

◆ 提质增效产品创制技术 ◆

强化养分资源高效利用的微生物肥料创制 关键技术与展望

梅瀚杰, 王 好, 危军伟

(湖北富邦科技股份有限公司, 湖北 武汉 430206)

[摘要] 当前全球农业面临化肥过量投入与利用率低下的双重困境, 亟须探索养分管理的新范式。本文旨在系统综述微生物肥料与传统矿质肥料协同增效的理论基础与应用技术, 重点解析“功能微生物-肥料-作物-土壤”多维互作体系中提高肥料利用率的核心机制。首先梳理从单一微生物接种剂向微生物-化学肥料协同产品转型的演进历程; 进而从土壤养分形态转化、根系构型与生理调控、根际微生态网络重构及生态环境效应4个维度, 深入阐释协同增效的生物学机制。在此基础上, 重点探讨基于合成生物学的菌种资源挖掘、新型功能载体与智能控释制剂创制以及微生物-化肥协同配方等关键产业化技术。最后, 针对当前产品质量稳定性差、标准缺失及推广壁垒等挑战, 提出融合精准营养管理与磷氟工程资源化利用的创新发展路径, 为构建绿色、低碳、高效的新型肥料产业体系提供理论支撑与战略建议。

[关键词] 微生物肥料; 创制; 协同增效; 根际微生态; 合成生物学; 展望

[中图分类号] S144; TQ44 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 2097-4566 (2026) 02-0047-10

Key technologies and prospects for creating microbial fertilizers enhancing utilization efficiency of nutrient

MEI Hanjie, WANG Hao, WEI Junwei

(Hubei Forbon Technology Co., Ltd., Wuhan 430206, China)

Abstract: Global agriculture currently faces the dual dilemma of excessive chemical fertilizer input and low nutrient use efficiency, necessitating a new paradigm in nutrient management. This review aims to systematically synthesize the theoretical foundations and application technologies of the synergy between microbial fertilizers and traditional mineral fertilizers, with a focus on deciphering the core mechanisms enhancing fertilizer efficiency within the “functional microbe-fertilizer-crop-soil” multi-dimensional interaction system. The paper first traces the evolutionary transition from single microbial inoculants to synergistic microbial-chemical fertilizer products. It then deeply elucidates the biological mechanisms of this synergy across four dimensions: Soil nutrient transformation, regulation of root system architecture and physiology, rhizosphere microbiome network reconstruction, and ecological environmental effects. Building on this, the review highlights key industrialization technologies, including synthetic biology-based strain mining, the creation of novel functional carriers and smart controlled-release formulations, and microbial fertilizer chemical fertilizer ternary coupling formulas. Finally, addressing challenges such as product instability, lack of standards, and adoption barriers, the innovative development pathways integrating precision nutrient management and phosphorus-fluorine engineering resource utilization are proposed, providing theoretical support and strategic recommendations for building a green, low-carbon, and efficient new fertilizer industrial system.

Key words: microbial fertilizer; creation; synergistic efficiency; rhizosphere microecology; synthetic biology; prospect

收稿日期: 2025-12-31

作者简介: 梅瀚杰(1994—), 男, 广东台山人, 硕士, 工程师, 主要从事高价值小分子的生物合成。

通信作者: 危军伟(1996—), 男, 湖北天门人, 博士, 工程师, 主要从事合成生物学研究与农业投入品开发工作。

基金项目: 湖北省农业微生物产业发展重大专项(NYWSWZX2025-2027-07); 湖北省农业关键核心技术攻关项目(HB NYHXGG2025-1)

1 农业绿色转型背景下的肥料提质增效：挑战与新范式

1.1 挑战

现代农业的高度集约化发展严重依赖化学肥料的投入，然而这种模式正面临严峻的可持续性挑战。据统计，全球化肥消费量持续攀升，但氮肥(N)和磷肥(P)的当季利用率普遍偏低，造成了巨大的资源浪费与环境负荷^[1]。最新的农学与生态生理学研究指出，全球范围内的氮素利用效率仍有较大提升空间，低下的氮素利用效率不仅增加了生产成本，还直接导致了硝酸盐淋失和氧化亚氮(N₂O)排放等环境风险^[2]。特别是在气候变化的背景下，氮肥施用已成为农业温室气体排放的主要来源之一，研究表明氮肥在“农田门口”的排放贡献率显著，对实现农业碳达峰、碳中和目标构成了巨大压力^[3]。此外，传统尿素等氮肥在施用过程中面临严重的氨挥发问题，损失比例可达5%~40%，这不仅降低了肥效，还对区域空气质量和生态系统造成了负面影响^[4]。随着循环农业理念的兴起，依赖传统矿质肥造成的资源枯竭压力(如磷矿石)日益凸显，促使学术界和产业界开始探索营养回收策略与新型肥料替代方案^[5]。因此，解决“高投入、低效率、环境压力”问题的思路，从单一的化学调控转向结合分子机制与生态系统过程的综合营养管理，已成为农业可持续发展的必然选择^[6]。

1.2 微生物肥料与传统化肥协同增效的提出与发展

为应对上述挑战，利用植物-微生物互作来提高化肥利用率的理念应运而生。ADESEMOYE等于2010年率先明确提出了通过植物根际促生菌(PGPR)与减量化肥配施，实现“减肥增效”的理论框架，奠定了协同增效思想的基础^[7]。回顾微生物肥料的发展历程，经历了从早期的单一菌种接种，到复合菌群构建，再到如今与化肥、有机肥深度融合的商品化制剂阶段，其内涵与外延不断拓展^[8]。现代定义中的生物肥料(Biofertilizers)不仅包含提供营养的固氮、解磷微生物，还涵盖了通过调节激素平衡和增强抗逆性来间接提高养分吸收的微生物类群，其核心目标已从单纯的替代化肥转向与化肥的集成管理与协同增效^[9]。当前，微生物接种剂正逐渐被视为可持续农业的关键投入品，其研发重点已从单纯的菌剂开发转向涵盖营养型、生防型及综合型的多元化产品体系^[10]。生物肥料与化肥的科学配伍，不仅能显著提高作物的养分吸收效率，还能通过改善土壤健康实现“减量增效”^[11]。

这一转变标志着农业施肥范式正在发生深刻变革，即从“化肥为主、微生物为辅”的传统模式，向“化肥+微生物协同驱动，甚至生物主导”的新型营养管理模式跨越^[11]。尽管目前实验室成果向田间转化的过程中仍存在产品配方与施用技术的差距，但配方创新和组合施用已成为主流趋势^[12]。未来的生物肥料创新将聚焦于解析其提高养分利用率的具体机制，并通过优化菌-肥互作路径，实现对传统化肥的高效替代或协同^[13]，这正是本文深入探讨的核心议题。此外，对PGPR主要功能模块(如固氮、溶磷、铁载体产生)的深入理解，也为设计下一代协同增效产品提供了坚实的生物学基础^[14]。

