



李俊,姜昕,刘东阳,等.微生物肥料研究与应用进展[J].南京农业大学学报,2026,49(5):975-989.

Li J, Jiang X, Liu D Y, et al. Research and application progress of microbial fertilizers[J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2026, 49(5): 975-989.

特约综述

微生物肥料研究与应用进展

李俊¹, 姜昕¹, 刘东阳², 王天舒¹, 李海涛², 马鸣超^{1*}

(1.中国农业科学院农业资源与农业区划研究所,北京 100081;2.南京农业大学资源与环境科学学院,江苏 南京 211800)

摘要:微生物肥料的研究应用随着农业发展转型得以不断壮大,并将在以合成生物学和生物智能制造为代表的新技术赋能下进入新的发展阶段,服务于国家的绿色高质量农业发展。本文在分析微生物肥料研究应用现状与发展瓶颈的基础上,阐述微生物肥料活化养分、促生抗逆、修复改良土壤、构建植物-微生物-土壤功能菌群等的系统性功能机制,明确合成微生物组与菌群互作、逆境下功能表达与效果稳定性和菌株功能代谢物与复合增效的基础性研究重点,以及复合化、多功能化、智能化和应用场景化的微生物肥料新产品研发路径,为创制精准、稳定、高效的新一代微生物肥料产品,并促进其在农业绿色高质量发展中的应用提供技术思路。

关键词:微生物肥料;技术创新;功能机制;产业应用;绿色高质量发展;合成微生物组

中图分类号:S144

文献标志码:A

文章编号:1000-2030(2026)05-0975-15

Research and application progress of microbial fertilizers

LI Jun¹, JIANG Xin¹, LIU Dongyang², WANG Tianshu¹, LI Haitao², MA Mingchao^{1*}

(1.Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China;

2.College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 211800, China)

Abstract: Research and application of microbial fertilizers have expanded continuously alongside the transformation of agricultural development. Empowered by emerging technologies represented by synthetic biology and intelligent biological manufacturing, microbial fertilizers will enter a new stage of development to support the national strategy of green and high-quality agricultural advancement. Based on an analysis of the current status and developmental bottlenecks in the research and application of microbial fertilizers, this paper systematically elaborates their functional mechanisms, including soil nutrient activation, plant growth promotion and stress resistance enhancement, soil remediation and improvement, and the construction of functional plant-microbe-soil microbiota systems. This study further identifies core priorities for fundamental research: synthetic microbiomes and microbial interspecies interactions, functional expression and efficacy stability under environmental stresses, as well as strain functional metabolites and synergistic effects of compound microbial agents. It also outlines research and development pathways for novel microbial fertilizer products featuring compound formulation, multi-functionality, intelligent production and scenario-specific application. The findings provide technical insights for developing a new generation of precise, stable and high-efficiency microbial fertilizers, and facilitate their wider adoption to advance green and high-quality agricultural development in China.

Keywords: microbial fertilizer; technological innovation; functional mechanism; industrial application; green and high-quality development; synthetic microbiome

微生物肥料是一类含有特定微生物活体的制品,主要应用于农业生产,通过其中所含微生物的生命活动,增加植物养分的供应量而促进植物生长,增强抗逆性并提高产量,改善农产品品质及农业生态环境^[1-2]。从其定义及多功能属性中可知,不同于传统肥料,微生物肥料是重要的新型生物投入品,是我国农业高质量发展的必备绿色投入品^[3-4],并将持续得到国家的研发支持与产业支持。

本综述在梳理微生物肥料研究和应用现状的基础上,深入剖析产业发展面临的瓶颈与挑战,基于合成生物学、智能制造等前沿技术驱动下的功能机制及其研究重点、微生物肥料新产品研发、未来展望等方面

收稿日期:2026-05-18

基金项目:国家重点研发计划项目(2023YFD1702200)

作者简介:李俊,研究员,博士,研究方向为微生物肥料研发应用与标准化,E-mail:lijun01@caas.cn。*通信作者:马鸣超,研究员,研究方向为微生物肥料资源与标准化,E-mail:mamingchao@caas.cn。

进行综述,为微生物肥料产业发展提供有益思路与借鉴。

1 微生物肥料研究应用现状与发展瓶颈

我国微生物肥料发展历经萌芽探索、初步推广、规范转型、规模扩张、创新升级五大阶段:20世纪40年代起以根瘤菌研究开启探索之路;20世纪50—80年代品类逐步丰富但生产粗放、质量参差不齐;20世纪90年代至21世纪初行业建立登记与监管制度,产品向复合化转型,基础研究不断深化;2006—2020年依托“化肥减量”等政策实施实现规模化发展,产业体量大幅提升,同时产品同质化、田间效果不稳等瓶颈日益凸显;2021年进入“十四五”后,合成生物学、多组学、人工智能等前沿技术赋能行业转向高质量创新发展,现已形成全球领先的产业规模,正向精准化、场景化、智能化方向持续迈进。

当前,全球气候变化加剧、土壤退化、连作障碍、盐碱化与面源污染等问题突出,传统农业生产模式面临严峻挑战,亟需绿色高效、环境友好的替代技术^[5-6]。2019年,美国国家科学院和工程院联合发布了研究报告^[7],认为微生物对农业生产至关重要,建立微生物与土壤及植物良性互作关系,可实现改善土壤结构、提高养分利用率以及提高作物对环境的抗逆能力,进而可彻底改变农业生产。实践中,选择适宜的微生物肥料产品和合理施用方式,能够实现微生物肥料产品功效,满足农业绿色高质量发展的需求。

自“十四五”以来,我国深入推进农业绿色转型,微生物肥料凭借固氮、溶磷、解钾、促生、抗逆、抑病及土壤改良等多重功能,在保障粮食安全、提升耕地质量、降低化肥依赖等方面发挥不可替代作用^[1,8]。放眼全球,绿色农业政策持续驱动微生物肥料行业发展,北美、欧洲依托成熟生物技术与有机农业体系,高端功能型菌剂需求快速攀升,巴斯夫、诺维信、Indigo Ag等国际农化巨头已构建了从菌株研发到田间应用的全产业链体系。伴随根际微生物组、合成微生物组、多组学技术与机器学习等新技术的快速发展,微生物肥料研究已从传统“单一菌株促生效果评价”,转向“植物-微生物-土壤互作机制解析”与“稳定功能菌群构建”的新阶段^[1,9],为突破微生物肥料产业瓶颈和实现其高质量发展提供了理论与技术基础。

我国微生物肥料历经多年的研究发展,已形成了世界级的产业规模,为“十五五”产业发展奠定了良好基础。截至目前(2026年5月底),全国已有微生物肥料企业3500余家(含境外29家)、产能达3500万吨、产值400亿元的产业规模。在农业农村部登记的微生物肥料产品总数近16000个,涵盖微生物菌剂、生物有机肥、复合微生物肥料三大类产品。其中,微生物菌剂类产品包括固氮菌剂、根瘤菌菌剂、硅酸盐菌剂、溶磷菌剂、光合细菌菌剂、有机物料腐熟剂、促生菌剂、菌根菌剂、农用微生物浓缩制剂、土壤修复菌剂等^[3]。产品应用面积超3333万hm²,在大田作物、经济作物、设施农业及障碍土壤修复中广泛应用,增产提质、减肥增效、改良土壤效果显著^[3,10]。可见,我国微生物肥料产业已进入健康、有序、可持续的发展阶段,并将在农业绿色高质量发展和科技创新的驱动下发挥更大的作用。

全球产业端已形成技术研发+制剂生产+田间服务一体化商业模式,国际头部企业依托合成生物学、高通量菌株改造、智能缓释制剂等核心技术,主打专用功能菌剂、逆境型复合菌肥、微生物代谢物类生物刺激剂三大高端品类,产品精准适配有机农业、设施种植、退化土壤修复等细分场景。欧美市场侧重菌株工程化改良、长效包埋制剂及标准化应用方案落地;海外企业同步布局微生物组检测+定制化菌肥配套服务,实现从单一产品向农业综合生物解决方案转型,技术商业化落地速度领先。

然而,全球微生物肥料产业发展仍面临多维度瓶颈。集中体现在6个方面:一是种质资源,特色抗逆功能菌株资源挖掘不足,极端环境、专用型菌种储备体系不完善;二是菌株有效性,功能菌株田间定殖能力弱、环境适应性差,易受本土微生物竞争影响;三是作用机制,植物-微生物-土壤互作、菌群协同及逆境下功能表达的底层机制解析尚不透彻;四是产品与效果,产品同质化严重,菌体保活技术短板突出,货架期短,普遍存在实验室高效、田间低效、施用效果波动大等问题;五是产业化,高端制剂、智能控释、复合菌群发酵等工艺成熟度不足,高端产品产能受限;六是标准体系,质量安全、功能评价、工程菌及新型制剂的标准化规范仍需完善,行业监管与市场引导力度有待加强^[1,4,11-12]。欧美虽在菌株改造、制剂工艺上具备优势,但菌群田间稳定性仍是全行业共同难题。现阶段,合成生物学、生物智能制造、新型载体与控释递送等前沿技术成为突破上述瓶颈的核心方向。伴随合成菌群设计(synthetic communities, SynComs)、逆境功能强化、AI辅助菌株筛选、生物炭及水凝胶包埋等技术落地,复合化、多功能化、场景化新品不断涌现^[2,6,9,13],并且《GB/T 41728—2022 微生物肥料质量安全评价通用准则》等国标的实施,也为我国产业规范化发展筑牢基础^[14-15]。

2 微生物肥料功能机制研究进展

微生物肥料是以有益微生物生命活动及其产生的功能代谢物为核心,通过改善植物营养(图1)、增强抗逆能力、调控根际微生态、提升土壤健康等机制,实现促进作物生长、增产提质、稳产可持续的农业高质量发展目标。与传统化学肥料相比,微生物肥料并不单纯依靠外源养分输入,而是通过微生物与植物、土壤和环境因子之间的互作,调动土壤潜在养分库、调节植物生理功能和根际生命共同体等路径实现其功能机制^[11]。因此,其作用机制具有显著动态性和系统性等生态学特征。近年来,随着根际微生物组、合成微生物组、多组学技术和机器学习方法的发展与应用,微生物肥料从“促生功能”转向“植物-微生物-土壤互作机制解析”和“稳定功能菌群构建”的系统性创新研究^[8-9,16]。目前关注的微生物肥料的稳定性和适应性难题,需在明确功能菌株的定殖、根际微生态菌群的形成、功能物质分泌稳定的基础上方能解决^[16]。鉴于微生物肥料菌种繁多、功能机制方式多样,本文从微生物肥料根际养分活化、土壤改良修复、根际微生态改善、促生抗逆与防病抑病等方面进行机制阐述。

