可以成为生物燃料制备的潜在原料。直接固定二氧化碳并转化制备生物燃料产品,被认为是碳捕集与封存技术的重要方向,能通过固碳减排与能源绿色制造的耦合实现“负碳”式的技术和产业模式^[9]。微藻是利用光能固碳驱动生长和代谢的典型体系。深圳大学高等研究院刘进团队^[10]针对真核微藻油脂合成,从代谢与调控机制、代谢工程策略的角度梳理了提高微藻脂质积累、优化微藻脂质组成的研究进展;中国科学院青岛生物能源与过程研究所吕雪峰团队^[11]针对原核蓝藻固碳合成乙醇技术,从新型底盘开发、高通量筛选技术应用、细胞工厂的稳定性与鲁棒性优化等角度对固碳产醇光合细胞工厂的构建与优化策略进行了介绍。食气梭菌是化能驱动二氧化碳固定的代表性体系。中国科学院青岛生物能源与过程研究所李福利团队^[12]综述了产乙酸梭菌转化利用二氧化碳的代表性成果,在途径梳理的基础上,从分子改造的角度介绍了通过微生物气体发酵,以一氧化碳或氢气为能量来源,实现碳资源回收与高值利用的研究进展。电能同样可以用于驱动二氧化碳的生物固定及能源合成。中国科学院天津工业生物技术研究所张玲玲团队^[13]综述了该领域的最新研究进展,针对直接利用和间接利用两种模式,从电子传递、碳的固定、产物合成等角度介绍了该领域的前沿成果,并以未来的工程化应用需求为导向对进一步的开发方向和潜在策略进行了展望。中国科学院分子植物科学卓越创新中心顾阳团队^[14]以二氧化碳固定为脉络,对上述路线进行了系统梳理和比较,以产业化应用为目标明确了各技术模式的发展现状与亟待解决的挑战。此外,西安交通大学费强团队^[15]针对沼气中二氧化碳与甲烷的高效共利用,提出了应用合成生物技术开发人工细胞工厂,耦合转化两种一碳气体高效生产生物航煤的沼气碳素全利用路线,有望解决现有沼气燃烧利用模式面临的碳利用不足和碳损失问题。

除了利用各类含碳资源制备液体生物燃料外,合成生物技术还在推动各类新型生物基能量转化路线的打通和优化。电能是最具代表性的清洁能源形态,以天然或人工电活性微生物为基础的微生物电化学体系在清洁能源开发、化学品可持续合成、特殊场景设备能量供应等方面有着重要的应用前景和开发潜力^[16]。中国科学院微生物研究所李寅团队^[17]聚焦生物光伏技术,系统介绍生物光伏体系中电子传递原

理、光伏元件设计与优化策略以及生物光伏系统在高功率电子器件领域的应用前景。天津大学宋浩团队^[18]则总结了以希瓦氏菌和地杆菌为代表的电活性微生物的基因编辑技术发展与应用情况,并展望了应用先进合成生物技术构建高效能电活性细胞,进而在环境、能源领域发挥实质性作用的未来前景。此外,郑庆祥^[19]以希瓦氏菌 *Shewanella* sp. MR-4 为研究对象,发现在不同末端电子受体条件下,其代谢通量显著改变,同时还原力的产生途径也发生明显变化,为进一步电活性微生物的理性优化提供了依据。

发展绿色低碳的可再生能源体系已经成为重要的国际共识和转型方向,也是我国践行“碳达峰、碳中和”目标、保障能源安全、实现可持续发展的必由之路。发展生物能源技术和产业,构建以二氧化碳和太阳能为原初物质和能量的能源“消耗-生产”闭环链条,将成为可再生能源体系中的重要组成部分。通过合成生物技术与材料科学、过程工程、人工智能等学科领域的深度融合,有望进一步催生能量转化与能源生产领域的重大原理突破和全新技术概念,从而引领生物能源制造范式的升级,支撑未来可持续型能源供应体系的建立。

