

· 序 言 ·

王钦宏 中国科学院天津工业生物技术研究所研究员。主要从事工业生物的进化与代谢工程研究，近年来实现了 10 多种芳香族化合物生产的工业菌种设计构建及应用、液滴微流控高通量筛选平台搭建及应用等，完成 7 项技术许可或转让，正在推进产业应用，在 *Science*、*Metab Eng*、*Biotechnol Biofuels*、*ACS Synth Biol* 等期刊发表论文超过 80 篇，申请专利 50 余项，获授权专利 20 项。曾荣获国务院政府特殊津贴、天津市五一劳动奖章等荣誉。现担任 *mLife*、《生物工程学报》等多个学术期刊编委。



马延和 中国科学院天津工业生物技术研究所研究员。长期从事微生物与酶工程的科研工作，系统开展了极端微生物与新酶发现、菌种及其酶分子改造、生物体功能设计利用等基础与应用基础研究。已在 *Science*、*Nat Commun*、*Angew Chem Int Ed*、*Metab Eng* 等期刊发表论文 300 余篇，获国内外授权发明专利 150 余项。曾获国家技术发明二等奖、中国科学院发明二等奖、中国科学院科技促进发展奖、中石化联合会技术发明一等奖、中国轻工联合会科技进步一等奖等。曾任国家“863 计划”生物医药领域专家组专家、国家“973 计划”重大项目首席科学家，现为国家战略性新兴产业咨询专家委员会委员、国家新材料发展咨询专家委员会委员、国家生物技术中长期发展纲要指导专家组成员等。



中国科学院天津工业生物技术研究所建所 10 周年专刊 序言

王钦宏，马延和

中国科学院天津工业生物技术研究所，天津 300308

王钦宏，马延和. 中国科学院天津工业生物技术研究所建所 10 周年专刊序言. 生物工程学报, 2022, 38(11): 3981-3990.

WANG QH, MA YH. Preface to the special issue on the 10th anniversary of Tianjin Institute of Industrial Biotechnology, Chinese Academy of Sciences. Chin J Biotech, 2022, 38(11): 3981-3990.

摘 要: 工业生物技术是实现绿色低碳与可持续发展的重要路径。十年前正式成立的中国科学院天津工业生物技术研究所是该领域的核心科技力量，形成了从生命科学基础研究到生物技术工业应用的科技创新链。在研究所成立 10 周年之际，本刊特组织出版专刊，结合研究所的 10 年发展，

Received: November 12, 2022

Corresponding authors: WANG QinHong. Tel/Fax: +86-22-84861950; E-mail: wang_qh@tib.cas.cn

MA Yanhe. Tel/Fax: +86-22-84861966; E-mail: ma_yh@tib.cas.cn

从院士专家评述、发展规划研究、前沿基础研究、底层技术开发、核心技术创新、产业培育推进6个方面,系统地梳理和凝练工业生物技术的发展状况,展望未来的发展趋势,为助力我国加快构建绿色低碳循环经济体系,推动生物经济高质量发展提供参考。

关键词: 工业生物技术; 生物制造; 合成生物学; 生物经济; 可持续发展

Preface to the special issue on the 10th anniversary of Tianjin Institute of Industrial Biotechnology, Chinese Academy of Sciences

WANG Qinhong, MA Yanhe

Tianjin Institute of Industrial Biotechnology, Chinese Academy of Sciences, Tianjin 300308, China

Abstract: Industrial biotechnology offers great promises to the development of a green, low-carbon and sustainable economy. The Tianjin Institute of Industrial Biotechnology, Chinese Academy of Sciences, which was formally established ten years ago, is an important powerhouse in the field of industrial biotechnology. To date, the Institute has developed a scientific and technological innovation chain, covering from basic research in life sciences to industrial application of biotechnology. On the occasion of the Institute's tenth anniversary, we publish this special issue to review the progress and trends of industrial biotechnology from six aspects, namely expert perspectives, development strategy, cutting-edge research, enabling technology, core technology innovation, and industrialization promotion. This will facilitate the construction of a green and low-carbon circular economy system, and promote the high-quality development of bioeconomy.