2 微生物肥料与传统肥料协同增效产品的类型与发展现状

2.1 微生物肥料的主要类型及功能定位

微生物肥料的功能实现依赖于核心菌株的特性。目前的生物技术进展将植物根际促生菌(PGPR)划分为几大关键功能群，包括生物固氮菌、解磷菌、解钾菌等，同时丛枝菌根真菌(AMF)等作为重要共生真菌，它们通过直接或间接机制促进植物生长^[15]。从功能定位上看，这些微生物肥料被精准定义为通过生物过程强化植物营养获取的制剂：固氮菌通过生物固氮酶将大气中的氮转化为植物可利用的铵态氮；解磷菌和解钾菌则通过分泌有机酸或酶类溶解土壤中的难溶性矿物养分^[11](见表1)。

ALZATE等的研究特别强调了PGPR在植物-微生物根际互作中的角色，指出其不仅是养分的供给者，更是根际营养信号的调控者，通过调节根系构型显著提升作物对化肥的捕获能力^[16]。在生化代谢层面，这些微生物通过复杂的代谢通路发挥作用，包括合成植物生长素(IAA)促进根系发育、产生ACC脱氨酶降低植物乙烯水平以缓解胁迫、分泌铁载体改善微量元素吸收等^[17]。以*Bacillus*属细菌为例，经过40年的研究与应用，其已从单一的生防或促生菌株，发展成为具备多种植物益生功能的通用型底盘生物，是构建协同增效产品的核心资源^[18]。摩西球囊霉菌与白僵菌协同诱导烟草合成病程相关蛋白，使叶斑病发生率降低37%，同时氮吸收效率提升22%。微生物菌剂通过分泌IAA刺激番茄根系伸长区扩展35%，使产量增加17.4%^[19]。总体而言，各类功能微生物在氮素固定、磷酸盐溶解及植物激素调节等方面的模块化功能，构成了微生物肥料与传统化肥协同增效的生物学基石^[14]。

表1 主要功能微生物类型及其在肥料协同增效中的作用机制

Table 1 Main types of functional microorganisms and their mechanisms in synergistic fertilizer efficiency

功能分类	代表性微生物	核心作用机制	与肥料协同增效的贡献
生物固氮	<i>Rhizobium</i> (根瘤菌属)、 <i>Azospirillum</i> (固氮螺菌属)、蓝藻	利用固氮酶系将大气氮(N ₂)转化为铵态氮(NH ₄ ⁺)	替代部分化学氮肥投入,减少氮肥流失与环境污染
磷素活化	<i>Bacillus</i> (芽孢杆菌属)、 <i>Pseudomonas</i> (假单胞菌属)、 <i>Aspergillus</i> (曲霉属)	分泌有机酸溶解难溶性矿物磷;分泌磷酸酶矿化有机磷	活化土壤沉积磷,减少外源磷肥在土壤中的固定,提高当季利用率
钾素活化	硅酸盐细菌(如胶质芽孢杆菌)	通过酸解与络合作用破坏矿物晶格,释放钾离子	释放土壤矿物钾库,提升钾肥及土壤本底钾的有效性
根系促生	PGPR (如 <i>Bacillus velezensis</i>)	合成植物生长素(IAA)、细胞分裂素;产生ACC脱氨酶降低乙烯水平	促进侧根与根毛发育,显著增加根系与肥料的接触面积和吸收能力
菌根共生	丛枝菌根真菌(AMF)	菌丝形成的庞大网络扩展根系吸收范围	协助作物获取磷、锌等难移动养分,增强作物抗逆性

2.2 微生物肥料与化肥协同增效产品的分类与特征

为了克服微生物制剂单独使用时效果不稳定及化肥利用率低的缺陷,通过制剂技术将二者有机结合的协同增效产品应运而生。这类产品依据物理形态和功能组合进行分类,主要包括液体接种剂、固体载体菌剂以及复合型/综合型产品^[20]。具体到协同增效的技术路线,可进一步细分为:(1)微生物与化肥颗粒复混,即在造粒过程中加入耐逆境的孢子态菌种;(2)微生物包衣/种衣剂+常规施肥模式,利用微生物膜层实现种肥同播;(3)微生物有机肥+减量化肥的综合管理模式^[10]。与普通菌剂相比,协同增效产品面临着更严峻的制剂化挑战,即如何在保证养分释放曲线与作物需求匹配的同时,维持微生物在“高盐指数”肥料环境中的活性^[21]。为此,基于天然多糖(如藻酸盐、淀粉)的包埋与控释技术被广泛应用,这类载体不仅能物理隔离化肥对菌体的直接毒害,还能起到缓释营养的作用,从而强化了微生物与化肥的协同效应^[22]。此外,利用微生物配方技术将有机废弃物转化为富含功能菌的生物-有机肥料基质,再与矿质养分配合,成为一种极具潜力的天然协同产品形式^[23]。在我国,这类产品已非常丰富,涵盖了固氮菌剂、复合微生物肥及生物有机肥等多种形式,形成了具有中国特色的协同增效产品技术体系^[24]。

2.3 国内外发展历程、产业化现状及存在问题

全球生物肥料产业正处于快速扩张期,但不同区域的发展特征与监管体系存在显著差异。在美国,生物肥料的定义、分类及监管路径相对明确,官方对其作为土壤改良剂或植物生长调节剂的法律地位进行了界定,市场准入机制较为成熟^[25]。我国的生物肥料产业虽然起步较晚,但发展迅猛,目前在企业数量、年产量及产品种类上均占据重要地

位;国内研发趋势正从简单的菌肥生产向高活性、多功能的复合产品创制转变^[24]。然而,质量控制仍是产业发展的瓶颈。各国在法规标准、质量检测及标签规范上的不统一,导致市场上常出现菌数不达标、杂菌污染及标签误导等“假劣产品”问题,严重影响了农户的信任度^[26]。此外,产业化过程中还面临着诸多障碍,包括生产规模放大困难、产品货架期短、农民对生物制剂认知不足等问题,这些因素共同制约了协同增效产品的大面积推广^[27]。值得注意的是,欧盟等地区通过借助政策工具大力推动有机-矿物复合肥及生物基础投入品的应用。这种政策导向正在重塑全球肥料市场格局,也为协同增效产品与政府减排目标的联动提供了良好的外部环境^[28]。

3 微生物肥料与传统肥料协同提高肥料利用率的作用机制

3.1 对土壤养分形态与迁移转化的影响机制

微生物肥料与传统肥料协同增效的首要机制在于对土壤养分库的活化与迁移转化过程的调控(见图1)。我国大规模整合分析表明,在田间条件下施用含有固氮、解磷、解钾菌的生物肥料,能显著提升土壤中矿质氮、有效磷及可交换钾含量,证明了微生物是将土壤中难溶态养分转化为植物可利用态的关键驱动力^[29]。特别是在减磷施肥的情境下,配施生物肥料能显著改善土壤Olsen-P(有效磷)水平及无机氮的形态分布,这种效应通过优化土壤微生物群落结构得以实现,直接验证了“减肥+养分形态转化”的协同机制^[30]。溶磷微生物(PSB/PSF)主要通过分泌有机酸、酶解及络合作用,改变Ca-P、Fe/Al-P等难溶性磷酸盐的溶解度,这是提高磷肥利用率的核心生物化学过程^[31]。进一步的机制研究指出,微生物溶磷过程能改变外

