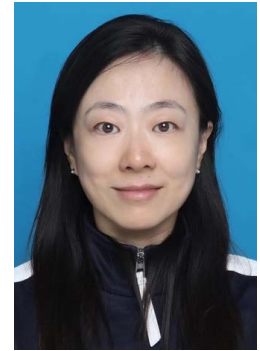


• 发展规划研究 •

**姜江** 国家发展和改革委员会产业经济与技术经济研究所创新战略研究室主任、研究员，兼任中国高技术产业理事会理事。主要从事产业经济学与产业政策、创新政策、新兴产业领域研究。作为主要研究人员参与国务院关于加快培育发展战略性新兴产业以及“十二五”“十三五”“十四五”国家战略性新兴产业发展规划研究、“十四五”国家生物经济发展规划、创新驱动发展战略、国家中长期科技发展规划研究、培育新经济发展新动能、鼓励大众创业万众创新等文件的起草工作和省部级重大课题研究工作。在《改革》《经济日报》《光明日报》等刊物上发表文章80余篇。有关研究成果多次获得中央、国务院领导批示，多次获得国家发改委优秀成果奖。出版专著《培育和发展战略性新兴产业：理论与实践》《“十三五”产业新增长点：打造经济发展新引擎》《践行五大发展理念 全面建设创新中国：中国创新驱动发展战略报告》，组织编写《中国大众创业万众创新发展报告》等年度发展报告。



## 我国工业生物技术和产业的现状、差距与任务

韩祺<sup>1</sup>, 姜江<sup>1</sup>, 汪琪琦<sup>2</sup>, 龚巧琳<sup>2,3</sup>, 李金山<sup>2</sup>, 张瀚予<sup>4</sup>

1 国家发展和改革委员会产业经济与技术经济研究所, 北京 100038

2 中国科学院天津工业生物技术研究所, 天津 300308

3 天津科技大学, 天津 300222

4 清华大学 社会学系, 北京 100084

韩祺, 姜江, 汪琪琦, 龚巧琳, 李金山, 张瀚予. 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, GONG QL, LI JS, ZHANG HY. The current situation and developmental trends of industrial biotechnology and biomanufacturing in China. Chin J Biotech, 2022, 38(11): 4035-4042.

**摘要:** 工业生物技术是利用生化反应和生物体机能进行物质合成加工与能量转化利用的集成技术, 正在支撑建立以可发酵糖、秸秆、二氧化碳等可再生资源为原料的化学品绿色高效制造新路线, 有望实现工业制造方式的根本转变, 是支撑经济社会可持续发展的重大战略技术, 已成为世界各国科技和产业竞争的焦点。本文从工业生物技术深度融合和支撑生物经济发展的态势出发, 系统分析了我国工业生物技术和生物产业发展的现状、短板问题, 提出了未来建议重点发展的主要方向。

**关键词:** 工业生物技术; 工程生物设计创制; 生物制造产业; 生物经济; 绿色可持续发展

Received: September 28, 2022; Accepted: October 27, 2022

Corresponding author: JIANG Jiang. E-mail: chuanguxinshi2017@vip.sina.com

# The current situation and developmental trends of industrial biotechnology and biomanufacturing in China

HAN Qi<sup>1</sup>, JIANG Jiang<sup>1</sup>, WANG Qiqi<sup>2</sup>, GONG Qiaolin<sup>2,3</sup>, LI Jinshan<sup>2</sup>, ZHANG Hanyu<sup>4</sup>

1 Institute of Industrial and Technological Economics, National Development and Reform Commission, Beijing 100038, China

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

3 Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300222, China

4 School of Social Sciences, Tsinghua University, Beijing 100084, China

**Abstract:** Industrial biotechnology is an integrated technology that utilizes biochemical reactions and biofunctions to achieve substance synthesis and energy conversion. The development of industrial biotechnology supports a green, efficient, and new route for manufacturing of chemicals using renewable raw materials. It is expected to bring a fundamental shift in industrial manufacturing and a change in economic growth mode. Industrial biotechnology is an important strategic technology supporting the sustainable development of social economy and has become a focus of global competition on science and technology. Based on an elaboration of industrial biotechnology's deep integration in bioeconomy, this paper summarized the current situation and developmental trends of industrial biotechnology and biomanufacturing industry in China. Gaps between developed countries and China as well as key areas for biotechnology development were proposed, followed by identifying tasks and directions for future development of biomanufacturing industry.

