



梁文卫,毕影东,樊超,等.大豆抗根腐病生物与生态防治策略研究进展[J].黑龙江农业科学,2025(8):115-123.

大豆抗根腐病生物与生态防治策略研究进展

梁文卫^{1,2},毕影东¹,樊超¹,刘建新¹,刘森¹,杨光¹,邸树峰¹,徐杰³

(1.黑龙江省农业科学院 耕作栽培研究所,黑龙江 哈尔滨 150023; 2.黑龙江省农业科学院 黑河分院 / 博士后创新实践基地,黑龙江 黑河 161400; 3.北大荒集团 黑龙江四方山农场,黑龙江 肇东 151100)

摘要:大豆根腐病作为制约全球大豆产业可持续发展的关键土传病害,长期依赖化学农药的防治模式,已引发病原菌抗药性攀升、土壤微生态失衡等系列问题,传统农业措施如轮作周期长、深耕成本高,难以满足现代生产需求。生物防治与生态调控的协同策略成为绿色防控的核心方向。为了解析大豆根腐病绿色防控机制,推动防控策略从化学依赖向“多菌协同-生境重塑”转型,系统综述了“病原菌抑制-免疫激活-微生态修复”的三维协同机制:生物防治菌剂(如芽孢杆菌分泌抗生素、木霉菌重寄生作用)直接抑制病原菌生长;植物免疫激发子(如壳寡糖、蛋白类激发子)通过 MAPK 和水杨酸信号通路激活防御酶系统;生态调控措施(轮作、有机肥配施)重构根际微生态,提升有益菌群丰度。多维度协同可使大豆根腐病发病率降低 30%~45%,同步提升蛋白质含量 2.0%~3.2%,在黑龙江省绥化等大豆主产区已形成可复制的防控模式。生防菌剂与生态调控通过“生物杀灭-生态排斥”双重屏障抑制病原菌,同时通过激活植物免疫系统与优化微生态环境可实现“短期控病-长期提质”。未来研究可围绕微生物组定向调控、智能传感精准施用及多学科交叉技术创新,构建“预防-抑制-修复”一体化精准防控体系,助力全球大豆产业可持续发展。

关键词:大豆根腐病;生物防治;生态调控;根际微生物;绿色防控

大豆 [*Glycine max* (L.) Merr.] 作为全球重要的粮油饲多用途作物,不仅是优质植物蛋白(含量 35%~40%)与植物油(含量 15%~20%)的核心来源,更在食品加工、饲料生产及生物能源领域具有不可替代的产业价值^[1]。然而,由尖孢镰孢菌 (*Fusarium oxysporum*)、大豆疫霉菌 (*Phytophthora sojae*)、立枯丝核菌 (*Rhizoctonia solani*) 等多病原菌复合侵染引发的大豆根腐病,已成为制约产业发展的首要生物障碍,美国中西部大豆带因该病年均损失超 10 亿美元,我国东北黑土区重病田减产幅度可达 30% 以上,全球范围内年均产量损失率高达 15%~50%,严重威胁大豆产业的可持续发展^[2]。

长期化学防治模式正面临双重危机:常用药剂如甲霜灵导致大豆疫霉菌抗药性频率超过 60%,连续施用可使土壤放线菌门丰度下降 25%、潜在病原菌丰度上升 18%,引发微生态失衡与水体污染^[3-4]。传统农业措施亦存在轮作需 3~5 年周期且受作物搭配限制,深耕对深层病原菌清除率不足 30% 且成本高等显著局限,难以适应规模化种植需求^[5]。

在此背景下,生物防治与生态调控的协同策略成为破局关键。生物防治通过生防微生物(如芽孢杆菌分泌脂肽类抗生素)直接抑菌或免疫激发子(如壳寡糖激活 MAPK 信号)增强植物抗性,生态调控则借助轮作(改变根际菌群结构)或有机肥配施(促进有益菌定殖)构建抑病生态位。本研究通过系统解析“病原菌抑制-免疫激活-微生态修复”的三维协同机制,结合黑龙江省绥化市等大豆主产区的防控实践(发病率降低 30%~45%、蛋白质提升 2.0%~3.2%),为推动大豆生产防控策略从“化学依赖”向“生态协同”转型提供科学支撑。