Keywords: industrial biotechnology; biomanufacturing; synthetic biology; bioeconomy; sustainable development

随着生命科学的快速发展,生物技术应用在工业领域展现了无限美好的前景。认识、创建、利用生命体,以二氧化碳、生物质等为原料合成基础化学品、材料、燃料、食品等,服务于物质生产的工业生物技术创新,具有原料可再生、生产过程清洁高效等特点。工业生物技术正在推动工业制造向绿色低碳转型,将工业的末端治理变为源头控制,减少经济发展的碳足迹,减少人类活动对自然环境的影响,从而在能源、化工、材料、食品、医药等领域改

变世界工业格局,开创一个财富绿色增长新纪元^[1-4]。工业生物技术是继医药生物技术、农业生物技术之后全球生物技术发展的“第三次浪潮”^[5-7]。世界经济合作与发展组织的案例分析表明,用工业生物技术生产的生物基产品替代石化产品,可以降低工业过程能耗 15%–80%、原料消耗 35%–75%、水污染 33%–80%、生产成本 9%–90%,可以减少燃料相关的温室气体排放量 75%–80%^[8-9]。2019 年全球生物基化学品市场规模达到了 3 527 亿元,预计 2026 年将

达到 6 276 亿元, 年增长率为 8.5%^[10-11]。发展工业生物技术, 构建绿色、碳中和工业制造技术体系, 是解决经济社会目前面临的资源、能源及环境危机的有效手段^[12], 将为推进我国制造业向价值链高端攀升、推动生物经济发展、实现“双碳”目标、建设美丽中国和促进社会经济可持续发展形成重大科技支撑^[13-14]。

由中国科学院和天津市人民政府共建的中国科学院天津工业生物技术研究所 (以下简称“天津工业生物所”) 于 2012 年 11 月 29 日正式成立, 这是国内从事工业生物技术创新推动工业领域生态发展的科研机构, 肩负着建立我国工业生物技术创新体系、促进工业绿色升级的历史使命, 战略定位是围绕绿色低碳和经济社会可持续发展的重大需求, 面向国民经济主战场, 面向工业生物科技前沿, 以生物设计为核心, 开展工业生物技术战略性、前瞻性的基础与应用基础研究, 集聚工业生物科技力量, 创新生物产业关键核心技术与重大颠覆性技术, 构建工业经济发展的生态路线, 服务我国绿色生物经济与社会经济可持续发展。

天津工业生物所以我国社会经济发展的重大需求为目标, 围绕“以可再生碳资源替代石化资源、以清洁生物加工方式替代传统化学加工方式、以现代生物技术提升产业水平”(“二个替代一个提升”) 的三大战略主题, 重点开展“工业蛋白质科学与生物催化工程、合成生物学与微生物制造工程、生物系统与生物工艺工程”3 个领域方向的基础研究和应用研究。天津工业生物所积极组建国家级创新平台, 已取得一定成效。正在牵头建设由中国科学院与天津市政府共建的国家合成生物技术创新中心, 这是继高速列车、新能源汽车之后科技部批复建设的第 3 个国家技术创新中心。在全国重点实验

室重组中建设的低碳合成工程生物学重点实验室, 已经获得中国科学院批复, 推荐纳入首批全国重点实验室序列。工业酶国家工程实验室新被国家发改委纳入国家工程研究中心管理序列, 中国合成生物产业知识产权运营中心已获得国家知识产权局批复建设, 生物技术国家专业化众创空间成为科技部批复建设的重要创新创业孵化载体。建设国家级国际科技合作基地, 建设了南方科技促进可持续发展委员会 (the Commission on Science and Technology for Sustainable Development in the South, COMSATS) 工业生物技术中心, 成为 COMSATS 继大气科学中心之后在中国的第 2 个创新网络节点。研究所在工业生物技术领域已经基本建成全链条的科技创新平台体系。

2022 年天津工业生物所迎来建所 10 周年。10 年来, 天津工业生物所发展了数字细胞、DNA 合成、基因组编辑、高通量筛选等一批底层技术, 突破了工业酶、工业菌种自主设计创制关键技术, 创建了数百个具有自主知识产权的生物工具, 在轻工发酵、生物医药、材料化工、健康食品等领域, 建立了多个绿色生物制造工艺并组织工业化实施, 已经成为我国工业生物领域的核心力量, 正在不断提升科技创新能力和转化能力, 努力以生物技术推动农业工业化、工业绿色化、产业国际化。

《生物工程学报》一直关注工业生物技术领域的发展。曾于 2008、2010、2011 和 2014 年出版过 4 期主题为“工业生物技术”的专刊以及 2019 年出版了主题为“工业生物学”的专刊, 受到读者的欢迎。结合天津工业生物所 10 年来在工业生物技术领域的创新发展, 《生物工程学报》于本期出版“中国科学院天津工业生物技术研究所建所 10 周年”专刊。本专刊共收录 25 篇文章, 分别从院士专家评述、发展规划研究、