**Keywords:** industrial biotechnology; design and creation of engineered organisms; biomanufacturing industry; bioeconomy; green and sustainable development

当前,全球生物基产品的商业活动高度活跃,生物技术加速渗透和融入传统产业,不断影响和改变各行各业的生产方式,预示着一个以工业生物技术、生物制造产业为标志的生物经济时代即将到来。工业生物经济是以可再生生物资源、高效生物过程以及生态产业集群来生产可持续生物基产品、创造就业和财富,支撑经济社会可持续发展的一种新经济形态,是生物经济的重要组成部分<sup>[1-2]</sup>。

## 1 生物技术与制造业呈现深度融合发展态势

生物制造可实现化学品的可持续生产,理

论上所有的有机化学品都可通过生物法合成。根据经济规模潜力分析,预计未来十年,35%的石油化工、煤化工产品将通过生物制造生产,从而摆脱石化资源依赖,成为可再生产品<sup>[3]</sup>;生物技术介入工业制造,可以显著减少有毒化学助剂的使用,降低温室气体、废弃物的排放。世界经合组织(Organization for Economic Co-Operation and Development, OECD)的案例表明,生物技术的应用可以降低工业过程能耗15%–80%、原料消耗35%–75%、空气污染50%–90%、水污染33%–80%,降低生产成本9%–90%<sup>[4]</sup>。生物制造可建立农业产品生产加工供给新模式,将通过种植和养殖生产的农业产

品、植物天然产物等合成基因组装到微生物细胞,可以实现蛋白质、淀粉、油脂、食糖、天然药物等的发酵合成,从而减少对自然资源的依赖和破坏,有望对农业生产方式产生变革性影响。工业生物技术的快速发展正在推动建立崭新的清洁和可持续的物质供给新模式,开启财富绿色增长新纪元,已成为世界各国抢占未来发展主动权的战略高地。

我国高度重视生物制造领域的科技创新,在化学品细胞工厂构建、二氧化碳生物转化利用、植物天然产物重组合成等方面取得重要进展,现代发酵产业发展特色显著,绿色生物制造体系初具规模。但与世界发达经济体相比,我国工业生物技术和产业的发展还存在原始创新能力不强、关键技术对产业支持能力不足等问题。因此,以推动产业高质量发展、构建新发展格局为核心,加强工业生物技术领域战略规划和前瞻布局,加大科技创新力度,提升生物制造产业创新发展能力,是在新一轮科技革命和产业变革赢得先机的重要任务。

## 2 工业生物技术发展现状、差距与主要任务

### 2.1 发展现状

#### 2.1.1 核心技术不断突破

我国在新型基因编辑器、酶蛋白理性设计、高通量筛选等底层生物技术,以及在细胞工厂创制、多酶分子机器构建、生物过程智能控制等核心技术方面取得了重要进展和突破,构建了包括氨基酸、有机酸、抗生素、维生素等现代发酵产品,以及大宗化学品、医药中间体、精细化学品等近百种细胞工厂,有力支撑了生物制造产业的发展。例如,我国科学家通过将维生素 B<sub>12</sub> 合成途径划分成 5 个模块,采用“自

下而上”的策略将 5 种微生物中的 28 个基因在大肠杆菌细胞中成功组装、调控,解决了多基因的适配机制问题,形成集成了不同来源基因组的、从头设计的人工途径,最终实现了维生素 B<sub>12</sub> 的从头合成<sup>[5]</sup>,是继微生物合成青蒿素、阿片类药物后,生物合成领域的又一重大进展,展示了合成生物技术在复杂化合物制造方面的巨大潜力。

#### 2.1.2 新兴技术加速布局

我国已加快在天然产物微生物重组合成、二氧化碳生物转化利用等前沿方向的战略布局和技术开发。在复杂天然化合物的生物合成领域,相关研究机构将功能组分的生物合成元件组装、编辑到微生物细胞中,构建出在发酵罐中制造天然产物的微生物新菌株,已打通了人参皂苷<sup>[6]</sup>、番茄红素<sup>[7]</sup>、胡萝卜素<sup>[8]</sup>、天麻素<sup>[9]</sup>、灯盏花素<sup>[10]</sup>、丹参新酮<sup>[11-12]</sup>、 $\beta$ -榄香烯、香紫苏醇等一批药用植物、经济植物产品的生物制造路线,生产效率大幅提升<sup>[13]</sup>。以人参皂苷、番茄红素、天麻素等为例,千平米发酵车间的合成能力相当于万亩农业种植,质量可完全替代化学合成。在新的工业原料路线方面,我国科学家从头设计构建了非自然的人工固碳与淀粉合成途径,国际上首次在实验室实现了二氧化碳到淀粉的人工从头全合成,能量利用效率和碳固定速率超越玉米淀粉合成途径,突破了自然光合作用局限,为以二氧化碳为原料合成复杂分子开辟了新的方向<sup>[14]</sup>。

