DOI 10.15302/J-SSCAE-2022.07.007

我国农业微生物产业发展研究

周杨[1, 2, 3, 4]，**邓名荣**[1, 2, 3, 4]，**杜娟**[1, 2, 4]，**宋仲戬**[1, 2, 4]，**吴清平**[1, 2, 4]，**朱红惠**[1, 2, 3, 4]

（1. 广东省科学院微生物研究所，广州 510070；2. 华南应用微生物国家重点实验室，广州 510070；3. 农业农村部农业微生物组学与精准应用重点实验室，广州 510070；4. 广东省菌种保藏与应用重点实验室，广州 510070）

摘要：农业微生物产业作为利用农业微生物资源和生物技术形成的生物科技产业和高增值农业，涉及种植业、养殖业、农业环境等，在保障粮食安全、提升耕地质量、促进农业减排方面具有重要意义。本文从微生物肥料、饲用微生物产品、微生物农药、酶制剂微生物产品、农业废弃物资源化利用等方向，梳理了我国农业微生物产业的发展现状，进而总结了农业微生物技术与产业发展趋势；在研判种质资源、技术研究、产品研发、行业标准等农业微生物产业发展面临问题的基础上，提出了布局科研平台专项、建设数据信息系统、加强微生物种业创新、构建法律法规体系等重点举措。建立完善的产业政策体系和相关配套措施，健全农业微生物产业创新体系，孵化参与国际竞争的高科技企业，以此保障我国农业微生物产业高质量发展。

关键词：农业微生物；产业发展；微生物肥料；饲用微生物；微生物农药；酶制剂微生物；微生物种业

中图分类号：Q939.96　　**文献标识码：**A

Development of Agricultural Microbial Industry in China

Zhou Yang[1, 2, 3, 4], **Deng Mingrong**[1, 2, 3, 4], **Du Juan**[1, 2, 4], **Song Zhongjian**[1, 2, 4], **Wu Qingping**[1, 2, 4], **Zhu Honghui**[1, 2, 3, 4]

(1. Institute of Microbiology, Guangdong Academy of Sciences, Guangzhou 510070, China; 2. State Key Laboratory of Applied Microbiology Southern China, Guangzhou 510070, China; 3. Key Laboratory of Agricultural Microbiomics and Precision Application, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Guanghou 510070, China; 4. Guangdong Provincial Key Laboratory of Bacteria Preservation and Application, Guangzhou 510070, China)

Abstract: Agricultural microbial industry belongs to a biotechnology industry with high value addition. It utilizes agricultural microbial resources and biotechnologies, involves fields such as planting, breeding, and agricultural environment, and is crucial in ensuring food security, improving cultivated land quality, and promoting agricultural emission reduction. In this study, we reviewed the development status of agricultural microbial industry in China from the aspects of microbial fertilizer, microbial feeds, microbial pesticide, and microbial enzyme preparation. Then we summarized the development trends of the agricultural microbial technology and industry. Considering the challenges faced by the industry in terms of germplasm resources, technical research, product development, and industry standards, we proposed several key measures including establishing special projects for scientific research platforms, building data information systems, strengthening innovation in the microbial seed industry, and building systems of laws and regulations. To contribute to the high-quality development of China's agricultural microbial industry, we suggest that an industrial

收稿日期：2022-03-29；**修回日期：**2022-06-28

通讯作者：朱红惠，广东省科学院微生物研究所研究员，研究方向为微生物资源发掘、保护和共享利用；E-mail: zhuhh_gdim@163.com

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 2”(2021-XZ-08)

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

policy system and related supporting measures should be established, the innovation system for the industry should be improved, and high-tech enterprises participating in international competition should be built.
Keywords: agricultural microbiology; industry development; microbial fertilizer; microbial feeds; microbial pesticide; microbial enzyme preparation; microbial seed industry

一、前言

农业微生物是农业生产（含种植业和养殖业）、农产品加工、农业生物技术、农业生态环境保护等有关应用微生物的总称，覆盖种植业、养殖业、农业环境等领域，涉及与农业有关微生物的特性、生命活动规律、作用过程调控等研究，也是促进农业生产发展的新兴方向 [1,2]。农业微生物产业指利用农业微生物资源及相关工程技术的产业，具有生物工程、高增值农业的产业特征，成为国家战略性新兴产业的重要增长点 [3]；微生物肥料、微生物饲料、微生物农药、微生物能源、食用菌、微生物食物、微生物生态环境保护剂等是其重要的产品形式。鉴于农业微生物产业在粮食安全、环境保护、经济发展等方面的重要价值，世界主要经济体均在产业发展层面给予高度重视。根据 Fortune Business Insights 发布的研究报告，全球农业微生物市场 2019—2024 年的复合增长率约为 14.6%，预计 2024 年细菌类、真菌类、病毒类产品的产值分别为 31.4 亿美元、13.4 亿美元、25.4 亿美元。

以动物、植物“二元结构”为特征的传统农业正在向动物、植物、微生物“三元结构”的新型农业转变 [1,4,5]，微生物在农业领域中的重要性得到了更多认识。发展农业微生物产业事关国家粮食安全保障和耕地质量提升，支持农业碳达峰、碳中和目标实现，促进可持续农业发展。保障国家粮食安全的压力始终存在，而微生物产业将在解决粮食可靠供给方面发挥积极作用。例如，以农业微生物为基础的白色农业，能够明显缓解现代农业中化肥和农药不合理使用产生的环境污染、作物病虫害频发、农业投入成本上升、农产品质量下降等问题；耕地质量是农业可持续发展的瓶颈，而微生物肥料、微生物农药等有利于改善土壤健康状态，促进耕地质量恢复。

