微生物菌剂在大豆质量提升中的应用研究进展

马欣悦[1,2,3]，黄　伟[4]，施梦迪[5]，杨怡中[5]，安　静[2,3]，
许　倩[1]，王　成[2,3*]，刘峰娟[2,3*]

（1. 塔里木大学 食品科学与工程学院，新疆 阿拉尔　843300；
2. 新疆维吾尔自治区农业科学院 农业质量标准与检测技术研究所，新疆 乌鲁木齐　830091；
3. 新疆维吾尔自治区农业科学院 农业农村部荒漠绿洲生态特色农产品功能营养与健康重点实验室（部省共建）/
新疆农产品质量安全重点实验室，新疆 乌鲁木齐　830091；4. 新疆维吾尔自治区农业科学院 微生物研究所，新疆 乌鲁木齐　830091；
5. 新疆农业大学 食品科学与药学学院，新疆 乌鲁木齐　830052）

摘　要　我国大豆（*Glycine max* L.）消费量位居全球前列，大豆作为植物蛋白和油脂的重要来源，在农业生产和居民膳食结构中占据关键位置。大豆籽粒中蛋白质含量约 40%，脂肪占比约 20%，还富含多种微量营养素，具有显著的经济价值与营养意义。微生物菌剂作为一种含特定活性微生物的功能性制剂，在农业领域的应用逐渐深入，其通过改良土壤理化性状，丰富土壤微生物群落多样性，抑制植株病害发生等途径，有效减少化肥农药使用量，同时对大豆生长发育及产量产生促进作用，进而提升大豆营养品质。本文综述了微生物菌剂对大豆生长发育、产量形成及营养品质的影响和作用机制，结合当前研究进展提出未来展望，旨在为大豆品质优化与农业可持续发展提供参考。

关键词　大豆；微生物菌剂；产量提升；品质改善；作用机制
中图分类号　Q939.9　　**文献标识码**　A　　**文章编号**　1005－7021（2026）04－0091－12
doi：10.3969/j.issn.1005－7021.2026.04.008

Research Progress on the Application of Microbial Inoculants for Enhancing Soybean Quality

MA Xin-yue[1,2,3]，HUANG Wei[4]，SHI Meng-di[5]，YANG Yi-zhong[5]，AN Jing[2,3]，
XU Qian[1]，WANG Cheng[2,3*]，LIU Feng-juan[2,3*]

（1. *College of Food Science and Engineering*，*Tarim University*，*Alar* 843300；
2. *Institute of Agricultural Quality Standards and Testing Technology*，*Xinjiang Academy of Agricultural Sciences*，*Urumqi* 830091；
3. *Key Laboratory of Functional Nutrition and Health of Agricultural Products with Ecological Characteristics of Agricultural Rural Desert Oasis*（*Ministry of Agriculture and Rural Affairs*）/ *Key Laboratory of Agricultural Products Quality and Safety*，*Xinjiang Academy of Agricultural Sciences*，*Urumqi* 830091；4. *Institute of Microbiology*，*Xinjiang Academy of Agricultural Sciences*，*Urumqi* 830091；
5. *College of Food Science and Pharmacy*，*Xinjiang Agricultural University*，*Urumqi* 830052）

Abstract　Soybean is a vital source of plant-based protein and oil in China，with seed protein and oil contents reaching up to 40% and 20%，respectively. It is also rich in various micronutrients，playing a critical role in both the agricultural production system and the national dietary structure. Microbial inoculants，as functional formulations contai-

基金项目：新疆维吾尔自治区现代农业产业技术体系-“大豆质量安全与营养品质评价岗位科学家”项目（XARS-04）；农业农村部荒漠绿洲生态区特色农产品功能营养与健康重点实验室（部省共建）开放基金资助课题（xjnkywdzc-2023003-pt1）
作者简介：马欣悦　女，硕士研究生。研究方向为农产品质量安全控制。E-mail：917581559@qq.com
* 通讯作者。王成，男，研究员，博士，硕士生导师。研究方向为农产品质量安全与营养品质评价。Tel：0991-4537561，E-mail：wangchengxj321@sina.com
刘峰娟，女，研究员，博士，硕士生导师。研究方向为农产品质量安全与营养品质评价。Tel：0991-4537561，E-mail：liufengjuan2050@126.com
收稿日期：2025-12-02

ning specific active microorganisms, can effectively reduce the use of chemical fertilizers and pesticides by improving soil structure, enhancing microbial diversity, and increasing plant stress resistance. These microbial inoculants significantly promote soybean growth and development, increase yield, and improve nutritional quality. This paper systematically reviews the effects and underlying mechanisms of microbial inoculants on soybean growth, yield formation, and quality enhancement. It also outlines future research directions, aiming to provide theoretical support and practical guidance for improving soybean quality and advancing sustainable agricultural development.

Keywords soybean; microbial inoculants; yield improvement; quality enhancement; mechanisms

大豆(*Glycine max* L.)作为豆科植物的典型代表,是我国重要的粮油兼用作物,兼具油料生产与植物蛋白供给双重功能,在饲料及工业原料领域也具有不可替代的地位[1]。大豆营养价值突出,富含优质蛋白质和脂肪,且具有较高的生物利用度,在保障国民营养健康方面发挥着关键作用[2]。然而,我国作为全球最大的大豆消费国,面临着严重的供需失衡问题。以 2025 年为例,国内大豆总产量仅为 2 091 万 t,而消费量高达 13 300 万 t,产需缺口达 11 209 万 t,对外依存度升至 84%(质量占比);国产大豆品种质量不高、出油率低、产品整齐度较差、生产成本和价格高于美国、阿根廷等主产国是目前存在的主要问题,这一比例在主要粮食作物中居于首位[3]。近年来,由于长期过量施用化肥导致的土壤退化、养分失衡等问题,严重制约了大豆的产量和品质提升。因此,探索可持续的施肥模式,实现大豆产量与品质的协同提升,已成为当前农业科技创新的重要任务[4]。微生物菌剂作为一种环境友好型农业投入品,因其独特的生物学特性备受关注。农业农村部为微生物菌剂搭建了登记分类体系,制定的两大国家标准——《微生物肥料质量安全评价通用准则》(GB/T 41728-2022)和《农用微生物菌剂功能评价技术规程》(GB/T 41727-2022),为菌种安全性划定了四级管理的清晰框架,按实际功能将菌剂分为养分供给、生长促进、土壤改良等五大类。近年来,我国微生物菌剂行业发展迅速,截至 2022 年市场规模已达 502.4 亿元,主要应用于南方水稻区及大豆主产区。中央财政支持大豆主产区推广应用根瘤菌剂等微生物菌剂,例如黑龙江省 2023 年推广面积已达 1 200 万亩,预计 2025 年全国大豆微生物菌剂应用面积将突破 2 000 万亩,较 2024 年增长约 33%。研究表明,微生物菌剂不仅能够改善土壤理化性质、优化微生物群落结构[5],还可显著增强大豆的抗逆能力[6]和抗病性能[7],从而促进植株生长发育。在化肥减量增效的背景下,微生物菌剂的应用对提升大豆产量和改善营养品质具有重要的实践意义[8]。植物根际促生菌(Plant Growth-Promoting Rhizobacteria,PGPR)作为微生物菌剂的核心成分,可通过各种促生机制促进植物生长[9],例如植物生长激素如吲哚乙酸(IAA)的生物合成[10]、铁载体的分泌[11]、磷酸盐的溶解[12]以及生物固氮作用等[13]。这些促生机制在多种作物中均有研究,特别是在豆科产品中表现出显著的应用效果[14-15]。根瘤菌与豆科植物的共生固氮是豆科植物与微生物互作中最为典型的共生固氮体系,该体系通过根瘤的产生,为宿主植物提供良好的氮素营养[16]。已有大量研究表明,根瘤菌的施用可显著提高大豆产量。Wang 等[17]通过田间试验发现,施用根瘤菌和固氮菌的复合菌剂可使大豆增产 36.1%。本文系统综述微生物菌剂对大豆生长发育、产量形成及营养品质的影响机制,旨在为大豆产量与品质提升提供科学依据,同时为微生物菌剂在大豆生产中的推广应用提供参考。