#### 2.1.3 科技创新平台不断完善

近些年我国工业生物技术领域的创新基地建设不断发展<sup>[15]</sup>。截至“十三五”末,生物制造业领域已建有 6 个国家重点实验室、5 个国家重点实验室、3 个国家工程实验室、5 个国家工程研究中心、1 个国家技术创新中心、2 个国家工程技术研究中心(表 1),以及 22 家国家

表 1 我国工业生物技术领域部分创新基地

Table 1 Representative examples of industrial biotechnological innovation bases in China

Category	Name lists
State Key Laboratory	1 State Key Laboratory of Microbial Technology 2 State Key Laboratory of Microbial Metabolism 3 State Key Laboratory of Microbial Resources 4 State Key Laboratory of Bioreactor Engineering 5 State Key Laboratory of Biochemical Engineering 6 State Key Laboratory of Food Science & Technology
State Key Laboratory (enterprises)	1 State Key Laboratory of Beer Fermentation and Engineering 2 State Key Laboratory of Dairy Biotechnology 3 State Key Laboratory of Biobased Fiber Manufacturing Technology 4 State Key Laboratory of Non-Food Biomass and Enzyme Technology 5 State Key Laboratory of Biological Feed Engineering
National Engineering Laboratory	1 National Engineering Laboratory for Industrial Enzymes 2 National Engineering Laboratory for High-efficiency Enzyme Expression 3 National Engineering Research Center of Cereal Fermentation and Food Biomanufacturing
National Engineering Research Center	1 National Engineering Research Center of Microbial Pesticides 2 National Engineering Research Center for Microbial Medicine 3 National Engineering Research Center of Fermentation Technology 4 Beijing National Engineering Research Center for Biochips 5 National Engineering Research Center of Biological Feed
National Technology Innovation Center	1 National Technology Innovation Center of Synthetic Biology
National Research Center for Engineering Technology	1 National Engineering Research Center for Biotechnology 2 National Glycoengineering Research Center

企业技术中心、15 家行业技术开发监测中心等，形成了从微生物资源发现、代谢调控、酶工程、生化工程、生物反应器到生物工艺的布局，涉及生物质利用、粮食发酵、食品加工、乳制品、生物基材料、生物医药、生物农药、生物饲料、啤酒发酵等领域，为工业生物技术创新、提升产业发展和竞争能力形成了重要支撑。

## 2.2 主要差距

### 2.2.1 技术研发支持不足

近年来，全球范围内工业生物技术先进性不断提升，生产成本不断下降，加快向工业制造领域渗透和应用。据 2019 年美国农业部公布的数据，生物基产品行业为美国经济贡献了 4 590 亿美元和 465 万个就业岗位，其中，每份

生物基产业的工作衍生出 1.76 个其他产业的就业机会<sup>[16]</sup>。2019 年我国生物医药的市场规模为 3 172 亿元<sup>[17]</sup>，而包括现代生物发酵、生物基化学品以及生物基材料等主要生物制造产业规模已超过 8 000 亿元<sup>[18]</sup>。但如何实现生物合成与化学合成的完美融合，推动绿色生物工业的颠覆性革命，尚需克服科学和工程的重大挑战。除此之外，我国在生命科学与生物技术方向研发投入对工业环境下生命过程机制理解与再设计、生命属性的工业化应用重视不足，与世界发达国家相比，我国在高版本生物工具研发及生物工业发展方面均受到一定程度的限制。

### 2.2.2 面向未来的颠覆性技术储备不足

生物制造已成为国际科技领域竞争的新赛

场, 欧美发达国家正在加强前瞻布局、发力推进。美国启动“生命铸造厂”计划, 预期产生 1 000 个自然界不存在的、独特的分子及复杂化学结构, 致力于材料、制造领域的生物转化与应用, 为美国创造世界领先的战略布局与经济优势, 被视为“引领改变游戏规则的技术转型”。美国已经或即将上市的合成生物技术产品已达 116 种, 涉及农业种植、石油化工、有机化工等产品, 有望开创千亿美元的市场。与欧美等发达国家相比, 我国在未来产业发展技术的战略架构、核心技术、关键装备领域还存在差距, 以跟跑为主的局面尚未完全改观。

