

微生物菌剂配合施肥对水稻根际微生态及养分利用效率的调控

赵学东

天津市优质农产品开发示范中心(天津市原种场) 天津 301505

摘要: 本文聚焦于水稻这一全球主粮作物,系统综述了微生物菌剂(主要包括固氮菌、解磷菌、解钾菌及促生菌)与不同施肥模式(化肥、有机肥及二者配施)协同作用对水稻根际微生态系统结构、功能及其养分利用效率的调控机制。文章首先阐述了水稻根际生态系统的构成、动态特征及其在养分循环中的核心地位;其次,深入剖析了各类功能微生物菌剂的作用机理,并探讨了其与施肥措施互作对根际微生物群落多样性、网络结构及关键功能基因丰度的影响;进而,详细论述了该协同体系如何通过改善根系构型、活化土壤养分、促进养分吸收转运等途径,显著提升水稻对氮、磷、钾等主要养分的利用效率;最后,文章指出了当前研究中存在的挑战,如菌剂田间效果不稳定、作用机制复杂性及长期生态效应不明等问题,并对未来研究方向进行了展望,旨在为构建高效、环保的水稻绿色生产技术体系提供理论支撑与实践指导。

关键词: 微生物菌剂;施肥;水稻;根际微生态;养分利用效率

引言

水稻作为世界近半数人口的主食,其安全生产关乎全球粮食安全与社会稳定。自20世纪中叶以来,化肥尤其是氮肥的大量投入推动水稻单产增长,但高度依赖化学投入品的集约化种植模式弊端凸显,我国水稻生产氮肥利用率低,大量未利用氮素引发水体富营养化等生态危机,且磷、钾等矿质资源不可再生威胁农业长远发展。在此背景下,探索替代或部分替代化肥的绿色技术路径迫在眉睫。根际作为植物-土壤-微生物相互作用活跃的界面,其微生物群落是土壤养分循环关键引擎和植物获取养分“合作伙伴”。随着分子生物学技术发展,我们对根际微生物组认知加深,微生物菌剂成为连接研究与生产的桥梁,引入有益微生物有望减少对外源化肥依赖。不过,其效果依赖土壤环境,施肥会改变根际特性,深入理解微生物菌剂与施肥措施关系对精准应用生物技术至关重要。本文旨在梳理微生物菌剂配合不同施肥模式对水稻根际微生态及养分利用效率的调控作用,为水稻生产绿色转型提供依据。

1 水稻根际微生态系统的构成与功能

1.1 根际微生态系统的定义与特征

根际是受植物根系活动直接影响的土壤微域,通常指紧邻根表数毫米的土壤。与非根际土相比,根际土壤理化性质和生物学活性独特,最显著特征是富含根系分泌物,成分复杂,包括糖类、氨基酸等,既为根际微生物

提供碳源和能源,又作为化学信号介导植物与微生物双向通讯^[1]。这种“根际效应”使根际微生物数量、多样性和活性远高于非根际土壤,形成高度动态、结构复杂的微生态系统。系统内植物根系、细菌、真菌(含丛枝菌根真菌AMF)、放线菌、原生动物等,通过竞争、共生、寄生等相互作用,共同维持系统稳定与功能。

1.2 根际微生物在养分循环中的核心作用

根际微生物是土壤养分生物地球化学循环的核心驱动力,决定水稻养分有效性。(1)氮素循环:根际是氮转化热点区域。固氮微生物将大气中惰性氮气转化为植物可利用的铵态氮;硝化细菌和反硝化细菌分别参与铵态氮氧化为硝态氮及硝态氮还原为氮气的过程;还能通过矿化作用分解土壤有机氮为无机氮。(2)磷素活化:土壤磷易被固定为难溶性磷酸盐,有效性低。解磷微生物分泌有机酸降低根际pH、螯合金属离子,或分泌磷酸酶水解有机磷,将难溶性磷转化为可溶性磷供植物吸收。(3)钾素及其他微量元素释放:硅酸盐细菌分解含钾矿物,释放钾、硅、铁、镁等元素;微生物代谢产生的铁载体高效螯合土壤铁离子,解决石灰性土壤中铁的有效性问题的。

