

我国微生物制造产业的发展现状与展望

毕心宇^{1,2}, 吕雪芹^{1,2}, 刘龙^{1,2}, 陈坚^{1,2}

(1. 江南大学未来食品科学中心, 江苏无锡 214122; 2. 江南大学糖化学与生物技术教育部重点实验室, 江苏无锡 214122)

摘要: 在我国“绿色生产, 节能减排”政策的倡导下, 微生物制造产业飞速发展, 涉及农业、食品、能源、化工等多领域, 并产生了良好的经济效益与社会价值。本文阐述了全球微生物制造产业的发展态势, 分析了我国微生物制造产业在发酵食品、生物肥料、酶制剂、生物基、生物质能领域的发展现状, 全面解析我国微生物制造产业发展的机遇与挑战。研究表明, 我国微生物制造产业涉及多个领域, 研发技术不断改革创新, 一些发酵大宗产业生产水平位居世界前列, 新菌种新产品持续增多, 工业生产规模逐步扩大。与此同时, 我国微生物制造产业也面临着核心菌种自主率低, 前沿科研技术垄断, 关键生产设备依赖进口等挑战。研究建议, 我国微生物制造产业应提高自主研发能力, 增强产业间的交叉创新, 开发智能化工业生产设备, 加速科研成果转化和工业化生产, 实现我国微生物制造产业的跨越式发展。

关键词: 微生物制造产业; 产业类型; SWOT 分析; 科技创新

中图分类号: Q936 **文献标识码:** A

Development Status and Prospects of Microbial Manufacturing Industry in China

Bi Xinyu^{1,2}, Lyu Xueqin^{1,2}, Liu Long^{1,2}, Chen Jian^{1,2}

(1. Science Center for Future Foods, Jiangnan University, Wuxi 214122, Jiangsu, China; 2. Key Laboratory of Carbohydrate Chemistry and Biotechnology, Ministry of Education, Jiangnan University, Wuxi 214122, Jiangsu, China)

Abstract: The microbial manufacturing industry is developing rapidly in China owing to the policy of “green production, energy saving, and emission reduction”. This industry involves agriculture, food, energy, chemical, and other fields and generates great economic benefits and social values. In this article, we describe the development trend of the global microbial manufacturing industry, summarize the development status of China’s microbial manufacturing industry in the fields of fermented food, biological fertilizer, enzyme preparation, bio-based material, and biomass energy, and analyze the opportunities and challenges of the industry in China. The research technology of China’s microbial manufacturing industry is constantly reforming and innovating, the production level of some major fermentation industries ranks among the top in the world, new strains and products continue to increase, and the scale of industrial production is gradually expanding. However, China’s microbial manufacturing industry still lacks independence regarding core strains, cutting-edge scientific research technologies, and key production equipment. Moreover, we suggest that China’s microbial manufacturing industry should improve its independent research and development capabilities, strengthen cross-industry innovation, develop intelligent equipment for industrial production, and accelerate the transformation of scientific research results.

Keywords: microbial manufacturing industry; industry type; SWOT analysis; technological innovation

收稿日期: 2021-07-22; **修回日期:** 2021-08-23

通讯作者: 陈坚, 江南大学教授, 中国工程院院士, 主要研究方向为微生物代谢工程; E-mail: jchen@jiangnan.edu.cn

资助项目: 中国工程院咨询项目“中国微生物安全与健康产业发展战略研究”(2020-ZD-05)

本刊网址: www.engineering.org.cn/ch/journal/sscae

一、前言

微生物制造产业是以微生物为核心，细胞为基础，利用基础科学方法，致力于把理论研究发现转化为人民生产生活中的实际产品、生产过程和系统服务等的全产业，将为化工、材料、食品等多种产业创造新的生产模式和经济形态。三百多年来，已经被发现和定名的微生物超过 10 万多种，1973 年，科学家利用基因技术开启了微生物制造的大门，研究发现了多种模式的微生物并将其应用于科学研究与工业生产 [1]。

微生物制造是在发酵工艺的基础上结合基因工程、细胞工程和酶工程以及其他技术成果而形成的。微生物制造的科学技术分别经历了代谢工程和反向代谢工程的早期发展、高通量组学、基因组水平代谢网络模型及细胞性能改造的后基因组时代以及系统代谢工程及合成生物学推动的最新进展三个阶段。随着科学技术的进步，合成生物学和生物反应器成为微生物制造中的两大重要支柱 [2]。由于微生物制造产业有着环境友好、资源再生、产能稳健等优势，已成为可持续发展的朝阳产业，在世界各国的发展战略计划中占有举足轻重的地位。

随着社会的迅猛发展和科学技术的飞速进步，微生物制造产业已涵盖医药制造，食品加工、农业提产、化工生产、污水处理、创新能源等各个领域。微生物制造产业具有广泛的环境适应性，多样的生产制造策略以及巨大的经济发展前景，为社会发展提供了一种可持续的良好模式。本文对微生物制造产业发展历程、各领域产业发展态势、我国微生物制造产业发展机遇与挑战进行全面剖析，以期为我国微生物制造产业的发展提供参考。

二、微生物制造产业的发展态势

(一) 全球微生物制造产业的发展现状

经济合作与发展组织 (OECD) 提出：微生物制造是最具竞争力的可持续发展产业之一，预期到 2030 年，世界上 35% 的化工产品将被微生物制造产品所取代，微生物制造产业将逐步形成可再生资源持续发展的经济形态。到 2020 年，已经有 134 个现代微生物制造的工业化案例，其主要发酵产品产值约为 140 多亿美元，年增长率约为 4.7%。