参 考 文 献

- [1] 国际能源署. 2050年净零排放:全球能源行业路线图[R/OL]. [2023-11-01]. <https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>.
International Energy Agency. Net zero by 2050: a roadmap for the global energy sector[R/OL]. [2023-11-01]. <https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>.
- [2] 能源转型委员会. 中国2050:一个全面实现现代化国家的零碳图景[R/OL]. [2023-11-01]. <https://beipa.org.cn/filedownload/283476>.
Energy Transitions Commission. China 2050: a zero-carbon picture of a fully modernised country[R/OL]. [2023-11-01]. <https://beipa.org.cn/filedownload/283476>.
- [3] SI T, ZHAO H M. A brief overview of synthetic biology research programs and roadmap studies in the United States[J]. *Synthetic and Systems Biotechnology*, 2016, 1(4): 258-264.
- [4] PERALTA-YAHYA P P, ZHANG F Z, DEL CARDAYRE S B, et al. Microbial engineering for the production of advanced biofuels[J]. *Nature*, 2012, 488(7411): 320-328.
- [5] RAGAUSKAS A J, WILLIAMS C K, DAVISON B H, et al. The path forward for biofuels and biomaterials[J]. *Science*, 2006, 311(5760): 484-489.
- [6] 肖艳,刘亚君,冯银刚,等. 热纤梭菌在生物质能源开发中的合成生物学研究进展[J]. *合成生物学*, 2023, 4(6):1055-1081.
XIAO Y, LIU Y J, FENG Y G, et al. Progress in synthetic biology research of *Clostridium thermocellum* for biomass energy application[J]. *Synthetic Biology Journal*, 2023, 4(6):1055-1081.
- [7] 晏雄鹰,王振,姜吉芸,等. 生物燃料高效生产微生物细胞工厂构建研究进展[J]. *合成生物学*, 2023, 4(6):1082-1121.
YAN X Y, WANG Z, LOU J Y, et al. Progress in the construction of microbial cell factories for efficient biofuel production[J]. *Synthetic Biology Journal*, 2023, 4(6):1082-1121.
- [8] 刘庠诗,吴奕禄,詹鹏,等. 醇脱氢酶的研究进展及其催化增值生物基呋喃化合物前景展望[J]. *合成生物学*, 2023, 4(6):1122-1139.
LIU X S, WU Y L, ZHAN P, et al. State-of-the-art for alcohol dehydrogenase development and the prospect of its applications in bio-based furan compounds valorization[J]. *Synthetic Biology Journal*, 2023, 4(6):1122-1139.
- [9] LIU Z H, WANG K, CHEN Y, et al. Third-generation biorefineries as the means to produce fuels and chemicals from CO₂[J]. *Nature Catalysis*, 2020, 3(3): 274-288.
- [10] 孙翰,刘进. 真核微藻脂质代谢工程的研究进展和展望[J]. *合成生物学*, 2023, 4(6):1140-1160.
SUN H, LIU J. Research progress and prospects in lipid metabolic engineering of eukaryotic microalgae[J]. *Synthetic Biology Journal*, 2023, 4(6):1140-1160.
- [11] 孙绘梨,崔金玉,荣国栋,等. 面向高效光驱固碳产醇的蓝细菌合成生物技术研究进展[J]. *合成生物学*, 2023, 4(6):1161-1177.
SUN H L, CUI J Y, LUAN G D, et al. Progress of cyanobacterial synthetic biotechnology for efficient light-driven carbon fixation and ethanol production[J]. *Synthetic Biology Journal*, 2023, 4(6):1161-1177.
- [12] 文志琼,李煜真,张金刚,等. 化能驱动的产乙酸菌转化利用CO₂研究进展[J]. *合成生物学*, 2023, 4(6):1178-1190.
WEN Z Q, LI Y Z, ZHANG J G, et al. Progress on bio-fixation and utilization of CO₂ in acetogens driven by chemical energy[J]. *Synthetic Biology Journal*, 2023, 4(6):1178-1190.