1 微生物菌剂概述

微生物菌剂是通过从土壤或植物中分离筛选特定菌群,经工业化扩繁后,以蛭石、草炭等吸附材料固定发酵液制成的活菌制剂[18]。其富含活性成分,不仅能丰富土壤微生物的多样性、改良土壤结构,还可调节根际微环境,并通过分泌植物生长激素促进作物生长,在提升作物产量和品质的同时推动绿色农业的发展[19]。微生物菌剂可分为单一菌剂和复合菌剂。单一微生物菌剂是由一种微生物菌株处理加工获得,其功能单一、适应能力差[20]。复合微生物菌剂是将两种或两种以上互不拮抗、功能不同的微生物菌株处理加工制成,

且应用效果更佳[21]。由于微生物菌株间的代谢互养、生物膜结构及定殖动力学互补的协同作用[22]等,复合微生物菌剂的稳定性和适应性更强。目前国内外对复合微生物菌剂的研究较多,其能够更有效地改善土壤有机质[23]、土壤 pH[24]、微生物群落,减少农药的使用量,提高农作物产量和品质,对农业的可持续发展具有重要意义。

根据微生物菌株与大豆的互作关系和核心功能,微生物菌剂可分为共生固氮类、根际促生类、养分转化类、内生协同类四大体系。①共生固氮类:以根瘤菌如根瘤菌属(*Rhizobium*)、慢生根瘤菌属(*Bradyrhizobium*)为代表,专性侵染大豆根系形成根瘤,通过固氮酶将分子态氮转化为氨,为豆科植物生长提供 60% ~65% 的氮素营养[25-26],同时分泌氢离子和有机酸,活化土壤磷酸盐[27-29]。②根际促生类:植物根际促生菌如芽孢杆菌属(*Bacillus*)、假单胞菌属(*Pseudomonas*)定殖于根际土壤,通过合成植物激素(如 IAA)、分泌铁载体或激活抗氧化酶系统,促进根系生长并缓解盐胁迫[30-32]。③养分转化类:包含解磷菌如巨大芽孢杆菌(*Bacillus megaterium*)、解钾菌如胶质芽孢杆菌(*Paenibacillus gelatinosus*),通过分泌磷酸酶、有机酸或胞外多糖,将土壤难溶性磷、钾化合物转化为可吸收态,其中解磷菌包括细菌、真菌和放线菌,真菌解磷持久性更强[33-34]。④内生协同类:以内生菌如伯克氏菌属(*Burkholderia*)、鞘氨醇单胞菌属(*Sphingomonas*)为代表,其定殖于大豆组织内部,兼具固氮、产激素、增强抗逆性等多重功能,形成稳定的内生共生关系,直接协同宿主生长[35]。

2 微生物菌剂对大豆生长、产量以及品质的影响

施用微生物菌剂不仅能够促进大豆的生长发育,刺激根系生长,增强光合作用,通过固氮作用、解磷解钾作用改善大豆的土壤环境和肥力,还能增强大豆的抗逆性,如抗病虫害、抗盐碱、抗干旱,最终提高大豆的产量和品质。

2.1 微生物菌剂对大豆生长发育的影响

微生物菌剂的施用能够促进大豆的生长发育,刺激大豆根系生长,增加根系的吸收面积,从而提高大豆对水分和养分的吸收能力;还能增强光合作用,改善大豆叶片的生理功能,提高叶片中叶绿素的含量,促使大豆合成更多的有机物质,为植株的生长和发育提供充足的能量和物质基础。

候婷婷等[36]通过大量盆栽试验,研究施用不同根瘤菌与不同微生物菌剂对大豆结瘤数量、根瘤干质量、鲜质量、株高、根长的影响。结果表明,接种不同根瘤菌均能促进大豆根系结瘤,改善大豆的农艺性状,促进大豆的生长发育;且相较于单一根瘤菌处理,将两种根瘤菌 1∶1(菌悬液体积比)混合形成的复合菌剂,能更显著增加大豆的结瘤数量、改善农艺性状、提高最终产量,表明复合菌剂与根瘤菌协同作用可有效促进大豆的生长和发育。舒健虹等[37]研究不同组合处理的促生菌株对大豆的农艺性状和生物量等影响的结果表明,大多数组合菌株对大豆幼苗植株的地上部分干重、茎粗,以及根系干重、根长、根瘤数等性状均有不同程度的促进作用。Ai 等[38]通过田间试验和盆栽试验分析根际微生物菌剂对大豆养分和根际土壤养分的影响,结果显示根际微生物菌剂能够提高根际土壤和大豆叶片中的养分含量。刘力赫等[39]分析促生菌对大豆种子萌发及幼根生长的影响,结果显示,促生菌对大豆种子萌发无明显促进作用,但能促进大豆幼根伸长。冯晓硕[40]采用室内盆栽试验和大田试验分析根际微生物菌剂对大豆连作生长的影响,结果显示,根际微生物菌剂能够改善大豆连作幼苗的形态,提高叶绿素含量,增强超氧化物歧旋酶活性,有利于大豆生长,增强结瘤能力,获得一定的增产效益。曹媛媛等[41]对菌株 DW12-L 定殖大豆根际、促进大豆生长的性能进行了研究,指出其定殖能力的强弱是影响菌株能否发挥促生作用的关键。Wang 等[42]研究根瘤菌和丛枝菌根真菌(Arbuscular Mycorrhizal Fungi,AMF)共接种对大豆生长的影响,发现共接种技术能在低磷或低氮条件下显著促进大豆生长,增加芽干重和大豆氮、磷含量,但在氮、磷含量正常情况下无明显影响。刘丽等[43]研究根瘤菌与促生菌共接种对大豆生长发育的影响,结果表明共接种可以促进大豆生长,能明显提升大豆单株分枝数、粒数及收获指数,显著提高根瘤占比并减少空荚数,增强土壤酶活性。但也有研究表明,部分复合菌剂会抑制大豆的生长发育,如

鹿鑫等[44]通过盆栽试验,研究复合菌剂接种对大豆的生长发育的影响,发现经多粘类芽孢杆菌(*Paenibacillus polymyxa*)为主要成分的复合菌剂处理的大豆种子出苗率和出苗势降低了 2.22% 和 6.67%,而且株高高于对照,茎粗低于对照,对大豆种子萌发和幼苗出土产生一定抑制作用。其原因可能是微生物次生代谢产物产生的自毒效应影响了发芽过程[45]。

以上研究表明,施用不同的微生物菌剂或接种根瘤菌、促生菌会不同程度地促进大豆的生长发育,如提升结瘤数、改善农艺性状、增加土壤和叶片的养分、增强连作大豆的抗逆性,并且配施复合菌剂效果更优。但也有研究发现,以多粘类芽孢杆菌为主的复合菌剂会抑制大豆种子萌发和出苗。微生物菌剂对大豆生长发育的应用研究见表 1。