OECD 预测，微生物制造产业占整个生物经济中的比重将达 40% 左右，远超生物农业 (36%) 和生物医药 (25%) [3]。

2020 年，美国提出利用微生物制造技术降低化工产业 30% 的能源消耗和污染排放，到 2030 年替代 25% 的有机化学品和 20% 的石油燃料的宏远目标，建立生物工业制造和设计生态系统 (Bio-MADE)，推动美国生物制造产业的发展。欧盟在 2019 年制定的《面向生物经济的欧洲化学工业路线图》中指出，生物制品到 2030 年的年利用量将达到 $1.2 \times 10^9 \sim 1.5 \times 10^9$ t，实现大规模微生物制造的生产与转型。美国、欧盟、日本、俄罗斯等国家和地区高度重视工业微生物技术的发展与应用，将其纳入国家生物经济专属战略或生物经济相关战略规划，并加大其科研投入比重，快速推进产业化进程。

(二) 国内微生物制造产业的发展现状

我国高度重视微生物制造产业的研发能力，已联合高等院校及科研院所建立了多个国家重点实验室、国家级工程研究中心、行业专项技术研究中心等。“十三五”期间，科技部大力推动生物制造科技发展，在国家重点基础研究发展计划、国家高技术研究发展计划和科技支撑计划等国家重大研发项目中多次指出生物科技发展的战略需求，大力推动我国微生物制造科技和产业的发展 [4]。

我国微生物制造产业正在向质量效益型转变，产品产量于 2018 年达到约 2.9×10^8 t，总产值 2472 亿元，新型产品持续增多。在 2006—2017 年，全球工业生物技术领域申请专利 515 677 件，中国专利 120 586 件，占总数的 23.4%，全球排名第一 [5]。中国微生物制造产业已经形成了淀粉、纤维素、木质素油脂、蛋白质等系统的产业链，并且在柠檬酸、谷氨酸、维生素 B₂、淀粉酶等领域产量排名世界第一 (见图 1)。以柠檬酸为例，在 1992—2020 年，我国研发团队开发新菌种、新工艺、复合酶技术使产量达到 191 g/L，远超发达国家，其年产量达到 1.4×10^6 t 以上；2004—2020 年，维生素 C 生产水平显著提高，年产量达到 2.13×10^5 t，达到世界一流水平。近 20 年，中国微生物制造产业在柠檬酸、维生素 C 等生产技术领域实现了从跟跑、伴跑向领跑迈进 (见图 2)。

虽然我国抗生素、维生素、氨基酸、益生菌

的产业规模都超过 500 亿元，但核心菌种自主率不足 20%，其中氨基酸的菌种自主率不足 5%。同时，一些先进仪器和核心技术完全依赖进口，造成巨额资金外流、形成海外产业垄断。另一方面，在国家政策的大力支持下，我国微生物制造产业发展速度迅猛，已经在很多领域赶超发达国家。同时，我国微生物制造在废水、废气处理，材料能源开发等领域发展空间巨大，这些都促使我国有机遇抢占该领域的未来核心技术，增加国际市场的行业竞争力。

(三) 微生物制造产业的市场发展态势

在酶制剂、生物医药等现代发酵行业中，美国、欧盟等国家和地区处于技术垄断地位。其利用基因编辑、数字模型等尖端技术推动微生物制造的研发

应用，如美国杜邦公司 (DuPont) 开发高产率 1,3-丙二醇的全新生物制造技术等 [6]。同时，在微生物发酵生产商业化，开发可降解新产品，建立全球生物数据平台等领域，发达国家均有重大突破。此外，发达国家还致力于微生物制造产业相关仪器设备、装备系统的研发，如美国 Opentrons 公司开发移液机器人和 Synlogic 公司研制细胞编程平台等，实现实验室自动化研发和微生物制造产业的高效生产。

日本、中国、韩国等在传统发酵产业的微生物应用具有悠久的历史背景和深厚的研究基础，在氨基酸、酵母等大宗发酵行业中占据了较多的市场份额。近年来，我国国内生产总值 (GDP) 每年以 10% 左右的速度增长，我国微生物制造业已经开始