1 大豆根腐病的传统防治困境与新型策略优势

1.1 病原菌复合侵染与传统防治瓶颈

大豆根腐病病原菌种类繁多,不同病原菌的致病机制复杂多样。尖孢镰孢菌可分泌多种细胞壁降解酶,如纤维素酶、果胶酶等,破坏大豆根系细胞结构,同时产生毒素抑制植物生长^[6]。大豆疫霉菌则通过游动孢子侵染根系,其分泌的效应子能够抑制植物的免疫反应,实现成功定殖和扩

收稿日期:2025-04-23

基金项目:黑龙江省博士后资助项目(LBH-Z24277)。

第一作者:梁文卫(1984-),男,博士,助理研究员,从事大豆育种及栽培技术研究。E-mail: liangwenwei5@163.com。

展^[4]。立枯丝核菌主要通过菌丝直接侵入根系,造成组织坏死^[7]。

传统化学防治虽在短期内对大豆根腐病有显著防控效果,但其长期使用衍生出一系列严峻问题。首先,病原菌抗药性问题日益突出。以甲霜灵为例,在频繁施用该药剂的种植区域,大豆疫霉菌对其抗性频率呈显著上升趋势,导致防治效果逐年衰减^[3]。长期依赖化学农药,使得病原菌在药物选择压力下不断进化,耐药种群逐步占据优势,化学防治的有效性面临巨大挑战。其次,化学农药对土壤微生物群落结构的破坏愈发严重,连续多年采用化学杀菌剂处理大豆种植土壤后,土壤中放线菌门的相对丰度显著降低,这一变化打破了土壤微生物群落原有的平衡状态,削弱了土壤生态系统的自我调节能力。同时,化学农药还会对根际固氮菌、丛枝菌根真菌(AMF)等有益微生物产生直接抑制作用,这些有益微生物的生长繁殖受限,导致土壤微生物多样性锐减、活性下降,进而影响土壤养分转化、固氮能力及植物根系的共生功能,最终损害土壤肥力与生态功能,加剧大豆根腐病的发生风险^[5]。

农业防治措施如轮作和深耕虽对大豆根腐病防控具有一定作用,但在实际应用中存在明显局限性。轮作作为常见的农业防治手段,其核心原理是通过改变种植作物种类打破病原菌的生活史循环,减少土壤中病原菌的累积。然而在现代大豆规模化、产业化种植背景下,轮作的实施仍面临诸多挑战。一方面,适宜与大豆轮作的作物种类有限,需综合考虑作物间的生长互补性、市场需求及经济效益等因素,这大大限制了轮作模式的选择范围。另一方面,轮作周期漫长,通常需要3~5年才能显著降低病原菌基数,实现理想的防控效果,难以满足现代农业追求高效生产的需求^[5]。Neupane等^[6]研究显示,即使采用轮作,在轮作周期内一旦遭遇极端气候或其他环境胁迫,根腐病仍有爆发风险,且不同作物搭配组合对病原菌抑制效果差异显著,增加了轮作方案制定与实施的复杂性。深耕旨在通过改善土壤结构,破坏病原菌生存环境以减轻病害,但其作业需要配备大型农机设备,且需耗费大量人力、物力与财力,显著增加了生产成本;更关键的是,对于在土壤深层越冬或存活的病原菌,深耕难以将其彻底清除或灭活,部分病原菌在深耕后仍可随土壤翻耕重新分布,继续威胁大豆根系健康,导致防治效果差。

1.2 生物与生态防治的核心优势

生物防治主要通过利用生防微生物(如芽孢杆菌、木霉菌)或植物免疫激活物质(如壳寡糖、蛋白类激发子)来抑制病原菌的生长和繁殖,或激活植物自身的免疫系统,增强植物对病原菌的抵抗力^[9-10]。生防微生物能够在根际定殖,通过分泌抗生素、产生细胞壁降解酶、竞争营养和生态位等多种方式直接抑制病原菌,同时还可以诱导植物产生系统抗性,提高植物的整体抗病能力,植物免疫激发子则能够模拟病原菌的入侵信号,激活植物体内的防御反应,使植物提前做好应对病原菌攻击的准备^[4]。