表 1 微生物菌剂对大豆生长发育的应用研究

Table 1 Application of microbial inoculants on soybean growth and development

试验类型	菌剂	测定指标	应用结果	参考文献
盆栽试验	根瘤菌(费氏中华根瘤菌 *Sinorhizobium fredii*、TY3-5-1)+复合微生物菌剂(枯草芽孢杆菌 *Bacillus subtilis*:胶冻芽孢杆菌 *Bacillus mucilaginosus*:巨大芽孢杆菌为 1:1:1等体积菌悬液复配)	农艺性状、结瘤数	接种根瘤菌均能促进大豆根系结瘤,改善农艺性状,促进生长发育;将两种根瘤菌 1:1 混合对大豆的产量、结瘤和农艺性状的影响明显优于单一根瘤菌	[36]
盆栽试验	根瘤菌(豌豆根瘤菌 *Rhizobium pisum*、中慢生型百脉根根瘤菌 *Mesorhizobium loti*)、根瘤菌属 + 内生细菌(枯草芽孢杆菌、嗜麦寡养食单胞菌 *Stenotrophomonas maltophilia*)	农艺性状、根瘤数	与接种单一根瘤菌相比,大多组合的微生物菌剂可显著促进大豆的茎粗,地上部分干物质重量 B2、D1 和 D2 的效果最明显,A1、B1 和 D1 增加根系生物量的效果最佳,根瘤数 A2、B2、C1 和 D1 结瘤最多	[37]
盆栽试验 + 田间试验	PGPR(肠杆菌属 *Enterobacter* spp. DW1、DW13、DN9)	种子数、种子重量、农艺性状	与未接种 PGPR 的植株相比,在盆栽试验中每株植物的种子数和每株种子重量分别增加了 20% 和 24%;在田间试验中接种 DW1 的植株单株荚数提高 46.78%,籽油含量提高 5.23%;接种 DW13 的单株种子数增加 79.82%,单株种子重增加 65.10%;接种 DN9 的百粒重提高 9.13%	[38]
盆栽试验 + 田间试验	促生菌(链霉菌 *Streptomyces* spp.、侧胞短芽孢杆菌 *Brevibacillus laterosporus*、皮尔瑞俄类芽孢杆菌 *Paenibacillus peoriae*)	生理生化指标、叶绿素含量	施用该菌剂可优化连作大豆幼苗的生理形态特征,包括促进叶绿素合成和增强 SOD 活性。此外,在收获期其具有促进结瘤和增加产量的双重功效	[39]
田间试验	根瘤菌(慢生根瘤菌属)+丛枝菌根真菌(摩西管柄囊霉 *Funneliformis mosseae*)	农艺性状、植物氮和磷含量	在低磷或低氮条件下,与根瘤菌和 AM 真菌的共接种显著促进了大豆的生长,如芽干重以及植物氮和磷含量均增加;但在正常的氮和磷含量条件下,接种该菌剂没有显著影响	[42]
田间试验	根瘤菌(日本慢生根瘤菌 *Bradyrhizobium japonicum*)+促生菌(胶质芽孢杆菌)	农艺性状、结瘤数、土壤酶活性	共接种可以促进大豆生长,并能明显提升大豆单株分枝数、粒数及收获指数,显著提高根瘤占比并减少空荚数,在增产的同时还能增强土壤酶活性	[43]
盆栽试验	复合菌剂(多粘类芽孢杆菌、鲁氏不动杆菌 *Acinetobacter lwoffii*、约氏不动杆菌 *Acinetobacter johnsonii*、环状芽孢杆菌 *Bacillus circulans*、短小芽孢杆菌 *Bacillus pumilus*)	出苗情况、农艺性状	复合菌剂的施用分别使出苗率和出苗势降低 2.22% 和 6.67%,株高高于对照,而茎粗却低于对照	[44]

注:A1、A2、B1、B2、C1、D1、D2 指该文献中菌剂处理方案,分别为 R286-1 + R286-5、R286-1 + R287-5、R287-3 + R286-5、R287-3 + R287-5、R310-1 + R286-5、R325-3 + R286-5、R325-3 + R287-5;R286-1、R287-3、R310-1、R325-3 指根瘤菌,R286-5、R287-5 指根瘤内生细菌

2.2 微生物菌剂对大豆产量的影响

目前市场上在大豆生产中应用效果突出的微生物菌剂有以下三种:①根瘤菌:“大豆接种复合根瘤菌与配套施肥技术”已在黑龙江全省大豆主产区广泛推广应用,年推广面积达 20 000 hm^2 以上,2022 年至 2024 年覆盖示范

推广面积 66 666.67 hm^2，可使大豆产量提高 10% 以上，同时减少氮肥用量 15% ~ 20%，取得了显著的经济效益和生态效益。②黄曲霉阻控-结瘤固氮耦合（Aflatoxin control-Rhizobiuminduction-coupling，ARC）微生物菌剂：在黑龙江省黑河市示范田面积达千亩级，全国累计示范面积超 6 666.67 hm^2，2023 年 10 月黑龙江示范区测产显示，大豆增产 34.7%，提质增产效果显著，同时抗逆性增强，安全性提升。③南开大学人工微生物菌剂：2024 年在天津和银川等盐碱区示范推广超 2 000 hm^2，大幅提高了大豆在盐碱条件下的生存适应性，增产效果显著。

肖之源等[46]在田间试验中使用 ARC 微生物菌剂处理了大豆品种“中豆 41”，通过对其关键农艺性状及变异特征进行分析，发现施用 ARC 微生物菌剂能显著提高“中豆 41”的百粒重，进而提升单产水平，具有良好的推广应用价值。祝英豪等[47]以“豫豆 21 号”大豆为研究对象，以常规施肥为对照，设置 4 个化肥减施处理，同时配施微生物菌剂，研究微生物菌剂对大豆农艺性状和产量的影响，结果表明适当减少化肥用量，同时添加微生物菌剂能够促进大豆生长，提高大豆产量。Wang 等[48]通过田间试验，研究了不同养分失衡施肥模式对大豆产量的影响，与对照相比，缺氮处理的大豆产量无显著差异，但在两个种植季节 2020 年大豆产量比 2017 年产量增加 9%，缺磷处理的大豆产量持续降低 25% ~ 29%，因此磷素缺乏会显著抑制根际微生物丰度与群落周转进程，破坏根际微生态稳态，进而制约大豆产能积累。柳开楼等[49]以常规施肥为对照，在常规施肥基础上以单独配施石灰（L）、微生物菌剂（M）、石灰与微生物菌剂组合（L + M）为试验组，研究其对大豆产量的影响，与对照相比，L 处理增产18.40%，M 处理增产 22.45%，而 L + M 复合处理增产效果最优，达 32.96%。周欣宇等[50]研究证实，施用微生物菌剂能优化大豆农艺性状，表现为底荚高度降低，有效荚数、单株粒数和百粒重增加，显著提高了大豆产量。冯明印等[51]研究报道，将微生物菌剂通过拌种和鼓粒期叶面喷施两种方式施用，对大豆具有显著的增产作用。陈秀范[52]通过设置小区面积 50 m^2 重复对照试验，研究微生物菌剂对大豆产量的影响，结果表明，施用微生物菌剂较常规施肥大豆增产 34.7 kg，增产19.3%。隋世江等[53]研究施用微生物菌剂对大豆“铁丰 29”产量的影响，结果表明，菌剂处理既提高大豆产量又增加大豆根瘤数。Ai 等[38]研究结果表明，与未接种植物根际促生菌（PGPR）的植株相比，接种 PGPR 的大豆植株单株荚数提高 46.78%、籽油含量提高 5.23%、百粒重显著提高，表明接种 PGPR 能够提高大豆产量。崔智慧等[54]对“赤豆三号”进行根瘤菌和促生菌接种试验，结果表明，接种单一微生物菌剂和复合微生物菌剂均提高“赤豆三号”根瘤数和根瘤重，且复合微生物菌剂处理显著提高“赤豆三号”主茎分枝数、单株荚数、单株粒数、单株粒重及产量。胡基华等[55]施用微生物菌剂对大豆产量的影响研究结果表明，减施化肥配施福尔太微生物颗粒剂可以提高大豆产量，比单施化肥产量提高了4.72%。李艳杰等[56]对两种根瘤菌剂与种衣剂拌种对大豆根系结瘤能力及生育和产量的影响进行了研究，种衣剂与根瘤菌剂混合使用，对大豆植株根系的生长和产量的促进作用要优于单独使用种衣剂和根瘤菌剂的效果，且增产效果显著。向友珍等[57]通过田间试验，接种根瘤菌和清水拌种，测定大豆的生理指标，结果表明，减少氮肥施用量的同时接种根瘤菌可促进关中平原大豆的生长、提升对氮素的利用效率、提高大豆产量。Igiehon 等[58]研究了根瘤菌和 AMF 在 100%、70% 和 40% 田间容量的水分方案下增强大豆对干旱胁迫的耐受能力，结果表明，与未接种的植株相比，共接种处理可以促进大豆的生长，提高大豆的产量。Cordeiro 等[59]通过田间试验接种氮固定菌（0、4、8 和 12 剂）和氮肥施肥量为 0、25、50 和 100 kg/hm^2，研究对大豆产量的影响，结果表明，施用 8 剂接种剂和 25 kg/hm^2 的氮肥施用量组合的大豆产量最高。