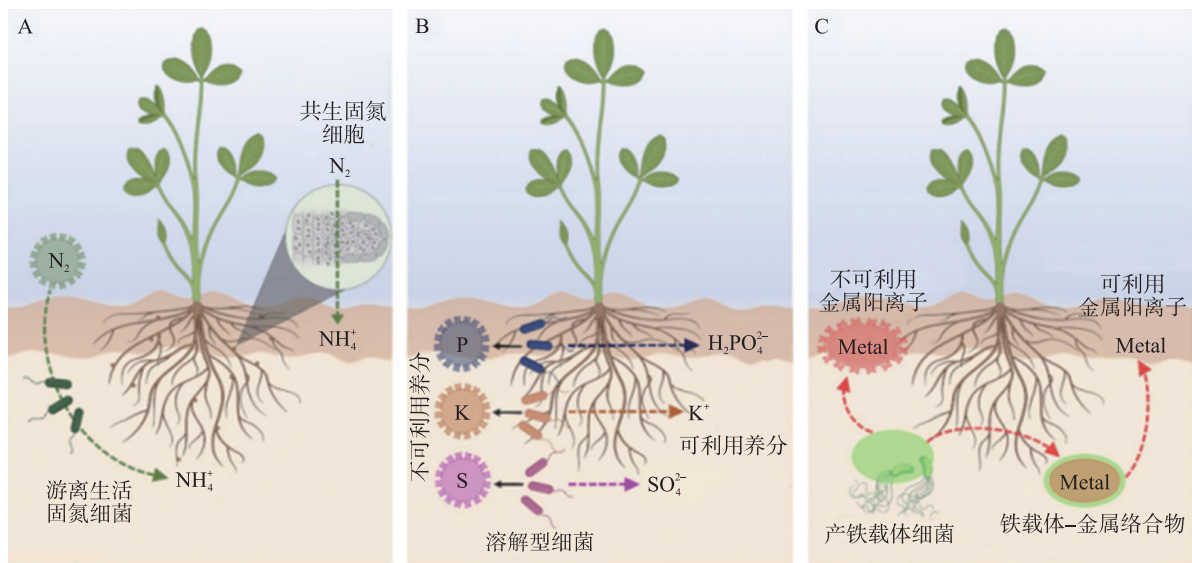


图1 生物肥料对养分可利用性的影响^[8]

Fig. 1 Biofertilizer-mediated nutrient availability^[8]

A. 微生物固氮供氮 N-biofertilizers; B. P、K 和 S 的生物肥料 P-, K-, and S-biofertilizers; C. 基于铁载体生成细菌的阳离子整合型生物肥料 Cation-chelating biofertilizers based on siderophore producing bacteria.

2.1 根际养分活化增效机制

根际是微生物肥料功能表达的核心界面,植物根系分泌的糖类、有机酸、氨基酸等物质可为有益微生物提供碳源与信号分子,而功能微生物可通过生物固氮、溶磷、解钾、合成铁载体等途径,将土壤中难以被作物利用的结合态养分转化为有效态(图1),大幅提升土壤养分利用率^[17]。

氮素活化方面,共生固氮细菌、自生固氮细菌可依托自身固氮系统固定大气氮素,补充土壤氮库,直接为作物提供氮营养^[8]。磷素活化是微生物肥料的核心功能之一,溶磷微生物可分泌葡萄糖酸、柠檬酸、草酸等有机酸降低根际 pH 值,分解土壤中难溶性无机磷酸盐,同时分泌磷酸酶、植酸酶等功能酶类,推动有机磷矿化分解,双重路径提升土壤有效磷含量^[8,18]。解钾微生物可借助有机酸、胞外多糖及矿物风化作用,分解钾长石、云母等含钾矿物,释放矿物结合态钾,实现土壤钾素活化^[19]。此外,产铁载体微生物可合成高亲和力铁载体,螯合土壤中惰性金属阳离子,提升铁、锌等中微量元素有效性,保障作物微量元素供给^[8]。

植物根际促生菌(PGPR)与丛枝菌根真菌(AMF)可形成协同增效体系:PGPR 促进作物根系、根毛发育,扩大养分吸收面积;AMF 通过外延菌丝构建地下菌丝网络,进一步拓展根系吸收范围,强化磷、水分及微量元素吸收效率^[18]。多项研究证实,养分形态变化还会反向调控根际微生物群落结构与互作关系,形成“植物-微生物-养分”良性循环^[17]。Alzate Zuluaga 等^[8]也指出,以 PGPR 为核心的微生物肥料,可通过养分活化构建可持续的作物营养供给体系。综上,微生物肥料通过改造根际微环境、转化惰性养分、强化

作物吸收能力,实现土壤养分的高效活化与利用。

2.2 土壤改良与修复机制

微生物肥料可从土壤物理结构、化学性质两大维度实现土壤修复与地力提升,对板结土、盐碱土、重金属污染土等障碍土壤的改良效果尤为突出。

在土壤物理性状改良上,枯草芽胞杆菌、丛枝菌根真菌等功能微生物可大量分泌胞外多糖(EPS)、球囊霉素相关土壤蛋白(GRSP)等黏性物质,胶结土壤单粒形成水稳性团粒结构,提升土壤孔隙度、通气性与保水能力,缓解土壤板结问题^[20]。AMF菌丝网络可穿插缠绕土壤基质,进一步加固团粒结构、降低土壤容重,为根系与微生物营造稳定生存环境^[21]。

在土壤化学性状改良方面,针对盐碱土壤,耐盐复合菌群可分泌小分子有机酸,螯合土壤中过量钠离子、钙离子,降低土壤碱化度与电导率,调节土壤pH值,提升土壤酸碱缓冲能力^[22-23]。田间试验表明,施用复合微生物菌剂可使盐碱土可溶性盐含量下降30.8%,土壤有机质与速效氮、磷、钾含量均得到显著提升,有效修复盐碱障碍^[24-25],图2展示了微生物菌肥在盐碱胁迫下通过重塑根际微生物群落改善土壤条件的核心机制。针对重金属污染土壤,有益微生物可通过胞外聚合物吸附、氧化还原、生物沉淀等方式钝化镉、铅等重金属离子,降低重金属生物有效性及生态风险^[26]。综上,微生物肥料兼具物理改良、化学修复和生物区系重塑的多重作用,是障碍土壤生态修复的绿色技术手段。

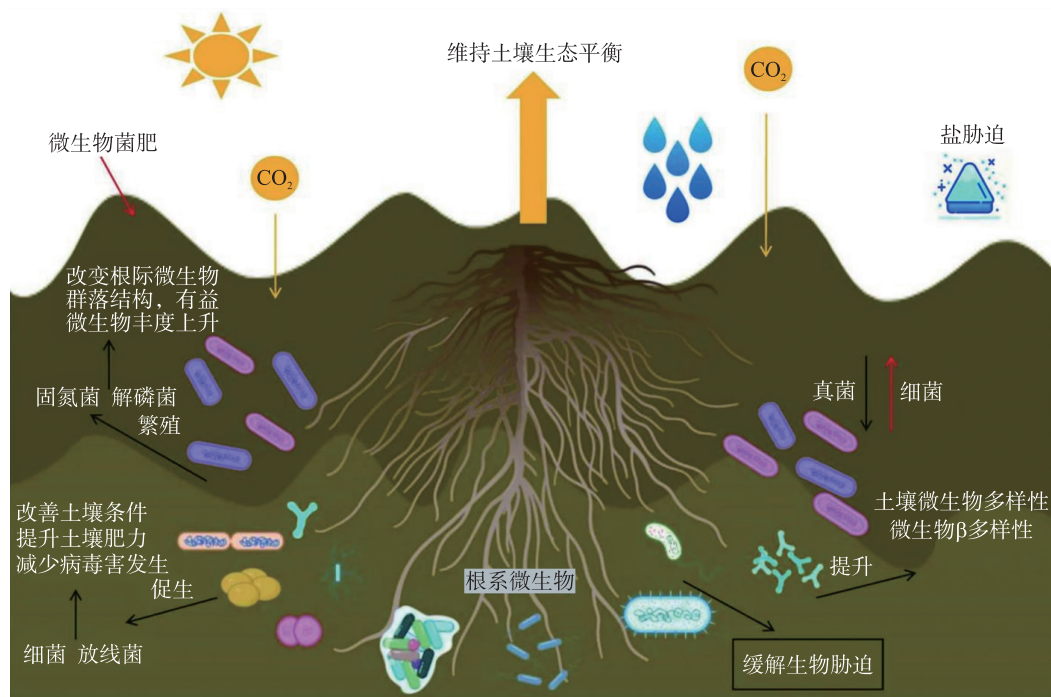


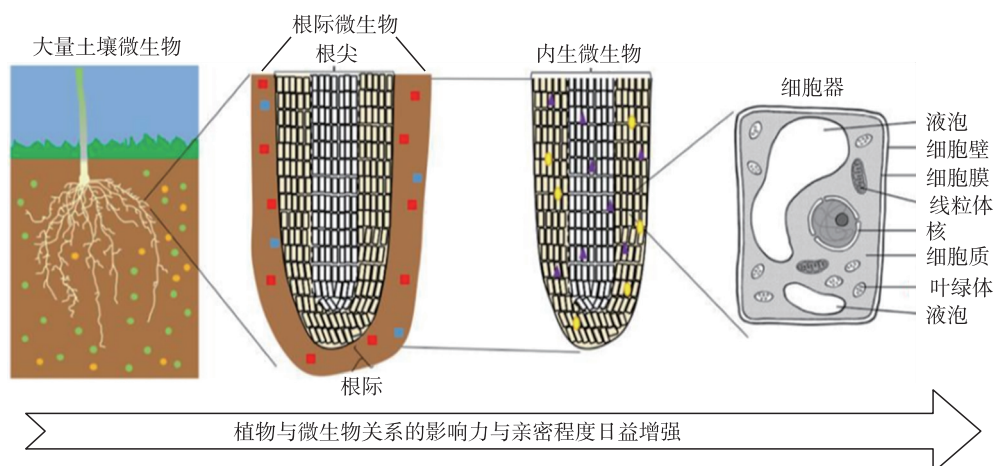
图2 微生物菌肥对盐碱胁迫下根际土壤的改良机制^[23]