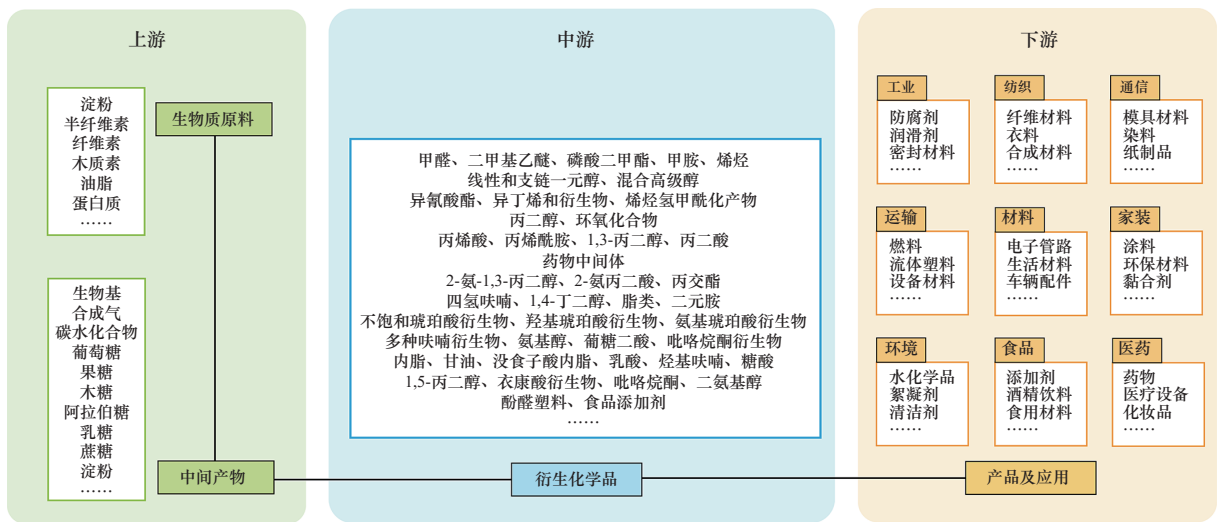


图 1 微生物制造产业链概况

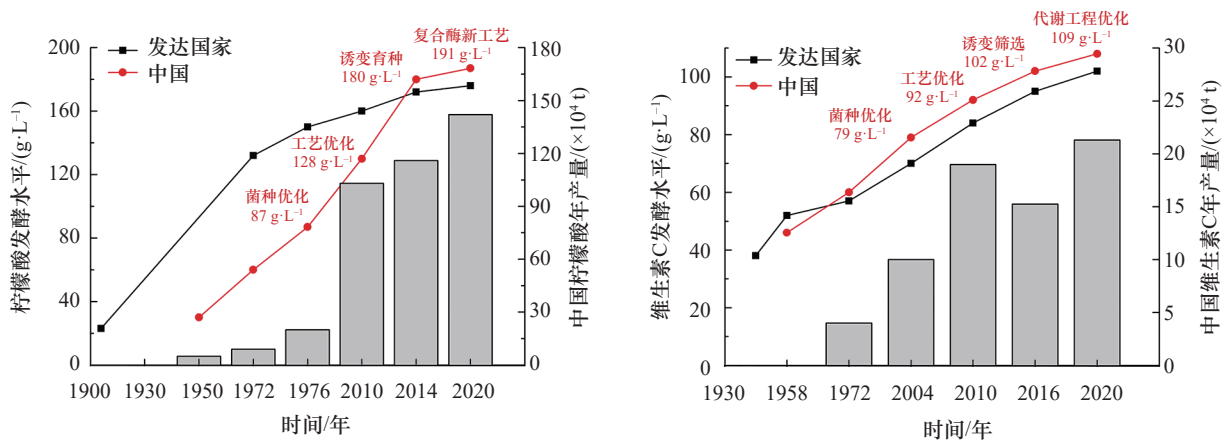


图 2 中国柠檬酸、维生素 C 产业发展现状

从工业化迈向产业化，覆盖领域和生产规模不断扩大，微生物制造产业逐步成为国民经济的新增长点。2010年，我国出口的商品中，抗生素、维生素、氨基酸类、有机酸类原料药是出口的主体，生产规模稳居全球第一 [6]。利用微生物法制造乙二醇、丁醇、乙烯等产品已实现工业化生产，同时，生物塑料、生化纤维等新材料的生产已形成工业规模 [7]。

(四) 微生物制造产业的技术发展趋势

目前，微生物制造技术在世界范围仍处于初步发展阶段，“十三五”期间，国家倡导节能减排、绿色生产，转变经济发展模式，大力发展微生物制造产业，促进我国从微生物制造大国向微生物技术强国转变。

基因组改组技术、系统代谢工程技术、细胞全局扰动技术等微生物基因组育种技术已在氨基酸等生物合成方面取得了显著的效益 [8]。微生物制造技术的进步，加速了基于数据分析与基因编辑的微生物合成新途径、构建新菌种、设计复合酶的功能化和智能化研究，大大提高了生物性能与物质转化效率，加快我国微生物制造产业进程，促进我国工业产业结构的调整。

近年来，微生物制造产业应用云计算、物联网和机器人等技术，开发了由光学传感器、数据分析软件等组成的微型生物反应器，实现了多数据在线监测，高通量筛选，单位能耗低，实验周期短的生产目标。在未来，微生物制造产业可利用大数据，人工智能等技术形成的信息物理系统(CPS)打造具有自感知、自学习、自决策、自执行、自适应功能的智能制造产业链，实现标准化、精细化、智能化生产。

三、我国微生物制造的细分产业发展分析

(一) 发酵食品领域的微生物制造发展态势

我国发酵大宗产业主要包括氨基酸、有机酸、酵母、淀粉糖、多元醇、功能发酵制品等。“十三五”以来，逐渐形成味精、赖氨酸、柠檬酸、结晶葡萄糖等大宗产品为主体、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。其中发酵大宗产品味精、赖氨酸、柠檬酸等产品的产量和贸易量位居世界前

列。发酵产业主产品的产量由2010年的 1.84×10^7 t增长为2019年的 3×10^7 t，年平均增长率为7.8%。同时产值也由1990亿元增长为3290亿元，年平均增长率达到了9.3%。生物发酵产业主要产品出口总量与出口额逐年稳步增长，其中柠檬酸、味精、淀粉糖等产品始终是生物发酵产业的主要出口产品 [9]。