## 2.3 主要任务

### 2.3.1 加强对生物制造领域的基础研究

发挥和提升生命体(系)在工业环境下的应用属性是实现生命科学工业化的核心关键。我国在工业菌种的代谢进化、细胞调控的基本原理以及优良性状的遗传机制与分子基础研究方面较薄弱。因此开展基因组结构与功能解析、细胞网络设计构建、酶蛋白理性设计、电能生物利用等方向的基础研究, 有助于理解工业环境下的结构与功能、进化与适应性、生物多样性等基本原理和规律, 将为设计构建高性能工程生物, 实现物质高效转化、能量高效利用奠定理论基础。

### 2.3.2 发展生物制造产业关键技术

聚焦高效生物催化剂的构建与应用, 从原料利用、生物菌种开发、过程放大与分离提取等多个技术环节, 加快发展原料工程、菌种工程、过程工程等重大关键技术, 突破新一代生物炼制、二氧化碳生物转化利用、新生化反应设计创制、菌种迭代创新、未来食品、医药化学品绿色生物制造、植物天然产物重组合成、功能微生物组设计、智能生物制造、高效分离材料及装备等关键技术, 解决生物制造过程效

率低、能力不足等问题, 建立从原料到产品的技术体系及装备, 提高生物制造过程的集成与工程化能力。

### 2.3.3 建设面向产业、面向未来的创新平台

多学科交叉和人工智能的快速发展正在推动生命科学研究范式加速向智能化、通量化、工程化演进, 打造工程生物创新平台已成为世界各国抢占未来竞争优势的重要举措。面向未来、面向产业, 建设基因库、蛋白元件库、菌种细胞库, 建设“机器学习、模拟设计、合成装配、高通量测试、工艺构建”为闭环的自动化工程生物设计创建基础设施平台, 大力发展 DNA 合成、基因编辑、蛋白质理性设计、高通量筛选、智能制造等底层技术, 形成工程生物自动化、智能化设计构建技术体系, 大幅度提升设计精准度、降低构建成本、提高应用评价能力, 为我国自主工业菌种开发和生物产业发展提供核心平台技术支撑。

## 3 生物制造产业发展现状、差距与主要任务

### 3.1 发展现状

#### 3.1.1 生物发酵产业形成规模优势

传统发酵食品是我国饮食文化的重要载体, 是极具中华文明特色的民生产业。传统发酵产品包括白酒、黄酒等酒类, 酱油、料酒、食醋、酱类等调味品。2018 年传统发酵产业总产值达 1.5 万亿元<sup>[19]</sup>, 已成为我国轻工制造业的重要组成部分。“十二五”以来, 我国现代生物发酵产业快速发展, 主要产品的产量由 2010 年的 1 840 万 t 增长为 2020 年的 3 141.3 万 t, 年均复合增长率 5.5%, 产值也由 1 990 亿元增长到 2 496.8 亿元, 形成了以谷氨酸盐、赖氨酸盐、苏氨酸、柠檬酸、结晶葡萄糖、麦芽糖浆、果葡糖浆、酵母等大宗产品为主体, 小品种氨基

酸、功能糖醇、低聚糖、微生物多糖等高附加值产品为补充的多产品协调发展的产业格局,其中氨基酸、有机酸的产量位居世界首位,淀粉糖居世界第二位。我国发酵产业总体保持稳定发展的态势,同时也呈现产能集中度不断增强的特点和以原料主产区为核心的发展格局,如谷氨酸生产企业产能前十的企业占总产量的90%以上,柠檬酸行业产能排名前6的企业占总产能97%以上,年产值达到百亿以上的大型产业集团已有5家。

### 3.1.2 部分重大化工产品生物制造率先实现产业化

我国重大化工产品的绿色生物制造技术不断取得突破,构建了丁二酸、丙氨酸、D-乳酸、苹果酸、生物柴油、甾体激素类药物、羟脯氨酸、肌醇等近20种原料药、中间体、精细化学品的生物制造路线,部分产品率先实现产业化,经济社会效益显著。我国在国际上率先建设了L-丙氨酸生物制造万吨级生产线,相比原化工生产工艺,每吨产品减少CO<sub>2</sub>排放0.5 t,生产成本降低40%以上,生产企业占据了全球60%以上市场。我国建成国际首条体外多酶体系合成肌醇路线,与传统路线相比,高磷废水排放减少90%,化学需氧量(chemical oxygen demand, COD)减少50%以上,成本降低50%以上。