Fig. 2 Mechanisms of microbial fertilizer in improving rhizosphere soil under saline-alkali stress^[23]

2.3 根际微生态改善机制

外源施用微生物肥料可定向重塑根际微生物群落结构,优化根际微生态环境,是保障肥料长效作用的核心机制(图3)。有益菌株进入土壤后可快速在作物根际定殖并形成优势菌群,通过生态位竞争、营养竞争抑制土著有害微生物繁殖,提升细菌、放线菌等有益微生物丰度,提高根际微生物群落多样性与稳定性^[16]。研究表明,施用贝莱斯芽胞杆菌、贵州木霉等功能菌剂后,根际芽胞杆菌属、木霉属等有益类群显著富集,群落结构趋于健康稳定^[27]。

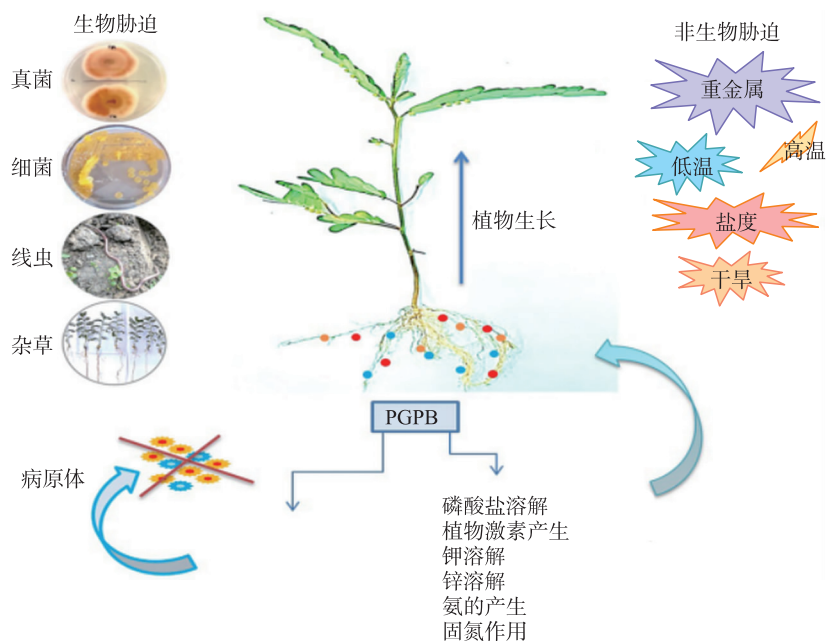
在菌群互作方面,有益微生物之间可形成代谢互惠网络,依靠交叉供食提升群落整体抗干扰能力,抵御病原菌入侵^[28]。同时,菌株分泌的挥发性有机物、信号分子可介导微生物与植物、微生物与微生物之间的信息交流,进一步稳固根际功能菌群结构^[29]。微生物肥料通过重构根际微生态,打破失衡的土壤微生物体系,构建“植物-有益微生物-土壤”共生的健康根际系统。

图3 植物-微生物互作关系的影响强度与亲密性梯度^[30]Fig. 3 Gradient of influence and intimacy in plant-microbe interactions^[30]

2.4 植物抗逆与防病抑病机制

微生物肥料通过促生长调节、诱导系统抗性和直接抑菌 3 个方面协同增强植物的抗逆与防病能力。

1) 促生长与抗逆调节机制。许多 PGPR 能分泌吲哚乙酸 (IAA)、赤霉素、细胞分裂素等植物激素,促进根系伸长、侧根形成和根毛发育,增强植物对水分和养分的吸收能力^[30-31]。部分功能菌株可产生 ACC 脱氨酶,降低逆境下植物体内乙烯的过量积累,从而缓解盐胁迫、干旱胁迫和重金属胁迫对生长的抑制作用^[5,30-31]。在干旱条件下,PGPR 还可通过促进根系发育、分泌胞外多糖、调节渗透保护物质、增强抗氧化酶活性和改善土壤持水性来提高植物水分利用效率^[6]。El-Saadony 等^[6]指出,耐旱型 PGPR 在缓解干旱胁迫、提升土壤健康和支持可持续农业方面具有重要潜力。在重金属污染土壤中,PGPR 则通过螯合、沉淀、吸附等方式改变重金属生物有效性,同时增强植物抗氧化系统,减轻毒害并提高植物修复效率^[5](图 4)。

图4 不同胁迫因素及 PGPB 在促进植物生长过程中的响应机制^[31]Fig. 4 Different stress factors and response of plant growth promoting bacteria to offer plant growth promotion^[31]

2) 诱导系统抗性(induced systemic resistance,ISR)机制。ISR 是连接抗逆与抗病的核心机制。功能菌株定殖根际后,可激活植物茉莉酸、乙烯、水杨酸等防御信号通路,提前启动植株免疫体系^[30-31]。在非生物胁迫下,ISR 可增强植物对干旱、盐碱、重金属等逆境的适应能力^[5-6,30];面对生物胁迫时,ISR 赋予作物广谱抗病能力,对真菌、细菌、线虫等多种病原均有防控效果^[30]。此外,部分 PGPR 分泌的高亲和力铁载体

体具有双重功能:一方面促进植物获取铁元素,另一方面剥夺病原菌必需铁离子,间接抑制土传病害^[31]。

3)直接抑菌与竞争排斥机制。有益菌通过抢占根际生态位、竞争营养物质,抑制病原菌定殖与繁殖^[30-31]。经典生防菌株如芽胞杆菌、木霉等可分泌脂肽类、挥发性有机物等抑菌活性物质,并通过重寄生作用直接裂解病原菌菌丝^[31-32]。如木霉生物有机肥可通过调控土壤微生物区系、强化根际生态位竞争,实现蔬菜作物的病害防控^[33]。田间实践表明,多菌株复合菌剂可叠加抑菌效果、拓宽抑菌谱并延缓病原菌抗药性产生,防病效果优于单一菌株^[34]。

综上,微生物肥料的抗逆与防病功能具有多靶点协同特征:既通过激素调控和 ACC 脱氨酶直接促进植物生长,又借助 ISR 同时增强非生物胁迫耐受和生物胁迫防御,辅以铁载体、抗菌代谢物和生态位竞争实现病害控制^[5-6,30-31]。

3 微生物肥料基础研究重点

3.1 合成微生物组与菌群互作研究

针对土壤环境复杂导致功能菌株定殖不稳定和田间效果波动大的难题,合成微生物组 SynCom 成为近年来微生物肥料创新的重要方向^[9,13]。合成菌群是依据功能互补、生态位分化、代谢互作和群落稳定性原则,构建具有明确功能和可解释机制的低复杂度微生物群落^[9]。Jing 等^[9]提出应将高通量试验筛选、菌株资源库建设和计算基因组分析结合起来,定向设计具有特定功能的合成微生物群落。该思路为微生物肥料研发提供了新范式:首先从健康或高产植物根际筛选核心有益菌;其次解析菌株的营养活化、促生抗逆、产功能代谢物等特征;再次通过共培养试验和组学分析识别互利、拮抗或冗余关系;最后构建功能稳定、生态位互补的合成菌群,与单菌株相比,合成菌群具有更强的功能冗余和环境适应能力^[9,13]。Emmenegger 等^[35]进一步将机器学习引入合成群落试验,实现了对群落抑病能力的精准预判(图5),标志着菌群设计从经验筛选迈向数据驱动。Wang 等^[36]发现窄谱资源利用型细菌(specialists)比广谱型(generalists)更利于群落长期稳定,前者被迫形成强烈的代谢互养关系,为理性设计功能稳定的合成菌群提供了“代谢特化-互作强化”的新原则。

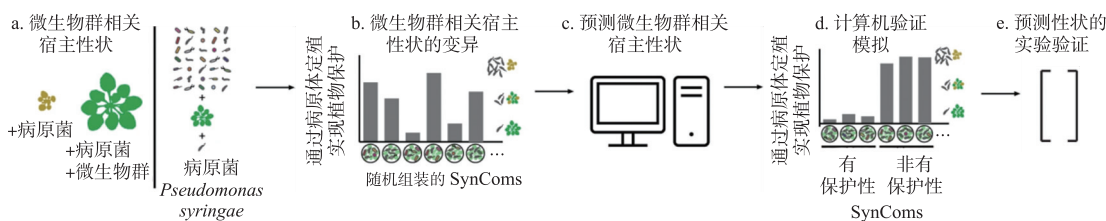


图5 筛选策略概述^[35]

Fig. 5 Overview of screening strategy^[35]

a. 以拟南芥(*Arabidopsis thaliana*)为宿主、病原菌 *Pseudomonas syringae* 以及细菌菌株库构建的试验体系 An experimental system of *Arabidopsis thaliana* as host, a pathogen *Pseudomonas syringae* and a bacterial strain collection; b. 随机构建合成微生物群落并接种于宿主,同时测定群落特征及宿主相关性状 Randomly constituted synthetic communities with which the host is inoculated and measurements of the community and host traits of interest; c. 通过统计建模(如机器学习方法)识别与目标性状变异相关的群落属性 Statistical modeling to identify properties of communities which correlate with variation in the trait of interest (e.g., machine learning); d. 利用独立数据集对模型进行验证 Validation of models with an independent dataset; e. 对被识别为可能影响宿主性状的群落属性进行实证验证,此处以病原菌定殖情况为例 Empirical validation of the properties of the communities identified as potentially impacting the host trait, here pathogen colonization.