我国微生物制造产业已结合代谢工程、多组学分析、代谢网络模型计算、调控基因回路设计与基因元件设计等多种合成生物学技术，广泛应用于有机酸、氨基酸、抗生素等产品的生产(见表1)。如通过改造代谢途径将葡萄糖直接转化为苹果酸，使其产量提高至180 g/L以上；通过设计精氨酸合成通路，减少溢流途径等操作合成新菌种，使L-精氨酸产量达到92.5 g/L；通过模型设计、过表达关键基因等技术，有效提高了红霉素、阿霉素、泰乐菌素等的生产水平 [6]。

目前，白酒行业与乳品等其他食品行业发展速度相当，已显示出良好的发展态势，整个白酒行业的销售额由2012年的4500亿元到2020年的5836.39亿元，累计增长4.61%；到2020年，利润总额达到1585.41亿元，累计增长13.35% [10]。酱油、食醋、酱菜等行业也利用微生物组学解析、酿造工艺优化、功能成分分析等技术从传统的天然发酵升级为精准调控的工业化数控发酵，从过去的手工作坊发展到中小型企业以及少数龙头企业(见图3)。总体来说，“十三五”以来，通过利用先进的微生物合成技术及先进的生产设备，我国发酵产业产量与规模得到了大幅提升，并保持稳定发展的态势。

(二) 生物肥料领域的微生物制造发展态势

从2015年开始，国务院发布《到2020年化肥使用量零增长行动方案》等政策控制化肥用量，致力于解决化肥水土污染和产能过剩的问题，推进微生物肥料的发展。目前，我国 2×10^8 亩(1亩 ≈ 666.67 m²)微生物肥料饲料生产基地主要生产有生物肥料、生物有机肥和微生物菌剂。农业农村部登记的微生物肥料产品有根瘤菌剂、固氮菌剂、溶磷菌剂等9个菌剂类品种。从传统的菌种筛选到菌种改造设计、多高效复合菌系制造、肥料菌株功能挖掘等技术的应用，微生物制造实现了肥料菌株研发

表 1 我国有机酸发酵产业的发展近况

产品	底物	菌种	技术方案	产量/(g·L ⁻¹)
丙酸	甘油	酸性丙酸杆菌	关键甘油脱氢酶与苹果酸脱氢酶共表达	39.43
	甘油	酸性丙酸杆菌	引入外源基因改造代谢通路	28.23
	乳清乳糖	酸性丙酸杆菌	过度表达编码OtsAB途径酶；分批补料发酵	135.00
柠檬酸	玉米粉	黑曲霉	删除交替氧化酶基因，过表达关键基因	169.10
	菊粉	耶氏解脂酵母	引入菊粉酶异源途径高效合成目的产物	84.00
	菊粉	耶氏解脂酵母	关键酶改造，发酵工艺优化	77.90
乳酸	玉米粉	酿酒酵母	引入乳酸脱氢酶，减少产物竞争途径	103.00
	葡萄糖	酿酒酵母	删除丙酮酸脱氢酶等，重建细胞氧化还原平衡	117.00
	葡萄糖	副干酪乳杆菌	利用CRISPR-Cas9 基因编辑技术改造代谢途径	221.00
丙酮酸	乳清粉	克雷伯氏产酸菌	改造代谢途径，阻断副产物生成	71.00
	葡萄糖、乙酸	大肠杆菌	诱变菌株筛选，异源酶表达	90.00
	葡萄糖	光滑球拟酵母	连续培养高通量筛选	94.30
苹果酸	葡萄糖	大肠杆菌	分段发酵优化	34.00
	葡萄糖	米曲霉	引入还原性三羧酸途径生产目的产物	59.00
	葡萄糖	黑曲霉	改造代谢通路，消除副产物积累；补料分批发酵	201.13

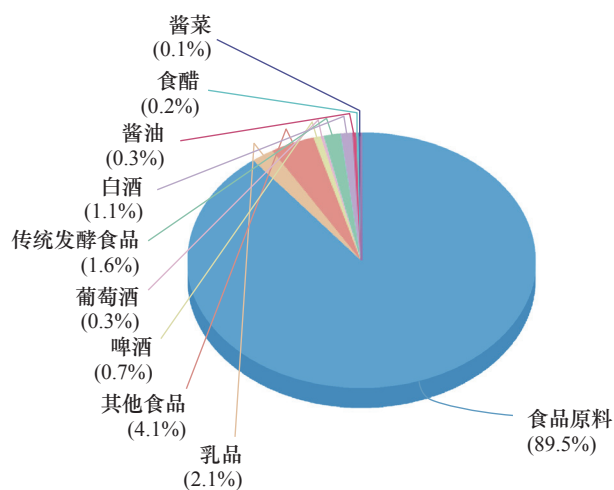


图 3 中国发酵食品领域的绿色工厂占比

的多样性、调控性和精确性，如今有固氮绿藻肥料、5406 抗生素肥料、泡囊丛枝 (VA) 菌根以及作为拌种剂的联合固氮菌等多种产品 [11]。2020 年，农业农村部微生物肥料和食用菌菌种质量监督检验测试中心显示，微生物菌剂产品数量为 3315 个，占比 45.75%；生物有机肥产品数量为 2205 个，占比 30.43%；复合微生物肥料产品数量为 1399 个，占比 19.31%。我国有两千多家微生物肥料制造企业、产能达到 3×10^7 t，产值 400 亿，已形成一定的产业规模。2017 年后，新型企业明显增多，发展势头迅