近年来，我国农业微生物市场发展势头迅猛，而市场空间依然较大，如微生物肥料仅占肥料总用量的 10%。微生物及其相关技术开始向农业生产的诸多方面渗透，以微生物农药、菌肥、堆肥、微生物饲料等为代表的产品，其技术研究和生产应用取得一定进展 [3,6,7]。也要注意到，相比微生物技术在医学上的应用，农业微生物发展整体上仍处于初级阶段。因此，本文旨在开展农业微生物产业发展研究，识别农业微生物产业发展的特点、痛点、机遇，总结产业发展趋势，提出重点举措建议及对策，以期为农业微生物技术规划、产业研究等提供基础参考。

二、农业微生物产业发展趋势

（一）国家层面重视微生物产业发展布局，开始研究制定产业发展政策

多个国家制定了战略规划来推动本国微生物产业发展。美国将微生物组列入国家计划，形成了“微生物组技术对认知和理解农业系统运行至关重要”的结论，将之作为农业领域亟待突破的研究方向。在北美、欧洲等地区，有机农业、可持续农业理念更加深入，优质高产农作物、土地生产力、土壤健康等需求推动了微生物产品市场份额的增长。例如，德国拜耳公司抢先布局农业微生物产品，收购了开发细菌类微生物农药产品的 AgraQuest 公司、研发真菌类微生物农药产品的 Prophyta 公司，建立了先进的生物产品技术平台以完善公司产品结构；先正达集团股份有限公司与荷兰皇家帝斯曼集团合作开发了基于微生物的农业解决方案，建立了微生物筛选的专用研发平台。

我国尚未专门针对农业微生物产业发布政策文件，一般以农业产业、生物技术、微生物性质的政策作为依据。农业微生物产业作为种业、生物技术的重要环节，已经纳入国家层面的发展规划，如“十四五”规划纲要中加强种质资源保护利用和种子库建设、培育具有国际竞争力的种业龙头企业、深入实施农药化肥减量行动、推进秸秆综合利用和畜禽粪污资源化利用等内容；基因与生物技术列入七大科技前沿攻关领域，将生物技术作为九大战略

性新兴产业之一。管理部门以更为细化的形式明确了农业微生物产业的发展重点和方向，如《2020 年种植业工作要点》提出深入开展有机肥替代化肥工作，向长江经济带、黄河流域等区域倾斜；《科技部对十三届全国人大一次会议第 7313 号建议的答复》明确了有关微生物科技创新的支持举措，将在加强微生物资源保护、开发、利用，加快微生物研究在农业、食品、药物领域应用与产业化等方面进行部署。

（二）微生物种质资源开始发挥农业微生物产业的“芯片”作用

农业微生物种质资源指能够纯培养、具有一定研究与应用价值的细菌和真菌等，是整个微生物行业的核心，微生物学和生物技术研究、微生物产业持续发展的重要物质基础。性能优异的微生物菌种资源已成为农业微生物产业的核心关键，一个菌种支撑一个细分产业的现象趋于普遍。例如，阿维菌素曾是农用杀虫剂的重点产品，科研人员基于阿维链霉菌高产菌株的阿维菌素生物合成适配性体系，设计了高效生产高效阿维菌素的元件与模块，将阿维菌素产量提高了 1000 倍，市场价格下降至原来的 1/50 以下 [8]；阿维菌素的生产技术革新引领了农用抗生素产业的快速发展，也为其他天然产物生物制品的改良提供了启示和借鉴。

以原位培养、微流控培养、细胞分选、单细胞测序等为代表的新型培养技术逐步成熟，发展了多种“非定向”“定向”相结合的“未 / 难培养微生物”分离技术与方法，为发掘新的农业微生物资源创造了技术条件，也为获取优良菌种提供了基础。在后基因组时代，未培养微生物的分离培养将以基因组功能预测为基础，重点开展原位功能活性测试，从生理特点、代谢途径、营养需求等方面探析微生物可培养机理，从而获取性状优良的可培养农业微生物菌种资源。

从自然界中分离获得的野生菌种，通常不满足规模化生产要求，需要进行选育以获得优质高产的菌种。以合成生物学、高通量自动化筛选为核心的现代生物技术，为菌种改良提供了新手段，筛选效率较传统诱变方式高出千倍以上。生物信息大数据、基因编辑等技术，成为利用合成生物学技术对微生物进行更为精准的人工调控以实现更高效的定向进化，进而开展农业微生物菌种选育及改造的技术基础，相关研究正在引领微生物产业的创新发展。农作物微生物组技术可揭示作物微生物组的功能，阐明与农业有关微生物的特性、生命活动规律、作用过程调控机制，正处于从基础研究成果向田间应用转化的阶段，将为农业生产共性关键问题提供新的解决方案。

（三）基础研究和前沿技术进展助推农业微生物的技术革命

农业微生物领域的技术创新与成果转化进步显著。以我国为例，在 Web of Science 数据库中（截至 2021 年年底），农业微生物领域的发表论文数超过 1.3×10^4 篇；近 10 年的技术专利占比超过 90%。伴随着现代生物科学的发展，农业微生物研究进步迅速。多组学联用研究的深入，新一代测序、基因编辑、微生物组、新兴培养、合成生物、生物信息、人工智能、大数据等技术的突破，驱动微生物从传统单一功能菌株到合成功能菌株、从自然筛选菌株到人工设计菌株的重要转变，代表着农业微生物的新一轮技术革命。单细胞成像、分析检测、高通量筛选等方向取得了积极进展，显著提升了微生物资源的分离筛选、细胞工厂构建筛选等能力。微生物新技术的不断涌现，支持农业微生物开发成为战略性新兴产业，相应市场将主要由新技术、创新优良种质等推动。