源无机磷肥在土壤中的沉淀-溶解平衡,减少磷的固定损失^[32]。田间试验数据也证实,丛枝菌根真菌(AMF)与溶磷细菌协同作用,能显著提高施入化学磷肥的有效性,从而提升作物的磷吸收率与产量^[33]。即使在盐碱胁迫等不利条件下,溶磷细菌与矿质磷肥配合使用,也能通过缓冲土壤pH值、改善磷的存在形态,有效促进作物对磷的获取^[34]。此外,PGPR与有机肥、化肥的综合配施,被证明能协同调控土壤养分库的周转通量,显著提升无机氮和有效磷的持续供应能力^[35]。这种协同效应还体现在对土壤整体肥力的提升上,如微生物菌群与NPK化肥联用可显著提高土壤阳离子交换量(CEC),从而增强土壤保肥能力^[36]。

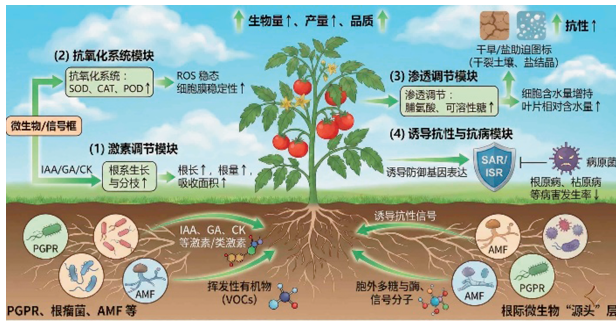


图1 根际微生物介导的土壤养分转化与化肥协同增效机制
Fig. 1 Schematic diagram of rhizosphere microbe-mediated soil nutrient transformation and synergistic efficiency with chemical fertilizers

3.2 对作物根系结构与养分吸收的生理调控作用

协同增效的另一个关键维度在于微生物对作物根系形态及养分吸收的直接调控(见图2)。HERRERO等明确指出,生物肥料提高氮素利用率的重要途径之一,是通过诱导根系分枝、增加根毛密度以及上调根系养分转运蛋白的表达量来实现的^[13]。田间试验研究显示,接种生物肥料的作物表现出根长、根表面积及结瘤数显著增加,这些形态学指标的改善与氮磷吸收效率的提升呈高度正相关,构建了“根系形态-营养吸收”的耦合增效模型^[37]。根系生物学研究也证实,优化的根系构型与高效的氮素吸收转运紧密相关,微生物在其中扮演了“构型重塑者”的角色^[38]。其分子生理机制主要涉及PGPR分泌的植物激素(如IAA、细胞分裂素)及信号分子(如ACC脱氢酶),这些物质作为化学信使调节植物根系发育程序,促进侧根形成^[17]。即便在非生物肥料的遗传学研究中,磷高效利用也往往归因于根系构型的改变及根际微生物多样性的增加,这侧面印证了根系-微生物-养分

三元互动的重要性^[39]。随着对植物养分利用分子机制认识的深入,根系转运蛋白与代谢酶的表达调控被确认为提高肥料利用率的关键靶点,而根际微生物正是调控这些靶点的外源“开关”^[2]。未来的技术方向将聚焦于利用合成生物学手段工程化根际通信,通过设计“可编程”的根-微生物互作系统,进一步精准提升作物的养分捕获效率^[40]。

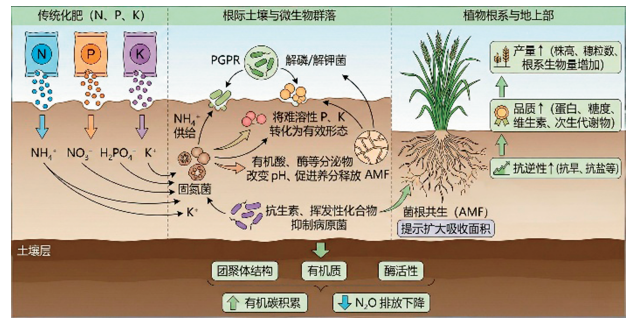


图2 微生物肥料诱导作物抗逆促生与根系构型调控的机制
Fig. 2 Mechanisms of microbial fertilizer-induced crop stress resistance, growth promotion, and root system architecture regulation

3.3 根际微生态构建与微生物协同网络优化

生物肥料与化肥的协同作用不仅体现在单一菌株的功能上,更深层次地体现在对根际微生态网络的重构与优化上。研究发现,生物有机肥的施用能显著改变根际微生物群落的组成与功能基因丰度,明确了通过微生态优化驱动产量提升的生态学路径^[41]。施用生物有机肥能促使根际微生物形成更复杂、更稳定的共现网络,这种网络结构的优化有助于提高群落对环境扰动的抵抗力^[42]。在连作障碍体系中,生物有机肥通过调节关键微生物类群及增强网络连接度,有效恢复了系统的生态功能与养分循环能力,是“微生态修复+增效”的典型案例^[43]。在复垦土壤等退化生境中,生物有机肥同样展示了其增强网络复杂度、通过形成“枢纽菌”来驱动作物生产力提升的独特优势^[44]。生物有机肥还能驱动“根系-微生物”的正反馈循环,共同刺激地上部的生长与养分利用^[45]。针对高寒矿区人工草地的研究也表明,有效微生物(EM)与有机肥的配施能协同调节“植被-土壤-细菌”互作网络,证明了多层网络协同优化的可行性^[46]。此外,将生物炭作为载体与生物有机肥配合,能进一步改善盐碱地等胁迫环境下的根际微生态环境与网络特征,体现了“材料+微生物+微生态”的集成效应^[47]。这种组合措施能显著改变细菌群落结构及功能代谢潜力,为微生态工程化治理提供新思

路^[48]。长期施肥定位试验进一步证实,连续的有机/生物肥料投入能定向塑造根际网络的关键种,说明施肥制度本身就是一种强有力的微生态重塑手段^[49]。有趣的是,即使通过人工选择压力改变根际微生物群落,也能显著影响作物的养分利用率和产量,这为通过微生物协同网络优化来定向培育高肥效微生态系统提供了理论支持^[50]。

3.4 抑制肥料损失与减排增汇等生态环境效应

微生物肥料与传统肥料的协同应用在抑制肥料损失、减少温室气体排放及增加土壤碳汇方面展现出显著的生态环境效益。在水稻田施用固氮微生物组合(如蓝藻、PGPR等)替代部分化肥,不仅能维持水稻产量,还能显著降低氧化亚氮(N_2O)和甲烷(CH_4)的排放量,实现了“生物肥料减排增效”的双重目标^[51]。通过减氮施肥配合微生物网络调控,可以在保证作物产量的同时,显著减少整个生产周期的温室气体(GHG)排放,强调了微生