3.2 逆境下功能表达与效果稳定性研究

在气候变化和土壤退化加剧的背景下,关注微生物肥料在逆境下的功能稳定性具有重要现实意义。不少微生物菌株在实验室条件下表现出良好的促生效果,但在田间高温、干旱、盐分、重金属或病原压力下,其定殖能力和功能表达出现明显下降^[5-6,16]。适应逆境下的微生物肥料研发应重点关注3个方向:第一,建立面向盐碱、干旱、重金属和连作障碍场景的功能菌资源库,重点从极端环境中筛选多重抗逆菌株^[37-38];第二,利用多组学手段和基因组尺度代谢模型解析菌株在逆境下的表达状态与代谢瓶颈^[6,16,39];第三,将抗逆菌株与合成菌群设计结合,借鉴代谢互养与生态位分化机制构建田间稳定性更强的肥料产品^[5-6,9,13,37]。图6总结了极端环境微生物响应环境胁迫的适应机制与关键功能分子。

适应逆境的微生物具有特殊的代谢调控能力。基因组尺度代谢模型(genome-scale metabolic model, GEM)研究表明,嗜热菌和嗜冷菌分别通过增强蛋白结构稳定性和表达冷激蛋白适应温度胁迫,耐盐菌则依赖相容溶质的合成或积累维持渗透平衡^[37-38]。耐旱菌株可通过产生胞外多糖(EPS)和渗透调节物质增强根际保水能力^[6],耐重金属菌株则依赖金属离子外排和抗氧化系统缓解毒害^[5]。极端环境来源微生物携带的抗逆基因(如 *irrE*、*dsup*、*cspL* 等)已在模式菌株中实现异源表达,为开发逆境型微生物肥料提供了遗传资源^[5-6,37-38]。

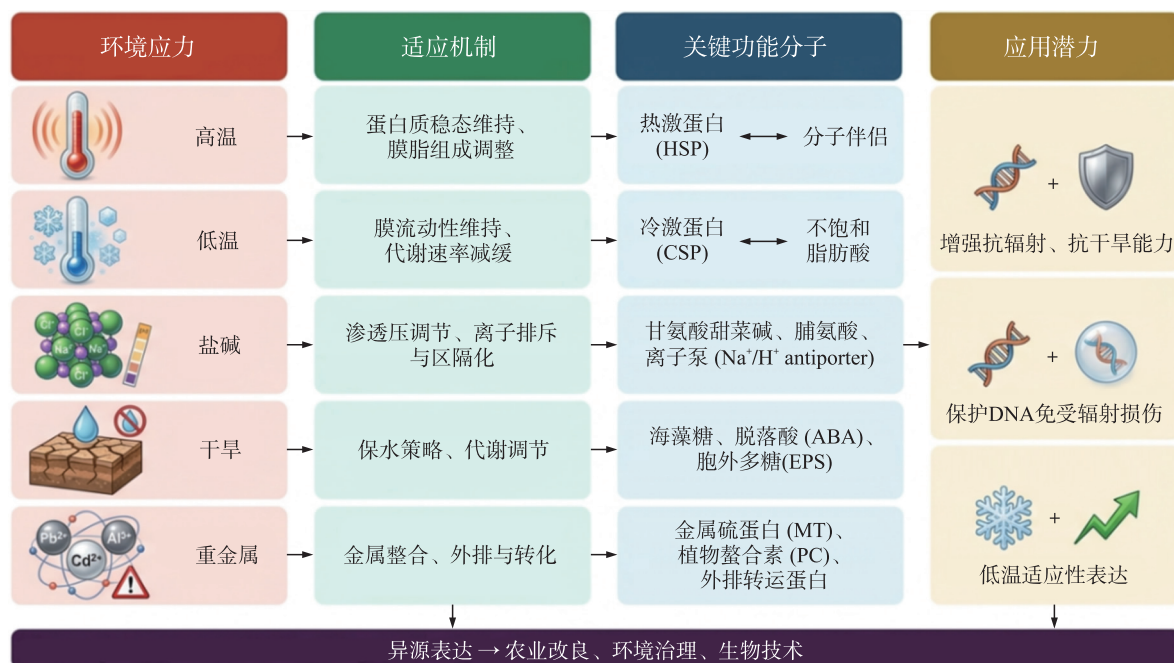


图6 极端环境微生物响应环境应力的适应机制及关键功能分子与应用潜力

Fig. 6 Adaptation mechanisms and key functional molecules of extremophiles in response to environmental stresses and their application potential

3.3 微生物肥料功能代谢物与复合增效研究

微生物肥料的功能稳定性在很大程度上取决于功能代谢物的复合增效,研究焦点正从单菌筛选转向多菌株协同体系设计。Liu 等^[40]发现果蔬残渣微氧发酵过程中,调控发酵参数可定向富集功能菌群并积累功能小肽和类脂等活性代谢物,为有机废弃物资源化生产生物活性肥料提供了新路径。Ma 等^[41]从根际代谢物转运角度揭示了氨基酸介导的微生物养分获取机制。Xie 等^[32]首次揭示了芽胞杆菌(*Bacillus*)与木霉(*Trichoderma*)这2种典型有益微生物之间的“跨界代谢物对话”机制。研究发现,二者虽然在平板上相互抑制,但在田间共接种时,可通过“ σ B因子-表面活性素-T22氮杂萘酮-镰刀菌酸”代谢网络(σ B-surfactin-T22azaphilone-Fusaric acid)形成稳定联盟,显著提升对棉花枯萎病的防控效果。这一发现打破了传统“拮抗菌不能共施”的认知,为构建高效稳定的合成菌群提供了理论依据。

田间应用同样证实了复合增效的优势。Lai 等^[34]发现多菌肥混合施用可重塑烟草根际微生物组,并增强有机酸和铁载体合成的协调性;Wang 等^[42]证实微藻为PGPR提供有机碳源后,PGPR分泌生长素和抗菌物质形成功能互补循环;Fan 等^[43]则发现有机肥与固氮菌配施通过“土壤养分-微生物-代谢物”互作网络提高竹笋产量。

复合增效的内在逻辑可归纳为3个方面:一是生态位互补,不同功能菌占据不同根际生态位,减少直接竞争;二是代谢互养,一菌代谢物成为另一菌的营养底物或信号分子;三是代谢物协同抑病,多种抗菌代谢物叠加可拓宽抑菌谱并降低病原菌抗性风险。梅瀚杰等^[44]系统总结了强化养分资源高效利用的微生物肥料创制关键技术,强调未来应重点发展基于代谢组学的功能代谢物筛选技术、菌株相容性快速评价体系以及多菌株协同发酵工艺。综上,微生物肥料正从“单一菌剂”向“代谢物导向的复合菌群”转型,核心任务在于解析跨界互作代谢途径,构建可预测的组装规则并开发复合发酵工艺。图7从生态位互补、代谢互养和协同抑病3个维度概括了复合增效的核心机制及其从功能代谢物筛选到田间验证的技术转化链条。

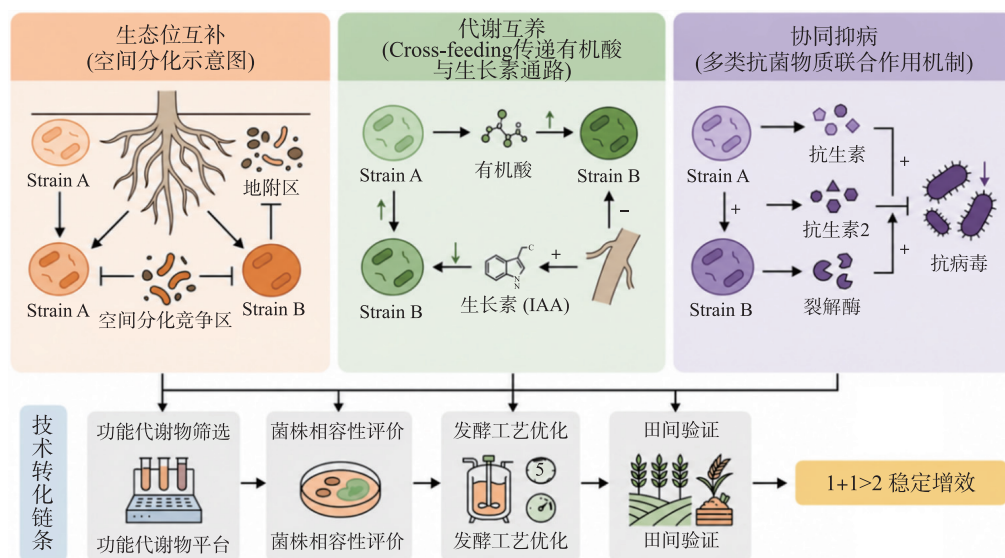


图7 微生物肥料复合增效的3条核心机制与技术转化路径

Fig. 7 Three core mechanisms of microbial fertilizer synergistic enhancement and the technology translation pathway

4 微生物肥料新技术、新产品研发与应用

为满足国家化肥减量增效、土壤健康修复和农业绿色转型的需要,需要从菌种筛选、功能强化、载体保护、控释递送和场景化应用等环节,采用宏基因组学、宏培养组学、高通量筛选、合成生物学、生物炭载体、水凝胶包埋、纳米递送和合成菌群等技术,研发功能高效稳定、应用场景轻简的新型微生物肥料^[45-47]。围绕“筛菌、改造、发酵、载体、产品”的技术链条,微生物肥料研发正实现3个关键转变:一是从“经验筛选菌株”转向“组学与数据驱动筛选菌株”;二是从“天然菌株直接利用”转向“功能菌株改造与合成菌群构建”;三是从“简单粉剂或液体菌剂”转向“复合载体、控释递送和场景化产品体系”。促使微生物肥料不再只是传统意义上的“活菌添加剂”,而是能成为调控根际微生态、改善养分循环、提升作物抗逆性和促进农业高质量发展的新一代生物制品^[2,4,16]。