（四）微生物资源鉴定精准化、功能评价系统化成为发展潮流

对微生物资源进行规模化、精准化鉴定评价，发掘满足现代农业发展需求的新型资源和基因，已经成为微生物利用领域的重要内容。在持续开展微生物资源的收集、保藏、应用开发等工作的同时，世界主要保藏中心正在由单一资源保藏机构转向包含评价、专业应用开发在内的综合性资源中心，注重将资源保藏与研发相结合，使高附加值化微生物资源得以充分利用。此外，随着微生物组研究的深入，针对微生物遗传资源、代谢物的合成生物学研究，生物制造先进技术和颠覆性技术开发是未来农业微生物领域的研究热点。

我国虽是微生物种质资源大国，但未进入种质资源强国行列，菌种资源的精准鉴评能力亟待提

升。微生物多样性高、代谢途径多样，然而大量具有优良性状的微生物资源“深藏库中无人识”：通过表型与基因型精准鉴定、用于育种创新的微生物种质资源比例不足10%，多数资源尚未进行有效的开发利用，资源优势未能转化为产业优势。精准鉴评微生物遗传资源，发掘适应现代农业发展所需的新资源和功能基因，是农业微生物利用的重要方向。基于农业微生物的资源、基因、蛋白、代谢物等的合成生物学研究与应用正在积极开展之中。

（五）多学科技术交叉与融合助力农业微生物智能制造和精准应用

大数据技术推动了农业微生物研究与应用朝着数据化模式发展，为农业微生物产业迈向现代化提供了新的支撑。物理、材料、计算机科学等学科与生命科学的交叉与融合，推动了生物成像、基因编辑、微生物组学等技术革新。测序技术的通量、准确度显著提高，基因编辑、合成生物学、现代生物信息学等促进了农业微生物产业的深刻变革。利用智能传感器、智能控制装备、深度学习等技术，构建发酵工艺的智能在线监测能力、微生物制造智能化技术与工艺体系，据此实现农业微生物产品的智能制造，逐步成为农业微生物产业的发展潮流。农业智能装备、大数据、人工智能、机器学习、区块链等技术，提供了异构数据的收集、分析、存储、共享、集成能力（及相应的高级分析方法），可实时监测日照、温/湿度、土壤养分、作物/养殖动物生长，水分、病原体、微生物在跨越土壤、动植物、环境时的循环运动过程以及病虫害情况。利用数据科学、信息技术实现农业微生物产品的精准应用，在动态变化条件下自动整合数据并进行实时建模，促进形成数据驱动的智慧管控及精准应用，成为重要的发展趋势之一。

（六）农业微生物产业成为资本市场的热点

农业微生物的研究和应用成为加快农业创新发展、提升农业科技竞争力的主导力量，国际农业强国已将微生物组列入农业领域五大亟待突破的方向。随着微生物技术的发展：农业微生物催生新产业发展，成为农业领域碳达峰、碳中和的核心途径。受良好前景的吸引，社会资本积极涌入农业微生物领域，微生物科技公司成为新兴的投资对象。美国Indigo Ag公司率先创建了农业微生物基因组信息数据库，获取了有利于植物营养和健康的微生物且增产提质效果明显，累计融资达到6.09亿美元。在我国，南宁汉和生物科技股份有限公司、甘肃中成德润生物科技有限公司、慕恩（北京）生物科技有限公司、成都新朝阳作物科学股份有限公司、北京蓝晶微生物科技有限公司等成功获得了融资，积极拓展微生物肥料、微生物菌剂、微生物农药、养殖替抗、农业面源污染治理、退化耕地质量提升等方面的业务。例如，慕恩（北京）生物科技有限公司选择农业作为微生物组产业化的应用方向，在多轮融资的支持下快速推动了植物微生物组产品线的产业化。

（七）农业微生物安全监管法规趋于完善

各国高度重视农业微生物，生物安全问题更为突出，相应的监管法规进一步规范。农业微生物菌种的精准鉴定、生物安全等级要求更为严格，环境安全评价已纳入菌剂产品的质量监督和管理程序。例如，不在农业微生物领域中使用溶血型枯草芽胞杆菌已成为共识，从而将该菌的限制使用从医药行业拓展至农业领域。转基因微生物的研发及产业化正在快速发展，突出问题便是对其进行有效的安全评价和法律监管；基因工程菌不能直接进行环境释放也成为多国的应用惯例。《中华人民共和国生物安全法》已经颁布和实施，“保护生物资源”“生物资源安全”成为法定事项，标志着生物安全进入依法治理的新阶段。

三、我国农业微生物产业细分领域发展现状

（一）微生物肥料

我国微生物肥料产业已经成为生物产业、生物经济产业的重要组成部分。微生物肥料标准体系相对全面，核心企业群基本形成。2021年，微生物肥料企业数超过2900个，产量约为2×10^7 t，产值约为400亿元。微生物肥料分为微生物菌剂、复合微生物肥料、生物有机肥等3种、11类产品，农业农村部登记证产品有9414个，相关产品的有效菌种由单一型向复合多效型过渡[9]。现阶段各省份均有微生物肥料菌剂的应用，其中以华中地区最多，华