以上研究结果表明，施用不同类型的微生物菌剂能够提升大豆的百粒重、有效荚数等农艺性状，大豆产量可提高 10% ~ 40%，甚至更高[49,52,55]，在农业生产中值得推广。微生物菌剂对大豆产量的应用研究见表 2。

表 2　微生物菌剂对大豆产量的应用研究

Table 2　Application of microbial inoculants on soybean yield

试验类型	菌剂	大豆品种	应用结果	参考文献
田间试验	ARC 微生物菌剂(解淀粉芽孢杆菌 *Bacillus amyloliquefaciens*、侧孢短芽孢杆菌、胶质芽孢杆菌、路德维希肠杆菌 *Enterobacter ludwigii*)	中豆 41	与对照组相比,各农艺性状指标均获显著提升,其中有效分枝增幅达 51.75%,单株有效荚数增加 27.20%,单株粒数提高 13.52%,百粒重增加 6.09%,带动小区产量上升 20.43%	[46]
田间试验	复合微生物菌剂(枯草芽孢杆菌、解淀粉芽孢杆菌、地衣芽孢杆菌 *Bacillus licheniformis*、胶冻样类芽孢杆菌 *Paenibacillus mucilaginosus*)	豫豆 21 号	微生物菌剂配合 20% 化肥减量施用能显著提升大豆产量,这一模式在许昌地区表现最佳	[47]
田间试验	石灰(L)配施微生物菌剂(枯草芽孢杆菌、巨大芽孢杆菌)(M)	浙鲜 16	与对照相比,L 处理增产 18.40%,M 处理增产 22.45%,而 L+M 复合处理增产效果最优,达 32.96%	[49]
田间试验	微生物菌剂 BMC(解淀粉芽孢杆菌)	黑农 84	施用微生物菌剂能优化大豆农艺性状,表现为底荚高度降低,有效荚数、单株粒数和百粒重增加,从而显著提高产量。喷施 10 mL/L 的微生物菌剂的增产效果最为显著,其有效荚数、单株粒数、产量分别比对照(ck)提高了 25.25%、24.79% 和 16.03%	[50]
田间试验	微生物菌剂(胶冻样类芽孢杆菌、解淀粉芽孢杆菌)	开育 12 号	使用微生物菌剂比常规施肥增产 34.7 kg,增产 19.3%	[52]
田间试验	两种不同微生物菌剂(菌剂 1、菌剂 2)(辽宁省农业科学院自行研制开发,未通过 16S rRNA测序确认)	铁丰 29	微生物菌剂处理既提高大豆产量又增加大豆根瘤数,菌剂 1 拌种比菌剂 1 叶面喷施增产,不同施入方式对于增加根瘤数无明显差异。总体上看,在提高大豆产量及增加大豆根瘤数方面,菌剂 1 均优于菌剂 2	[53]
田间试验	根瘤菌+促生菌	赤豆三号	单菌接种与复合菌处理对“赤豆三号”均表现出促瘤效应,根瘤数量和生物量显著增加,其中,组合菌处理后大豆产量最高,较对照增产 651.3 kg/hm^2,增产 29.3%;较单接种处理增产 372.0 kg/hm^2,增产 14.9%	[54]
田间试验	复合微生物菌剂(解淀粉芽孢杆菌、胶冻样类芽孢杆菌、枯草芽孢杆菌、巨大芽孢杆菌)	合农 69	减施化肥配施微生物菌剂可以有效保证大豆产量,较单施化肥产量提高了 4.72%	[55]
田间试验	根瘤菌	黑河 53 号	根瘤菌剂与种衣剂拌种后大豆地上部及根系干物质积累量显著增加,且株高、株有效荚数及有效粒数、株粒重及百粒重均增加,较对照增产 2.42% ~9.12%	[56]
田间试验	根瘤菌	大豆	接种根瘤菌和亲水拌种处理下的大豆生长状况最佳,两年平均最大根瘤数为 241.47 个、最大根瘤干质量为 1.30 g、最大根长密度为 15.00 cm/cm^3、最大叶面积指数为 5.44 cm^2/cm^2、最大干物质积累量为 17 530.51 kg/hm^2、最大叶绿素含量为 53.55、最大净光合速率为 32.75 μmol/(m^2·s)、最大种子产量为 4 659.4 kg/hm^2	[57]
盆栽试验	根瘤菌(根瘤菌属、解纤维素根瘤菌 *Rhizobium cellulosilyticum*)+丛枝菌根真菌(类球囊霉属 *Glomus*、巨孢囊霉属 *Gigaspora*、斗管囊霉属 *Funneliformis*、近明囊霉属 *Claroideoglomus*、根内囊霉属 *Rhizophagus*)	大豆 PAN 1532 R	干旱胁迫条件下,根瘤菌和菌根接种都增加了大豆产量,接种物对豆荚数、豆荚鲜重、种子数、种子鲜重、每个豆荚的最高种子数和种子干重的影响最大	[58]
田间试验	固氮菌(NFB)	大豆	施用 8 剂接种剂和 25 kg/hm^2 组合的大豆产量最高	[59]

2.3 微生物菌剂对大豆营养品质的影响

目前国内外关于微生物菌剂对大豆营养品质影响的研究较少,主要对大豆中蛋白质和油脂含量进行研究。舒健虹等[37]以大豆为研究对象,分析不同组合处理的促生菌株对大豆营养品质的影响,测定了粗蛋白、中性纤维、酸性纤维、全磷、钙的含量,结果表明,不同组合菌株与对照相比不同程度提高了大豆的粗蛋白、钙含量,显著降低了酸性纤维含量。傅晨野[60]的试验设置全量化肥(T1)、减氮 50%(T2)和无氮(T3),三个处理均配施复合微生物肥,结果表明,T2、T3 处理可显著提升大豆蛋白品质,但脂肪含量降低,而 T1 处理脂肪含量最高。廖艺[61]以"黑农 84"和"黑农 87"为试验材料,设置了六种施肥方式和三种加入根瘤菌的拌种方式对大豆营养品质进行了研究,结果表明,大豆根瘤菌剂拌种能够提高大豆的蛋白质与脂肪含量,在化肥减量 50% 配施有机肥的条件下,大豆蛋白质和脂肪含量达到峰值。Ngosong 等[62]通过田间试验,研究大豆接种 PGPR 和 AMF 对其产量和营养品质的影响,结果表明,接种两种菌剂可使其根瘤数量显著增加,酸性磷酸酶活性不同程度增强,并且提高大豆产量,提升碳水化合物、蛋白质、锌和铁等营养品质。Roriz 等[63]研究了从大豆根际分离的 PGPR 在碱性土壤条件下对大豆生长发育及产量的促进作用,结果表明,该 PGPR 菌株使豆荚数量增加了 33%,并上调了铁相关基因的表达,同时显著影响了大豆组织中锰、锌和钙的积累,提高了大豆中的微量元素含量。

以上研究结果表明,微生物菌剂的施用能够提高大豆的营养品质,尤其是促生菌,可提高大豆中蛋白质、油脂等含量,进而提升大豆的营养品质与经济价值。微生物菌剂对大豆营养品质的应用研究见表 3。