## 3.2 主要差距

### 3.2.1 核心菌种和关键酶创制能力不足

工业菌种和工业酶是生物制造产业发展的核心,决定了生物制造的产品种类、原料路线、成本基础。我国生物制造产业规模全球第一,带动形成了10万亿元规模的上下游产业,但产业发展面临核心菌种水平低、菌种创制能力不强等瓶颈问题,导致企业生产能力与国外差距明显,产业利润率普遍较低,国际竞争力差,部分产品受制于人。加强核心工业菌种和工业

酶的创制已成为支撑我国生物产业自主创新发展的关键。

### 3.2.2 产业链协同与发达国家存在较大差距

低成本、稳定的原料供应是生物产业快速发展的基础。目前我国生物制造原料以淀粉等可发酵糖为主,90%以上来源于玉米等谷物粮食,按每年可用于工业加工玉米量3 000–5 000万t计,难以支撑生物制造产业的规模发展。当前我国木质纤维素,甲醇、CO<sub>2</sub>、合成气等储量巨大,是优良的生物制造候选原料,但现阶段存在碳素利用转化效率低,技术经济性难以与石化炼制产品竞争等问题,尚不能支撑大规模生物制造。因此,建立可持续的原料供应体系,已成为保障我国生物制造产业发展的重要任务。

### 3.2.3 化工基础和高端精细材料向先进生物制造转型升级存在“卡脖子”环节

基于工业菌种的生物制造的快速发展使得更多的化学品从石油基转向生物基生产路线成为可能。与世界其他发达国家相比,我国在事关未来发展的高性能生物催化剂的设计能力、生物合成与生物催化工艺构建关键技术、可工业化生产的产品种类和规模上还有明显差距,存在生产成本低、优势产品少、部分产品严重依赖进口等问题,导致产业发展未来竞争力和对经济社会发展支撑能力不强。

## 3.3 主要任务

### 3.3.1 加快构建我国具有自主知识产权的高性能工业菌种

从提升我国生物发酵产业核心竞争力的需求出发,大力发展微生物细胞基因组工程技术体系,提升工业菌种设计创制能力,大幅度缩短工业菌种改造周期,获得自主知识产权菌株。开发新型发酵工艺与装备,提升原料利用能力和转化率,加快传统发酵产业、氨基酸、有机酸、抗生素、维生素、酵母等现代发酵产业的

技术革新和产业升级,显著提升综合经济效应,促进节粮、节能和减排,提升国际市场竞争力,推进我国从生物发酵大国向生物发酵强国转变。

### 3.3.2 推进原料体系多元化战略,加快非粮原料路线的突破

围绕生物制造原料体系构建,加快形成玉米芯、甘蔗渣、米糠等集约性木质纤维素原料的高效转化工业模式,建立秸秆糖、化学品转化的整体工业系统,推进具有国际先进水平的生物炼制系统规模化示范。大力发展 CO<sub>2</sub>、钢厂尾气、电石气、工业废气、生物质合成气、甲烷等一碳气体生物转化、过程控制及产品分离提取技术,提升一碳气体到化学品的生物转化能力和效率,建立以一碳气体为原料的化学品工业制造技术体系,支撑我国生物制造规模化发展。

### 3.3.3 加快战略布局,加快重大技术产业化实施

围绕工业制造绿色发展和未来新经济模式构建的重大需求,加快可再生化工、医药化学品生物合成、未来食品、天然产物重组合成、二氧化碳生物转化等方向战略布局,建立从原料、过程到产品绿色化的技术体系,推动药物分子、聚合材料、食品组分、新蛋白资源和化工化学品等生物制造技术的市场化、规模化应用。加强生物合成新技术与产品市场准入法规和监管体系建设,为生物制造产业发展构建和营造良好的生态环境。

## 4 结论与展望

越来越多的证据表明,工业生物技术和生物制造是推动生物经济高质量发展、打造经济发展新动能的重要内容。大力发展工业生物技术与产业,是变革传统制造模式的重大方向,是实现碳达峰碳中和目标、推动可持续发展内在需求,对我国加快构建绿色低碳循环经济体

系、引领未来生物经济发展至关重要。必须看到,我国工业生物技术和产业既有优势条件,也在部分领域存在明显差距。应抓住当前生物经济蓬勃发展的战略窗口期,把工业生物技术和产业作为我国发展生物经济的重要突破口,积极应对国际科技竞争风险挑战,为人类社会实现可持续发展贡献中国智慧和力量。