北、西北地区次之，东北、华南地区较少。微生物肥料在30多种主要农作物生产环节得到应用，累积应用面积超过5亿亩（1亩≈666.67 m^2）[10]；以禾谷类农作物应用量最多，其次是纤维类、油料类。微生物肥料标准体系包括5个层面、近30个标准，为微生物肥料市场的菌种资源、产品生产、质量检验、产品使用、包装/储存全过程的规范化，监管部门的质量监督提供了依据，支持了微生物肥料产业的稳健发展[11]。

（二）饲用微生物产品

我国微生物饲料添加剂产业尚处起步阶段，相关企业约有400家，年销售额约为20亿元，企业的平均规模不大。2018—2020年，饲料添加剂总产量年均增长率为12%，其中饲用微生物添加剂年均增长率为21%[12]。按照饲料生产量、养殖动物总量计算，微生物饲料添加剂的国内市场容量约为180亿~200亿元，而目前的市场普及率仅约10%，产业发展前景广阔。在养殖业实施“禁抗令”的背景下，微生物饲料添加剂成为替代养殖用抗生素的重要种类，相应的科研资金投入加大，安全高效的新产品不断推出。

（三）微生物农药

在我国，随着环保问题受重视程度的提高，使用化学农药受到越来越多的限制，因而市场对农用微生物制剂的需求稳步增长。微生物制剂的研发成本逐渐降低、研发周期合理缩短，植保市场更加偏向微生物制剂，相应的发展空间广阔。目前获得广泛应用的微生物农药有井冈霉素、苏云金杆菌、赤霉素、阿维菌素、春雷霉素等。截至2021年，我国取得登记的微生物农药有效成分有47种，占农药有效成分的比重为7%；微生物农药产品有542种，占农药产品的比重为1.3%[13]。然而，微生物农药产业存在着企业规模小、竞争力弱、技术装备水平低、产品结构单一、难以提供系统解决方案等问题。

（四）农业酶制剂微生物产品

我国酶制剂企业主要生产淀粉酶、糖化酶等传统酶制剂，而传统酶制剂的供应出现了同质化严重、技术含量偏低、市场竞争激烈、产能明显过剩等现象。《2020—2026年中国酶制剂市场竞争策略及投资可行性研究报告》数据显示，2020年农用酶制剂领域酶制剂产量为2.24×10^5 t（增长率为15%）；其中饲料添加剂中的酶制剂产量为1.35×10^5 t（增长率为10.8%），混合型饲料添加剂中的酶制剂产量为8.9×10^4 t（增长率为22.2%）[14]。在新型生物酶领域，国际先进企业拥有核心技术方面（如新菌种、新基因等）的先发优势；国内企业正在积极实施技术升级，着力开发新型酶制剂产品并扩大应用范围。

（五）农业废弃物资源化利用

我国是农业生产大国，每年有大量的农业废弃物产生，相应的处理需求极大。2020年，农作物秸秆综合利用率为91.6%，其中秸秆肥料化利用率为56.7%，饲料化利用率约为8%，农作物秸秆堆肥处理占比约为20%[15]。2019年，禽畜粪便综合利用率为70%，肥料化是主要的综合利用方式（占比约为58%）；预计2025年畜禽粪污综合利用率可达80%[16]。在禽畜粪便的肥料化处理过程中，堆肥处理占大部分；禽畜粪便经微生物发酵、除臭处理后，结合后续工艺可制成复合微生物肥料等产品。

四、我国农业微生物产业发展面临的挑战

（一）农业微生物种质资源发掘、保护、共享利用

1. 农业微生物资源拥有量不足，菌种和数据库的对外依赖度高

我国农业微生物资源专业菌种库可公开获取的库藏资源总量约为1.75×10^4株，而世界最大的农业微生物资源库保有可公开获取的细菌和真菌资源总量约为9.8×10^4株，说明我国农业微生物总保有数量方面不占优势。发达国家利用规则制定、科技研发方面的先发优势，在微生物菌株资源方面占有主导权。我国是最大的微生物菌种资源进口国，在基础研究和生产应用领域都对进口菌株资源、生物信息大数据形成依赖，如我国近10年发表的细菌新物种约为2700个，而引进的模式菌超过9700株。然而，随着各国加强包括微生物在内的遗传资源保护力度并提升生物安全的重视程度，国际保藏机构对微生物菌种的出口更为谨慎；特别是自新型冠状病毒肺炎（COVID-19）疫情暴发以来，用于科学研究的常规菌种，其引进工作已显困难。

发达国家对生物大数据进行了有效管理和利

用，如欧洲、美国、日本的三大核酸数据库掌握并管理了全世界的生物数据。2021年，美国国家生物技术信息中心的核酸数据库共包括1.063×10^8条序列，其中来自于中国的序列数目占比为37.54%。我国是生物数据产出大国，但没有建成具有国际影响力的生物数据库。在生物大数据、生物高技术出口管控趋于增强的背景下，我国获取外部微生物菌种基因资源、生物大数据的能力存在弱化的风险。尽快追赶发达国家生物大数据技术，构建自主可控的生物大数据并进行有效保护和管理，是我国农业微生物产业发展的迫切问题。