物群落结构优化与环境减排效应之间的内在联系^[52]。不同类型的生物肥料基质对气体通量的影响机制也逐渐清晰,例如以昆虫粪等生物转化产物为基质的有机肥,能显著改变土壤 CO_2 、 N_2O 及 CH_4 的排放格局,说明生物肥料的基质类型是调控环境效应的关键变量^[53]。与传统化肥相比,有机/生物基础肥料在长期尺度上更有利于降低GHG排放并促进土壤碳固存,这为将肥料管理纳入气候变化应对策略提供了依据^[54]。此外,结合控释技术的新型肥料(如包膜肥料)与微生物过程的耦合是减少矿质养分淋洗和 N_2O 排放的有效手段,进一步强化了“制剂技术+生物调控”在阻控养分流失方面的潜力^[55]。微生物肥料通过功能菌群(如固氮菌、解磷菌)改善土壤微生态,促进养分循环,与传统化肥协同使用可提升肥料利用率。

3.5 小结

微生物与化肥协同增效的多维互动机制见表2。

表2 微生物与化肥协同增效的多维互动机制

Table 2 Multi-dimensional mechanisms of synergy between microbial and chemical fertilizers

互作维度	关键过程与机制	对肥料利用率的提升效应
土壤养分转化	沉淀-溶解平衡移动:微生物分泌有机酸改变难溶性磷酸盐溶解度 养分形态重塑:提高土壤矿质氮、有效磷及可交换钾库容	将土壤中无效/缓效养分转化为速效态养分,减少化肥的固定损失
根系生理调控	构型重塑:诱导侧根分枝、增加根毛密度(IAA/信号分子驱动) 分子调控:上调根系养分转运蛋白表达量	物理上扩大根系吸收面积(截获能力),生理上增强对养分的主动摄取速率
根际微生态优化	网络重构:构建复杂、稳定的根际微生物共现网络 生态位竞争:抑制病原菌,富集有益“枢纽菌”	维持根际健康的养分循环环境,缓解连作障碍,保障根系持续吸收功能
生态环境效应	减排增汇:改变土壤C/N循环,降低 N_2O 、 CH_4 排放 阻控流失:减少硝酸盐淋洗,通过微生物固持减少养分向水体迁移	降低单位产量的碳排放,实现减肥、增效、低碳的综合效益

4 协同增效产品的创制技术与应用效果

4.1 功能微生物资源挖掘、筛选与优化利用

传统的功能微生物筛选主要依赖于简单的体外培养特征,如溶磷菌或固氮酶活性测定,但这种方法往往忽视了复杂生境下的定殖能力与生态位竞争,导致实验室优良菌株在田间应用时效果不稳定,因此,建立从“实验室筛选”向“生态位导向”转化的筛选体系已成为行业共识^[12]。随着组学技术的发展,基于根际分离结合多指标体外初筛及盆栽复核的系统化流程,能够更精准地锁定具有特定功能的菌株资源,例如针对高寒草地根际的系统筛选已成功获得适应性强的促生菌株^[56]。进一步地,代谢组学驱动的逆向筛选策略正在兴起,通过对放线菌等微生物的生物活性代谢物进行普查,研究人员能够从次级代谢产物出发反向定位具有高产潜力的功能菌株,极大地提升了新型生物肥料资源的挖掘效率^[57]。

在精准育种方面,全基因组测序与*in silico*挖掘技术的结合,使得研究者能够直接从基因层面预测并选育出具有特定抗真菌或促生性状的*Bacillaceae*菌株,并已证实其在提升小麦产量与加工品质方面的显著潜力^[58]。此外,为了突破单一菌株的功能局限,利用宏基因组数据预测功能互补性,并结合合成生物学理念构建合成微生物群落,已成为解决复杂农业环境问题的关键技术路径,该策略通过组装具有不同生态功能的菌群,实现了比单一接种剂更优异的适应性与稳定性^[59]。同时,近年来研究表明,基于宏基因组与代谢组数据定向设计的合成菌群在田间条件下同样能够稳定定殖并显著提升作物产量与土壤功能,为协同增效型生物肥料的创制与应用提供了重要范例^[60]。

4.2 肥料载体与制剂化技术及其对菌活性的影响

制剂化技术是决定微生物肥料货架期及田间肥效的关键,其核心挑战在于开发能够同时保护微生

物活性并匹配作物营养需求的载体系统。天然多糖类高分子材料，如海藻酸钠和壳聚糖，因其优异的生物相容性和成膜性，被广泛用于微生物微胶囊的制备，这类载体不仅能有效缓冲环境胁迫，还能通过配方调整实现菌株的缓释，已被证实能显著提升接种剂在土壤中的存活率^[22]。当前的制剂创新正聚焦于延长货架期与提升环境适应性，新型载体（如纳米载体）与冷藏技术的结合，以及针对不同基质（如泥炭、木屑）的优化筛选^[61]。为了降低成本并实现资源循环，利用农业废弃物（如谷物麸皮）作为液体发酵基质或载体的技术取得了突破，这不仅延长了 *Azospirillum brasilense* 等功能菌的生存时间，还赋予了产品额外的多功能属性^[62]。将微生物配方技术与有机废弃物的转化利用相结合，创制富含微生物与养分的生物-有机肥料基质，已成为连接废弃物资源化与肥料增效的重要桥梁^[23]。为了解决功能菌与高盐、高养分环境之间的适配矛盾，部分研究尝试利用纳米载体与包埋技术对微生物进行多层保护涂覆，并通过调节载体粒径与表面性质来提高其在高浓度矿质肥料体系中的存活率与控释性能^[63]。针对液体与固体制剂在生产放大过程中的不同挑战，发酵工艺参数的精细调控与干燥技术的选择直接决定了最终产品的活菌数^[64]。此外，相关研究表明，通过比较喷雾干燥与冷冻干燥等不同固体制剂化工艺，并结合保护剂体系优化，可在不显

著降低菌株活力的前提下获得具有更长货架期和良好再水化性能的微生物肥料产品^[65]。

4.3 微生物-化肥协同配方与产品创制策略

实现微生物与化肥协同增效的核心在于构建生物-有机-无机相耦合的多元配方体系，该体系旨在通过微生物的生物转化作用激活矿质养分，同时利用化肥的速效性弥补生物肥效迟缓的短板。目前，生物有机矿物肥作为一种集成创新产品，通过将功能微生物、有机基质与矿质养分有机结合，已被证实能显著提高磷、钾等养分的生物有效性，是解决磷资源危机的重要手段^[66]。在具体创制策略上，利用微生物与生物技术手段处理农业废弃物，并将其转化为磷肥管理的载体，不仅实现了磷素的可持续管理，还通过有机碳的投入提升了土壤对化肥的缓冲能力^[67]。针对微生物强化型生物肥料，通过优化配方工艺，确保微生物在含有一定浓度化学养分的环境中仍能保持高效的定殖与促生功能，是当前产品创制的关键技术难点与突破方向^[65]。LI等的研究表明，将高效溶磷菌株定向负载于磷矿粉等矿物质载体表面，可在维持常规施肥水平的前提下显著提升磷肥的养分利用率与作物产量，为微生物-化肥一体化生物矿物肥料的产品开发提供了重要实践依据^[68]。