猛，截至 2020 年年底，共登记产品 7604 个，登记前 4 位的是微生物菌剂、生物有机肥、复合微生物肥料、有机肥料腐熟剂 [12]。

2020 年 12 月，微生物肥料技术研究推广中心召开了“第四届中国微生物肥料技术与行业发展大会”，科学技术部、农业农村部与国内生物公司展开研讨交流，以微生物科技，创新产业化为方向，积极推进我国微生物肥料产业长远发展。未来我国微生物肥料产业发展的首要目标以需求为导向，搭建“产学研”融合的科技创新平台，选育新菌种、研发新产品、拓展新功能，实现微生物肥料产业的可持续创新的长远发展。

(三) 酶制剂领域的微生物制造发展态势

酶制剂是指从生物中提取的具有酶特性的一类物质，可在生产中代替需要高温强酸等特殊条件的化学反应，有着简化工艺、降低成本、提高产量、节约能源、减少污染等不可忽视的优势。目前，酶制剂已应用于食品加工、医药领域、环境保护、农业以及化工等行业。据中金企信（北京）国际信息咨询有限公司公布的《2020—2026 年中国酶制剂市场竞争策略及投资可行性研究报告》统计数据显示：2016 年，酶制剂年产量已达 1.2×10^6 t，年增长率保

持在 10% 左右。酶制剂至今已有 3000 多个品种，然而只有 60 多种酶制剂实现了大规模工业化的生产，酶制剂产业的发展空间巨大，前景广阔。

2005 年，酶制剂产品的年产量只有 4.8×10^5 t (标)，到 2010 年已增长到 7.75×10^5 t，达到 10.1% 的复合增长率 [13]。虽然中国企业在饲用酶制剂领域实现了重大突破，占全球饲用酶制剂市场的 14%，但在整个生物经济领域核心的工业酶制剂，还落后于国际领先企业。随着基因工程、蛋白质工程等学科领域的知识积累，以及高通量测序技术、基因编辑等技术的突破，工业酶制剂的微生物制造也迎来了新的发展机遇，微生物酶的发掘、微生物细胞工厂的改造、专性酶的从头合成等都将为生物医药、环境能源、生物材料等产业提供新的解决方案，从而推动新一轮技术革命浪潮。因此，在新的技术革命浪潮中把握机遇，快速掌握核心技术，提升行业技术水平，提高国际竞争力是我国酶制剂产业发展的战略重点。

(四) 生物基化学品领域的微生物制造发展态势

生物基产品主要指利用秸秆等木质纤维素类农林废弃物为原料生产环境友好的化工产品和绿色能源，其中生物基化学品是当今全球的热点之一，可以有效解决传统化工产业能源消耗大，污染环境的弊端。全球有超过 4 万亿美元的产品通过化工方法生产，据 OECD 预计，在未来 10 年里，至少有 20% 的石油化工产品（约 8000 亿美元）可被生物基化学品替代。在欧盟提出的到 2030 年生物基经济发展目标中，生物基化学品将占到欧盟化学品总产量的 30%；据美国农业部研究报告，到 2025 年，生物基化学品将占据 22% 的全球化学品市场，其产值将超过 5×10^{11} 美元/年。同时，生物基化学品也是我国“十三五规划”中明确提出要重点开发的材料之一。我国生物基经济近年来保持 20% 左右的年均增长率，总产量已达到 6×10^6 t/a [14]。

在我国微生物制造生物基产品中，生物基精细化学品占据大部分的市场份额，目前我国生物制造企业有 5000 多家，达到 15 000 亿元的总产值规模，其中超过 4000 亿元的产值是现代生物制造产业。在代谢工程、合成生物学、酶工程等核心理论技术的不断发展下，通过利用代谢改造、蛋白从头设计

等技术手段，我国利用一步生物合成法高效生产 L-丙氨酸，在缩短生产时间的同时可大幅节约成本，与传统国际巨头企业如德国巴斯夫集团、日本味之素公司等竞争中具有明显优势，占据了超过 60% 的国际市场。同时，在生产琥珀酸、D-乳酸等大宗化工产品中，通过改造菌株代谢途径，从头合成新酶等技术方法达到了国际领先的技术水平。但国内生物基化学品产业还存在关键原料受限、核心技术缺乏、产品成本高昂、市场竞争力不足等现状，在总体规模和水平上仍与发达国家存在差距。

(五) 生物基材料领域的微生物制造发展态势

我国是世界第四大塑料制品生产国，塑料制品年需求量达 7×10^6 t，被废弃的塑料制品约为 2×10^6 t。在全球“禁塑”大环境下，以“绿色、环保、可再生、易降解”著称的生物基材料显得尤为重要，迎来发展的黄金期。德国 Nova 研究所报告提出，生物基材料在聚合物和塑料的市场份额约为 1%，到 2024 年，预计复合年增长率为 3%~4%，与传统的石油基高分子材料增长率相近。国内市场的生物基增塑剂年需求量约为 3.1×10^6 t，且随着应用领域的不断扩展以每年 8% 到 12% 的速度递增，但产能尚不足 1×10^4 t，远远不能满足市场需求，缺口巨大。

目前，生物基材料的生产应用变得更加专业化和普遍化。通过合成生物学、基因组学等技术改造微生物自身蛋白，构建具有特殊性能的新生物基材料已成为研究热点，聚乳酸 (PLA)、聚丁二酸丁二醇酯 (PBS)、聚羟基脂肪酸酯 (PHA) 等新生物材料已应用于生物基增塑剂的生产。通过引入外源基因、弱化抑制基因、强化启动子等方法实现了大肠杆菌通过一步法利用葡萄糖合成 PHA，其中乳酸组分的摩尔百分比达到 1.6%，聚合物含量为 83.9 wt%，为生物基材料的制造提供基础 [15]。利用微生物制备生物基材料能够大大减少化工合成中的污染问题，并且相对低廉的生产成本能够极大地提升生物基材料的市场竞争力。生物基材料产业在提升技术创新能力和加快产业化进程方面具有广阔的发展空间，微生物制造将是未来生物基材料生产的核心技术。