2. 农业微生物资源保藏量与质量脱节，大规模挖掘尚未开展，产业链源头创新能力不足

根据世界菌种保藏联合会（WFCC）统计，2021年中国微生物资源总保有量约为4.23×10^5株（占世界总量的比例为15%），专利菌种保藏数量约为3.72×10^5株（占世界总量的比例为28.8%），绝对数量并不少；而我国的专利菌株发放率仅为3.3%，远低于10%~500%的世界先进水平。菌种的共享率体现了他人对某个菌株的需求程度，能一定程度上反映菌株的质量与价值。因此，我国保有的微生物资源质量不高，核心优良菌种成为微生物资源开发与利用的瓶颈环节。

还要注意到，我国自然微生物资源极为丰富，但优质微生物遗传资源数量的占比偏低，同国外相比存在一定差距，难以满足日益增长的新型微生物菌种和遗传资源需求。例如，我国益生菌的年产值超过500亿元（约占世界产值的17%），而优良菌种的自主供给率不足10% [4]。

3. 全国性的普查勘探尚未开展，农业微生物遗传资源状况缺乏全面掌握

我国是12个高度生物多样性国家之一，收集保存的微生物资源较美国、德国等发达国家在多样性上存在差距，尚有大量微生物遗传资源没有得到应有认识。由于没有开展有目的、有计划、系统性的国家级微生物资源普查项目，我国微生物遗传资源量、分布现状、资源变化状况等基础资料相对匮乏，在空间尺度上存在部分考察空白区域，制约了相关资源的收集保护和有效利用。我国虽已部署代表性生态系统微生物资源的调查工作，但科学考察与调查的数据没有进行及时补充和更新，对生态环境脆弱区生物资源考察的重视程度也显淡薄。

4. 农业微生物资源保护体系不完善，种质安全保障能力待提高

根据WFCC统计，目前我国微生物菌种保藏库共有52家，其中国家库9家，地方库43家，数量并不少。这些保藏库分布于17个省份，但各区域分布不均衡，如北京市的保藏中心高度集中，华南地区缺少国家库，16个省份无保藏中心。我国构建了中国农业微生物菌种保藏管理中心（国家级保藏机构）牵头，食用菌、乳酸菌、芽胞杆菌、根瘤菌、苏云金芽胞杆菌、厌氧菌、菌根菌等专业型保藏机构相结合的微生物资源收集保藏工作体系。然而，有超过50%的微生物遗传资源分散存放在科研院所和高校，受限于保藏条件和专业性参差不齐、保藏质量标准不统一，相应遗传资源的长期安全保藏难以保障。目前，我国没有建立成熟的资源集成机制和保护体系，未能将分散的资源进行有效集成和规范管理；保护体系层次与布局有待完善，资源散失的风险较高。

（二）基础研究与核心技术研发

1. 农业微生物核心种质资源获取、选育、鉴评研究能力薄弱

优良菌种是微生物种业发展的关键，但核心优良菌种的自主率极低，严重制约了微生物产业的发展水平。例如，我国氨基酸产业年产值超过500亿元，约占世界产能的60%，而优良菌种自主率不足5% [17]。近年来，我国在微生物种质资源发掘与应用方向取得进展，但基础理论、分离技术、资源评价与选育、资源深度挖掘及鉴评技术、绿色制造技术、合成菌群技术等较世界先进水平仍有差距。例如，我国农产品加工用高端酶生产菌株长期依赖进口，国外厂商垄断了主要的专利菌种。我国是食用菌生产大国（产量的世界占比约为75%），但许多工厂化栽培的食用菌菌种（如金针菇、蟹味菇母种）长期依靠进口；不合理地承担了使用进口菌种的风险，出现断供问题的可能性不能排除。

2. 微生物菌剂产品应用受农业环境、宿主等的影响机理不清，使用效果不稳定

对农业微生物产品效果的制约因素认识还不深入，成为农业微生物产品使用效果不稳定的直接原因。微生物肥料的使用效果通常受土壤环境、气候条件、作物种类等的影响，存在效果不佳或者不稳

定的情况。饲用微生物添加剂在动物机体的肠道微环境中易受多种因素影响，微生物饲料添加剂发挥益生作用的机制比较复杂。科研人员开始关注产业发展问题背后的科学问题，揭示这些科学问题将促进产业的高质量发展。例如，2021 年中国农业科学院农业资源与农业区划研究所研究团队提出了微生物肥料菌种芽胞杆菌应对植物免疫实现根际定殖的新策略，为促进肥料微生物在植物根际定殖、改善微生物肥料施用技术提供了理论参考 [18]。

3. 农业微生物科技创新和产业发展的基础研发投入不足

现阶段，我国农业微生物研发偏重基础研究，产业化生产关键技术及平台未能得到足够重视；相关企业规模普遍较小，研发投入力度有限，不利于行业技术升级和产品更新。从产业格局看，大型跨国微生物制剂企业占据了农业微生物菌剂市场的主导地位，而我国企业产业集成度低、规模零散，国际市场竞争力不足。虽然社会资本已经进入农业微生物产业，但技术研发仍依赖政府投入。农业微生物高新技术研发未能实现市场化导向，这是造成技术创新不足、产业发展滞后的重要因素。近年来，在科研项目运作思路上开始有所调整，如“揭榜挂帅”关键核心技术攻关类项目等，但相关评价、管理模式等仍待进一步深化。