- [13] 刘伟松, 张坤城, 崔会娟, 等. 电能辅助二氧化碳生物转化[J]. 合成生物学, 2023, 4(6):1191-1222.
LIU W S, ZHANG K C, CUI H J, et al. Electro-assisted carbon dioxide biotransformation[J]. Synthetic Biology Journal, 2023, 4(6):1191-1222.
- [14] 叶伟, 李芮, 姜卫红, 等. 二氧化碳微生物转化与体外酶催化体系研究进展[J]. 合成生物学, 2023, 4(6):1223-1245.
YE W, LI R, JIANG W H, et al. Microbial conversion and *in vitro* enzymatic catalysis for carbon dioxide utilization: a review[J]. Synthetic Biology Journal, 2023, 4(6):1223-1245.
- [15] 张晨悦, 马英群, 王兴, 等. 全碳素生物转化沼气制备生物航煤制造路线研究进展[J]. 合成生物学, 2023, 4(6):1246-1258.
ZHANG C Y, MA Y Q, WANG X, et al. Progress in the bioconversion of biogas into sustainable aviation fuel[J]. Synthetic Biology Journal, 2023, 4(6):1246-1258.
- [16] MCCORMICK A J, BOMBELLI P, BRADLEY R W, et al. Biophotovoltaics: oxygenic photosynthetic organisms in the world of bioelectrochemical systems[J]. Energy & Environmental Science, 2015, 8(5): 1627.
- [17] 朱华伟, 李寅. 生物光伏: 环境友好的新型太阳能利用技术[J]. 合成生物学, 2023, 4(6):1259-1280.
ZHU H W, LI Y. Biophotovoltaics: an environmentally friendly technology for solar energy utilization[J]. Synthetic Biology Journal, 2023, 4(6):1259-1280.
- [18] 陈雅如, 曹英秀, 宋浩. 电活性微生物基因编辑与转录调控技术进展与应用[J]. 合成生物学, 2023, 4(6):1281-1299.
CHEN Y R, CAO Y X, SONG H. Advances and applications of gene editing and transcriptional regulation in electroactive microorganisms [J]. Synthetic Biology Journal, 2023, 4(6):1281-1299.
- [19] 郑庆祥. 希瓦氏菌 *Shewanella* sp. MR-4 在不同末端电子受体条件下的代谢通量分析[J]. 合成生物学, 2023, 4(6):1300-1320.
ZHENG Q X. Metabolic flux analysis of *Shewanella* sp. MR-4 with different terminal electron receptors[J]. Synthetic Biology Journal, 2023, 4(6):1300-1320.



吕雪峰(1974—),男,研究员,博士生导师,中国科学院青岛生物能源与过程研究所所长。主要从事合成生物学与绿色生物制造领域的研究,在光驱固碳产能蓝细菌的人工设计与构建及真菌天然产物药物等方面取得系列学术成果。2009年入选中国科学院人才计划,2013年入选山东省人才称号,2015年获国家自然科学基金杰出青年基金资助,2015年入选青岛市创新创业领军人才,2018年入选国家人才计划,2020年入选第十届山东省优秀科技工作者。组建的微生物制造工程中心设计开发了个性化的新型高效微生物细胞工厂,打通了多种能源、化工、医药产品的生物合成技术路线。与道达尔公司、鲁抗医药等国内外企业建立了系统、深入、高效、可持续的研发合作;发表论文百余篇,授权专利66项。

E-mail: lvxf@qibebt.ac.cn



宋浩(1973—),男,天津大学化工学院教授,博士生导师。入选国家万人计划科技创新领军人才、科技部中青年科技创新领军人才。担任中国生物工程学会合成生物学专业委员会副主任。研究方向是合成生物学与光电遗传学、生物制药。近年主持国家合成生物学重点研发项目、国家高技术研究发展计划课题、国家自然科学基金、国家海洋局等项目十余项。在 *Nature Chem. Biol.*、*Nature Commun.*、*Energy and Environ. Science* 等期刊发表文章130多篇。担任 *Frontiers in Bioeng. and Biotech.* 副主编, *Adv. Biosystems*、*Engineering Biology*、《合成生物学》等期刊编委。

E-mail: hsong@tju.edu.cn