前沿基础研究、底层技术开发、核心技术创新、产业培育推进 6 个栏目较为系统地阐述了工业生物技术的发展现状，并展望了未来的发展趋势和挑战。

专刊邀请了积极推动工业生物技术创新发展的领域院士专家，结合自身的亲历、体会和思考，对工业生物技术及相关领域的发展进行了系统的回顾、展望与评述，并对相关领域的未来发展与挑战进行了深邃的展望，提出了重要建设性的意见和建议。欧阳平凯院士是我国长期从事工业生物技术及其在化工、材料、医药、食品等领域应用研究的资深专家，对我国工业生物技术的发展起了重要的推动作用；他在深入认识和体会工业生物技术发展重要性的基础上，结合天津工业生物所及国内其他从事工业生物技术研究 and 开发的科研机构的发展，回顾了我国工业生物技术发展战略规划布局、重要技术突破进展和行业影响，并对我国工业生物技术的未来发展进行了展望分析^[14]。近年来，合成生物学的发展为工业生物技术创新提供了强力的支撑^[15]。赵国屏院士是我国合成生物学最早发起人之一，他在国内创建了首个合成生物学重点实验室——中国科学院合成生物学重点实验室，多年来对合成生物学的发展有切身的体会和深入的见解；他结合天津工业生物所作为我国合成生物学领域重要代表成立 10 年来的发展，聚焦“造物致用”，回顾和梳理了国内外合成生物学的重要科技进展与产业发展状况，并展望分析了我国合成生物学的未来发展，认为为了充分发挥合成生物学的“赋能”工业生物技术创新的潜质，不仅需要重新审视现有的研究和开发体系，还迫切要求组织管理模式的变革以及创新生态的建设，从而保证资助机制和管理政策能够与合成生物学的“会聚”特点及“赋能”潜质相匹配，从而有效促进工业

生物技术的发展^[16]。高福院士作为天津工业生物所创建的推动者，怀着深厚感情回顾了天津工业生物所的由来和早期成长发展历程，通过思考科学、技术、工程之间的关系，提出从事基础科学研究的科研人员进行转化应用的路径与逻辑关系，希望广大科研人员能够做出解决实际问题的科技成就，并展望了未来工业生物技术的远景^[17]。

发展规划是在当前发展基础上，对未来发展作出前瞻性谋划和战略性安排。对发展规划进行研究可以理清发展目标，明确战略布局和发展重点，从而统一思想，指引方向。工业生物技术领域的发展规划研究同样对领域发展具有极其重要的意义和作用。专刊邀请了中国科学院、国家发展和改革委员会以及天津市等科研管理部门与发展规划相关研究人员，对工业生物技术领域的发展与规划进行了较为系统的梳理，可以为后续国家和地方的工业生物技术创新发展与产业推进提供重要参考。中国科学院前沿科学与教育局褚鑫和王力为等梳理了工业生物技术的前沿科技的学科基础和发展方向，总结了工业生物技术主要经历了由生命科学突破性成就、多学科技术理念交汇融合和产业应用导向推动的 3 个阶段，特别评述了工程生物学前沿基础研究取得的重要进展，建议需要加强布局，有望更好地支撑工业生物技术进一步创新发展^[18]。中国科学院科技促进发展局杨明和周桔从战略规划、创新机构、人才建设、基础研究、科技创新、产业推进等方面系统介绍了中国科学院在工业生物技术领域的整体安排、建制化研发与科技进展，并提出了加快工业生物技术发展的建议，强调了工业生物技术正在变革传统工业制造模式，是构建碳中性工业制造路线的重要科技支撑^[19]。国家发展和改革委员会产业经济与技术经济研究所韩祺等对

我国工业生物技术和产业的现状、差距与任务进行了系统梳理,认为工业生物技术是实现工业制造生产方式的根本转变,彻底变革经济增长方式,支撑社会经济可持续发展的重大战略技术,需要加快战略布局,加强重大技术的源头创新与产业化实施^[20]。天津市科学技术局毛劲松深入剖析了天津市发展生物技术和生物产业优势的基础,介绍了天津市近年来在支持生物技术和生物产业方面的总体部署和举措,以及在支撑生物产业发展方面取得的重要进展,指出大力发展工业生物技术是区域实现高质量、可持续发展的重要路径,对我国其他区域的创新发展具有较好的参考意义^[21]。

发展工业生物技术需要前沿基础研究提供科学知识,需要底层共性技术提供支撑,需要突破关键核心技术促进产业培育与应用。过去 10 年来,以天津工业生物所等为代表的科技力量,有效地发展了工业生物技术的前沿基础研究、底层技术开发、核心技术创新、产业培育推进,形成了从生命科学基础研究到生物技术工业应用的科技创新链,奠定了我国工业生物技术创新发展的重要基础。因此,专刊组织了天津工业生物所相关科研人员,结合研究所在前沿基础研究、底层技术开发、核心技术创新、产业培育推进的相关进展,进行了较为系统的梳理和总结。