表 3 微生物菌剂对大豆营养品质的应用研究

Table 3 Application of microbial inoculants on the nutritional quality of soybean

试验类型	菌剂	大豆品种	应用结果	参考文献
盆栽试验	根瘤菌(豌豆根瘤菌、中慢生型百脉根根瘤菌、根瘤菌属)+内生细菌(枯草芽孢杆菌、嗜麦寡养食单孢菌)	黔豆 1 号	不同组合菌株相比对照不同程度地提高大豆的粗蛋白、钙含量,显著降低酸性纤维含量	[37]
田间试验	根瘤菌 A + 根瘤菌 B	黑农 84 和黑农 87	经根瘤菌剂拌种的大豆,其蛋白质和脂肪积累量均获得明显增加,在化肥减量 50% 配施有机肥的条件下,大豆蛋白质和脂肪含量达到峰值	[61]
田间试验	促生菌(节杆菌属 *Arthrobacter*、芽孢杆菌属 *Bacillus* sp.、赖氨酸芽孢杆菌属 *Lysinibacillus*、类芽孢杆菌属 *Paenibacillus*、中华单孢菌属 *Sinomonas*)+丛枝菌根真菌(稀有种内囊霉 *Rhizophagus intraradices*、塞拉多盾巨孢囊霉 *Scutellospora cerradensis*、极大巨孢囊霉 *Gigaspora gigantea*)	大豆种子	接种两种菌剂使其根瘤数量显著增加,使酸性磷酸酶活性不同程度增强,并且提高了大豆产量以及碳水化合物、蛋白质、锌和铁等营养品质。土壤磷与大豆籽粒蛋白和碳水化合物含量显著正相关;酸性磷酸酶与大豆籽粒产量和碳水化合物含量显著正相关;有效根瘤与大豆籽粒中的碳水化合物蛋白质锌和铁含量显著正相关	[62]
田间试验	促生菌(地衣芽孢杆菌、空气芽孢杆菌 *Bacillus aerius*)	大豆	增加了豆荚数量(33%)和铁相关基因的表达,并且显著影响大豆组织中锰、锌和钙的积累,提高大豆中的微量元素含量	[63]

3 微生物菌剂提升大豆质量的机制

微生物菌剂对大豆质量提升的机制主要表现在三个方面。第一,不同微生物菌剂对大豆根系的作用机制。①解磷解钾作用:微生物菌剂中的解磷菌、解钾菌能够分解土壤中的难溶性磷、钾化合物,提高土壤中有效磷与速效钾的含量,满足大豆生长对磷、钾元素的需求。②固氮作用:根瘤菌等固氮菌能够与大豆根系形成共生关系,为大豆提供氮素营养,减少化肥使用量[64-66]。③改善土壤结构:微生物在土壤中活动时,会产生大量的多糖、有机酸等物质,促进土壤颗粒的团聚,改善土壤的物理性质,为大豆根系生长创造良好的土壤环境[67]。现有研究表明,在对大豆根系作用机制

的研究中，根瘤菌作为最成熟的功能菌，不仅能够有效降低大豆对化学氮肥的依赖，还能通过改善土壤氮素循环，促进土壤生态系统的可持续发展，在农业生产的绿色转型中发挥着不可替代的作用[68]。魏启舜等[69]通过试验证明，接种根瘤菌作为优化农艺性状的关键措施，既能优化大豆品质，提高大豆产量，又能实现降肥增效的目的。吕慧丹等[70]研究发现，微生物菌剂对土壤铵态氮含量无显著影响，但会降低硝态氮含量，显著提高土壤有效磷和速效钾含量。Phillips 等[71]研究指出，外生菌根真菌与 AM 菌根真菌侵染植株根系后，能够增强根际微生物的活性，提高土壤养分的转化率。张玉潇[72]的试验证实，复合微生物菌剂“Z1 + Z2”能有效定殖于大豆根际，显著增强其固氮能力，具体表现为地上部鲜重增加 50%（质量分数，下同）、根瘤数量提升 94%、根瘤重量提升 71%、固氮酶活性增强 54%。不同微生物菌剂对大豆根系的作用机制见图 1。

第二，微生物菌剂分泌植物激素促进大豆生长的作用机制。微生物可产生多种植物内源激素，如 IAA（生长素）、赤霉素类物质及细胞分裂素等植物生长调节剂，可以调节大豆的生长发育；微生物与大豆相互作用过程中，可能会通过信号传导等方式影响大豆的基因表达，从而调控大豆的生长发育[73]。Lee 等[74]将苏里霉素 17 喷洒于 2 周龄大豆叶片，结果显示木质化相关酶和抗氧化酶及其亚型的活性均有所提升，这与先前关于细菌素刺激植物生长的研究相关[75]。Prudent 等[76]在水分胁迫条件下，将苏里霉素 17 应用于 1 月龄的大豆植株后，植物生物量增加 17%，根系生物量增加 37%，根瘤生物量增加 55%，大豆根系中的脱落酸含量增加 30%，调节了大豆的生长发育。Ku 等[77]研究磷酸盐溶解菌 YL6 对大豆的促生长作用，结果表明促生长作用与 YL6 溶解无机磷、有机磷以及产生吲哚-3-乙酸和赤霉素的能力有关，与未施用磷酸盐溶解菌 YL6 的植株相比，根际土壤速效磷含量分别增加了 120.16%、62.47% 和 7.21%，植株全磷含量分别增加了 198.60%、6.20% 和 78.89%。微生物菌剂分泌植物激素对大豆生长的作用机制见图 2。

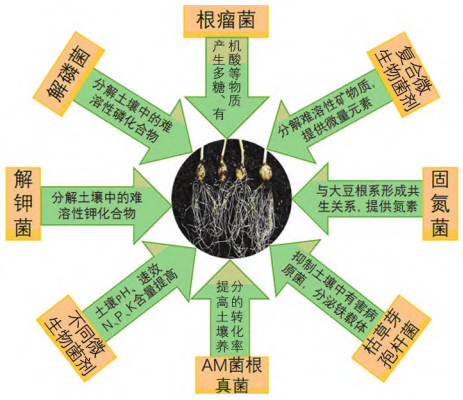


图 1　不同微生物菌剂对大豆根系的作用机制

Fig. 1　Mechanism of different microbial agents on soybean roots

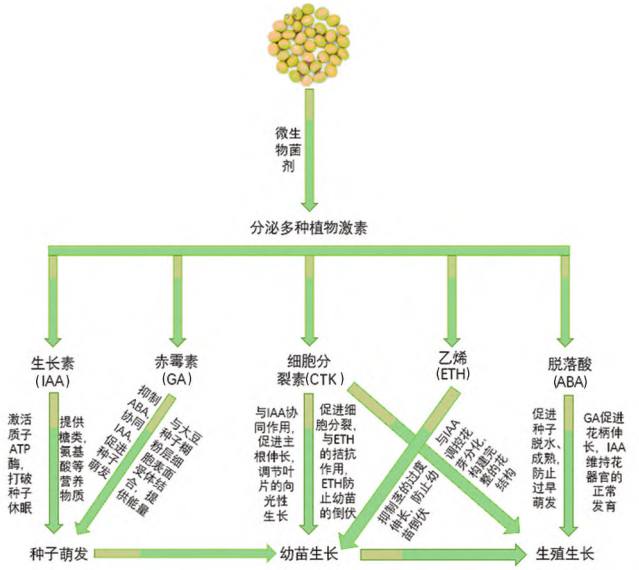


图 2　微生物菌剂分泌植物激素对大豆生长的作用机制

Fig. 2　The mechanism of action of microbial agents on the secretion of plant hormones by soybean growth