生态调控主要通过优化根际微生态环境、改善土壤条件来构建不利于病原菌生存和繁殖的生态位。例如,通过接种有益微生物(如假单胞菌、AMF)来调节根际微生物群落结构,增强有益微生物与病原菌之间的竞争能力;采用轮作、间作等种植模式,改变土壤微生物的生存环境,减少病原菌的积累;合理施用有机肥,改善土壤的物理、化学和生物性质,促进植物根系的生长和发育,提高植物的抗病能力^[11-12]。

生物防治与生态调控策略具有靶向性强、环境相容性高、促进可持续农业发展等显著优势。它们能够在不破坏生态环境的前提下,有效控制大豆根腐病的发生和危害,同时还可以提高土壤肥力,改善土壤生态环境,实现农业生产的可持续发展,因此成为替代传统化学防治的关键路径。

2 生物防治策略

2.1 生物防治菌剂的多元抑菌机制与区域应用

2.1.1 芽孢杆菌属(*Bacillus*) 代谢产物与生态位竞争协同抑菌,芽孢杆菌属是一类广泛应用于大豆根腐病生物防治的生防菌,其中枯草芽孢杆菌(*Bacillus subtilis*)的研究和应用最为广泛,它主要通过分泌多种代谢产物发挥抑菌作用^[13-14]。其分泌的脂肽类抗生素,如表面活性素(Surfactin)、伊枯草菌素(Iturin)和丰原素(Fengycin),具有独特的抑菌机制。表面活性素是一种具有两亲性的环状脂肽,能够降低表面张力,破坏病原菌细胞膜的磷脂双分子层结构,导致细胞膜通透性增加,细胞内物质泄漏,最终使病原菌细胞死亡。伊枯草菌素则通过与细胞膜上的特定受体结合,干扰膜蛋白的合成和功能,抑制病原菌菌丝的伸长和生长。丰原素可以特异性地结合 β -1,3-葡聚糖,阻断病原菌细胞壁的合成,从而抑

制病原菌的生长和繁殖。除了分泌抗生素,枯草芽孢杆菌还能够通过竞争营养和生态位来抑制病原菌。在根际环境中,枯草芽孢杆菌能够快速定殖,与病原菌竞争有限的营养物质(如碳源、氮源和铁离子等)和生存空间,从而限制病原菌的生长^[15]。此外,枯草芽孢杆菌还可以分泌一些胞外酶,如蛋白酶、淀粉酶等,分解土壤中的有机物质,为自身生长提供营养,同时改善土壤的微生态环境^[16]。

在大豆根腐病的防治实践中,枯草芽孢杆菌展现出良好效果。Han 等^[17]从大豆根际土壤中分离出的枯草芽孢杆菌 HSY21,对尖孢镰刀菌抑制率为 81.30%,在温室和田间条件下对大豆根腐病防治效果分别为 63.83%和 57.07%。郭荣君等^[18]利用营养竞争平板筛选法获得了枯草芽孢杆菌菌株 B006 和 B010,田间小区试验结果表明,以种子处理(1×10^8 CFU·mL⁻¹,药种比为 1:60)和以麦麸为载体的固体菌剂土壤沟施(1×10^8 CFU·g⁻¹,用量 195 kg·hm⁻²)这两种方式施用 B006 和 B010 菌剂,对真叶期大豆根腐病的防治效果分别为 74.6%和 63.5%,高于商品化学农药 35%多福合剂种子处理的防效,大豆产量分别增加 13.8%和 24.0%。杨帆等^[19]研究发现,枯草芽孢杆菌 HMGR-8 对大豆根腐病优势致病菌尖孢镰刀菌表现出较好的抑制作用,抑制率为 46.52%。盆栽试验中,经枯草芽孢杆菌 HMGR-8 发酵液单一菌剂处理的植株病情指数为 25.60%,与化学药剂多菌灵处理组病情指数(17.00%)差异不显著,与只接病原菌处理组病情指数(53.33%)差异显著,表明枯草芽孢杆菌 HMGR-8 可有效降低大豆根腐病的危害程度。另有研究将枯草芽孢杆菌 b29 菌液和营养因子等复配成的生物拌种剂,对大豆根腐病菌孢子萌发和菌丝生长抑制作用显著^[20]。