## REFERENCES

- [1] 姜江. 生物经济发展新趋势及我国应对之策. 经济纵横, 2020, 3: 87-93.  
Jiang J. The new trend of bioeconomy and the countermeasures in China. Econ Rev J, 2020, 3: 87-93 (in Chinese).
- [2] 韩祺. 加快融入全球生物经济发展新格局. 中国生物工程杂志, 2022, 42(5): 10-11.  
Han Q. Accelerating to integrate into the global bio-economy new pattern of development. China Biotechnol, 2022, 42(5): 10-11 (in Chinese).
- [3] OECD (Organisation for Economic Co-operation and Development). The Bioeconomy to 2030: designing a policy agenda[EB/OL]. [2022-09-08]. [https://www.oecd-ilibrary.org/economics/the-bioeconomy-to-2030\\_9789264056886-en](https://www.oecd-ilibrary.org/economics/the-bioeconomy-to-2030_9789264056886-en).
- [4] Zhang YHP, Sun JB, Ma YH. Biomanufacturing: history and perspective. J Ind Microbiol Biotechnol, 2017, 44(4/5): 773-784.
- [5] Fang H, Li D, Kang J, et al. Metabolic engineering of *Escherichia coli* for *de novo* biosynthesis of vitamin B<sub>12</sub>. Nat Commun, 2018, 9(1): 4917.
- [6] Dai LH, Liu C, Li J, et al. One-pot synthesis of ginsenoside Rh2 and bioactive unnatural ginsenoside by coupling promiscuous glycosyltransferase from *Bacillus subtilis* 168 to sucrose synthase. J Agric Food Chem, 2018, 66(11): 2830-2837.
- [7] Sun T, Miao L, Li Q, et al. Production of lycopene by metabolically-engineered *Escherichia coli*. Biotechnol Lett, 2014, 36(7): 1515-1522.
- [8] Zhao J, Li QY, Sun T, et al. Engineering central metabolic modules of *Escherichia coli* for improving  $\beta$ -carotene production. Metab Eng, 2013, 17: 42-50.
- [9] Bai YF, Yin H, Bi HP, et al. *De novo* biosynthesis of gastrodin in *Escherichia coli*. Metab Eng, 2016, 35: 138-147.

- [10] Liu XN, Cheng J, Zhang GH, et al. Engineering yeast for the production of breviscapine by genomic analysis and synthetic biology approaches. *Nat Commun*, 2018, 9(1): 448.
- [11] Guo J, Zhou YJ, Hillwig ML, et al. CYP76AH1 catalyzes turnover of miltiradiene in tanshinones biosynthesis and enables heterologous production of ferruginol in yeasts. *PNAS*, 2013, 110(29): 12108-12113.
- [12] Zhou YJ, Gao W, Rong Q, et al. Modular pathway engineering of diterpenoid synthases and the mevalonic acid pathway for miltiradiene production. *J Am Chem Soc*, 2012, 134(6): 3234-3241.
- [13] 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).
- [14] Cai T, Sun HB, Qiao J, et al. Cell-free chemoenzymatic starch synthesis from carbon dioxide. *Science*, 2021, 373(6562): 1523-1527.
- [15] 邱灵, 韩祺, 姜江. 面向 2035 的中国生物经济发展战略研究. *宏观经济研究*, 2021(11): 48-57, 92.  
Qiu L, Han Q, Jiang J. A study on China's bioeconomy development strategy for 2035. *Macroeconomics*, 2021(11): 48-57, 92 (in Chinese).
- [16] BioPreferred. An Economic Impact Analysis of the U.S. Biobased Products Industry 2018[EB/OL]. [2019-07-08]. <https://www.biopreferred.gov/BPResources/files/BiobasedProductsEconomicAnalysis2018.pdf>.
- [17] 张佩, 夏小二. 2020 年度生物医药产业发展态势分析. *中国生物工程学会中国生物产业发展报告 2020-2021*. 北京: 化学工业出版社, 2021: 37-91.
- [18] 刘斌, 陈方. 2020 年物制造发展态势. *中国生物工程学会中国生物产业发展报告 2020-2021*. 北京: 化学工业出版社, 2021:166-190.
- [19] 夏小乐, 吴剑荣, 陈坚. 传统发酵食品产业技术转型升级战略研究. *中国工程科学*, 2021, 23(2): 129-137.  
Xia XL, Wu JR, Chen J. Technology upgrading strategy for traditional fermented food industry in China. *Strateg Study CAE*, 2021, 23(2): 129-137 (in Chinese).

(本文责编 郝丽芳)