第三,微生物菌剂增强大豆抗逆性的作用机制。微生物菌剂中的有益微生物能够增强大豆的抗逆性。①抗病虫害:如木霉菌[78]可抑制病原菌的生长和繁殖,减少大豆病虫害的发生。②抗盐碱:如枯草芽孢杆菌[79]可调节土壤酸碱度,提高大豆对盐碱的耐受性。③抗干旱:如 AMF[80]代谢活动产生的黏性物质能够增加土壤的保水能力,并刺激根系生长,使根系能够更深入地吸收土壤中的水分。④耐酸铝:如假单孢菌[81]通过分泌柠檬酸、草酸等有机酸调节根际微环境酸碱度,同时螯合铝离子降低其生物毒性,并促进大豆根系生长、增强养分吸收与抗氧化能力,从而提升南方大豆对酸铝胁迫的耐受性。Lancia 等[82]研究表明,一些从土壤中分离出的有促进植株生长以及抑制病原微生物作用的微生物,常常能够转化土壤连作产生的有害化合物,同时竞争性抑制病原菌的营养获取和生存空间,最终降低病原菌丰度和侵染程度,抑制植株根际病害与连作障碍的发生。Lu 等[83]研究结果表明,链霉菌拉沙里菌素(*Streptomyces* lasalocidi)粗提物和适宜浓度的吲哚-3-甲醛能够调控大豆根系构型,有利于缓解大豆盐胁迫,增强大豆抗盐胁迫能力。Khan 等[84]研究根际细菌对大豆盐胁迫的影响发现,这些根际细菌会产生吲哚-3-乙酸、铁载体[85]和细胞外聚合物,同时具有磷酸盐溶解功能,可提高大豆农艺性状、叶绿素含量及各种酶含量等,进而提高大豆品质。Nader 等[86]研究表明,耐旱细菌和 AMF 在干旱胁迫下可提高大豆根际细菌数量、菌根定殖指数,增强土壤酶(脱氢酶和磷酸酶)活性,改善大豆生产力。Jabborova 等[87]研究表明,PGPR 在干旱条件下能显著提高大豆植株的根瘤数、根长、干重等,并改善土壤酶活性和养分状况。Liu 等[88]研究发现,*GsMYB10* 基因通过调控大豆根际微生物群落结构,富集耐铝功能的根际微生物群,显著增强了大豆对铝胁迫的耐受性。微生物菌剂增强大豆抗逆性的作用机制见图 3。

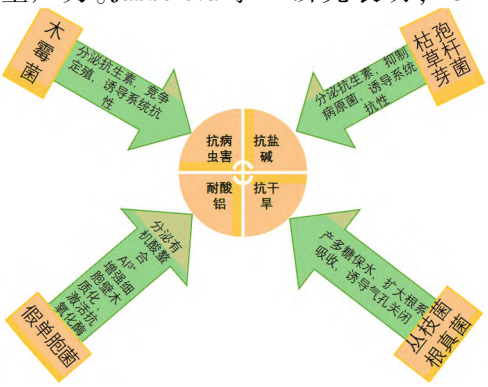


图 3 微生物菌剂增强大豆抗逆性的作用机制

Fig. 3 The mechanism of microbial agents enhancing soybean stress resistance

4 展 望

大豆是我国重要的粮油兼用作物,其产量与品质的提升对筑牢国家粮食安全具有重要意义[89-90]。自 20 世纪中期,大豆微生物菌剂已开始推广应用,多选用根瘤菌或固氮菌进行接种,并取得了显著效果,这种模式的核心思路是通过单一菌剂补充土壤中的氮素,从而减少对化肥的依赖。PGPR(包括固氮菌、溶磷菌、溶钾菌等多个类群),尤其是芽孢杆菌既能激活土壤中土著根瘤菌与大豆的共生,促进大豆的生长发育,又能提升其产量和品质,为微生物菌剂在大豆生产中的进一步推广奠定基础。

目前,微生物菌剂对大豆生长和产量的影响已有大量的相关研究,自 20 世纪中期以来,对微生物菌剂的研究主要以增产效果为核心目标,特别是根瘤菌、PGPR 等菌剂对产量的影响,而对大豆营养品质的提升还缺乏系统研究。未来应在以下几个方面进行更深入的研究:①系统研究微生物菌剂对大豆营养品质的改善和控制机制,尤其是异黄酮和生育酚等功能性成分的变化特征;②从生理生化方面探究微生物菌剂对提升大豆营养品质的作用机制;③根据不同区域的土壤和气候环境条件,改善微生物菌剂的施用方式,并建立适合的专用菌剂和配方;④开发大豆营养品质快速、准确的监测和评价方法,并推动其应用。

参考文献:

[1] 高粱红. 中国大豆产业全球发展战略研究[D]. 北京: 对外经济贸易大学, 2012.

[2] Wang W, Wang Z, Hou W, et al. *GmNMHC5* may promote nodulation via interaction with GmGAI in soybean[J]. The Crop Journal, 2022, 10(1): 273-279.

[3] 罗屹. 中国生物育种大豆产业化存在的问题及对策建议:基于部分试点地区的调研[J]. 中国油料作物学报, 2025, 47(4):797-805.

[4] Wei W, Guan D, Ma M, et al. Long-term fertilization coupled with *Rhizobium inoculation* promotes soybean yield and alters