（六）生物质能领域的微生物制造发展态势

生物质能是将秸秆等植物原料利用微生物发酵制造成沼气、生物制氢、生物柴油和燃料乙醇等形式的能源。2019 年，英国《BP 世界能源统计年鉴》指出，世界生物燃料产量逐年递增，生物燃料占市场份额逐步增多，到 2018 年全球燃料乙醇产量达到了 6.04×10^7 toe。在我国，生物质能主要包括生物质发电、生物柴油及生物天然气等。如利用乳化工艺和生物合成技术，将木质素高效合成液体燃料，具有环境污染小、燃烧效率高、储量丰富等优势 [16]。根据生物质能源行业发展前景数据显示，截至 2019 年，我国生物质发电投资规模突破 1502 亿元，同比增长 12.3%。2020 年中国生物质能产业新增投资约 1960 亿元，其中，生物质发电、生物天然气、生物质成型燃料供热产业、生物液体燃料成为重点投资项目 [17]。2021 年 3 月，国家电网发布《关于公布 2021 年第六批可再生能源发电补贴项目清单的公告》，其中生物质发电项目数量为 6 个，包括垃圾焚烧发电项目 5 个、农林生物质发电项目 1 个，核准/备案容量为 139 MW，变更一项可再生能源发电补贴清单的集中式生物质发电项目，核准/备案容量为 30 MW，标志着生物质能已成为国家能源发展的重点战略目标。

《生物质能发展“十三五”规划》指出，生物质能产业已经达到商业化、标准化和规模化，其年利用量约等于 5.8×10^7 tce，实现了“绿色生产，节能减排”。据统计数据显示，2020 年中国城市垃圾产生量超过 3.6×10^8 t。目前，面对如此庞大的垃圾资源，我国主要停留在集中焚烧发电的处理模式，而西方发达国家已利用生活垃圾回收生产农业肥料、工业材料等，实现了能源的循环利用。展望未来，生物质能行业可开展垃圾再制造领域研发，精细化分类利用废料，实现“变废为宝”。

四、我国微生物制造产业发展 SWOT 分析

（一）优势分析（Strengths）

在国家相关政策的大力支持下，微生物制造产业稳健发展，产业规模增长快速，社会效益显著。其中，微生物制造的生物发酵领域的产量与产值稳步提升，出口稳定增长，国际竞争力大幅提升。同

时，我国拥有极大的市场空间与市场潜力。仅以微生物制造的生物能源领域为例，到 2035 年，我国原油预计需求将超过 7×10^8 t，天然气预计需求超过 6×10^{11} m³，其中 70% 的原油和 30% 的天然气需要进口。调查数据显示，我国生物乙醇与生物天然气可开发潜力分别为 1.5×10^8 t 和 2.5×10^{11} m³ [18]。由此可见我国微生物制造在生物能源领域有非常大的市场潜力和发展空间。

（二）劣势分析（Weaknesses）

1. 原料劣势

微生物工业领域现有技术木质素纤维素（秸秆）、甲醇（C1）等非粮生物质原料方面需求量大，微生物生产的核心原料研发技术存在瓶颈，进口依赖性严重，导致产品质量和附加值低，原子经济性不足，生产成本低，与石化炼制产品相比市场竞争力不强等一系列问题。

2. 技术劣势

我国在生物催化剂创制等基础技术领域的创新能力相对薄弱，在核心菌种和关键酶的知识产权上受制于人，存在着前期投入大、资源分散、缺乏人才、成果转化率等问题，使得国内微生物制造产业在国际市场缺乏竞争力。此外，我国微生物制造产业前瞻技术储备不足，与欧美等发达国家相比，我国战略架构、底层核心技术还存在差距，尤其是以动态调控、数字模型、传感技术等为代表的新时代前沿学科交叉布局明显不足。

3. 设备劣势

现阶段，我国微生物制造的核心装备支撑系统仍与先进国家有着巨大的差距，缺乏基于大数据、人工智能等技术的微生物反应器、过程传感检测等为核心的装备支撑系统。由于我国的高端装备制造产业链基础积淀不够，因此在原材料、规范化加工、辅助配件、在线检测等多个细分技术领域相对落后。高端设备研发技术垄断，成本昂贵，研发时间长等问题，使得制造企业的投入回报风险高，最终形成行业恶性循环。

（三）机会分析（Opportunities）

《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和 2035 年远景目标纲要》指出，要大

力推动生物信息技术的融合创新，加快生物医药、生物材料、生物能源等产业的发展，将生物经济做大做强。同时，《国家科学与技术中长期发展规划纲要》中，将工业生物技术列为科技前沿技术，生物技术产业被确定为七大战略性新兴产业之一。我国在宏观的产业政策外，还积极推动“一带一路”战略以促进人才交流，高效利用全球创新资源。

除了政策的大力扶持外，国家在微生物制造产业的投入也逐年加大，行业基础设施方面有了很好的提升，大力推动了生物技术产业发展。以京津冀、长江三角洲及珠江三角洲为核心的工业生物产业集群都具有国际竞争力。可以说，我国对微生物技术的重视已提升到空前的战略高度，鼓励高新技术的创新创业，引导多学科交叉，融入大数据与人工智能，对该领域的进一步发展形成有利保障。