前沿基础科学研究是指认识自然现象、揭示自然规律,获取新知识、新原理、新方法的研究活动,是工业生物技术发展的基石。蛋白质是生命的物质基础,是生命活动的主要承担者。与自然生物中的蛋白质不同,工业生物领域应用的蛋白质常常面临较为苛刻的工业生产环境条件,需要研究不同工业生产环境下蛋白质的结构与功能构效关系。刘卫东团队在过去 10 年相关工作积累的基础上,综述了工业应用

导向的蛋白质结构与功能研究进展,重点梳理了植物天然产物合成相关萜类合成酶、白色污染降解的 PET 降解酶以及生物质转化利用关键酶的结构和功能研究,为后续相关酶蛋白的应用开发奠定了基础^[22]。孙周通团队回顾了研究所在工业蛋白理性设计领域的系列重要工作进展,从酶设计方法学研究、新酶反应设计到生物催化应用等方面进行了分析讨论,并提出需要结合目前人工智能快速发展的机遇,积极推动“人工酶的智能塑造”前沿探索,发展由序列到功能的端对端一步设计策略,加速构建高性能核心酶蛋白催化剂^[23]。能量转化是生命活动与物质合成的驱动力,自然生物受环境和自身代谢进化限制,能量利用和转化途径有限,代谢调控机制复杂,导致能量利用效率低、转化速度慢,通常难以满足工业应用的需求。张以恒与朱之光团队聚焦电-氢-糖循环转化的新能源体系理论,重点综述基于体外多酶催化系统的糖与水反应制氢、糖完全氧化产电,以及氢或电能固定 CO₂ 到糖的生物转化方面所做的工作,阐述体外多酶催化系统的设计原则、分子基础,并从电-氢-糖循环进一步延伸出以糖(淀粉)为核心的体外合成生物制造,指出需要突破生物合成的能量转化效率瓶颈,抢占工业生物技术基础研究制高点^[24]。工业生物技术的重要特征是利用糖类、木质纤维素甚至 CO₂ 等可再生碳资源,近年来 CO₂ 作为工业生物技术的第 3 代原料体系备受关注。江会锋和蔡韬团队从学习自然、设计自然、超越自然的视角,聚焦二氧化碳生物工业利用,阐述了固碳还原与碳链延长元件设计与改造、途径组装与适配、系统的构建与调控等方面的相关研究进展,指出解决自然生物的 CO₂ 固定、转化、利用效率低的核心在于生物系统的解析、设计、重构与调控,拓展自然生物合成能力的边界,从而为促进二

氧化碳的规模化利用、推动工业原料路线的转移奠定基础^[25]。

底层共性技术是推进工业生物技术领域快速发展的重要手段，底层共性技术的突破往往能颠覆一个领域乃至整个研究范式。工业生物技术的创新发展离不开计算设计、合成构建、高通量筛选、测试评价、诊断分析、智能发酵等底层共性技术的开发与应用。近年来底层技术加快突破和演进，工业生物技术研究正在走向工程化、智能化、自动化。工业生物的设计构建离不开 DNA 合成这一底层技术的支撑，冯森等结合自身工作实践，对工业生物技术中 DNA 合成需求、合成策略以及可持续发展面临的问题和解决方案研究进展进行了探讨，总结指出随着 DNA 合成技术的不断发展和迭代，如何以高通量和高精度的方式以及以更低的成本、在更短的时间内获得更长的高质量 DNA 产品，是当前工业化 DNA 合成领域的竞争焦点，规范地运用 DNA 合成技术不仅是保障 DNA 合成技术可持续发展的重要因素，对于工业生物技术稳定、健康发展也至关重要^[26]。基因编辑可以精准且高效地操纵基因表达或改写基因组序列，是助力工业生物技术快速发展的核心使能技术。毕昌昊团队在总结基因组编辑技术发展历程基础上，对目前常用的工业生物底盘细胞的基因组编辑技术进行较为系统的梳理介绍，强调伴随 CRISPR 相关基因组编辑技术的不断发展，可以预见工业生物技术的发展也会迎来暴发期，然而目前基于 CRISPR 发展的基因组编辑技术在工业生物领域中的应用潜力还有待进一步的挖掘^[27]。依托生物数据构建数字细胞模型，对于理解细胞系统组织原理和生命进化规律，预测各种环境和基因扰动对细胞功能的影响并指导设计人工生命具有重要意义。马红武团队重点总结了基因组尺度代谢网络模