soil bacterial community composition[J]. Frontiers In Microbiology, 2023, 14: 1161983.
[5] 张虎天, 尚虎山. 菌肥拌种和种植模式对豌豆/玉米根际微生物群落的影响[J]. 水土保持通报, 2015, 35(6): 168-171.
[6] 刘青. 丛枝菌根菌对玉米生理生态特性和农艺性状的影响研究[D]. 南宁: 广西大学, 2008.
[7] 朱碧春, 顾丽, 李正, 等. 南极土壤芽孢杆菌的分离鉴定土及其防治玉米细菌性褐腐病的研究[J]. 南京农业大学学报, 2017, 40(4): 641-648.
[8] 沙月霞, 沈瑞清. 微生物菌剂浸种联合生物菌肥防控玉米茎腐病的应用效果[J]. 玉米科学, 2022, 30(3): 156-161.
[9] Glick BR. Plant growth-promoting bacteria: Mechanisms and applications[J]. Scientifica, 2012, 2012(1): 963401.
[10] Patten CL, Glick BR. Bacterial biosynthesis of indole-3-acetic acid[J]. Canadian Journal of Microbiology, 1996, 42(3): 207-220.
[11] Tian F, Ding Y, Zhu H, et al. Genetic diversity of siderophore-producing bacteria of tobacco rhizosphere[J]. Brazilian Journal of Microbiology, 2009, 40(2): 276-284.
[12] Rodriguez H, Gonzalez T, Goire I, et al. Gluconic acid production and phosphate solubilization by the plant growth-promoting bacterium *Azospirillum* spp. [J]. Naturwissenschaften, 2004, 91(11): 552-555.
[13] Ashraf MA, Rasool M, Mirza MS. Nitrogen fixation and indole acetic acid production potential of bacteria isolated from rhizosphere of sugarcane (*Saccharum officinarum* L.)[J]. Advances in Biological Research, 2011, 5(6): 348-355.
[14] 赵思崎, 王敬敬, 杨宗政, 等. 微生物复合菌剂的制备[J]. 微生物学通报, 2020, 47(5): 1492-1502.
[15] Rasool M, Akhter A, Soja G, et al. Role of biochar, compost and plant growth promoting rhizobacteria in the management of tomato early blight disease[J]. Scientific Reports, 2021, 11(1): 6092.
[16] 翟羽佳, 蔡若楠, 陈玺同, 等. 不同基因型大豆根际及根内促生菌的分离筛选[J]. 高师理科学刊, 2023, 43(12): 74-81,87.
[17] Wang C, Li Y, Li M, et al. Functional assembly of root-associated microbial consortia improves nutrient efficiency and yield in soybean[J]. Journal of Integrative Plant Biology, 2021, 63(6): 1021-1035.
[18] 孟思达, 张文祥, 郑昕雨, 等. 不同微生物菌肥对日光温室袋培番茄生长、产量和品质的影响[J]. 北方园艺, 2021(7): 49-54.
[19] Bechtaoui N, Raklami A, Benidire L, et al. Effects of PGPR co-inoculation on growth, phosphorus nutrition and phosphatase/phytase activities of faba bean under different phosphorus availability conditions[J]. Polish Journal of Environmental Studies, 2020, 29(2): 1557-1565.
[20] 田凤鸣, 陈强, 何九军, 等. 一种用于防治花椒根腐病复合微生物菌剂 GF-1 的制备[J]. 宜宾学院学报, 2024, 24(12): 51-57.
[21] 何飞燕, 杜全能, 杨正, 等. 复合微生物菌剂对花生生长及产量的影响[J]. 江苏农业科学, 2020, 48(14): 104-109.
[22] Sun X, Xu Z, Xie J, et al. *Bacillus velezensis* stimulates resident rhizosphere *Pseudomonas stutzeri* for plant health through metabolic interactions[J]. The ISME journal, 2022, 16(3): 774-787.
[23] 王思凡, 陈维峰, 马林, 等. 复合微生物菌剂对黄芪生长及叶片酶活性的影响[J]. 福建林业科技, 2024, 51(2): 71-77.
[24] Tian X, Chai G, Zhu L, et al. Response of soybean cd to soil cd and pH and its associated health risk in a high geological background area in Guizhou Province, Southwest China[J]. PLoS One, 2024, 19(10): e0312301.
[25] Ibanez F, Fabra A. *Rhizobial* nod factors are required for cortical cell division in thenodule morphogenetic programme of the aeschynomeneae legume *Arachis*[J]. Plant Biology, 2011, 13(5): 794-800.
[26] Oldroyd GE, Murray JD, Poole PS, et al. The rules of engagement in the legume-rhizobial symbiosis[J]. Annual Review of Genetics, 2011, 45: 119-144.
[27] Jlao RZ, Peng YH. Phosphate solubilization by *Rhizobia* isolated from woody legume plantsin Hainan island[J]. Scientia Silvae Sinica, 2010, 46(10): 1-5.
[28] Zhang XT, Kang LH, Ma HB, et al. Selection of acacia rhizobium which have the abilityto dissolve phosphorus[J]. Forest Research, 2008, 21(5): 619-624.
[29] Whitelaw MA, Harden TJ, Helyar KR. Phosphate solubilisation in solution culture by thesoil fungus *Penicillium radicum*[J]. Soil Biology and Biochemistry, 1999, 31(5): 655-665.
[30] Suslow TV, Schroth MN. Rhizobacteria of sugarbeets: Effects of seed applicationand root colonization on yield[J]. Phytopathology, 1982, 72: 199-206.
[31] Egamberdieva D, Wirth S, Jabborova D, et al. Coordination between *Bradyrhizobium* and *Pseudomonas* alleviates salt stress in soybean through altering root system architecture[J]. Journal of Plant Interactions, 2017, 12(1): 100-107.
[32] IslamF, Yasmeen T, Arif MS, et al. Plant growth promoting bacteria confer salt tolerance in *Vigna* radiata by up-regulating antioxidant defense and biological soil fertility[J]. Plant Growth Regulation, 2016, 80(1): 23-36.
[33] 张小敏, 张璇. 种子处理技术在林业生产中的应用[J]. 新农民, 2024(23): 108-110.
[34] 于海洋, 周方园, 李凤, 等. 解磷微生物及其在土壤污染防治中的应用研究进展[J]. 环境科学与技术, 2020, 43(S1): 44-51.
[35] Adhikari P, Joshi K, Pandey A. *Taxus* associated fungal endo-

phytes: Anticancer ous to other biological activities[J]. Fungal Biology Reviews, 2023, 45: 100308.
[36] 候婷婷,于德水, 何鑫, 等. 复合微生物菌剂对大豆生长发育、结瘤和产量的影响[J]. 江苏农业科学, 2023, 51(10): 65-72.
[37] 舒健虹, 王子苑, 刘晓霞, 等. 牧草促生菌分离鉴定及对大豆促生性能的研究[J]. 中国土壤与肥料, 2020, (4): 215-222.
[38] Ai W, Guo T, Lay KD, et al. Isolation of soybean-specific plant growth-promoting rhizobacteria using soybean agglutin and evaluation of their effects to improve soybean growth, yield, and soil nutritional status [J]. Microbiological Research, 2022, 261: 127076.
[39] 刘力赫, 王丽雪, 高昕蕊, 等. 3 种促生菌对豌豆和大豆种子萌发及幼根生长的影响[J]. 高师理科学刊, 2023, 43(4): 55-59.
[40] 冯晓硕. 根际促生菌筛选鉴定及其对连作大豆的促生作用[D]. 大庆: 黑龙江八一农垦大学, 2021.
[41] 曹媛媛, 陈春, 郭婷婷, 等. 亲和性促生菌 DW12-L 的定殖及其对大豆生长的影响[J]. 江苏农业学报, 2019, 35(4): 776-783.
[42] Wang X, Pan Q, Chen F, et al. Effects of co-inoculation with arbuscular mycorrhizal fungi and rhizobia on soybean growth as related to root architecture and availability of N and P[J]. Mycorrhiza, 2011, 21(3): 173-81.
[43] 刘丽, 马鸣超, 姜昕, 等. 根瘤菌与促生菌双接种对大豆生长和土壤酶活的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(3): 644-654.
[44] 鹿鑫, 赵敦厚, 关法春, 等. 复合菌剂添加对盐碱地大豆生长发育及产量的影响[J]. 大豆科学, 2022, 41(5): 588-593.
[45] 黄玉茜, 杨劲峰, 梁春浩, 等. 香草酸对花生种子萌发、幼苗生长及根际微生物区系的影响[J]. 中国农业科学, 2018, 51(9): 1735-1745.
[46] 肖之源, 瞿建武, 孙琳, 等. ARC 微生物菌剂对中豆 41 农艺性状及产量的影响[J]. 湖北植保, 2024(3): 24-27.
[47] 祝英豪, 衡博文. 减施化肥、配施微生物菌剂对大豆产量的影响[J]. 农业工程技术, 2022, 42(35): 18,20.
[48] Wang M, Ge AH, Ma X, et al. Dynamic root microbiome sustains soybean productivity under unbalanced fertilization[J]. Nature Communications, 2024, 15(1):1668.
[49] 柳开楼, 李浩, 张景云, 等. 石灰配施微生物菌剂对大豆套种西瓜产量和红壤肥力的影响[J]. 湖北农业科学, 2022, 61(23): 45-48.
[50] 周欣宇, 王美玲, 曲志鹏, 等. 微生物菌剂对大豆产量的影响[J]. 耕作与栽培, 2023, 43(5): 23-24,28.
[51] 冯明印, 吕泽芬, 李国强. 生物菌肥在大豆上应用效果研究[J]. 现代农业科技, 2007(1): 87,89.
[52] 陈秀范. 微生物菌剂在大豆上的肥效试验报告[J]. 现代农业, 2019(6): 57.
[53] 隋世江, 安景文, 娄春荣, 等. 微生物菌剂对大豆产量和根瘤数的影响[J]. 辽宁农业科学, 2010(6): 49-50.
[54] 崔智慧, 杨薇, 魏云山, 等. 根瘤菌处理对大豆生长发育和产量的影响[J]. 大豆科技, 2024(4): 20-24.
[55] 胡基华, 李萌, 曹旭, 等. 微生物菌肥对寒地大豆根围土壤细菌群落和产量的影响[J]. 微生物学杂志, 2022, 42(4): 12-20.
[56] 李艳杰, 张武, 项鹏, 等. 根瘤菌剂与种衣剂拌种对大豆生育及产量的影响[J]. 现代化农业, 2024(7): 5-8.
[57] 向友珍, 张威, 唐子竣, 等. 减施氮肥和接种根瘤菌对大豆生理生长与氮素利用效率及产量的影响[J]. 农业机械学报, 2024, 55(3): 340-351.
[58] Igiehon ON, Babalola OO. *Rhizobium* and mycorrhizal fungal species improved soybean yield under drought stress conditions [J]. Current Microbiology, 2021, 78(4): 1615-1627.
[59] Cordeiro CFDS, Echer FR. Interactive effects of nitrogen-fixing bacteria inoculation and nitrogen fertilization on soybean yield in unfavorable edaphoclimatic environments[J]. Scientific Reports, 2019, 9(1): 15606.
[60] 傅晨野. 化肥配施复合微生物肥对土壤特性及大豆生长的影响[D]. 大庆: 黑龙江八一农垦大学, 2023.
[61] 廖艺. 大豆根瘤菌剂在不同施肥模式下的效应研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2022.
[62] Ngosong C, Tatah BN, Olougou MNE, et al. Inoculating plant growth-promoting bacteria and arbuscular mycorrhiza fungi modulates rhizosphere acid phosphatase and nodulation activities and enhance the productivity of soybean (*Glycine max* L.) [J]. Frontiers In Plant Science, 2022, 13: 934339.
[63] Roriz M, Pereira SIA, Castro PML, et al. Impact of soybean-associated plant growth-promoting bacteria on plant growth modulation under alkaline soil conditions[J]. Heliyon, 2023, 9(5): e14620.
[64] Nanganoa LT, Ngome FA, Suh C, et al. Assessing soil nutrients variability and adequacy for the cultivation of maize, cassava, and sorghum in selected agroecological zones of Cameroon [J]. International Journal of Agronomy, 2020, 2020(1): 8887318.
[65] Ortiz-bareosa GS, Torres-martinez L, Rothschild J,et al. *Lotus japonicus* regulates root nodulation and nitrogen fi xation dependent on the molecular form of nitrogen fertilizer[J]. Plant and Soil, 2023, 483(1): 533-545.
[66] Santachiara G, Salvagiotti F, Rotundo JL. Nutritional and environmental effects on biological nitrogen fixation in soybean: A meta-analysis[J]. Field Crops Research, 2019, 240: 106-115.
[67] Fraysse N, Couderc F, Poinsot V. Surface polysaccharide involvement in establishing the Rhizobium-legume symbiosis[J]. European Journal of Biochemistry, 2003, 270(7): 1365-1380.
[68] 刘荣昌, 杨晓野, 梁俊荣, 等. 根瘤菌的研究现状及应用