微生物强化型肥料产品关键创制技术与策略见表3。

表3 微生物强化型肥料产品的关键创制技术与策略

Table 3 Key technologies and strategies for creating microbially enhanced fertilizers

技术模块	关键技术路径	技术优势与应用价值
菌种资源挖掘	多组学筛选:基于宏基因组/代谢组的逆向筛选 合成菌群:基于功能互补性组装多菌株群落	突破单一菌株环境适应性差的瓶颈,实现功能模块化与定制化(如抗逆+促生)
载体与制剂化	新型功能载体:海藻酸钠、生物炭、纳米材料包埋 智能控释:多层包衣技术,响应环境因子释放	隔离高盐指数化肥对菌体的毒害,延长货架期,实现养分与微生物的同步释放
协同配方构建	生物-有机-无机耦合:利用生物转化将有机废弃物与矿质养分结合 废弃物资源化:利用磷化工副产物或农业废弃物作为载体	解决单一化肥肥效短、单一菌肥见效慢的问题;实现磷资源循环利用与成本降低
生产工艺优化	高密度发酵:优化碳氮比与发酵参数 活性保持技术:喷雾干燥/冷冻干燥保护剂体系优化	确保产品中有效活菌数达标,提升产品在储存与运输过程中的稳定性

4.4 田间应用效果：产量、品质与肥料利用率提升

微生物肥料与传统肥料协同应用的最终目标是实现减肥增产与提质增效，大量田间试验已证实了这一策略的有效性。一项涵盖我国多种作物与土壤条件的分析显示，施用含有固氮、解磷等功能的生物肥料，能显著提升作物产量及土壤养分有效性，其平均增产效应与品质改善幅度均具有统计学意义^[30]。在具体作物上，利用微生物有机肥部分

替代化学肥料，已被证明能在减少化肥投入的同时，通过优化氮素的转化与利用效率，维持甚至提高小麦等主要粮食作物的产量^[69]。针对干旱等逆境条件，含有PGPR的生物肥料表现尤为突出，其通过促进鹰嘴豆等作物的养分吸收与生长，有效缓解了环境胁迫对产量的负面影响^[70]。在高经济价值作物中，矿质施肥与根际微生物生物引发(biopriming)的联合应用，不仅显著提高了红甘蓝

的氮素利用效率,还改善了能量利用效率与经济产出,展现了协同技术的综合优势^[71]。

4.5 对土壤健康与环境质量的综合影响及典型案例

除了直接的农艺效应外,微生物肥料与传统肥料的协同应用对重塑土壤健康与改善环境质量具有深远的生态意义。在免耕体系中,生物有机肥的施用被证实能显著提高土壤质量指数(SQI)并优化微生物群落结构,这种农艺措施与生物投入品的结合,为旱作农业区的土壤保育提供了双赢方案^[72]。基于我国多地长期试验的综合分析也表明,适量增加有机肥(含生物有机肥)投入普遍能够在维持甚至提高产量的同时显著提升土壤质量指数,说明该类措施在不同作物和耕作制度下具有较强的普适性^[73]。针对连作障碍这一顽疾,生物有机肥通过调节根际微生物群落与土壤酶活性,有效缓解了棉花等作物连作导致的土壤退化,证明了其在重建根际微生态平衡方面的关键作用^[43]。相关研究还发现,在长期连作棉田中配施生物有机肥或与生物炭等有机改良剂配合使用,能够显著降低土传病原菌丰度、提高根系防御相关酶活性,从而减轻连作障碍带来的产量损失^[74]。在土地复垦领域,生物有机肥通过重塑根际细菌群落,显著提升了复垦土壤的生产力与生态功能,是退化土地生态修复的理想材料^[75]。在新垦或退化土壤上施用含功能菌的生物有机肥,可增加土壤有机碳和氮素积累,促进养分循环相关功能群的恢复,从而加快土壤结构与生产力的重建进程^[76]。全球尺度的综合评估表明,有机肥与有机-矿质类肥料相结合的施用模式整体上能够改善土壤健康、提高作物产量,并在多数情景下降低单位产量温室气体排放强度,为微生物肥料与化学肥料协同增效提供了宏观证据支撑^[77]。

5 挑战与发展方向

5.1 产品质量稳定性、适应性与安全性面临的主要挑战

尽管微生物肥料产业发展迅速,但产品质量控制滞后、田间效果不稳定及安全性评估不足仍是限制其大规模推广的瓶颈。目前,全球范围内生物肥料的监管框架与质量标准差异巨大,许多产品存在活菌数不达标、杂菌污染以及标签与实际内容不符等问题,亟须建立统一且严格的国际化质量控制体系^[26]。实验室筛选出的优良菌株在从实验室到田间的转化过程中,常因无法适应复杂的土壤环境、难以与土著微生物竞争或受环境异质性影响而效果衰减,这种适应性鸿沟是当前研发面临的最大

技术障碍^[12]。此外,随着生产规模的扩大,如何保证发酵、制剂及储存运输全链条中的菌株活性与变异控制,以及如何应对农民对新型肥料认知不足和信任缺失的市场挑战,也是产业化必须跨越的难关^[27]。

5.2 合成生物学与精准营养管理驱动的协同增效新路径

为了突破现有技术的局限,合成生物学与精准农业的融合正在为肥料产业带来革命性的创新机遇。通过合成生物学手段改造谷物作物的氮固定途径,使非豆科作物在施肥田块中也能实现高效的生物固氮,是减少化学氮肥依赖的颠覆性技术方向。利用工程化手段设计植物-微生物间的通信系统,构建“智能”根际微生物群落,使其能根据植物的营养需求动态调控养分供给,将极大提升养分利用效率并推动精准施肥技术的发展^[40]。此外,合成微生物群落的设计正从简单的菌株混合向功能导向的群落工程演进,通过构建具有功能冗余与互补性的稳定群落,结合纳米载体等新型递送系统,有望实现对作物生长与土壤健康的精准、可控管理^[78]。

5.3 与磷资源高效利用及磷氟工程耦合的机遇

微生物与生物技术在挖掘农业废弃物磷库方面的应用,展示了将“废弃磷”转化为“有效磷”的巨大潜力,这与磷氟工程中对资源梯级利用的理念高度契合^[67]。随着全球对循环农业的重视,政策制定者正逐步推动有机-矿质肥料的采用,这为开发结合了微生物活化、有机质缓冲与矿质营养补充的新型肥料提供了广阔的市场空间与政策红利^[28]。