（四）威胁分析（Threats）

在当前严峻的国际形势和激烈的行业竞争下，美国、欧盟、日本等国家和地区已经加强微生物制造领域的未来前瞻布局，试图在多个微生物制造产业中分割国际市场、设置技术壁垒，给我国的微生物制造产业带来了诸多挑战。美国针对生物技术专门出台《中国生物技术发展：美国和其他国家的参与及作用》，并采取各种手段对我国生物制造等领域重点防范和封锁。2020年4月，美国布鲁金斯学会发布报告《中国在全球生物技术领域的作用及其对美国政策的影响》，全面剖析我国微生物制造产业对美国的挑战并提出相应措施。由于核心菌种和先进设备受制于人，我国微生物制造产业“卡脖子”现象日益凸显，市场发展受到限制。大成集团、宁夏伊品生物科技股份有限公司、山东隆大生物工程有限公司等企业在扩大规模或进入国际市场后，纷纷受到国际龙头企业的专利诉讼，严重阻碍企业发展，有些企业甚至到了破产重组的境地。这些事件折射出当前微生物制造领域先进技术严重依赖国外，知识产权保护力度薄弱，技术“借鉴”现象频繁发生，反映了当前微生物制造行业技术体系、产业体系与知识产权体系还存在着诸多问题。

虽然面临诸多外部的威胁与挑战，但是我们也应当清楚的认识，微生物制造产业仍属于新兴产业，我国整体发展水平与国外基本并行。在国内研发机构与企业的不断突破下，我们有机遇掌握该领

域的未来核心技术，形成持续研发能力和自主的产品体系、技术体系、产业体系和知识产权体系，保障我国的经济健康发展与国防安全。

五、我国微生物制造产业的发展建议

（一）过程与装备

党的“十九大”报告指出要加快建设制造强国，加快发展先进制造业，推动互联网、大数据、人工智能和实体经济深度融合，在中高端消费、创新引领、绿色低碳、共享经济、现代供应链、人力资本服务等领域培育新增长点、形成新动能 [19]。这就迫切要求我国制造业要向绿色化、高端化、智能化方向迈进。

因此，在微生物制造的过程与装备方面，应围绕生物制造对高端、绿色、智能的需求，以关键核心装备智能化生物反应器、智能化过程传感检测等为方向，结合生物过程智能化分析和决策软件的开发，实现大数据—知识混合驱动的智能生物制造。

（二）交叉前沿与颠覆性创新

《“十三五”生物技术创新专项规划》指出，生物技术发展突出体现了学科交叉汇聚日益紧密的全球科技创新发展态势，拓展了科学发现与技术突破的空间。美国一直以来高度重视生物材料交叉技术的前沿探索，世界著名智库研究预测在未来10年内生物材料交叉技术可能取得颠覆性突破。因此，我国的微生物制造产业应当坚持引领跨越，促进跨学科、跨行业的深度融合交叉合作。充分发挥生物技术的引领性作用，强化原始创新和集成创新，促进生物技术成果转化和产业化发展，抢占国际竞争的战略制高点。

生物制造的前沿交叉与应用将有助于我国摆脱原始创新能力不足，关键核心技术受制于人的困境，提升科技创新质量；有助于为我国科技创新实现跨越式发展提供新的物质基础；有助于缩小与发达国家之间的科技创新差距，为我国建设世界科技强国提供战略新机遇。

（三）超前部署

在发展微生物制造产业的过程中，应当坚持从基础研究、关键技术到产业应用示范进行一体化部

署。从而加快推动生物技术产业的发展,支撑“建设世界科技强国”“中国制造 2025”等战略目标的实现 [20]。

应当充分发挥微生物技术在经济建设和社会发展中的支撑引领作用,瞄准微生物基础前沿、重大关键技术、产业化应用等方向,坚持“自主创新、重点跨越、支撑发展、引领未来”的方针,集中资源系统性布局,强化原始创新和集成创新,将自主创新自始至终作为我国的微生物制造产业发展的战略基点。

六、结语

微生物制造产业在食品、化工、农业、医药领域已展现巨大的经济效益与社会价值,并在材料、环境、能源行业快速发展,随着生物基础研究与技术设备的不断研发,未来还可能进入矿业、冶金等领域,实现微生物制造的全方位、多领域、高精尖的长远发展。但我国微生物制造产业在科技研发与技术革新方面任重道远,相信在我国政策扶持与相关科研院所的共同努力下,我国微生物制造产业可以提升产业效益、扩大应用范围、提高国际竞争力,实现微生物制造技术强国的战略目标。