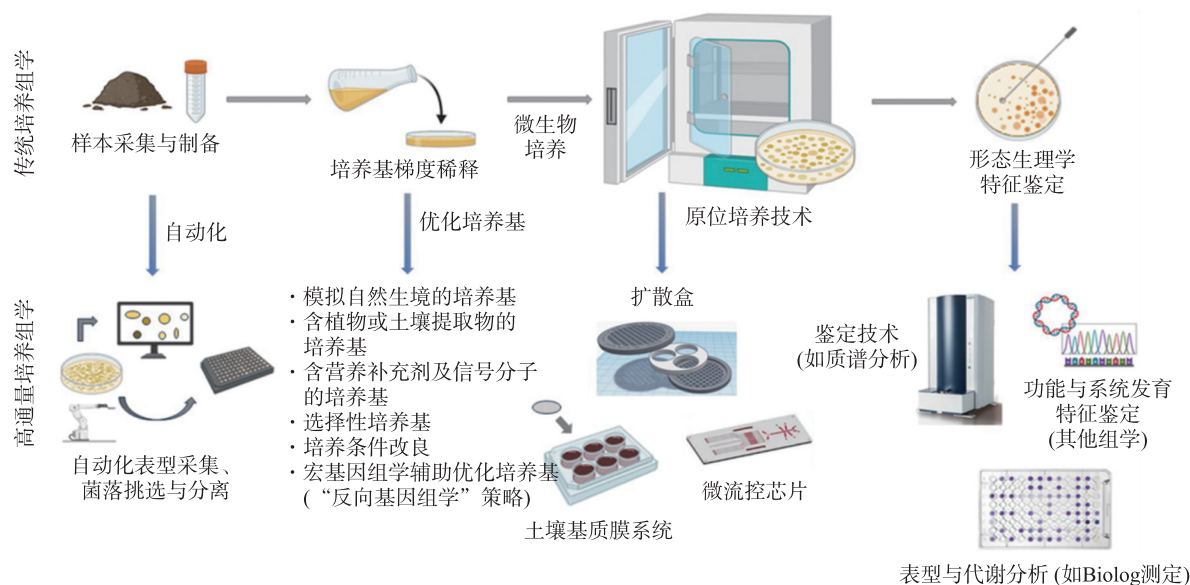
4.1 高通量筛选与组学技术是高效获得优良菌株的技术手段

菌种资源是创新微生物肥料产品的“芯片”。近年来,宏基因组学和微生物组学技术被广泛用于解析土壤、根际和植物内生微生物群落结构及其功能。通过对土壤微生物群落的高通量测序,可以识别与养分转化、植物促生、病害抑制和环境适应相关的关键功能基因,为后续功能菌株筛选提供靶向依据^[45]。宏基因组学的优势在于能够突破传统培养技术的限制,直接从环境样品中获得微生物群落组成、功能基因和代谢通路等信息。例如,在农业土壤微生物组研究中,研究者可通过宏基因组测序分析固氮基因、磷循环相关基因、钾矿物风化相关基因以及抗逆代谢通路,从而判断不同土壤环境中潜在有益微生物的分布规律^[45]。

与宏基因组学相比,采用宏培养组学技术能更有效地筛选挖掘获得功能菌株资源。宏培养组学通过设计多类型培养基、梯度营养条件、模拟根系分泌物环境以及高通量分离鉴定技术,尽可能提高根际和植物内生微生物的可培养比例^[46-47]。这一技术特别适合微生物肥料研发,因为优良产品最终需要稳定、可发酵、可保存、适用性强的功能菌株。宏培养组学在“发现菌群功能”与“获得产品菌株”之间起到了桥梁作用^[46]。近年来,AI辅助筛选通过整合多组学与表型数据,可预测菌株的促生潜力和复配兼容性^[48]。

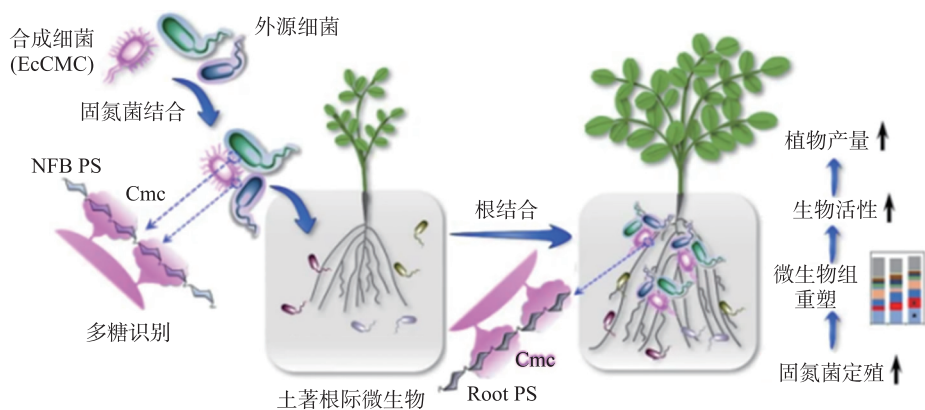
挖掘极端环境中的优良菌株是当前微生物肥料研发的重要方向。盐碱地、干旱区、重金属污染土壤和低温地区中长期存在的微生物,往往具有较强的逆境适应能力。将这些微生物筛选并开发为具有耐盐、耐旱、耐低温等特色功能的菌剂,可以增强微生物肥料在特殊土壤和设施农业中的应用价值。已有研究从盐碱地区筛选出具有植物促生能力的细菌组合,证明其能够缓解盐胁迫并促进植物生长^[49]。

综上,宏基因组学提供功能预测,宏培养组学提供可培养资源,AI提高筛选效率,三者共同构成新一代微生物肥料菌株筛选的技术基础(图8)。

图8 传统与新兴培养组学方法^[45]Fig. 8 Traditional and novel approaches to culturomics^[45]

4.2 合成生物学与工程改造是赋能微生物肥料新产品的技术路径

在获得潜在的优良菌株资源后,如何进一步增强其功能稳定性和田间适应性,是微生物肥料研发的关键难题。自然菌株虽然具有一定促生、固氮、溶磷或生防能力,但其功能表达往往受土壤类型、温度、湿度、根系分泌物、原生微生物群落竞争等因素影响,导致田间效果不稳定。合成生物学和基因工程技术为功能菌株的定向改造提供了新手段。合成生物学的核心思路是将生物系统进行模块化设计和工程化重构,使微生物具备更强、更稳定或可调控的功能。在固氮微生物研究中,研究者已经开发出适用于固氮土壤微生物的合成生物学工具箱,包括启动子、质粒、调控元件和遗传操作体系等,为工程固氮菌的构建和新产品研发奠定了基础^[50]。这类工具可用于增强固氮基因表达、提高氮代谢效率或改善工程菌在根际环境中的定殖能力。例如,研究者构建的合成细菌 EcCMC 利用表面多糖识别蛋白作为锚点,可显著增强外源固氮菌在根系的定殖效率并实现增产(图9)^[51]。

图9 合成细菌 EcCMC 介导的固氮细菌定殖及其对植物产量影响的机制^[51]Fig. 9 Schematic mechanism of synthetic bacterium(EcCMC)-mediated NFB colonization and its impact on plant yield^[51]

对于禾本科作物而言,工程化根际微生物具有重要应用价值。水稻、小麦和玉米等主要粮食作物通常不能像豆科植物那样与根瘤菌形成高效共生固氮体系,因此如何利用工程微生物提高其氮素利用效率,是微生物肥料研发的前沿方向之一。已有研究围绕玉米根际微生物工程开发了快速 MoClo 工具箱,为作物根际微生物组的定向改造提供了技术平台^[50]。此外,关于固氮酶工程和合成固氮系统的研究表明,通过优化固氮酶结构、调控电子传递途径和改善氧敏感性,有望提高生物固氮效率和固氮量^[52]。工程固氮菌虽然具有较大潜力,但其田间应用仍面临多重挑战。一方面,固氮过程能量消耗大,工程菌需要在复杂土

壤环境中维持稳定代谢;另一方面,基因工程菌释放到田间涉及生态安全、生物扩散和监管问题。因此,相关研究强调,合成生物学技术从实验室走向农业田间应用时,必须充分考虑功能稳定性、环境适应性、生物安全性和政策监管等问题^[53]。也就是说,工程化微生物肥料不能只追求高功能表达,还需要保证其环境可控性和生态安全性。

除固氮外,合成生物学还可以用于构建“微生物植物通信系统”。有研究者设计了合成微生物向植物传递环境信号的通信通道,使工程细菌能够感知外界环境并将信号转化为植物响应^[54]。这一思路为智能响应型菌肥提供了理论基础。未来,微生物肥料可能不仅能够提供养分或促生物质,还可以根据根际 pH 值、盐分、水分、病原菌压力或植物生育阶段变化,自动调控功能表达,实现“智能化根际管理”。

4.3 高密度发酵与保活技术是微生物肥料产品质量与功效的工艺保证

高密度、高活性、低成本是微生物肥料规模化生产的目标。对于芽胞杆菌、假单胞菌、固氮菌、乳酸菌、木霉和丛枝菌根真菌等不同微生物类型,需要根据其生理特征设计不同的培养基、通气条件、pH 值、温度、碳氮源比例和发酵工艺。尤其对于非芽胞型细菌和真菌类菌剂,保活难度更高,制剂稳定性往往成为限制产品推广的重要因素。目前,微生物肥料常见制剂包括液体菌剂、粉剂、颗粒剂、冻干粉和包埋型制剂。液体菌剂储存期短,粉剂和颗粒剂干燥过程可能损伤菌体,冻干制剂活性好但成本高。因此,研发低成本保护剂、优化干燥工艺和提高菌体抗逆性,是提高微生物肥料货架期和田间稳定性的关键。

在保活技术方面,常用策略包括添加海藻糖、甘油、脱脂乳粉、谷氨酸钠、壳聚糖或多糖类保护剂,降低干燥和低温胁迫对细胞膜、蛋白质和酶活性的损伤^[55]。同时,筛选耐干燥、耐低温、耐高渗透压和耐紫外的菌株,也有助于提高制剂稳定性。对于芽胞杆菌类产品,可以利用其形成芽胞的能力提高货架期;对于 PGPR、根际固氮菌或假单胞菌类产品,则需要更加重视载体保护和包埋递送技术^[56-57]。未来微生物肥料研发应更加重视“菌株功能—发酵工艺—制剂稳定性—田间应用效果”的全链条评价。

4.4 新型载体与制剂技术与应用

4.4.1 生物炭与有机质基复合载体助力微生物肥料产品提质增效 载体是影响微生物肥料产品性能的重要因素。传统微生物肥料常使用草炭、蛭石、沸石、腐殖酸、秸秆粉或有机肥作为载体,但这些材料在孔隙结构、吸附能力、保水性、灭菌稳定性和微生物保护方面存在差异。近年来,生物炭因其孔隙丰富、比表面积大、吸附能力强、稳定性高和土壤改良效果明显,成为微生物肥料载体研究的热点^[21]。生物炭作为微生物载体具有多重优势。首先,其多孔结构可以为微生物提供物理庇护空间,降低干燥、紫外和土壤竞争压力对菌体的伤害;其次,生物炭能够吸附水分和养分,为接种微生物提供相对稳定的微环境;最后,生物炭本身具有改良土壤结构、提高阳离子交换量和调节土壤 pH 值的作用,有利于微生物定殖和植物根系生长^[21,58]。有研究指出,生物炭与微生物菌剂联合施用能够改善砂质土壤肥力,提高作物生产力^[59-61]。这种复合方式对于保水保肥能力差的土壤尤其具有应用价值。在国家推进农业废弃物资源化利用背景下,秸秆炭、稻壳炭、畜禽粪便炭和果树枝条炭等材料均可作为微生物肥料载体来源。这不仅有助于提高微生物肥料产品性能,也符合农业废弃物循环利用和绿色低碳农业的发展方向^[62-63]。然而,生物炭载体也存在一定问题。不同原料和热解温度制备的生物炭理化性质差异较大,其 pH 值、灰分、孔隙结构、挥发性有机物和潜在污染物含量均可能影响微生物活性。因此,生物炭基微生物肥料开发需要建立原料选择、热解工艺、灭菌方式、菌体吸附量、释放速率和田间效果评价标准。未来应根据不同作物和土壤场景,开发适配性更强的生物炭基复合菌肥产品。