型的构建质控以及其在途径设计和指导菌种代谢工程改造方面的应用，进一步结合近年来细胞模型研究的前沿趋势对整合多种约束模型的构建和分析研究方面的最新成果进行了介绍，最后对数字细胞研究的未来发展方向进行展望，提出数字细胞技术与基因组测序、合成、编辑等其他底层技术发展与应用将显著提升人们对生命进行读写改创的能力^[28]。王猛团队回顾了研究所在工业菌种自动化高通量编辑与筛选领域的系列重要工作进展，对基因克隆、基因组编辑、编辑序列设计等生物技术的自动化实现，以及流式细胞、液滴微流控、全基因组规模扰动测序等高通量筛选技术进行了分析讨论和展望，认为创建具有自主知识产权的优秀工业菌种及其产业应用需要智能化、自动化和全链条覆盖的整体技术体系的支撑^[29]。夏建业团队结合自身多年来在工业发酵领域的实践，分别从工业生物技术发展对发酵优化技术的挑战、发酵优化与放大的核心技术、高通量发酵装备技术、数据可视化技术、数字孪生及知识图谱等智能技术在发酵优化放大中的应用等几个方面进行了较为系统的综述，并对未来工业发酵优化技术的场景以及未来发酵技术对人才培养等提出的新要求进行了展望，特别指出未来随着人工智能技术更加成熟，其与发酵技术的深度融合将颠覆传统发酵技术手段^[30]。通过发展新一代的底层技术体系将为工业生物技术的进一步创新发展提供关键技术支撑。

突破工业生物关键核心技术是促进生物产业发展之根，推动生物经济发展之基。围绕我国生物发酵工业生产菌种卡脖子问题，王钰团队选取了具有代表性的大宗氨基酸、B 族维生素、柠檬酸、燃料乙醇等发酵工业，综述发酵工业菌种改造提升的最新进展，强调了人工智能、自动化与生命科学交叉融合将有效帮助指

导下一轮的菌种设计改造,从而进一步加快工业发酵菌种迭代升级的速度,推动生物发酵产业的高质量发展^[31]。柏文琴和宋诒团队综述了工业酶制剂产业现状,总结了天津工业生物所在工业酶及绿色生物工艺开发应用方面产生的一系列关键技术突破与研发进展,展示了通过酶与生物技术的进步提升传统生物加工产业发展的典型案例,指出这些核心技术的发展将推动越来越多的传统制造走向绿色可持续发展路线。围绕医药化工产业转型升级等问题^[32],朱敦明团队重点针对手性胺、手性醇、天然/非天然氨基酸、甾体化合物、芳香类化合物等医药化学品的绿色生物合成进行了系统总结,展望提出未来医药化学品的生物合成不仅需要运用分子生物学和基因工程技术对生物催化剂性能进一步提升,而且需要将生物合成与化学合成紧密结合,从而实现更多化学品的绿色合成制造和产业的可持续发展,保障医药化工产业绿色发展^[33]。针对中草药等重要植物种植依赖土地资源、重金属污染重、标准化难等问题,刘涛团队综述了萜类、黄酮类、苯丙素类等重要类型植物天然产物微生物重组合成方面的研究进展,探讨了颠覆天然产物的传统生产模式,加快推进市场准入和工业化生产的路径与挑战^[34]。聚焦秸秆高值化利用与重要化工产品生物制造,田朝光团队重点综述了真菌系统的生物质降解与转化以及生物质一步转化燃料乙醇、苹果酸等多种大宗能源材料化学品的相关进展;同时,围绕在可再生化工研究方面,梳理了丁二酸、乳酸等一批大宗有机酸,以可再生碳资源为原料进行生产的技术创新进展,展示了生物制造替代石化制造生产大宗化学品的潜力,相关研究进展为我国建设低碳经济社会提供了有效参考路径^[35]。围绕粮食食品自主供给的国家重大战略需求,李德茂、孙媛霞团队聚焦未

来食品——健康糖、微生物蛋白及人造肉等关键辅配料的生物制造技术研究,追踪了在细胞工厂构建、工业环境下菌种测试与过程优化和衍生产品开发等研究的最新进展,探讨了未来食品生物制造支撑农产品的车间制造新模式,摆脱传统粮食食品生产对土地、化肥、农药依赖的可能与挑战^[36]。