（三）企业发展与产品研发

1. 企业数量多而规模小，市场集中度低，产业集群待形成

随着人们对植物 – 微生物互作认识的加深，基于农作物微生物技术的产品正在推向市场，在减少化学肥料使用、提高农产品产量与品质方面展现了良好前景。然而，农业微生物行业整体呈现“大而不强”的态势，除少数龙头企业外，多数企业生产规模小、研发能力低、微生物高新技术转化实力不足。我国微生物产业处于升级发展的过渡阶段，受限于市场惯性，国产品牌和产品的竞争优势不明显。相比之下，国际龙头企业开发了一系列极具市场竞争力的产品，如诺维信公司的 Quick Roots 菌剂产品、孟山都公司的玉米微生物种衣剂、以色列拉姆拉特种肥公司的系列微生物复合菌剂都取得了良好的经济效益和生态效益。随着国际市场竞争更显激烈，我国微生物企业在核心原料、技术、产品等方面可能面临复杂局面；受 COVID-19 疫情影响，微生物产业链重塑的风险加大，成为产业发展需要关注的因素。

2. 产业链源头创新能力不足，低端产品同质化现象严重

农业微生物产业链的源头是优异菌种资源，而国内在此方面的创新研发能力不足。核心菌种缺乏是重要原因，导致了市场混乱和龙头企业缺失。相关企业侧重于扩大市场规模，而核心竞争力升级未能置于重要位置。农用菌剂产品种类众多，但生产用菌种同质化、产品组合雷同、更新换代慢、针对性不强。有关农业微生物产品生产、销售、使用等环节的科学问题认识不清，导致微生物制剂的货架期较短、使用效果不稳定，成为制约农业微生物市场发展的主要因素之一。菌种保藏、功能复壮技术有待提升，微生物菌种的功能挖掘、农业应用深度等均有不足。例如，发酵培养基成分、发酵工艺、加工工艺对微生物生理状态的影响研究分散而片面，没有系统性；微生物菌剂活性保持技术研究较少，微生物细胞诱导休眠技术和激活技术开发几乎空白；新型菌剂基质、辅剂以及加工处理、运输、贮存技术研究力度不够。

（四）行业标准和知识产权管理

在微生物菌种知识产权保护方面，虽有《中华人民共和国专利法》等相关产权保护法律，但因微生物菌种容易复制和流失，加之同一物种不同菌株的生产性状差异明显，开展微生物菌种产权的有效保护仍是难题。由于微生物菌种产权保护力度不足，相关企业从事前期菌种研发的积极性不高，这是市场上产品同质化的原因之一。此外，微生物菌种具有特殊性，知识产权方面的维权工作比较困难。

在生产方面，农业微生物行业标准体系不完善，导致产品质量参差不齐，给产品检测、销售、市场监督带来了不便。肥料微生物产业标准相对完善，产业链全过程均有标准可依，为确保质量安全、规范生产过程、实施质量监督提供了直接依据；但是随着行业发展、产品种类丰富，标准制定及市场监管已显滞后。饲用微生物行业标准体系建设明显滞后，存在着标准品种不足、名称不统一、引用文件及技术要求不恰当、指标描述不规范、指标设置不合理、无复合产品标准等问题 [12,19,20]。

五、我国农业微生物产业发展建议

（一）加强顶层设计和政策支持，提升农业微生物产业核心竞争力

从基础研究、应用基础研究的角度看，应关注功能微生物与农作物、养殖动物、环境要素之间的互作关系，参与地球生物化学循环、调控微生态平衡的作用机理；进一步深化活性物质、功能基因、代谢途径、表达产物的功能/调控/机制研究以及合成生物学改造研发。择机开展全国性的微生物资源普查专项，加强核心菌种资源的规模化挖掘和评价，为种业高质量发展筑牢物质基础。基于优质资源，建立典型农业生态系统功能微生物的基因组、代谢组、蛋白组学信息数据库；利用生物信息学、合成功能菌群、现代生物技术，系统解析关键菌种的潜在功能活性，选育并创制高效工程菌种、人工合成菌群。

建议设立农业微生物产业相关的政策制定与评议机制，涵盖管理部门、行业协会、科研机构、企业，从法律法规、财政政策、创新支持等方面统筹发展举措。构建的政策体系着力于促进行业关键共性技术、前沿引领技术、“卡脖子”技术、颠覆性技术等的突破，应有较强的可操作性；在生物技术快速发展的背景下，及时评价产业政策实施效果，调整阻碍产业发展的政策内容，提高政策实施的精准度，保持产业发展的活力。营造公平竞争环境，健全市场监管体系，据此促进农业产业结构的优化调整。

（二）建设国家农业微生物资源数据信息系统、国家微生物种质资源科学大装置

建议择机推动国家微生物种质资源科学大装置建设，形成超大型微生物资源库、模式与标准菌株库、区域特色菌株库、生物遗传信息库。利用现代信息技术，建立微生物资源数据库与信息服务系统，提升菌种资源管理的信息化和网络化水平。进一步完善现有资源库的数据信息，收集包括微生物资源采集信息、生理生化信息、核酸序列信息、标记分子指纹图谱信息在内的生物资源信息，形成记载微生物资源完善性状特征和潜在应用前景的信息数据库。高效筛选并准确评价微生物的菌种、基因、代谢产物的应用价值，获得具有产业化应用前景的核心菌株、复合微生物体系、基因、酶及其他代谢产物。

运用现代信息技术，充分整合微生物种质资源实物库、微生物基因数据库、微生物资源信息库。建立生物信息学数据处理、功能分析、结构设计等专业软件环境，网络技术、大数据分析等特色功能，提升全国范围内微生物资源的数据共享水平。建设包括农业微生物优异菌种资源挖掘、发酵工艺开发、中试放大生产在内的协同开发技术体系，解决实验可重复、实验数据标准化、实验设施开放共享等科研共性问题，推动云端实验室平台辐射全国。