2.1.2 木霉菌属(*Trichoderma*):重寄生与系统抗性诱导双重效应 木霉菌属是大豆根腐病生物防治领域的重要生防菌,其中哈茨木霉(*Trichoderma harzianum*)的应用潜力备受关注^[21]。哈茨木霉主要通过重寄生作用与诱导植物系统抗性这两种机制,实现对大豆根腐病病原菌的有效抑制。重寄生作用是哈茨木霉发挥抑菌效能的关键途径。当哈茨木霉与病原菌接触后,能够识别病原菌的菌丝,并通过缠绕、穿透等方式侵入病原菌细胞内部,分泌几丁质酶、 β -1,3-葡聚糖酶等细胞壁

降解酶,分解病原菌的细胞壁成分,最终导致病原菌细胞死亡^[22]。另一方面,哈茨木霉侵染大豆根系后,能够激活植物体内的防御反应,诱导植物产生系统抗性。它可以刺激大豆体内水杨酸(SA)含量升高,进而诱导病程相关蛋白(PR-5)和植保素等防御物质的合成,增强大豆对腐霉菌等病原菌的抗性^[23]。同时,哈茨木霉还可以调节植物体内的激素平衡,促进植物根系的生长和发育,提高植物的整体抗病能力^[22]。

在大豆根腐病防治中,哈茨木霉表现优异。张武等^[24]在 2020 至 2022 年间连续三年研究了哈茨木霉 Th7 在多年重茬大豆田的应用效果。结果显示,Th7 在出苗后 30 d 对根腐病的防治效果为 37.51%~53.80%,出苗后 60 d 为 38.44%~43.28%。拌种处理不仅提高了大豆出苗率,还增加了单株荚数、粒数和百粒重,最终使产量比未拌种处理提高了 3.27%~12.64%^[24]。Gao 等^[25]通过田间试验发现绿色木霉(*Trichoderma viride*)可有效防治大豆根腐病,其效果与化学农药 27%苯醚·咯·噻虫悬浮种衣剂相当。

2.2 植物免疫激发子:激活宿主防御的“生物开关”

2.2.1 壳寡糖:触发丝裂原活化蛋白激酶(MAPK)信号通路增强抗病性 壳寡糖作为典型的植物免疫激发子,是壳聚糖降解产生的低聚糖,能够特异性地激活植物免疫系统,显著增强其对根腐病病原菌的抵御能力^[26-28]。其作用机制起始于根系细胞膜上的几丁质激发子受体激酶 1(CERK1)受体对壳寡糖的特异性识别,进而触发 MAPK 级联反应这一核心信号通路。当壳寡糖与 CERK1 受体结合后,MAPK 信号通路被激活,促使 MAPK 蛋白发生磷酸化修饰而活化,活化的 MAPK 蛋白进一步诱导防御相关基因(如 *GmCHI1*、*GmGLU1*)的表达量显著上调。这些基因编码的几丁质酶、 β -1,3-葡聚糖酶等防御酶在接种病原菌后 24 h 内活性达到峰值,能够高效分解病原菌的细胞壁成分,从而有效抑制病原菌的生长和繁殖^[29-31]。

在针对大豆根腐病的防治研究中,一项重要的发现是,采用壳寡糖进行种子包衣处理,并辅以花期喷施的复合应用策略,能够显著提升大豆植株的抗病能力,该复合处理方法对大豆根腐病的防治效果达到了 72.6%,显示出其作为一种有效的生物防治手段的巨大潜力^[32]。

2.2.2 蛋白类激发子:诱导系统获得性抗性(SAR) 大豆疫霉分泌的蛋白类激发子(如 *PsXEG1*)是诱导大豆系统获得性抗性(SAR)的关键物质,可赋予植株对多种病原菌的广谱抗性,其作用机制表现为:当大豆感知 *PsXEG1* 后,立即启动水杨酸信号通路,激活防御相关基因的表达^[33]。转录组分析显示,超 200 个基因(如苯丙氨酸解氨酶 PAL、过氧化物酶 POD 编码基因)呈现差异表达,这些基因产物通过参与木质素合成加固根系细胞壁,形成物理屏障;同时诱导植保素等抗菌物质生成,直接抑制病原菌繁殖,实现“结构防御+生化抑制”的双重保护^[34]。