工业生物技术发展的战略主题是“两个替代一个提升”,以天津工业生物所为代表的科技力量过去 10 年来的关键核心技术的创新突破,形成了一批“两个替代一个提升”的产业培育推进案例。针对以可再生碳资源替代石化资源,张学礼团队联合合作企业,以 L-丙氨酸为例,综述了氨基酸厌氧发酵过程中的关键问题及其在产业化实施中的应用,促进了微生物发酵实现以可再生资源为原料直接生产传统石化基产品,减少对石油基原料的依赖^[37]。针对以清洁生物加工方式替代传统化学加工方式,吴洽庆和朱敦明团队联合合作企业,以新一代甾体药物关键中间体的转化菌株构建和智能化生产为例,综述甾体药物中间体菌种改造和转化工艺开发及其在产业化应用中的进展,促进了以简单生物工艺替代数十步的化学合成工艺,显著降低“三废”排放,形成绿色、清洁生产模式,解决化学合成高污染、高能耗等问题^[38]。针对以现代生物技术提升产业水平,孙际宾团队联合合作企业,从 L-谷氨酸产业的现状分析和关键技术创新需求的角度出发,介绍了近年来获得具有自主知识产权的高性能工业菌种和 L-谷氨酸生产关键技术创新开发和产业应用的进展,相关研究不仅提升了传统产品生产技术的水平,解决了行业发展的瓶颈问题,也为其他传统发酵产品的技术革新提供了值得借鉴的成功范例^[39]。

工业生物技术是绿色低碳、经济社会可持

续发展的重要解决方案,希望通过本专刊的推出,在系统梳理过去10年来工业生物技术的创新发展、不足短板与面临的艰巨挑战的基础上,标定出我国工业生物技术发展新的“起点”。在这新的“起点”,通过生物学与数学、物理、化学以及数据科学、纳米科学、人工智能等学科的交叉与整合,加速新一代工业生物技术的创新发展,变革加工方式和提升传统产业,促进工业生物产业新形态的形成。此外,本专刊内容上或多或少仍然会存在一些问题,希望各位同行和广大读者进一步批评指正。

REFERENCES

- [1] Carruthers DN, Lee TS. Translating advances in microbial bioproduction to sustainable biotechnology. *Front Bioeng Biotechnol*, 2022, 10: 968437.
- [2] Nielsen J, Tillegreen CB, Petranovic D. Innovation trends in industrial biotechnology. *Trends Biotechnol*, 2022, 40(10): 1160-1172.
- [3] 谭天伟, 陈必强, 张会丽, 等. 加快推进绿色生物制造 助力实现“碳中和”. *化工进展*, 2021, 40(3): 1137-1141.
Tan TW, Chen BQ, Zhang HL, et al. Accelerate promotion of green bio-manufacturing to help achieve “carbon neutrality”. *Chem Ind Eng Prog*, 2021, 40(3): 1137-1141 (in Chinese).
- [4] 张媛媛, 曾艳, 王钦宏. 合成生物制造进展. *合成生物学*, 2021, 2(2): 145-160.
Zhang YY, Zeng Y, Wang QH. Advances in synthetic biomanufacturing. *Synth Biol J*, 2021, 2(2): 145-160 (in Chinese).
- [5] Straathof AJJ, Wahl SA, Benjamin KR, et al. Grand research challenges for sustainable industrial biotechnology. *Trends Biotechnol*, 2019, 37(10): 1042-1050.
- [6] Clomburg JM, Crumbley AM, Gonzalez R. Industrial biomanufacturing: the future of chemical production. *Science*, 2017, 355(6320): aag0804.
- [7] Bornscheuer UT, Huisman GW, Kazlauskas RJ, et al. Engineering the third wave of biocatalysis. *Nature*, 2012, 485(7397): 185-194.
- [8] Rosemann A, Molyneux-Hodgson S. Industrial biotechnology: to what extent is responsible innovation on the agenda? *Trends Biotechnol*, 2020, 38(1): 5-7.
- [9] Hatti-Kaul R, T?rnvall U, Gustafsson L, et al. Industrial biotechnology for the production of bio-based chemicals—a cradle-to-grave perspective. *Trends Biotechnol*, 2007, 25(3): 119-124.
- [10] Biggs BW, Alper HS, Pfleger BF, et al. Enabling commercial success of industrial biotechnology. *Science*, 2021, 374(6575): 1563-1565.
- [11] Task Force on Synthetic Biology and the Bioeconomy [EB/OL]. [2022-11-7]. <https://www.schmidtfutures.com/our-work/task-force-on-synthetic-biology-and-the-bioeconomy/>.
- [12] Hadley Kershaw E, Hartley S, McLeod C, et al. The sustainable path to a circular bioeconomy. *Trends Biotechnol*, 2021, 39(6): 542-545.
- [13] 耿红冉, 董华, 陈洁君, 等. 我国工业生物技术科技发展路径分析. *生物加工过程*, 2019, 17(6): 551-555.
Geng HR, Dong H, Chen JJ, et al. Development approach review of industrial biotechnology research in China. *Chin J Bioprocess Eng*, 2019, 17(6): 551-555 (in Chinese).
- [14] 欧阳平凯. 我国工业生物技术发展回顾及展望. *生物工程学报*, 2022, 38(11): 3991-4000.
Ouyang PK. The industrial biotechnology in China: development and outlook. *Chin J Biotech*, 2022, 38(11): 3991-4000 (in Chinese).
- [15] Clarke L, Kitney R. Developing synthetic biology for industrial biotechnology applications. *Biochem Soc Trans*, 2020, 48(1): 113-122.
- [16] 赵国屏. 合成生物学: 从“造物致用”到产业转化. *生物工程学报*, 2022, 38(11): 4001-4011.
Zhao GP. Synthetic biology: from “build-for-use” to commercialization. *Chin J Biotech*, 2022, 38(11): 4001-4011 (in Chinese).
- [17] 高福. 国家人勇担国家责, 积极推动中国生物经济与生物产业发展. *生物工程学报*, 2022, 38(11): 4012-4018.
GAO GF. Active promotion of bio-industry technology development in China. *Chin J Biotech*, 2022, 38(11): 4012-4018 (in Chinese).
- [18] 褚鑫, 王力为, 许虹, 等. 工业生物技术的前沿科技.