（三）实施基础研究和前沿关键技术突破，将微生物种业纳入现代种业体系

发展农业微生物资源发掘技术，揭示典型农业生态系统和农业过程中的微生物资源多样性；实施微生物组、未/难培养微生物分离培养等国家级研究项目，加强本土功能微生物资源发掘力度，形成农业生态系统关键未/难培养微生物类群，提升国家微生物资源的多样性与总量。

加强本土高性能菌株的选育力度，突破微生物种业的关键共性技术体系，培育具有自主知识产权的重大微生物资源品种系列；解析微生物组中与优异农艺性状、地域特色密切相关的关键类群，分离筛选关键核心菌株；获得具有农业领域应用前景的微生物菌株、复合微生物体系、基因、酶及其他代谢产物，协同开展微生物资源储备、研究评价、开发利用，提高实际应用成效。

开展农业微生物产品创新研究，突破从高性能菌株到高性能产品所需的关键技术。构建包括关键菌株的培养发酵技术、产品应用效果、环境条件优化在内的全链条科技服务，提升农业微生物产业技术创新能力，为农业可持续发展提供微生物技术层面的解决方案。通过“研产”结合，逐步提高微生物种业在现代种业体系中的地位，增强微生物种业的市场竞争力。

（四）构建农业微生物产业发展平台，支持领域创新体系建设

构建农业微生物产业集群，形成健康可持续的产业发展模式。成立国家农业微生物种业科技创新

联盟，通过广泛的联合与协作，突破微生物产业的关键共性技术体系。设立国家农业微生物工程技术研究中心、微生物农业科技产业基础条件与设施、农业微生物产业技术示范基地，促进高效产业技术的成熟与应用。建立农业微生物产业化示范基地，发展具有国际竞争力的产品系列，依靠优势技术和政策引导性投入来驱动优势企业成长。

建设科学高效且相对完整的农业种质资源、微生物种质资源保护体系，涵盖总库、区域中心、专业分库等。兼顾异地保护、专业类型、地域布局等因素，完善微生物遗传资源收集与保藏体系的层次及布局；重点建设分散资源的有效集成与保护体系、微生物遗传资源数据信息系统、国家综合性微生物遗传资源长期备份库。

构建新型国家农业微生物产业共建共享体系，形成国家农业种质资源共享共用交易平台，推动微生物菌种、组学大数据、专利、科技文献、仪器设备、专家队伍、分离筛选技术、保藏技术、产业化产品、高价值成果等资源的多元化开发利用，充分激活农业微生物产业资源。

（五）建设农业微生物产业的法律法规体系，加强生物安全与科学伦理工作

制定和完善我国农业微生物产业的法律法规体系，注意与《〈生物多样性公约〉关于获取遗传资源和公正公平分享其利用所产生惠益的名古屋协定书》的配套。加强微生物种业管理体系建设，明确微生物种业发展、菌种资源管理、微生物安全等级等方面的法律法规。优化现有的管理制度及法规，确立新研发功能菌种资源的知识产权保护政策，支持学术界在现有国际法律法规框架下参与制定国际规则。

强化农业微生物种质资源保护利用政策，规范开展保护单位确定、资源登记等工作。研究适应微生物特点的种质资源管理办法和知识产权保护制度，如菌种溯源制度等。应用基于分子生物学的菌种编码唯一性检测系统等研究成果，构建菌种溯源标签系统，维护新资源菌株选育者的合法权益，提升农业微生物领域的知识产权保护水平，根本性改善当前市场上微生物产品种类同质化、产品维权难的局面。

在管理和科研层面，需加强农业微生物产业的生物安全与科学伦理工作，构建相应的指导性规则体系以支持领域的有序发展；行业协会、企业参与建立行业层面的伦理共识，明确行业中生物安全和伦理“红线”，保障农业微生物产业和相关生物技术的良性发展。

参考文献

[1] 李俊, 沈德龙, 林先贵. 农业微生物研究与产业化进展 [M]. 北京: 科学出版社, 2011.
Li J, Shen D L, Lin X G. Agricultural microbiology research and industrialization progress [M]. Beijing: Science Press, 2011.

[2] 曹志强. 自然界最基本循环和微生物农业 [J]. 中国科学院院刊, 2011, 26(5): 570–576.
Cao Z Q. The basic cycles in the nature and microbial agriculture [J]. Bulletin of the Chinese Academy of Sciences, 2011, 26(5): 570–576.

[3] 朱将伟. 微生物及其相关技术在农业领域的应用探讨 [J]. 绿色科技, 2020 (24): 231–232.
Zhu J W. Discussion on the application of microorganism and related technology in agriculture [J]. Journal of Green Science and Technology, 2020 (24): 231–232.

[4] 杜娟, 马连营, 马爱进, 等. 我国微生物产业发展战略研究 [J]. 中国工程科学, 2021, 23(5): 51–58.
Du J, Ma L Y, Ma A J, et al. Development strategy of microbial industry in China [J]. Strategic Study of CAE, 2021, 23(5): 51–58.

[5] 陆建中, 林敏, 邱德文. 我国农业微生物产业发展战略与对策 [J]. 中国农业科技导报, 2007, 9(4): 22–25.
Lu J Z, Lin M, Qiu D W. Development strategy and counter measures for agricultural microorganism industry in China [J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2007, 9(4): 22–25.