值得注意的是, Xia 等^[35]研究证实 *PsXEG1* 的诱导效应存在品种特异性,在抗病性较弱的大豆品种中,该激发子对防御基因的激活效率更高,可显著增强其根腐病抵抗力。这一发现不仅揭示了蛋白类激发子的精准调控潜力,更为抗病性弱的品种提供了定制化防控思路——通过外源性激发子施用,可弥补其先天防御缺陷,构建靶向性的抗性提升策略。

3 生态调控策略

3.1 根际微生物群落的生态平衡与功能解析

3.1.1 假单胞菌属(*Pseudomonas*):铁载体介导的营养竞争 假单胞菌属中的荧光假单胞菌(*Pseudomonas fluorescens*)在大豆根腐病生态调控中发挥着重要作用,其主要通过分泌铁载体介导的营养竞争机制来抑制病原菌的生长^[36]。在土壤环境中,铁元素是微生物生长所必需的营养物质,但铁在土壤中的溶解度较低,可利用性有限。荧光假单胞菌能够分泌特异性的铁载体,如吡咯烷酮羧酸,这些铁载体对铁离子具有极高的亲和力,比病原菌的铁摄取系统对铁离子的亲和力高 10 倍以上,在缺铁环境中,荧光假单胞菌分泌的铁载体能够迅速结合环境中的铁离子,形成铁-铁载体复合物,使病原菌无法获取足够的铁元素,从而抑制病原菌的铁摄取系统,限制病原菌的生长和繁殖^[37]。

这一机制在实践中的潜力得到了证实。例如,一项针对来自印度尼西亚大豆根际的假单胞菌的研究筛选了 81 个菌株,其中 11 个菌株(编号为 CRB-3、CRB-16、CRB-17、CRB-31、CRB-44、CRB-75、CRB-80、CRB-86、CRB-102、CRB-109 和 CRB-112)在体外对主要的土传病原真菌——立枯丝核菌、尖孢镰刀菌(*Fusarium oxysporum*)和

茄病镰刀菌(*Rhizoctonia solani*)表现出显著的拮抗活性,抑制率高达 11.1%~60.0%。这些菌株的拮抗机制多样,其中 7 个菌株能产生铁载体,通过营养竞争限制病原菌生长;2 个菌株能产生几丁质酶,降解真菌细胞壁;另有 4 个菌株能产生氰化氢,直接抑制病原菌。在盆栽试验中,将这些菌株用于种子包衣处理,在无菌土壤条件下对病害的抑制效果可达 14.3%~100%,在非无菌土壤条件下也能达到 5.2%~52.6%。特别值得注意的是,菌株 CRB-16、CRB-44、CRB-86、CRB-102 和 CRB-109 在非无菌土壤条件下仍能保持超过 30%的高病害抑制率^[38],这充分展示了假单胞菌作为土传病原真菌生物防治剂的广阔应用前景。

3.1.2 丛枝菌根真菌(Arbuscular Mycorrhizal Fungi, AMF):共生介导的抗病机制 AMF 与大豆根系形成的共生体在增强大豆抗病能力方面扮演着重要角色^[39]。AMF 的菌丝网络不仅能扩大植株根系吸收范围,还能在根表形成物理屏障,减少病原菌直接接触和侵染根系的机会^[40]。同时,AMF 侵染大豆根系后可诱导茉莉酸(JA)信号通路相关基因(如 *GmLOX3*)的表达,促进大豆素等植保素的合成。这些植保素具有抗菌活性,能够抑制或延缓病原菌的生长和繁殖。此外,AMF 共生还能调节豆科植物根际的激素平衡,并增强植株的抗氧化酶系统活性(如超氧化物歧化酶、过氧化物酶等),从而减轻病原菌侵染过程中产生的氧化胁迫损伤^[41]。

多项田间和温室试验证实了 AMF 对大豆健康的积极影响。例如,在连作大豆田中接种特定的 AMF 菌株(如 *Funneliformis mosseae*),可以显著降低由立枯丝核菌引起的大豆根腐病发病率^[42]。还有研究报道,接种 AMF 后,大豆植株对磷素的吸收效率可显著提升,从而改善植株整体营养状况,间接增强其抗病能力^[43]。此外,种植密度的管理也会影响 AMF 的效果,适当降低密度能为 AMF 菌丝生长提供更充足的空间,强化其物理屏障作用和共生效率^[44]。这种由物理阻隔、信号诱导和代谢调节共同构成的复合机制,为利用 AMF 改善大豆健康、防治根腐病提供了重要的理论依据和实践潜力。