- 生物工程学报, 2022, 38(11): 4019-4026.
- Chu X, Wang LW, Xu H, et al. Frontier science for industrial biotechnology. *Chin J Biotech*, 2022, 38(11): 4019-4026 (in Chinese).
- [19] 杨明, 周桔. 中国科学院工业生物技术发展路径. *生物工程学报*, 2022, 38(11): 4027-4034.
- Yang M, Zhou J. Development path of industrial biotechnology in Chinese Academy of Sciences. *Chin J Biotech*, 2022, 38(11): 4027-4034 (in Chinese).
- [20] 韩祺, 姜江, 汪琪琦, 等. 我国工业生物技术和产业的现状、差距与任务. *生物工程学报*, 2022, 38(11): 4035-4042.
- Han Q, Jiang J, Wang QQ, et al. The current situation and developmental trends of industrial biotechnology and biomanufacturing in China. *Chin J Biotech*, 2022, 38(11): 4035-4042 (in Chinese).
- [21] 毛劲松. 生物技术创新驱动天津经济社会高质量发展. *生物工程学报*, 2022, 38(11): 4043-4049.
- Mao JS. High-quality development of Tianjin economy and society driven by biotechnology innovation. *Chin J Biotech*, 2022, 38(11): 4043-4049 (in Chinese).
- [22] 韩旭, 李倩, 韦泓丽, 等. 工业应用导向的蛋白质结构与功能研究进展. *生物工程学报*, 2022, 38(11): 4050-4067.
- Han X, Li Q, Wei HL, et al. Application-oriented structure and function study of proteins: a review. *Chin J Biotech*, 2022, 38(11): 4050-4067 (in Chinese).
- [23] 曲戈, 袁波, 孙周通. 工业蛋白质理性设计与应用. *生物工程学报*, 2022, 38(11): 4068-4080.
- Qu G, Yuan B, Sun ZT. Rational design and applications of industrial proteins. *Chin J Biotech*, 2022, 38(11): 4068-4080 (in Chinese).
- [24] 宋云洪, 吴冉冉, 魏欣蕾, 等. 电-氢-糖循环的新能源体系研究进展. *生物工程学报*, 2022, 38(11): 4081-4100.
- Song YH, Wu RR, Wei XL, et al. Advances in a new energy system based on electricity-hydrogen-carbohydrate cycle. *Chin J Biotech*, 2022, 38(11): 4081-4100 (in Chinese).
- [25] 蔡韬, 刘玉万, 朱蕾蕾, 等. 二氧化碳人工生物转化. *生物工程学报*, 2022, 38(11): 4101-4114.
- Cai T, Liu YW, Zhu LL, et al. Artificial bioconversion of carbon dioxide. *Chin J Biotech*, 2022, 38(11): 4101-4114 (in Chinese).
- [26] 冯淼, 王丽娜, 汪保卫, 等. 工业生物技术中 DNA 合成发展现状及展望. *生物工程学报*, 2022, 38(11): 4115-4131.
- Feng M, Wang LN, Wang BW, et al. Current status and prospect of DNA synthesis in industrial biotechnology. *Chin J Biotech*, 2022, 38(11): 4115-4131 (in Chinese).
- [27] 杨超, 董兴啸, 张学礼, 等. 基因组编辑技术在工业生物领域中的应用现状及展望. *生物工程学报*, 2022, 38(11): 4132-4145.
- Yang C, Dong XX, Zhang XL, et al. Application of genome editing technology in industrial microorganisms: current status and perspectives. *Chin J Biotech*, 2022, 38(11): 4132-4145 (in Chinese).
- [28] 袁倩倩, 毛志涛, 杨雪, 等. 数字细胞模型的研究及应用. *生物工程学报*, 2022, 38(11): 4146-4161.
- Yuan QQ, Mao ZT, Yang X, et al. Digital cell models and their applications: a review. *Chin J Biotech*, 2022, 38(11): 4146-4161 (in Chinese).
- [29] 涂然, 毛雨丰, 刘叶, 等. 工程菌种自动化高通量编辑与筛选研究进展. *生物工程学报*, 2022, 38(11): 4162-4179.
- Tu R, Mao YF, Liu Y, et al. Advances in automated high-throughput editing and screening of engineered strains. *Chin J Biotech*, 2022, 38(11): 4162-4179 (in Chinese).
- [30] 夏建业, 刘晶, 庄英萍. 人工智能时代发酵优化与放大技术的机遇与挑战. *生物工程学报*, 2022, 38(11): 4180-4199.
- Xia JY, Liu J, Zhuang YP. Opportunities and challenges for fermentation optimization and scale-up technology in the artificial intelligence era. *Chin J Biotech*, 2022, 38(11): 4180-4199 (in Chinese).
- [31] 周文娟, 付刚, 齐显尼, 等. 发酵工业菌种的迭代创制. *生物工程学报*, 2022, 38(11): 4200-4218.
- Zhou WJ, Fu G, Qi XN, et al. Upgrading microbial strains for fermentation industry. *Chin J Biotech*, 2022, 38(11): 4200-4218 (in Chinese).
- [32] 郑宏臣, 徐健勇, 杨建花, 等. 工业酶与绿色生物工艺的核心技术进展. *生物工程学报*, 2022, 38(11): 4219-4239.
- Zheng HC, Xu JY, Yang JH, et al. Developments of core technologies in industrial enzymes and green