5.4 政策、标准与产业化推广的关键着力点

微生物肥料产业的健康发展离不开科学的政策引导与完善的标准体系支撑。对比美国等发达国家的经验,明确生物肥料的法律定义、建立基于科学风险评估的注册制度以及实施严格的市场监管,是规范市场秩序、提升产品信誉的基础^[26]。虽然我国生物肥料企业数量众多且产品类型丰富,但在核心菌种自主权、生产工艺标准化及高端产品研发方面仍有提升空间,政策应进一步向原始创新与产学研深度融合倾斜^[24]。未来的产业化推广需重点解决商业化过程中的技术壁垒与市场准入问题,通过推动液体制剂、复合配方等先进技术的应用,并结合全球有机-矿质肥料的政策趋势,构建“技术-产品-政策”协同发展的产业生态。

微生物肥料产业化发展的政策支持、多尺度效

应与集成应用框架见图3。

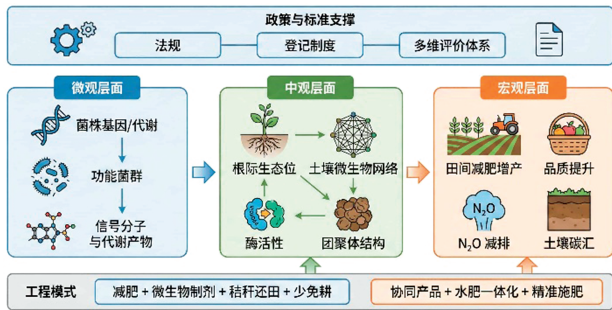


图3 微生物肥料产业化发展的政策支持、多尺度效应与集成应用框架

Fig. 3 Policy support, multi-scale effects, and integrated application framework for the industrial development of microbial fertilizers

6 结论与未来研究重点建议

综上所述，微生物肥料与传统肥料的协同增效不仅是解决化肥过量施用、提升肥料利用率的有效途径，更是推动农业绿色低碳转型的关键技术。本文系统阐释了协同增效产品的类型特征，揭示了其通过优化土壤养分形态、调节根系生理及重塑根际微生态网络来提高养分利用的机制，并展示了其在田间增产提质与土壤健康培育方面的显著成效。面对产品稳定性差、标准缺失及机制研究滞后等挑战，未来的研究应重点聚焦于：(1) 利用合成生物学与多组学技术挖掘并构建高效、稳定的合成微生物群落；(2) 创新适合工业化生产与田间应用的智能载体与递送系统；(3) 深化微生物与磷氮化工废弃物资源化利用的耦合工艺研发；(4) 建立基于长期定位试验的综合生态环境效应评价体系。通过多学科交叉与产业链协同，创制新一代提质增效肥料产品，将为保障全球粮食安全与生态环境可持续发展提供强有力的科技支撑。

[参考文献]

[1] GULSHAN T, VERMA A, AYOUB L, et al. Increasing nutrient use efficiency in crops through biofertilizers [J]. The Pharma Innovation Journal, 2022, 11(6):2003–2010.

[2] REDDY M B, SRAVANI P, KUMAR S, et al. Nitrogen use efficiency reimagined: advancements in agronomic, ecophysiological, and molecular strategies [J]. Journal of Plant Nutrition, 2025, 48(9):1577–1603.

[3] REVATHI J, VISHNOI M, JAMAKHANDI H, et al. Nitrogen Fertilizers and Climate Change: A Comprehensive Review of Greenhouse Gas Emissions and Sustainable Management [J]. International Journal of Environment and Climate Change, 2025, 15(8):430–443.

[4] SKORUPKA M, NOSALEWICZ A. Ammonia Volatilization from

Fertilizer Urea—A New Challenge for Agriculture and Industry in View of Growing Global Demand for Food and Energy Crops [J]. Agriculture, 2021, 11(9):822.

[5] SHRIVASTAVA V, LAASRI I. Nutrient Recovery Strategies and Agronomic Performance in Circular Farming: A Comprehensive Review [J]. Nitrogen, 2025, 6(3): 80.

[6] VASANTHKUMAR S S, SABARIVASAN R, SAKTHISELVI T, et al. Soil-Plant Nutrient Dynamics in Agriculture: Integrating Molecular Mechanisms with Ecosystem-Scale Processes for Sustainable Food Production [J]. Authorea Preprints, 2025.

[7] ADESEMOYE A O, KLOEPPER J W. Plant-microbes interactions in enhanced fertilizer-use efficiency [J]. Applied Microbiology & Biotechnology, 2009, 85(1):1–12.

[8] ALOO B N, TRIPATHI V, MAKUMBA B A, et al. Plant growth-promoting rhizobacterial biofertilizers for crop production: The past, present, and future [J]. Frontiers in Plant Science, 2022, 13:1002448.

[9] SHAHZAD M, HAYAT R, MUJTABA G, et al. Biofertilizers in sustainable agriculture: mechanisms, applications, and future prospects [J]. Discover Agriculture, 2025, 3(1):224.

[10] DÍAZ-RODRÍGUEZ A M, PARRA C F I, CIRA CHÁVEZ L A, et al. Microbial inoculants in sustainable agriculture: advancements, challenges, and future directions [J]. Plants, 2025, 14(2):191.

[11] NEGI R, YADAV N, YADAV A N. Microbial biofertilizers: A paradigm shift towards agricultural sustainability [J]. Biologia, 2025, 80(2):389–414.

[12] IBÁÑEZ A, GARRIDO-CHAMORRO S, VASCO-CÁRDENAS M F, et al. From Lab to Field: Biofertilizers in the 21st Century [J]. Horticulturae 2023, 9: 1306.

[13] HERRERO J, RAMÍREZ-SANTOS A, DÍAZ-SANTOS E, et al. Biofertilizers for Enhanced Nitrogen Use Efficiency: Mechanisms, Innovations, and Challenges [J]. Nitrogen, 2025, 6(4):111.

[14] TIMOFEEVA A M, GALYAMOVA M R, SEDYKH S E. Plant growth-promoting soil bacteria: nitrogen fixation, phosphate solubilization, siderophore production, and other biological activities [J]. Plants, 2023, 12(24):4074.

[15] ARGENTEL-MARTÍNEZ L, PEÑUELAS-RUBIO O, HERRERA-SEPÚLVEDA A, et al. Biotechnological advances in plant growth-promoting rhizobacteria for sustainable agriculture [J]. World Journal of Microbiology and Biotechnology, 2025, 41(1):21.

[16] ALZATE Z M Y, FATTORINI R, CESCO S, et al. Plant-microbe interactions in the rhizosphere for smarter and more sustainable crop fertilization: the case of PGPR-based biofertilizers [J]. Frontiers in Microbiology, 2024, 15:1440978.

[17] WAHAB A, BIBI H, BATOOL F, et al. Plant growth-promoting rhizobacteria biochemical pathways and their environmental impact: a review of sustainable farming practices [J]. Plant Growth Regulation, 2024, 104(2):637–662.

[18] WU X M, LIU Y, JIA B L, et al. Four decades of Bacillus biofertilizers: Advances and future prospects in agriculture [J]. Microorganisms, 2025, 13(1):187.