[6] 张帆, 韩淑敏, 李琦, 等. 微生物饲料添加剂在现代畜禽养殖中的应用 [J]. 畜牧与饲料科学, 2019, 40(1): 60–62.
Zhang F, Han S M, Li Q, et al. Application of microbial feed additives in modern livestock and poultry breeding [J]. Animal Husbandary and Feed Science, 2019, 40(1): 60–62.

[7] 刁润丽. 农业废弃物的资源化利用及问题分析 [J]. 广西农学报, 2021, 36(2): 60–63.
Diao R L. Resource utilization and problem analysis of agricultural waste [J]. Journal of Guangxi Agriculture, 2021, 36(2): 60–63.

[8] 文莹, 张立新. 阿维菌素的中国“智”造 [J]. 遗传, 2018, 40(10): 888–899.
Wen Y, Zhang L X. Avermectins, intelligently made in China [J]. Hereditas, 2018, 40(10): 888–899.

[9] 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. 登记产品 [EB/OL]. (2021-12-30)[2022-05-15]. http://www.biofertilizer95.cn/zhdjcpml.
Center for Quality Supervision and Test for Microbial Fertilizers and Mushroom Spawn, Ministry of Agriculture and Rural Affairs. Register products [EB/OL]. (2021-12-30)[2022-05-15]. http://www.biofertilizer95.cn/zhdjcpml.

[10] 李俊, 姜昕, 马鸣超. 新形势下微生物肥料产业运行状况及发展方向 [J]. 植物营养与肥料学报, 2020, 26(12): 2107–2114.
Li J, Jiang X, Ma M C. Situation and development direction for microbial fertilizer industry in the near future of China [J]. Journal

of Plant Nutrition and Fertilizers, 2020, 26(12): 2107–2114.

[11] 农业农村部微生物产品质量监督检验测试中心(武汉). 标准规范 [EB/OL]. (2021-12-30)[2022-05-15]. http://wzj. hzau. edu. cn/bzgf.htm.
The supervision, Inspection & Testing Center of Microbial Products Quality, Ministry of Agriculture and Rural Affairs(Wuhan). Standards [EB/OL]. (2021-12-30)[2022-05-15]. http://wzj. hzau. edu.cn/bzgf.htm.

[12] 中国饲料工业协会网. 行业分析 [EB/OL]. (2021-12-30)[2022-05-15]. http://www.chinafeed.org.cn/hyfx/.
China Feed Industry Association Network. Industry analysis [EB/OL]. (2021-12-30)[2022-05-15]. http://www.chinafeed.org.cn/hyfx/.

[13] 张宏军, 陶岭梅, 刘学, 等. 我国生物农药登记管理情况分析 [J]. 中国生物防治学报, 2022, 38(1): 9–17.
Zhang H J, Tao L M, Liu X, et al. Review on registration and management of bio-pesticide in China [J]. Chinese Journal of Biological Control, 2022, 38(1): 9–17.

[14] 毕心宇, 吕雪芹, 刘龙, 等. 我国微生物制造产业的发展现状与展望 [J]. 中国工程科学, 2021, 23(5): 59–68.
Bi X Y, Lyu X Q, Liu L, et al. Development status and prospects of microbial manufacturing industry in China [J]. Strategic Study of CAE, 2021, 23(5): 59–68.

[15] 李自蕊, 龙济芝, 胡广昌, 等. 农作物秸秆综合利用 [J]. 云南农业, 2022 (2): 21–23.
Li Z R, Long J Z, Hu G C, et al. Comprehensive utilization of crop straw [J]. Yunnan Agriculture, 2022 (2): 21–23.

[16] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 关于推进污水资源化利用的指导意见 [EB/OL]. (2021-01-11)[2022-05-15]. https://www.ndrc.gov.cn/xwdt/tzgg/202101/t20210111_1264795_ext.html.
National Development and Reform Commission. Guidelines on promoting the resource utilization of sewage [EB/OL]. (2021-01-11)[2022-05-15]. https://www.ndrc.gov.cn/xwdt/tzgg/202101/t20210111_1264795_ext.html.

[17] 关丹, 李燕军, 陈宁. 氨基酸产业现状及生产菌株选育技术 [J]. 发酵科技通讯, 2018, 47(2): 110–114.
Guan D, Li Y J, Chen N. Amino acid industry status and strain breeding technology [J]. Bulletin of Fermentation Science and Technology, 2018, 47(2): 110–114.

[18] Zhang H H, Liu Y P, Wu G W, et al. Bacillus velezensis tolerance to the induced oxidative stress in root colonization contributed by the two-component regulatory system sensor ResE [J]. Plant, Cell & Environment, 2021, 44(9): 3094–3102.

[19] 中国饲料工业协会网. 饲料标准 [EB/OL]. (2021-12-30)[2022-05-15]. http://www.chinafeed.org.cn/slbz/.
China Feed Industry Association Network. Feed standards [EB/OL]. (2021-12-30)[2022-05-15]. http://www.chinafeed.org.cn/slbz/.

[20] 王以燕, 袁善奎, 农向群, 等. 我国微生物农药产品质量、安全性评价和使用技术相关标准 [J]. 农药, 2021, 60(12): 872–877.
Wang Y Y, Yuan S K, Nong X Q, et al. Current situation of standards for quality control, risk assessment and application technology of microbial pesticides in China [J]. Agrochemicals, 2021, 60(12): 872–877.