3.2 农业管理措施对根际微生态的定向调控

3.2.1 轮作模式:打破病原菌生活史与优化群落结构 轮作作为重要的农业生态调控措施,在防控大豆根腐病和改善根际微生态方面发挥着关键

作用。通过大豆与玉米等作物的轮作,可以利用不同作物根系分泌物的差异化特性,显著改变根际微生物群落结构。田间定位试验结果清晰地表明,实施轮作后,原本在连作土壤中相对富集的、与病原菌相关的子囊菌门(Ascomycota)的相对丰度下降了 21%,而厚壁菌门(Firmicutes)等有益菌群落的相对丰度则增加了 35%^[45]。这种有益群落的结构重构,很大程度上归因于玉米根系分泌的特定酚酸类物质,例如阿魏酸(Ferulic acid),这些物质能够有效抑制病原菌的繁殖,同时促进芽孢杆菌(*Bacillus*)等拮抗性有益微生物在根际的定殖。

长期轮作试验的研究进一步证实了其显著效果。与连作田相比,采用轮作模式的田块中,大豆根腐病的发病率降低了 32.7%。与此同时,土壤健康指标也得到了改善,土壤脲酶活性提升了 17.9%,蔗糖酶活性提升了 19.3%^[46]。这种病害减轻和土壤酶活性提升的双重效应,一是,源于轮作打破了病原菌的世代循环,显著减少了土壤中病原菌的积累;二是,轮作通过提升土壤酶系活性,增强了土壤有机质的分解效率和养分转化能力,为大豆生长营造了更加健康的根际微环境。

不仅如此,轮作作物的选择和种植顺序对防控效果同样具有显著影响。Wei 等^[45]研究表明,“玉米-大豆”的轮作模式相较于“小麦-大豆”的模式,能使根腐病的发病率额外降低 15.6%。其核心机制在于,玉米根系分泌的特定次生代谢产物,如丁布(DIMBOA),对病原菌菌丝的生长具有更强的抑制作用,同时“玉米-大豆”模式对土壤中放线菌等有益微生物群落的富集效应更为显著。这些发现为推行“禾本科-豆科”轮作体系提供了精准的技术参数和理论依据。

3.2.2 有机肥配施:促进有益微生物定殖与抑制病原菌 有机肥的施用对调控根际微生态、防控大豆根腐病发挥着积极作用。施用有机肥一方面能够显著提升根际土壤有机质含量,为枯草芽孢杆菌等生防菌提供丰富的碳源,促进其种群密度的增加,进而强化这些生防菌在根际的定殖与繁殖能力,从而增强对病原菌的抑制效果,充足的营养供应有利于生防菌在根际更好地定殖和繁殖,增强其对病原菌的抑制能力^[47]。另一方面,有机肥在分解过程中产生的阿魏酸等酚酸类物质能够干扰病原菌(如疫霉菌)的生理代谢,抑制其游动孢子的萌发^[48]。此外,有机肥还能有效改善土壤

的物理结构,增加土壤孔隙度,提升通气性与保水性,为大豆根系的健康发育创造有利条件,这间接增强了植株自身的抗病能力。

不同类型有机肥对根际微生物群落的调控效应也存在差异。Yu 等^[47]研究发现,相较于牛粪和绿肥,施用羊粪能更显著地增加土壤中芽孢杆菌属、放线菌属等有益微生物的数量,通过优化微生物群落结构,更高效地抑制大豆根腐病原菌的生长。台莲梅等^[49]研究也表明,施用不同有机肥的处理区均比对照区根腐病发生程度轻,并且表现出大豆整个生育期株高、干物质积累以及产量均比对照区高,尤以施用鸡粪区最为显著。

综上,有机肥通过“碳源供给-生防菌增殖”“酚酸抑菌-代谢干扰”“物理改土-根系强化”以及“微生物群落优化-抑病功能提升”等多重机制协同作用,有效防控大豆根腐病,其中特定类型的有机肥如羊粪在根际微生态调控中展现出独特的优势。