[19] 王伊琨, 高飞, 李昌伟, 等. 微生物肥料对土壤和作物生长的影响 [J]. 农业工程, 2024, 14(9):68–72.

- WANG Y K, GAO F, LI C W, et al. Effect of microbial fertilizer on soil and crop growth[J]. *Agricultural Engineering*, 2024, 14(9):68–72.
- [20] DOS REIS G A, MARTÍNEZ-BURGOS W J, POZZAN R, et al. Comprehensive review of microbial inoculants: Agricultural applications, technology trends in patents, and regulatory frameworks[J]. *Sustainability*, 2024, 16(19):8720.
- [21] FADIJI A E, XIONG C, EGIDI E, et al. Formulation challenges associated with microbial biofertilizers in sustainable agriculture and paths forward [J]. *Journal of Sustainable Agriculture and Environment*, 2024, 3(3):e70006.
- [22] VASSILEV N, VASSILEVA M, MARTOS V, et al. Formulation of microbial inoculants by encapsulation in natural polysaccharides: focus on beneficial properties of carrier additives and derivatives [J]. *Frontiers in plant science*, 2020, 11:270.
- [23] VURUKONDA S S K P, FOTOUPOULOS V, SAEID A. Production of a rich fertilizer base for plants from waste organic residues by microbial formulation technology [J]. *Microorganisms*, 2024, 12(3):541.
- [24] SUN X L, XU Z H, ZHANG N, et al. Biofertilizer Industry and Research Developments in China: A Mini-Review [J]. *Microbial Biotechnology*, 2025, 18(5):e70163.
- [25] SANTOS F, MELKANI S, OLIVEIRA-PAIVA C, et al. Biofertilizer use in the United States: definition, regulation, and prospects [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2024, 108(1):511.
- [26] BHARTI N, SURYAVANSHI M. Quality control and regulations of biofertilizers: Current scenario and future prospects [M]// *Biofertilizers*. Cambridge: Woodhead Publishing, 2021: 133–141.
- [27] YADAV A, YADAV K. Challenges and opportunities in biofertilizer commercialization [J]. *SVOA Microbiol*, 2024, 5(1):1–14.
- [28] CHOJNACKA K. Global adoption of organo-mineral fertilisers: environmental and policy insights [J]. *Discover Agriculture*, 2025, 3(1):184.
- [29] PEI B L, LIU T, XUE Z Y, et al. Effects of Biofertilizer on Yield and Quality of Crops and Properties of Soil Under Field Conditions in China: A Meta-Analysis [J]. *Agriculture*, 2025, 15(10):1066.
- [30] ZHANG Y L, XIAO R, ZHAO Y C, et al. Impact of phosphorus reduction combined with biofertilizer application on soil nutrients and microbial communities in arid oasis agricultural areas[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2025, 16:1606813.
- [31] LEI Y M, KUAI Y H, GUO M Y, et al. Phosphate-solubilizing microorganisms for soil health and ecosystem sustainability: A forty-year scientometric analysis (1984–2024) [J]. *Frontiers in Microbiology*, 2025, 16:1546852.
- [32] TIMOFEEVA A, GALYAMOVA M, SEDYKH S. Prospects for using phosphate-solubilizing microorganisms as natural fertilizers in agriculture[J]. *Plants*, 2022, 11(16):2119.
- [33] ELEKHTYAR N M, AWAD-ALLAH M M A, ALSHALLASH K S, et al. Impact of arbuscular mycorrhizal fungi, phosphate solubilizing bacteria and selected chemical phosphorus fertilizers on growth and productivity of rice [J]. *Agriculture*, 2022, 12(10):1596.
- [34] ADNAN M, FAHAD S, ZAMIN M, et al. Coupling phosphate-solubilizing bacteria with phosphorus supplements improve maize phosphorus acquisition and growth under lime induced salinity stress[J]. *Plants*, 2020, 9(7):900.
- [35] ASGHAR I, AHMED M, FAROOQ M A, et al. Characterizing indigenous plant growth promoting bacteria and their synergistic effects with organic and chemical fertilizers on wheat (*Triticum aestivum*) [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2023, 14:1232271.
- [36] SHUKLA S K, SHARMA L, JAISWAL V P, et al. Soil quality parameters vis-a-vis growth and yield attributes of sugarcane as influenced by integration of microbial consortium with NPK fertilizers[J]. *Scientific Reports*, 2020, 10(1):19180.
- [37] YOUSEFI A, NABATI J, MIRZAEETALARPOSHTI R, et al. Optimizing mung bean productivity and root morphology with biofertilizers for sustainable farming [J]. *Scientific Reports*, 2025, 15(1):40333.
- [38] WANG R, SUN C, CAI S, et al. Research progress in crop root biology and nitrogen uptake and use, with emphasis on cereal crops[J]. *Agronomy*, 2023, 13(7):1678.
- [39] QADIR S, KAMAL F, KAMAL R, et al. Phosphorus Efficiency in Brassica napus: Unlocking Genetic, Physiological, and Root [J]. *Architecture Innovations*, 2025, 2(3):11–20.
- [40] GRIFFIN C, OZ M T, DEMIRER G S. Engineering plant-microbe communication for plant nutrient use efficiency [J]. *Current Opinion in Biotechnology*, 2024, 88:103150.
- [41] WANG Z, YANG T J, MEI X L, et al. Bio-organic fertilizer promotes pear yield by shaping the rhizosphere microbiome composition and functions [J]. *Microbiology Spectrum*, 2022, 10(6):e0357222.
- [42] YANG J, LIU X, RONG X, et al. Bio-organic fertilizer application improves cucumber growth, disease resistance, and soil fertility by regulating rhizosphere microbiomes [J]. *Plant and Soil*, 2025, 514:1315–1329.
- [43] YU M, HE H, CHENG L, et al. Bio-Organic Fertilizers Enhance Yield in Continuous Cotton Cropping Systems Through Rhizosphere Microbiota Modulation and Soil Nutrient Improvement[J]. *Agronomy*, 2025, 15(9):2238.
- [44] YANG J, LU X, HAO B, et al. Bio-organic fertilizers reshape rhizosphere bacterial community and enhance crop productivity in reclaimed soil [J]. *Frontiers in Microbiology*, 2025, 16:1713125.
- [45] KANG Y, MA Y, XIE C, et al. Bioorganic fertilizer drives the root system architecture and rhizosphere microbiome interactions to stimulate aboveground growth of pear trees in acid red soil[J]. *Plant and Soil*, 2025, 516:629–650.
- [46] LYU L, SHI J, GAO P, et al. EM biofertilizer and organic fertilizer co-application modulate vegetation-soil-bacteria interaction networks in artificial grasslands of alpine mining regions[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2025, 16:1659475.
- [47] GU Y, ZHANG H, LIANG X, et al. Effect of different biochar particle sizes together with bio-organic fertilizer on rhizosphere soil microecological environment on saline-alkali land [J]. *Frontiers in Environmental Science*, 2022, 10:949190.
- [48] GU Y Y, ZHANG H Y, LIANG X Y, et al. Impact of biochar and bioorganic fertilizer on rhizosphere bacteria in saline-alkali soil[J]. *Microorganisms*, 2022, 10(12):2310.