前景［J］. 中国农学通报, 2009, 25（11）: 1-4.
［69］ 魏启舜, 郭东森, 王琳, 等. 不同施肥条件下接种根瘤菌对鲜食大豆结瘤和产量的影响［J］. 江苏农业科学, 2021, 49(23): 77-82.
［70］ 吕慧丹, 黄玉波, 赵士诚. 养分专家系统结合微生物菌剂在大豆上的应用效果［J］. 中国土壤与肥料, 2023(5): 8-13.
［71］ Phillips RP, Fahey TJ. Tree species and mycorrhizal associations influence the magnitude of rhizosphere effects［J］. Ecology, 2006, 87(5): 1302-1313.
［72］ 张玉潇. 肠杆菌和克雷伯氏杆菌混合菌剂修复水体氮污染和促进大豆生物固氮的机制［D］. 武汉: 华中农业大学, 2023.
［73］ Shuai H, Meng Y, Luo X, et al. Exogenous auxin represses soybean seed germination through decreasing the gibberellin/abscisic acid（GA/ABA）ratio［J］. Scientific Reports, 2017, 7(1): 12620.
［74］ Lee K, Gray EJ, Mabood F, et al. The class IId bacteriocin thuricin-17 increases plant growth［J］. Planta, 2009, 229(3): 747-755.
［75］ Jung W, Mabood F, Souleimanov A, et al. Stability and antibacterial activity of bacteriocins produced by *Bacillus thuringiensis* and *Bacillus thuringiensis* spp.［J］. Journal of Microbiology and Biotechnology, 2008, 18(11): 1836-1840.
［76］ Prudent M, Salon C, Souleimanov A, et al. Soybean is less impacted by water stress using *Bradyrhizobium japonicum* and thuricin-17 from *Bacillus thuringiensis*［J］. Agronomy for Sustainable Development, 2015, 35(2): 749-757.
［77］ Ku Y, Xu G, Tian X, et al. Correction: Root colonization and growth promotion of soybean, wheat and Chinese cabbage by *Bacillus cereus* YL6［J］. PLoS One, 2018, 13(11): e0200181.
［78］ Mukherjee PK, Horwitz BA, Herrera-Estrella A, et al. *Trichoderma* research in the genome era［J］. Annual Review of Phytopathology, 2013, 51(1):105-29.
［79］ Ayaz M, Ali Q, Zhao W, et al. Exploring plant growth promoting traits and biocontrol potential of new isolated *Bacillus subtilis* BS-2301 strain in suppressing Sclerotinia sclerotiorum through various mechanisms［J］. Frontiers in Plant Science, 2024, 15: 1444328.
［80］ Tang C, Zhang Z, Yu L, et al. Research progress of arbuscular mycorrhizal fungi promoting citrus growth［J］. Horticulturae, 2023, 9(11):1162.
［81］ Marcelli V, Osimani A, Aquilanti L. Research progress on the use of lactic acid bacteria as natural bio-preservatives against *Pseudomonas* spp. in meat and meat products: A review［J］. Food Research International, 2024, 196:115129.
［82］ Lancia BB, Mavrodi OV, Raaijmakers JM, et al. Differential ability of genotypes of 2, 4 diacetylphloroglucinol-producing *Pseudomonas fluorescens* strains to colonize the roots of pea plants［J］. Applied and Environmental Microbiology, 2002, 68(7): 3226-3237.
［83］ Lu L, Liu N, Fan Z, et al. A novel PGPR strain, *Streptomyces lasalocidi* JCM 3373T, alleviates salt stress and shapes root architecture in soybean by secreting indole-3-carboxaldehyde［J］. Plant Cell Environ, 2024, 47(6): 1941-1956.
［84］ Khan MA, Sahile AA, Jan R, et al. Halotolerant bacteria mitigate the effects of salinity stress on soybean growth by regulating secondary metabolites and molecular responses［J］. Molecular & Cellular Plant Biology, 2021, 21(1): 176.
［85］ Roriz M, Pereira SIA, Castro PML, et al. Iron metabolism in soybean grown in calcareous soil is influenced by plant growth-promoting rhizobacteria: A functional analysis［J］. Rhizosphere, 2021, 17: 100274.
［86］ Nader AA, Hauka FIA, Afify AH, et al. Drought-tolerant bacteria and arbuscular mycorrhizal fungi mitigate the detrimental effects of drought stress induced by withholding irrigation at critical growth stages of soybean（*Glycine max* L.）［J］. Microorganisms, 2024, 12(6): 1123.
［87］ Jabborova D, Kannepalli A, Davranov AK, et al. Co-inoculation of rhizobacteria promotes growth, yield, and nutrient contents in soybean and improves soil enzymes and nutrients under drought conditions［J］. Scientific Reports, 2021, 11(1): 22081.
［88］ Liu L, Cheng L, Liu K, et al. Transgenic soybean of GsMYB10 shapes rhizosphere microbes to promote resistance to aluminum（Al）toxicity［J］. Journal of Hazardous Materials, 2023, 455:131621.
［89］ 黄俊霞,冀宝璐,赵伟,等. 大豆种质鼓粒期源库关系及粒皱缩性鉴定指标筛选［J］. 沈阳农业大学学报, 2025, 56(3): 14-22.
［90］ 张娜,蔡丽君,刘婧琦,等. 不同栽培方式和种植密度对大豆抗倒伏性能及产量的影响［J］. 沈阳农业大学学报, 2025, 56(5):26-35.