2 功能微生物菌剂的种类、作用机理及其与施肥的互作

2.1 主要功能微生物菌剂及其作用机理

应用于水稻生产的微生物菌剂主要包含以

下几类：（1）固氮菌剂：如固氮螺菌 *Azospirillum brasilense*）、固氮芽孢杆菌 *Bacillus azotoformans*）等。它们通过固氮酶系统，在厌氧微环境下将 N_2 还原为 NH_3 。除了直接提供氮素，它们还能分泌吲哚乙酸（IAA）等植物生长素，刺激水稻根系发育，扩大根系吸收面积。（2）解磷/解钾菌剂：如巨大芽孢杆菌 *Bacillus megaterium*）、枯草芽孢杆菌 *Bacillus subtilis*）、胶质芽孢杆菌等。其核心机制在于分泌有机酸溶解矿物，或产生胞外多糖形成生物膜，促进矿物风化。同时，它们也能分泌多种酶类，降解土壤有机质，释放结合态养分。（3）植物根际促生菌（PGPR）：这是一类功能更为广泛的菌群，除具备上述部分功能外，还能通过多种途径促进植物生长。例如，通过分泌 ACC 脱氨酶降低植物体内乙烯水平，缓解胁迫；通过产生抗生素或诱导系统抗性（ISR）来抑制土传病原菌；通过改善根际微环境，增强植物对水分和养分的吸收能力。

2.2 施肥对根际微生态的塑造作用

施肥是人为干预根际微生态最直接的方式。不同类型的肥料对微生物群落的影响截然不同。（1）化肥施用：高浓度的无机氮、磷输入会迅速改变根际的化学环境。一方面，充足的氮源可能抑制固氮微生物的活性（氮阻遏效应）；另一方面，过量的化肥，特别是铵态氮肥，会导致土壤酸化，抑制对 pH 敏感的有益微生物（如 AMF），同时可能富集一些耐酸或致病性微生物，破坏微生态平衡。（2）有机肥施用：有机肥（如畜禽粪便、秸秆堆肥）富含有机质和多种养分，其缓慢释放的特性为微生物提供了持续的碳源和能源。施用有机肥通常能显著增加土壤微生物总量和多样性，特别是促进腐生真菌和放线菌的生长，有利于构建结构稳定、功能冗余度高的微生物网络。有机肥中的腐殖酸等物质还能改善土壤团粒结构，为微生物创造更适宜的栖息地^[2]。（3）化肥与有机肥配施：这种模式被认为是兼顾速效与长效、养分供应与土壤培肥的理想方案。化肥提供速效养分满足作物关键生育期的需求，而有机肥则通过改良土壤理化性质和提供微生物基质，为微生物菌剂的定殖和功能发挥创造了有利条件。

2.3 微生物菌剂与施肥的协同效应

微生物菌剂与施肥措施之间存在着深刻的互作关系，合理的搭配能产生显著的协同增效作用。（1）有机肥为菌剂提供“温床”：有机肥改善的土壤物理结构（如孔隙度、保水性）和丰富的有机质，为接种的外源功能菌提供了良好的生存空间和充足的食物来源，极大地提高了其在根际的定殖成功率和存活时间。研究表

明，在施用有机肥的基础上接种解磷菌，其解磷效率比单施化肥或单接菌剂高出数倍。（2）菌剂提升肥料利用效率：接种的微生物菌剂能够有效弥补单一施肥模式的不足。例如，在减量化肥条件下，固氮菌可以补充氮素亏缺；在施用难溶性磷肥时，解磷菌能将其活化。更重要的是，菌剂通过促进根系生长，扩大了根系对肥料的“捕获”范围，减少了养分的流失。（3）协同调控微生物群落结构：微生物菌剂的引入并非简单地增加几个物种，而是作为一种“生态工程师”，通过改变根际环境（如 pH、氧化还原电位）和分泌特定代谢物，间接地调控整个土著微生物群落的组装。当与有机肥配施时，这种调控作用更为显著，往往能富集更多与养分循环相关的功能菌群（*nifH* 固氮基因 *phoD* 解磷基因携带者），并抑制病原菌的丰度，形成一个以有益功能为导向的、更具韧性的根际微生态系统。

3 对水稻养分利用效率的调控机制

微生物菌剂配合施肥最终要体现在对水稻生产力的提升上，其核心在于对养分利用效率（Nutrient Use Efficiency, NUE）的优化。NUE 通常可分解为吸收效率和利用效率。

3.1 改善根系形态与生理

健康的根系是高效吸收养分的前提。微生物菌剂，特别是 PGPR，通过分泌 IAA、赤霉素等植物激素，能显著促进水稻不定根和侧根的发生，增加根长、根表面积和根尖数。一个庞大而活跃根系系统，极大地扩展了与土壤的接触面，增强了对移动性较差的磷、钾等养分的“觅食”能力^[3]。同时，一些菌剂还能增强根系细胞膜的透性，上调根系质膜上养分转运蛋白（如硝酸盐转运蛋白 NRT、磷酸盐转运蛋白 PHT）的表达，从生理层面提升根系的吸收速率。