- bioprocessing. *Chin J Biotech*, 2022, 38(11): 4219-4239 (in Chinese).
- [33] 陈曦, 吴凤礼, 樊飞宇, 等. 手性医药化学品的绿色生物合成. *生物工程学报*, 2022, 38(11): 4240-4262.
Chen X, Wu FL, Fan FY, et al. Green biosynthesis of chiral pharmaceutical chemicals. *Chin J Biotech*, 2022, 38(11): 4240-4262 (in Chinese).
- [34] 毕慧萍, 刘晓楠, 李清艳, 等. 植物天然产物微生物重组合成研究进展. *生物工程学报*, 2022, 38(11): 4263-4282.
Bi HP, Liu XN, Li QT, et al. Advances in microbial synthesis of plant natural products. *Chin J Biotech*, 2022, 38(11): 4263-4282 (in Chinese).
- [35] 李金根, 刘倩, 刘德飞, 等. 秸秆真菌降解转化与可再生化工. *生物工程学报*, 2022, 38(11): 4283-4310.
Li JG, Liu Q, Liu DF, et al. Plant biomass degradation by filamentous fungi and production of renewable chemicals: a review. *Chin J Biotech*, 2022, 38(11): 4283-4310 (in Chinese).
- [36] 李德茂, 童胜, 曾艳, 等. 未来食品的低碳生物制造. *生物工程学报*, 2022, 38(11): 4311-4328.
Li DM, Tong S, Zeng Y, et al. Low carbon biomanufacturing for future food. *Chin J Biotech*, 2022, 38(11): 4311-4328 (in Chinese).
- [37] 刘萍萍, 郭恒华, 张冬竹, 等. L-丙氨酸厌氧发酵关键技术及产业化. *生物工程学报*, 2022, 38(11): 4329-4334.
Liu PP, Guo HH, Zhang DZ, et al. Key technology for anaerobic fermentation of L-alanine and its commercialization. *Chin J Biotech*, 2022, 38(11): 4329-4334 (in Chinese).
- [38] 冯进辉, 张汝金, 张峥斌, 等. 系列甾体药物关键中间体转化菌种构建及智能化生产应用. *生物工程学报*, 2022, 38(11): 4335-4342.
Feng JH, Zhang RJ, Zhang ZB, et al. Construction of strains for bioconversion of steroid key intermediates and intelligent industrial production. *Chin J Biotech*, 2022, 38(11): 4335-4342 (in Chinese).
- [39] 李学朋, 陈久洲, 张东旭, 等. L-谷氨酸生产关键技术创新与产业化应用. *生物工程学报*, 2022, 38(11): 4343-4351.
Li XP, Chen JZ, Zhang DX, et al. Innovation of key technologies in fermentative production of L-glutamate and industrial application. *Chin J Biotech*, 2022, 38(11): 4343-4351 (in Chinese).

(本文责编 陈宏宇)