参考文献

- [1] 周景文,高松,刘延峰,等.新一代发酵工程技术:任务与挑战[J].食品与生物技术学报,2021,40(1):1-11.
Zhou J W, Gao S, Liu Y F, et al. A new generation of fermentation engineering technology: Tasks and challenges [J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2021, 40(1): 1-11.
- [2] 陈涛,崔真真,户文亚,等.代谢工程发展30年[J].生物工程学报,2021,37(5):1-16.
Chen T, Cui Z Z, Hu W Y, et al. Thirty years development of metabolic engineering: A review [J]. Chinese Journal of Biotechnology, 2021, 37(5): 1-16.
- [3] 经济合作发展组织. 生物技术在工业可持续发展中的应用 [M]. 北京: 科学技术文献出版社, 2005.
Organization for Economic Cooperation and Development. The application of biotechnology in sustainable industrial development [M]. Beijing: Science and Technology Literature Press, 2005.
- [4] 李祯祺,徐萍,刘斌.中国工业生物技术行业现状分析与发展前景[J].生物产业技术,2017(6):7-16.
Li Z Q, Xu P, Liu B. Analysis of the status quo and development prospects of China's industrial biotechnology industry [J]. Biotechnology and Business, 2017 (6): 7-16.
- [5] 顾显伟,沈沂,周君梅,等.基于Web of Science的生物样本库论文计量学分析[J].中华医学科研管理杂志,2019,32(6):451-455.
Gu X W, Shen L, Zhou J M, et al. Metrological analysis of papers in biological repositories based on Web of Science[J]. Chinese Journal of Medical Science Research Management, 2019, 32(6): 451-455.
- [6] 张媛媛,曾艳,王钦宏.合成生物制造进展[J].合成生物学,2021,2(2):145-160.
Zhang Y Y, Zeng Y, Wang Q H. Advances in synthetic biomanufacturing [J]. Synthetic Biology Journal, 2021, 2(2): 145-160.
- [7] 陈宁,范晓光.我国氨基酸产业现状及发展对策[J].发酵科技通讯,2017,46(4):193-197.
Chen N, Fan X G. Current situation and development strategy of amino acid industry in China [J]. Bulletin of Fermentation Science and Technology, 2017, 46(4): 193-197.
- [8] 冯小娜,齐娜,宋伟,等.蛋白质工程改造磷脂酶D提高磷脂酰丝氨酸产量[J].食品工业科技,2020,41(17):98-103,108.
Feng X N, Qi N, Song W, et al. Protein engineering modified phospholipase D to increase the production of phosphatidylserine [J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(17): 98-103.
- [9] 石维忱,王晋.生物发酵产业“十四五”时期发展展望[J].食品科学技术学报,2021,39(2):8-13.
Shi W C, Wang J. Prospect of bio-fermentation industry during national 14th Five-Year Plan period [J]. Journal of Food Science and Technology, 2021, 39(2): 8-13.
- [10] 科学技术部.科技部关于印发《“十三五”生物技术创新专项规划》的通知[EB/OL].(2017-05-10)[2021-07-10].http://www.most.gov.cn/tztg/201705/t20170510132695.html.
Ministry of Science and Technology of the PRC. Notice of the Ministry of Science and Technology on Printing and Distributing the “Thirteenth Five-Year Plan for Biotechnology Innovation” [EB/OL]. (2017-05-10)[2021-07-10]. http://www.most.gov.cn/tztg/201705/t20170510132695.html.
- [11] Mahanty T, Bhattacharjee S, Goswami M, et al. Biofertilizers: A potential approach for sustainable agriculture development [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2017(24): 3315-3335.
- [12] 路垚,何宗均,田阳.微生物肥料的研究进展与应用前景[J].农家参谋,2020,642(1):10.
Lu Y, He Z J, Tian Y. Research progress and application prospects of microbial fertilizers [J]. The Farmers Consultant, 2020, 642(1): 10.
- [13] 张俭波.食品工业用酶制剂的管理[J].生物产业技术,2019(3):83-90.
Zhang J B. Management of enzyme preparations for food industry [J]. Biotechnology and Business, 2019 (3): 83-90.
- [14] 于建荣,王跃,毛开云.生物基产品发展现状及前景分析[J].生物产业技术,2017(4):7-15.
Yu J R, Wang Y, Mao K Y. Analysis of the development status and prospects of bio-based products [J]. Biotechnology and Business, 2017 (4): 7-15.
- [15] 陆静娴,李志敏,叶勤,等.弱化呼吸链水平对代谢工程大肠杆菌聚羟基丁酸乳酸酯合成的影响[J].生物工程学报,2019,35(1):66-76.
Lu J X, Li Z M, Ye Q, et al. Effect of reducing the activity of respiratory chain on biosynthesis of poly(3-hydroxybutyrate-co-lactate)

- in *Escherichia coli* [J]. *Chinese Journal of Biotechnology*, 2019, 35(1): 66–76.
- [16] Duwe A, Tippkter N, Ulber R. Lignocellulose-Biorefinery: Ethanol-focused [J]. *Advances in Biochemical Engineering/Biotechnology*, 2017 (166): 177–215.
- [17] 水电水利规划设计总院. 中国可再生能源发展报告2019 [M]. 北京: 中国水利水电出版社有限公司, 2020.
China Hydropower Planning and Design Institute. China renewable energy development report 2019 [M]. Beijing: China Water Resources and Hydropower Press Co., Ltd., 2020.
- [18] 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” [J]. *化工进展*, 2021, 40(3): 1137–1141.
Tan T W, Chen B Q, Zhang H L, et al. Accelerate promotion of green bio-manufacturing to help achieve “carbon neutrality” [J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2021, 40(3): 1137–1141.
- [19] 洪银兴. 培育新动能: 供给侧结构性改革的升级版 [J]. *经济科学*, 2018 (3): 5–13.
Hong Y X. Cultivating new momentum: an upgraded version of supply-side structural reform [J]. *Economic Science*, 2018 (3): 5–13.
- [20] 国家信息中心. “十三五”以来战略性新兴产业发展形势分析 [R]. 北京: 国家信息中心, 2018.
State Information Center. Analysis on the development situation of strategic emerging industries since the 13th Five-Year Plan [R]. Beijing: State Information Center, 2018.