4.4.2 纳米材料、水凝胶与包埋递送系统将赋能新一代微生物肥料产品研发 除生物炭外,水凝胶、海藻酸钠微球、壳聚糖包埋材料和纳米胶囊也是微生物肥料制剂技术的重要发展方向。与传统粉剂相比,包埋和控释材料能够为微生物提供更稳定的生存环境,减少储存和施用过程中的菌体损失,并实现养分、微生物和促生因子的同步释放^[64-69]。

水凝胶材料具有良好的吸水保水能力,可以在干旱或水分波动较大的环境中维持根际水分稳定。已有研究构建了根际细菌保护性水凝胶,将植物促生菌包埋于羧甲基壳聚糖、海藻酸钠和氯化钙形成的凝胶体系中,从而提高菌株在不利环境下的存活率和促生效果^[70]。将海藻酸盐水凝胶与微量元素、植物促生菌结合,可以实现微生物和营养元素的双重控释^[67]。这种“菌体+养分+载体”的复合设计,有利于提高微生物肥料产品的综合功能。应用纳米材料也为微生物肥料产品研发提供了新思路。例如,壳聚糖、海藻酸盐和腐殖酸等材料可用于构建纳米生物肥料胶囊,同时负载氮、磷、钾养分和促生菌,实现缓释与保护功

能^[64]。壳聚糖包埋微生物肥料也被证明能够改善土壤健康、提高番茄产量和促进植物生长^[66]。近期, Liu 等^[51]构建了“真菌组装微球”系统,可在盐碱土环境中稳定释放真菌代谢产物并缓解盐胁迫。不过,纳米材料应用于农业时需要重视生态安全性、降解性、成本和长期土壤环境影响,避免因过度追求材料先进性而忽视实际应用可行性。

总之,新型载体与制剂技术是提高微生物肥料稳定性和产品竞争力的关键。生物炭、水凝胶和包埋系统可改善产品田间应用的稳定性。未来微生物肥料产品可能更多采用“功能菌株+有机质载体+保水材料+缓释养分+根际靶向递送”的复合设计模式。

4.5 复合多功能化与应用场景化

4.5.1 复合化与多功能是微生物肥料产品的研制方向 微生物肥料产品体系正在从单菌种、单功能向复合化、多功能方向发展,复合菌剂和多功能菌肥成为产品研发的重要趋势^[2,16]。复合菌剂通常应由多种功能互补的微生物组成。例如,固氮菌可增加氮素输入,溶磷菌可释放难溶性磷,解钾菌可促进矿物钾活化,芽孢杆菌和木霉可抑制土传病害,部分 PGPR 可分泌 IAA、赤霉素、铁载体或 ACC 脱氨酶,提高植物抗逆能力。通过合理复配,微生物肥料可以同时实现促生、抗病、改土和养分活化等多重功能。值得注意的是,单一菌株自身也可能通过多机制耦合实现多功能协同。例如,贝莱斯芽孢杆菌 SQR9 在根表形成生物膜的同时,分泌的铁载体能够在生物膜基质中富集铁元素,形成局部铁库,既保障了自身定殖需求,又显著改善了作物铁营养^[71]。这表明,深入解析菌株的多功能耦合机制,是设计高效复合菌剂的理论基础。

与单菌剂相比,合成菌群可以通过不同功能菌之间的互补作用,提高产品稳定性和多功能性。例如,一些菌株负责固氮,一些菌株负责溶磷或解钾,还有一些菌株产生植物激素、铁载体或抗病物质。理性设计菌群结构,可以构建具有促生、抗逆、生防和养分活化多重功能的复合菌剂^[48,72-73]。但需要加强研发和突破菌株间的相容性、比例稳定性、发酵一致性以及田间定殖协同效应等合成菌群关键难点。

研发“菌与药复合”的防病促生一体化产品具有发展潜力和实践需求。土传病害、连作障碍和根际微生态失衡是设施农业和高强度种植体系中的常见问题。利用拮抗菌、促生菌和有机载体构建兼具生防和促生功能的产品,可以减少化学农药使用,提高土壤健康水平。但这类产品需要注意菌株安全性、抗病谱、与作物品种的适配性以及与其他农业投入品的兼容性。韦中等^[16]提出应从根际互惠功能体角度思考微生物肥料研发,即不仅关注单个菌株功能,也要关注植物、微生物、土壤和有机载体之间形成的互惠关系。这一观点对未来产品开发具有启发意义。微生物肥料不应只是将多个菌株简单混合,而应基于根际生态功能进行设计,使不同微生物在养分转化、定殖互助、病害抑制和环境适应方面形成协同效应。

4.5.2 应用场景化是微生物肥料效果稳定的保证 未来微生物肥料产品的重要方向是应用场景化。所谓场景化,是指根据不同土壤类型、作物种类、生育阶段和生产问题设计专用产品。例如,可开发盐碱地专用菌肥、设施蔬菜专用菌肥、果园土壤改良菌肥、稻麦玉米专用复合菌肥、连作障碍修复菌肥和干旱区保水促生菌肥等。不同应用场景下限制因子不同,产品设计应有针对性地选择功能菌株和载体类型。合理引导微生物肥料产品走向有序的场景化发展,有利于改变当前市场上产品同质化严重的现状。同时,为了确保产品在不同场景中的效果稳定性,还需要建立产品效果与土壤类型、作物种类、气候条件和施用方式的匹配关系数据库^[2,4]。配套开发智能化施用决策支持系统,实现“因地选菌、因时施用”。

5 未来展望

5.1 深化基础机制研究,夯实技术理论支撑

紧扣“十五五”农业绿色发展需求,围绕功能稳定、复合增效、场景适配三大目标,综合运用合成生物学、多组学、人工智能等技术,深入解析养分活化、促生抗逆、土壤微生态调控等核心机制。重点攻关合成菌群互作、逆境功能表达、微生物功能代谢物协同增效等方向,衔接《T/CISIA 010—2025 生物刺激素 微生物功能代谢物通则》等新规要求,以科学实证厘清微生物肥料与微生物类生物刺激剂的协同机制,破解“实验室效果优、田间表现差”难题,为产品长效稳定应用筑牢理论根基。

5.2 迭代升级产品体系,丰富场景化供给

依托高通量筛选、菌株定向改造、高密度发酵、新型载体包埋等技术,推动产品向复合化、多功能化、精准化升级。重点研发土壤修复、连作障碍治理、养分活化、种子包衣、有机物料腐熟等专用菌剂,打造适配盐碱地、旱地、设施农业、主粮与经济作物的场景化产品矩阵。顺应生物刺激剂产业发展趋势,开发“微生

物菌体+功能代谢物”复合产品,融合肥料营养供给与生物刺激剂抗逆、提质功效,加快前沿技术成果产业化落地。

5.3 完善产业扶持政策,引导行业良性发展

衔接化肥减量、耕地保护、土壤治理、“双碳”等国家战略,将微生物肥料纳入各类农业重大工程,落实专项补贴、税收减免、信贷支持等激励政策。搭建产学研用协同平台,支持前沿技术研发与成果转化,针对不同生态区域出台差异化扶持举措。结合未来生物刺激剂纳入肥料管理体系的新政导向,统筹两类绿色投入品的配套扶持政策,引导产业从规模扩张转向高质量发展。

5.4 健全全链条标准体系,统一规范技术要求

补齐现有标准短板,构建基础术语分类、菌种安全、生产工艺、检测方法、施用规程一体化标准体系。对标现行生物刺激剂系列团体标准与行业标准及国标要求,完善合成菌群、工程菌株、微生物代谢物、新型载体制剂等新兴领域规范,统一活菌检测、功能评价、标签标识等核心要求。分作物、分土壤制定施用规范,推行企业高标准内控体系,实现微生物肥料与微生物类生物刺激剂标准衔接,以标准化引领产品提质。

5.5 强化全维度市场监管,净化行业经营环境

严格执行肥料登记制度,抬高准入门槛,强化菌种溯源、安全评估与田间效果核验。开展多部门联合常态化执法,严查活菌数不达标、虚假宣传、无证生产等违法行为,建立黑名单与市场退出机制。衔接生物刺激剂新规,细化代谢物含量、功能宣称等监管细则,借鉴产品溯源管理经验完善追溯体系;针对工程菌、纳米制剂等新品类增设生物安全监管规则,守住质量与安全底线。

5.6 优化产业生态布局,推进整合与国际化发展

推动行业资源整合,引导中小企业深耕细分赛道,实现差异化发展,支持龙头企业整合资源做大做强,提升产业集中度。补齐上下游产业链配套,加强专业人才培养。依托我国产业优势稳步开拓海外市场,紧跟全球生物刺激剂法规新动态,适配欧盟、东南亚等地区监管要求输出产品与技术,深度参与国际标准共建,提升行业国际竞争力。

5.7 联动智慧农业发展,创新应用服务模式

推动微生物肥料与智能农机、水肥一体化、农业物联网融合,实现精准配肥、智能施用。拓展“产品+测土配方+田间技术服务”新业态,搭配生物农药、生物刺激剂打造一体化绿色投入品组合。依托数字化技术实现微生物肥料、生物刺激剂全流程监测与效果追踪,充分发挥2类产品协同优势,助力耕地提质、稳产增收与农业生态保护,服务农业绿色可持续发展。

参考文献 References:

- [1] 李俊,姜昕,马鸣超,等.我国微生物肥料产业需求与技术创新[J].中国土壤与肥料,2019(2):1-5.
Li J, Jiang X, Ma M C, et al. Development demand and technical innovation for bio-fertilizer industry in China[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2019(2): 1-5 (in Chinese with English abstract).
- [2] 张瑞福,陈玉,孙新丽,等.中国生物肥料与有机肥料研究三十年:回顾与展望[J].植物营养与肥料学报,2024,30(7):1262-1273.
Zhang R F, Chen Y, Sun X L, et al. Biofertilizer and organic fertilizer research over thirty years in China: retrospect and prospect[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2024, 30(7): 1262-1273 (in Chinese with English abstract).
- [3] 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):2108-2114.
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): 2108-2114 (in Chinese with English abstract).
- [4] 丁文成,何萍,周卫.我国新型肥料产业发展战略研究[J].植物营养与肥料学报,2023,29(2):201-221.
Ding W C, He P, Zhou W. Development strategies of the new-type fertilizer industry in China[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2023, 29(2): 201-221 (in Chinese with English abstract).
- [5] Qin H C, Wang Z X, Sha W Y, et al. Role of plant-growth-promoting rhizobacteria in plant machinery for soil heavy metal detoxification[J]. Microorganisms, 2024, 12(4): 700.
- [6] El-Saadony M T, Saad A M, Mohammed D M, et al. Drought-tolerant plant growth-promoting rhizobacteria alleviate drought stress and enhance soil health for sustainable agriculture: a comprehensive review[J]. Plant Stress, 2024, 14: 100632.
- [7] National Academies of Sciences, Engineering, Medicine. Science breakthroughs to advance food and agricultural research by 2030[M]. Washington, DC: The National Academies Press, 2019.
- [8] Alzate Zuluaga 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.
- [9] Jing J Y, Garbeva P, Raaijmakers J M, et al. Strategies for tailoring functional microbial synthetic communities[J]. The ISME Journal, 2024, 18:

wrae049.

- [10] 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): 1–22.
- [11] 张福锁, 程凌云, 黄成东, 等. 绿色智能肥料: 智能调控的创新思路与产业化途径[J/OL]. 土壤学报, 2025–12–03. https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=BsQQ9aL8NZtkEmbak8mHGtFJPasCqwtUrnxcX45cvpmF9zYSsa-IZZ91wDB-cRnd0iixNmvcK2L68a6IwhCaOs7fj-D4lWBvYE61oHi_UvdYRxnqGZmWIBQRWr8B6dVecoXXZEMIZmv_P5jnlwVqALXV8kUMPrIUPoB42xRE3WP6PXRyQgBiZg=&uniplatform=NZKPT&language=CHS.
Zhang F S, Cheng L Y, Huang C D, et al. Green intelligent fertilizer: innovative ideas and industrialization ways of intelligent regulation[J/OL]. China Industrial Economics, 2025-12-03. https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=BsQQ9aL8NZtkEmbak8mHGtFJPasCqwtUrnxcX45cvpmF9zYSsa-IZZ91wDB-cRnd0iixNmvcK2L68a6IwhCaOs7fj-D4lWBvYE61oHi_UvdYRxnqGZmWIBQRWr8B6dVecoXXZEMIZmv_P5jnlwVqALXV8kUMPrIUPoB42xRE3WP6PXRyQgBiZg=&uniplatform=NZKPT&language=CHS (in Chinese with English abstract).
- [12] Fadji A E, Xiong C, Egid 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.
- [13] 方临川, 胡紫莹, 崔庆亮, 等. 合成菌群构建与应用: 提升土壤健康新策略[J]. 土壤学报, 2025, 62(5): 1233–1245.
Fang L C, Hu Z Y, Cui Q L, et al. Construction and application of synthetic communities: a new strategy to improve soil health[J]. Acta Pedologica Sinica, 2025, 62(5): 1233–1245 (in Chinese with English abstract).
- [14] GB/T 41728—2022 微生物肥料质量安全评价通用准则[S].
GB/T 41728—2022 General criteria for quality and safety evaluation of microbial fertilizer[S] (in Chinese).
- [15] GB/T 41729—2022 复合型微生物肥料生产质量控制技术规程[S].
GB/T 41729—2022 Code of practice for quality control for production of composite microbial fertilizers[S] (in Chinese).
- [16] 韦中, 杨天杰, 王孝芳, 等. 基于根际互惠功能体的微生物肥料研发思考[J]. 植物营养与肥料学报, 2024, 30(12): 2403–2409.
Wei Z, Yang T J, Wang X F, et al. Development of microbial fertilizers in a perspective of rhizosphere holobiont[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2024, 30(12): 2403–2409 (in Chinese with English abstract).
- [17] 阮文渊, 任剑豪, 郭美娜, 等. 氮磷养分介导的植物-微生物互作研究进展[J]. 植物营养与肥料学报, 2024, 30(7): 1322–1328.
Ruan W Y, Ren J H, Guo M N, et al. Advances in the study of plant-microbial interactions coordinated by nitrogen and phosphorus nutrients[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2024, 30(7): 1322–1328 (in Chinese with English abstract).
- [18] Pii Y, Mimmo T, Tomasi N, et al. Microbial interactions in the rhizosphere: beneficial influences of plant growth-promoting rhizobacteria on nutrient acquisition process. A review[J]. Biology and Fertility of Soils, 2015, 51(4): 403–415.
- [19] 韩苗, 朱晓艳, 陈国伟, 等. 解钾菌及其释钾微观机制的研究进展[J]. 土壤学报, 2022, 59(2): 334–348.
Han M, Zhu X Y, Chen G W, et al. Advances on potassium-solubilizing bacteria and their microscopic potassium solubilizing mechanisms[J]. Acta Pedologica Sinica, 2022, 59(2): 334–348 (in Chinese with English abstract).
- [20] Situ G, Zhao Y L, Zhang L, et al. Linking the chemical nature of soil organic carbon and biological binding agent in aggregates to soil aggregate stability following biochar amendment in a rice paddy[J]. Science of the Total Environment, 2022, 847: 157460.
- [21] Bolan S, Hou D Y, Wang L W, et al. The potential of biochar as a microbial carrier for agricultural and environmental applications[J]. Science of the Total Environment, 2023, 886: 163968.
- [22] 张明霞, 赵萌萌, 郭紫煊, 等. 枯草芽胞杆菌 L5 的促生机理及其修复盐碱土壤效果研究[J]. 兰州交通大学学报, 2025, 44(5): 136–148.
Zhang M X, Zhao M M, Guo Z X, et al. Study on the growth-promoting mechanism of *Bacillus subtilis* L5 and its effect on the remediation of saline-alkali soil[J]. Journal of Lanzhou Jiaotong University, 2025, 44(5): 136–148 (in Chinese with English abstract).
- [23] 管上淇, 段维, 贾秀苹, 等. 微生物菌肥影响作物盐碱抗性响应机理研究进展[J]. 江苏农业科学, 2025, 53(18): 7–16.
Guan S Q, Duan W, Jia X P, et al. Research progress on mechanisms of microbial fertilizer influencing crop tolerance to saline-alkali stress[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2025, 53(18): 7–16 (in Chinese with English abstract).
- [24] Li R, Sun B, Song M J, et al. Improvement of saline soil properties and *Brassica rapa* L. growth using biofertilizers[J]. Sustainability, 2024, 16(5): 2196.
- [25] 龚文坤, 伍巧慧, 王钢, 等. 火龙果根际促生微生物筛选及其效应[J]. 热带生物学报, 2024, 15(5): 632–638.
Gong W K, Wu Q H, Wang G, et al. Screening of microorganisms promoting rhizosphere growth in dragon fruit[J]. Journal of Tropical Biology, 2024, 15(5): 632–638 (in Chinese with English abstract).
- [26] Chen H M, Min F F, Hu X, et al. Biochar assists phosphate solubilizing bacteria to resist combined Pb and Cd stress by promoting acid secretion and extracellular electron transfer[J]. Journal of Hazardous Materials, 2023, 452: 131176.
- [27] 贾南豫, 朱水英, 蒋栋, 等. 施用液体有机肥对干旱胁迫下玉米和小麦生长及根际微生物的影响[J]. 南京农业大学学报, 2025, 48(5): 1060–1069.
Jia N Y, Zhu S Y, Jiang D, et al. The effect of liquid organic fertilizer on the growth and rhizosphere microorganisms of corn and wheat under drought stress[J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2025, 48(5): 1060–1069 (in Chinese with English abstract).
- [28] Yang X R, Yang T J, Zhang Z R, et al. Substrate utilization and cross-feeding synergistically determine microbiome resistance to pathogen invasion[J]. Nature Ecology & Evolution, 2026, 10(2): 211–220.
- [29] Tan T M, Tao L L, Zhang Y L, et al. The volatile pentadecane from *Bacillus* alleviates plant iron deficiency through activating the reduction-based Fe uptake system[J]. Plant Biotechnology Journal, 2026, 24(3): 1564–1577.
- [30] Backer R, Rokem J S, Ilangumaran G, et al. Plant growth-promoting rhizobacteria: context, mechanisms of action, and roadmap to