3.2 活化与转化土壤养分

这是微生物菌剂提升 NUE 最直接的途径。在根际微域内，接种的功能菌通过其代谢活动，将土壤中无效态或缓效态的养分转化为有效态。氮素方面固氮菌直接贡献生物氮；同时，一些菌剂能抑制硝化作用，减少氮素损失，并促进铵态氮向氨基酸等形式的同化。磷素方面解磷菌分泌的有机酸不仅能溶解无机磷，还能与土壤中的铝、铁、钙离子形成络合物，防止磷的再次固定。其产生的植酸酶能水解植酸（土壤有机磷的主要形态），释放出正磷酸盐。钾素及其他方面硅酸盐细菌通过酸解和酶解作用，持续释放矿物钾。此外，微生物活动还能促进土壤中微量元素的有效化。施肥模式为此过程提供

了物质基础。有机肥本身含有大量有机养分,需要微生物矿化才能被利用;而化肥则为微生物的快速繁殖和代谢活动提供了必要的无机营养。二者结合,形成了一个“肥料-微生物-养分活化”的良性循环。

3.3 促进养分在植株体内的转运与分配

高效的吸收只是第一步,养分在体内的合理分配同样重要。研究表明,某些根际微生物能影响水稻体内激素平衡,进而调控养分的长距离运输。例如,通过调节细胞分裂素水平,可以影响氮素向新生叶片和籽粒的分配。一个功能健全的根际微生态系统,还能通过诱导系统抗性,减少病害对植株维管束系统的破坏,保证养分运输通道的畅通^[4]。最终,更多的光合产物和吸收的养分被有效地分配到经济产量器官(籽粒),从而在减少肥料投入的同时,维持甚至提高产量,实现 NUE 的实质性提升。

4 研究挑战与未来展望

尽管微生物菌剂配合施肥展现出巨大的应用前景,但其从实验室走向大田推广仍面临诸多挑战。首先,田间效果的不稳定性是最大瓶颈。实验室或盆栽试验中表现优异的菌株,在复杂的田间环境中(受气候、土壤类型、耕作制度、土著微生物竞争等多重因素影响)往往效果不佳甚至失效。这凸显了菌剂研发必须从“单一明星菌株”向“功能菌群”或“合成菌群”转变,利用微生物间的互惠共生关系,构建更具环境适应性和功能稳定性的复合菌剂。其次,作用机制的复杂性有待深入解析。目前的研究多停留在相关性分析层面,对“接种菌-土著菌-植物”三者之间精确的信号传导、代谢互作和网络调控机制知之甚少。未来需要整合多组学技术(宏基因组、宏转录组、代谢组)与先进的成像技术(如纳米二次离子质谱 NanoSIMS),在时空尺度上动态追踪养分流向和微生物互作,揭示其因果关系。再次,长期生

态效应评估不足。大规模、长期施用微生物菌剂对土壤微生物组的演替方向、功能冗余度以及潜在的生态风险(如基因水平转移、对非靶标生物的影响)尚缺乏系统研究。建立完善的环境安全评价体系是其商业化应用的前提。最后,缺乏与智能农业的深度融合。未来的精准微生物农业应基于土壤健康诊断和作物营养需求预测,实现菌剂种类、用量和施用时期的智能化决策。这需要开发配套的快速检测技术和数字农业平台。

5 结语

水稻根际微生态系统是土壤养分与植物营养需求的关键连接枢纽。微生物菌剂作为绿色可持续的农业投入品,和科学施肥(尤其是有机无机配施)协同,能有效调控根际微生物群落结构与功能,重塑以养分高效循环为导向的微生态环境。它通过改善根系构型、活化土壤养分、促进养分吸收转运等途径,显著提升水稻对氮、磷、钾等主要养分的利用效率,为化肥减施增效、保障粮食安全及推动农业绿色发展提供有力技术支撑。未来,研究需聚焦克服田间应用不稳定问题,深化对复杂互作机制的理解,加强长期生态安全评估,加速微生物菌剂从科研成果向生产力的转化,助力生态文明建设和农业高质量发展国家战略。

参考文献

- [1] 屈成,刘芬,洪超怡.微生物菌肥在水稻生产上的应用研究进展[J].作物研究,2025,39(04):374-378.
- [2] 汤洪伟,吴岳,朱新霞,等.微生物菌剂对水稻吸收富集镉及根系微生物群落的影响[J/OL].中国水稻科学,1-16[2026-03-23].
- [3] 任玉成.微生物菌剂对水稻生长和产量的影响[J].农业技术与装备,2025,(04):171-172+176.
- [4] 林诚隆,张帆,林俊,等.复合微生物菌剂对水稻生长及产量的影响[J].农业科技与装备,2024,(05):14-16.