- [49] TANG J, WU H, LI Y, et al. The Response Microbial of the Cucumber Rhizosphere Network Keystone Taxa of the Cucumber Rhizosphere to Continuous Fertilization [J]. *Microorganisms*, 2025, 13(2):451.
- [50] GARCIA J, GANNETT M, WEI L P, et al. Selection pressure on the rhizosphere microbiome can alter nitrogen use efficiency and seed yield in *Brassica rapa* [J]. *Communications Biology*, 2022, 5(1):959.
- [51] MALYAN S K, BHATIA A, TOMER R, et al. Mitigation of yield-scaled greenhouse gas emissions from irrigated rice through *Azolla*, Blue-green algae, and plant growth-promoting bacteria [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, 28(37):51425–51439.
- [52] LI G, MA L, ZHANG Q, et al. Balancing Maize Yield, Greenhouse Gas Emissions, and Soil Functions Through Nitrogen Fertilizer Reduction and Microbial Network Regulation [J]. *Land Degradation & Development*, 2025.
- [53] HUANG Z, XU S, ZHENG N, et al. Salty bio-converted organic fertilizer modulates soil greenhouse gas emissions [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2024, 445:141192.
- [54] BADAGLIACCA G, TESTA G, LA M S G, et al. Organic fertilizers and bio-waste for sustainable soil management to support crops and control greenhouse gas emissions in mediterranean agroecosystems: A Review [J]. *Horticulturae*, 2024, 10(5):427.
- [55] BENLAMLIH F Z, LAMHAMEDI M S, PEPIN S, et al. Evaluation of a new generation of coated fertilizers to reduce the leaching of mineral nutrients and greenhouse gas (N₂O) emissions [J]. *Agronomy*, 2021, 11(6):1129.
- [56] YI G, LI J, WANG X, et al. Screening of plant growth-promoting rhizobacteria and their growth-promoting activities for *Stipa purpurea* in alpine grassland [J]. *Journal of Applied Microbiology*, 2025, 136(3):lxaf041.
- [57] FADDETTA T, POLITO G, ABBATE L, et al. Bioactive metabolite survey of actinobacteria showing plant growth promoting traits to develop novel biofertilizers [J]. *Metabolites*, 2023, 13(3):374.
- [58] CASAL A, GIZZI F O, FIGUEROA S A, et al. Genomically-selected antifungal Bacillaceae strains improve wheat yield and baking quality [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2025, 109(1):164.
- [59] SINGH M, JHA S, PATHAK D, et al. Advancing biofertilizers: the evolution from single-strain formulations to synthetic microbial communities (SynCom) for sustainable agriculture [J]. *Discover Plants*, 2025, 2(1):226.
- [60] HERNÁNDEZ-GARCÍA J A, BERNAL J S, ANTONY-BABU S, et al. Teosinte-derived SynCom and precision biofertilization modulate the maize microbiome, enhancing growth, yield, and soil functionality in a Mexican field [J]. *Frontiers in Microbiology*, 2025, 16:1534327.
- [61] MONICA S, PANNEERSELVAM S, RAJASEKARAN R, et al. Recent Advances in Bioinoculant Formulations and Their Shelf-Life: A Review [J]. *Current Microbiology*, 2025, 82(11): 1–21.
- [62] SHARDA P, KUMARI S, NEEMISHA. Cereal Bran Based Cost Effective Liquid *Azospirillum brasilense* Biofertilizer with Extended Growth, Multifunctional Attributes and Shelf Life [J/OL]. *Waste and Biomass Valorization*, 2025:1–17. <https://doi.org/110.1007/s12649-025-03238-8>.
- [63] SHOLKAMY E N, ABDELHAMID M A A, MEKAWY A M M, et al. Nano-Biofertilizer Formulations for Sustainable Agriculture: Potential and Limitations [M]//*Plant-Microbe Interactions for Environmental and Agricultural Sustainability*. Cham:Springer Nature Switzerland, 2025:661–693.
- [64] FIGIEL S, RUSEK P, RYSZKO U, et al. Microbially Enhanced Biofertilizers: Technologies, Mechanisms of Action, and Agricultural Applications [J]. *Agronomy*, 2025, 15(5):1191.
- [65] LUFT L, MAZUTTI M A. Freeze and spray drying technologies to produce solid microbial formulations for sustainable agriculture [J]. *Processes*, 2025, 13(7):2188.
- [66] SYED S, WANG X, PRASAD T N, et al. Bio-organic mineral fertilizer for sustainable agriculture: current trends and future perspectives [J]. *Minerals*, 2021, 11(12):1336.
- [67] OUBOHSSAINE M, RABEH K, HNINI M, et al. Microbial and biotechnological approaches to harness agricultural wastes for sustainable phosphorus management in crop production [J]. *Frontiers in Agronomy*, 2025, 7:1686198.
- [68] MAŽYLYTĖ R, KAZIŪNIENĖ J, OROLA L, et al. Phosphate solubilizing microorganism *Bacillus* sp. MVY-004 and its significance for biomineral fertilizers' development in agrobiotechnology [J]. *Biology*, 2022, 11(2):254.
- [69] LI Y, WEI J, MA L, et al. Enhancing wheat yield through microbial organic fertilizer substitution for partial chemical fertilization: regulation of nitrogen conversion and utilization [J]. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2024, 24(1): 935–943.
- [70] NABATI J, NEZAMI A, YOUSEFI A, et al. Biofertilizers containing plant growth promoting rhizobacteria enhance nutrient uptake and improve the growth and yield of chickpea plants in an arid environment [J]. *Scientific Reports*, 2025, 15(1):8331.
- [71] SARKAR D, SANKAR A, DEVIKA O S, et al. Optimizing nutrient use efficiency, productivity, energetics, and economics of red cabbage following mineral fertilization and biopriming with compatible rhizosphere microbes [J]. *Scientific Reports*, 2021, 11(1):15680.
- [72] WANG X, YANG Q, ASAD M S, et al. Coupling no-tillage with bio-organic fertilizer strategies to regulate soil quality and microbial communities, without compromising crop yield under rainfed conditions on the Loess Plateau, China [J]. *Plant and Soil*, 2025, 516:1–21.
- [73] LI P, LI Y, XU L, et al. Crop yield-soil quality balance in double cropping in China's upland by organic amendments: A meta-analysis [J]. *Geoderma*, 2021, 403:115197.
- [74] GU M, YANG R, XU W, et al. Effects of cotton stalk biochar combined with bio-organic fertilizer on rhizosphere soil microecology and cotton growth of continuous cropping cotton [J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2019, 21(10):47.
- [75] QIAO C, YANG J, FU J, et al. Bio-organic fertilizers modulate the rhizosphere bacterial community to improve plant yield in reclaimed soil [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2025, 16:1660229.