- commercialization of biostimulants for sustainable agriculture[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2018, 9: 1473.
- [31] Fanai A, Bohia B, Lalremruati F, et al. Plant growth promoting bacteria (PGPB)-induced plant adaptations to stresses; an updated review[J]. *PeerJ*, 2024, 12: e17882.
- [32] Xie J Y, Sun X L, Wen T, et al. Metabolite interactions mediate beneficial alliances between *Bacillus* and *Trichoderma* for effective *Fusarium* wilt control[J]. *The ISME Journal*, 2026, 20: wraf283.
- [33] 刘正洋, 王若斐, 乔策策, 等. 木霉生物有机肥对白菜和甘蓝产量及土壤微生物区系的影响[J]. *南京农业大学学报*, 2020, 43(4): 650–657.
- Liu Z Y, Wang R F, Qiao C C, et al. Effects of *Trichoderma*-organic fertilizer application on yield and soil microflora in Chinese cabbage and cabbage rotation system[J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2020, 43(4): 650–657 (in Chinese with English abstract).
- [34] Lai X J, Hou S L, Liu S Q, et al. Mixed application of microbial fertilizers reshapes the tobacco rhizosphere microbiome and enhances metabolic coordination to improve crop quality[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2025, 16: 1726681.
- [35] Emmenegger B, Massoni J, Pestalozzi C M, et al. Identifying microbiota community patterns important for plant protection using synthetic communities and machine learning[J]. *Nature Communications*, 2023, 14: 7983.
- [36] Wang W, Xia Y W, Zhang P P, et al. Narrow-spectrum resource-utilizing bacteria drive the stability of synthetic communities through enhancing metabolic interactions[J]. *Nature Communications*, 2025, 16: 6088.
- [37] Caro-Astorga J, Meyerowitz J T, Stork D A, et al. Polyextremophile engineering: a review of organisms that push the limits of life[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2024, 15: 1341701.
- [38] Shu W S, Huang L N. Microbial diversity in extreme environments[J]. *Nature Reviews Microbiology*, 2022, 20(4): 219–235.
- [39] Abdul Rehman Y, Fayyaz A, Alblooshi A S, et al. Molecular adaptations and engineering of extremophiles for synthetic biology and biotechnological applications[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2026, 17: 1754802.
- [40] Liu P, He G D, Guo Z C, et al. Characteristics of microbial community succession and functional metabolite accumulation during microaerobic fermentation of high-sugar-load fruit and vegetable residues: potential implications for guiding home production of environmental-friendly bioactive fertilizer[J]. *Genomics*, 2026, 118(2): 111204.
- [41] Ma A Y, Xun W B, Zhang S N, et al. Amino-acid-transporter-mediated assembly of rhizosphere microbiota enhances soil organic nitrogen acquisition in rice[J]. *Nature Plants*, 2026, 12(2): 356–368.
- [42] Wang Y, Xue X H, Schagerl M, et al. Combined application of microalgae and plant growth-promoting rhizobacteria: synergistic effects in improving soil health and crop root disease resistance[J]. *Applied Soil Ecology*, 2026, 218: 106684.
- [43] Fan W, Li S M, Zhang Z W, et al. Mechanistic insights into yield enhancement of *Chimonobambusa opienensis* bamboo shoots driven by organic fertilizer combined with *Azotobacter chroococcum* via soil nutrient-microbe-metabolite interactions[J]. *BMC Plant Biology*, 2025, 25(1): 1625.
- [44] 梅瀚杰, 王好, 危军伟. 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[J]. *生态产业科学与磷氟工程*, 2026, 41(2): 47–56, 72.
- Mei H J, Wang H, Wei J W. Key technologies and prospects for creating microbial fertilizers enhancing utilization efficiency of nutrient[J]. *Eco-industry Science & Phosphorus Fluorine Engineering*, 2026, 41(2): 47–56, 72 (in Chinese with English abstract).
- [45] Clagnan E, Costanzo M, Visca A, et al. Culturomics- and metagenomics-based insights into the soil microbiome preservation and application for sustainable agriculture[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2024, 15: 1473666.
- [46] Lopez-Echartea E, Dusek N, Misialek M, et al. Culturomics from field-grown crop plants using dilution to extinction, two-step library preparation and amplicon sequencing[J]. *Microbiology*, 2025, 171(6): 001571.
- [47] Ji C, Guo J L, Ma Y, et al. Application progress of culturomics in the isolated culture of rhizobacteria: a review[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2024, 72(14): 7586–7595.
- [48] Berruto C A, Demirel G S. Engineering agricultural soil microbiomes and predicting plant phenotypes[J]. *Trends in Microbiology*, 2024, 32(9): 858–873.
- [49] Tiwari P K, Srivastava A K, Singh R, et al. Stress-relieving plant growth-promoting bacterial co-inoculation enhances nodulation and nitrogen uptake in black gram under nitrogen-free saline conditions[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2024, 15: 1516748.
- [50] van Schaik J, Li Z D, Cheadle J, et al. Engineering the maize root microbiome: a rapid MoClo toolkit and identification of potential bacterial chassis for studying plant-microbe interactions[J]. *ACS Synthetic Biology*, 2023, 12(10): 3030–3040.
- [51] Liu S, Zhao Z R, Ji Y X, et al. Synthetic bacterium-facilitated colonization of nitrogen-fixing bacteria for remodeling the rhizosphere microbiome and improving plant yield[J]. *Microbiome*, 2025, 14(1): 7.
- [52] Bennett E M, Murray J W, Isalan M. Engineering nitrogenases for synthetic nitrogen fixation: from pathway engineering to directed evolution[J]. *BioDesign Research*, 2023, 5: 5.
- [53] Brooks S M, Alper H S. Applications, challenges, and needs for employing synthetic biology beyond the lab[J]. *Nature Communications*, 2021, 12: 1390.
- [54] Boo A, Toth T, Yu Q G, et al. Synthetic microbe-to-plant communication channels[J]. *Nature Communications*, 2024, 15: 1817.
- [55] Elsakhawy T, Ghazi A, Ali Abdel-Rahman M. Developing liquid *Rhizobium* inoculants with enhanced long-term survival, storage stability, and plant growth promotion using ectoine additive[J]. *Current Microbiology*, 2021, 78(1): 282–291.
- [56] Soares M B, Almada C N, Pereira E P R, et al. Review-sporeforming probiotic bacteria: characteristics, health benefits, and technological aspects for their applications in foods and beverages[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2023, 138: 453–469.
- [57] Shabir R, Li Y T, Rashti M R, et al. Alternative carrier materials for plant growth-promoting rhizobacteria: progress and perspectives[J]. *Journal*

- of Soils and Sediments, 2026, 26(2):39.
- [58] Rawat J, Sanwal P, Saxena J, et al. Exploring the biochar as a suitable carrier for a bioinoculant *Aspergillusniger* K7 and its consequence on *Eleusine coracana* in field studies[J]. Journal of Agriculture and Food Research, 2023, 14:100825.
- [59] Li Q B, Hu Y H, Zhang X J, et al. *Bacillus*-loaded biochar as a dual strategy for *Fusarium* wilt control and soil health improvement in peanut cultivation[J]. Applied Soil Ecology, 2025, 213:106325.
- [60] Uzinger N, Takács T, Szili-Kovács T, et al. Fertility impact of separate and combined treatments with biochar, sewage sludge compost and bacterial inocula on acidic sandy soil[J]. Agronomy, 2020, 10(10):1612.
- [61] Khalifa D M, Hewait H M, Stanciu A S, et al. Interactive effects of biochar and microbial biofertilizers on sandy soil fertility and cowpea yield in Egyptian agroecosystems[J]. Scientific Reports, 2026, 16:8735.
- [62] Dadhich A, Choudhary R, Sharma Y, et al. Integrating functional biochar and synthetic microbial consortia for circular bioeconomy and sustainable contaminant remediation[J]. Current Research in Biotechnology, 2025, 10:100319.
- [63] Luo P Y, Zhang W K, Xiao D, et al. Biochar-based fertilizers: advancements, applications, and future directions in sustainable agriculture: a review[J]. Agronomy, 2025, 15(5):1104.
- [64] Hamed R, Jodeh S, Alkowni R. Nano bio fertilizer capsules for sustainable agriculture[J]. Scientific Reports, 2024, 14:13646.
- [65] Feng Q R, Luo Y, Liang M, et al. Rhizobacteria protective hydrogel to promote plant growth and adaption to acidic soil[J]. Nature Communications, 2025, 16:1684.
- [66] Beula Isabel J, Balamurugan A, Renuka Devi P, et al. Chitosan-encapsulated microbial biofertilizer: a breakthrough for enhanced tomato crop productivity[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 260:129462.
- [67] Antunes D R, Forini M M L H, de Lima P H C, et al. Sustainable hybrid alginate-based hydrogels for dual controlled release of micronutrients and plant growth-promoting bacteria in soil[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2026, 355:151216.
- [68] Davis R A, Mafune K K, Winkler M K H. Biodegradable hydrogels and microbial consortia as a treatment for soil dysbiosis[J]. Frontiers in Microbiology, 2025, 16:1565940.
- [69] Piccoli I, Camarotto C, Squartini A, et al. Hydrogels for agronomical application; from soil characteristics to crop growth: a review[J]. Agronomy for Sustainable Development, 2024, 44(2):22.
- [70] Overall A, Moreira H, Sousa A S S, et al. Enhancing maize growth and reducing irrigation needs with extracellular polymeric substances and microbial inoculants[J]. Rhizosphere, 2025, 35:101136.
- [71] Tan T M, Xu Z H, Tao L L, et al. Siderophore-mediated iron enrichment in the biofilm matrix enhances plant iron nutrition[J]. Cell Reports, 2025, 44(11):116481.
- [72] Wu W J, Hu H Y, Wang W W, et al. Harnessing biological nitrogen fixation: multi-scale engineering for self-sustaining agroecosystems[J]. Biotechnology Advances, 2025, 84:108687.
- [73] Zhao Z H, Fernie A R, Zhang Y J. Engineering nitrogen and carbon fixation for next-generation plants[J]. Current Opinion in Plant Biology, 2025, 85:102699.

责任编辑:刘怡辰



李俊,中国农业科学院农业资源与农业区划研究所研究员、博导、中国微生物学会监事长、国家大豆产业技术体系岗位科学家。先后担任中国微生物学会常务理事、农业微生物学专委会主任委员及农业农村部微生物肥料质检中心主任等职务。长期从事微生物资源利用及其产业化技术研发、功能机制与生态学研究、微生物肥料质量安全评价与标准制定以及微生物肥料行业技术管理等工作。累计主持国际合作、国家重点研发计划、973 计划、863 计划、国家大豆产业技术体系任务和农业农村部专项等课题 100 余项,在国内外学术期刊上发表论文 140 余篇,主编专著 8 部,获得国家发明专利 11 项。规划并主持制定了 40 项微生物肥料国家和行业标准,建立了国际首创的微生物肥料标准体系,推进了我国微生物肥料的标准化与产业化,推动了微生物肥料及生物刺激剂等合成生物学技术产品在培肥土壤、提高肥料利用率、增产提质、节本增效和农业绿色高质量发展中的规模化应用。



马鸣超,中国农业科学院农业资源与农业区划研究所研究员,博士,现任农业农村部微生物肥料和食用菌菌种质量检验检测中心副主任,农业农村部微生物产品质量安全风险评估实验室(北京)副主任,国家大豆产业技术体系岗位科学家,中国微生物学会农业微生物学专业委员会副主任委员,北京微生物学会副理事长,农业农村部肥料登记评审委员会委员,北京市评标专家。先后主持国家自然科学基金青年基金项目、国家标准和农业行业标准制修订项目、农业农村部政府购买服务项目等省部级课题 20 余项,发表论文 70 余篇,主编专著 2 部,以第一完成人制定农业行业标准 5 项,授权发明专利 3 项。近年来主要从事微生物肥料功效机制、质检技术、风险评估、标准体系建设和土壤微生物学等相关研究。