4 生物防治与生态调控的协同机制与实践成效

4.1 协同作用的三重路径

4.1.1 病原菌抑制协同 生物防治与生态调控的协同效应主要通过“病原菌抑制-免疫激活-微生态修复”3 个维度实现。在病原菌抑制维度,生物防治菌剂发挥着直接作用:枯草芽孢杆菌能分泌脂肽类抗生素破坏病原菌细胞膜^[13-14],哈茨木霉则通过重寄生作用分解病原菌细胞壁,从而直接杀灭病菌^[22]。同时,生态调控措施如轮作,能够改变根际微生物群落结构,为生防菌创造更有利的定殖环境,使生防菌在轮作田中的定殖效率提升 25%^[50]。二者结合,形成了“生物杀灭+生态排斥”的双重屏障,有效降低了土壤中病原菌的数量与活性,减少了其对大豆根系的侵染机会。Rigobelo 等^[51]将枯草芽孢杆菌、哈茨木霉和荧光假单胞菌复配,并结合轮作与有机肥施用,可使土壤病原菌数量减少 50%以上,大豆根腐病发病率降低 40%~45%,进一步证实了这种协同模式的强大效果。这种协同模式通过生物防治的直接抑菌作用与生态调控的微生态优化形成叠加效应,为大豆根腐病综合防控提供了“多菌协同-生境重塑”的高效路径。

4.1.2 植物免疫增强 在免疫激活维度,生物防治与生态调控的协同不仅直接作用于病原菌和环境,还能激发大豆自身的防御体系。许多生防微

生物,如荧光假单胞菌和哈茨木霉,在被诱导或直接作用下,能够触发大豆体内的系统获得性抗性(SAR)或诱导系统性抗性(ISR)^[37]。这些生防菌通过产生特定的信号分子(如鞭毛蛋白或效应蛋白),被植物细胞表面的模式识别受体(PRRs)识别,激活下游的防御信号通路,如茉莉酸(JA)和乙烯(ET)介导的ISR通路,或水杨酸(SA)介导的SAR通路。荧光假单胞菌分泌的II型分泌系统效应蛋白或胞外多糖,能够激活大豆体内的JA/ET信号,促进防御相关基因(如防御酶基因、植保素合成基因)的表达,从而提高植物对根腐病的整体抗性^[38]。生态调控措施,如健康的土壤结构(通过有机肥改善)和多样化的根际微生物群落(通过轮作和有机肥实现),也为这些诱导抗性反应提供了良好的生理基础和环境支持。土壤中的有益微生物与生防菌共同作用,持续向植物根系发送“安全”或“警戒”信号,维持植物免疫系统处于一种适度激活的状态,使其在面对病原菌感染时能更快、更有效地启动防御反应。这种由生物防治和生态调控共同激活的植物免疫增强,是协同效应中“免疫激活”维度的核心体现,显著提升了大豆在复杂土壤环境中的抗病能力。

4.1.3 微生态修复 有机肥与生物菌剂配合施用,对改善根际土壤微生态环境具有显著作用。有机肥为土壤中的微生物提供了丰富的碳源和营养元素,这为有益微生物(如链霉菌属等拮抗菌)的生长繁殖创造了有利条件。这种营养供给可以使拮抗菌的丰度显著增加,如根际土壤中链霉菌属的丰度可增加50%左右^[52]。这些有益微生物在生长过程中,能够产生多种抗菌物质,或通过竞争营养和生态位来抑制病原菌的生长,从而形成对植物根系的保护屏障。

与此同时,有益微生物的代谢活动还能进一步优化土壤的物理结构和化学性质。它们分泌的胞外多糖等物质有助于促进土壤颗粒的团聚,增加土壤孔隙度,改善土壤的通气性和保水性。此外,有益微生物还能活化土壤中的难溶性养分,提高土壤酶活性,形成一个良性循环的微生态环境。这种经过修复的微生态环境,不仅为大豆根系提供了更适宜的生长条件,也间接增强了大豆的抗病能力,为大豆的健康生长提供了持续的支持。

4.2 典型产区的协同防控效果

在农业实践中,将生物防治与生态调控措施相结合,已在多个地区取得了显著成效。在黑龙江

省绥化等地,通过采用“复合生物防治菌剂(含哈茨木霉、枯草芽孢杆菌等)+大豆-玉米轮作+有机肥施用”的模式,有效降低了大豆根腐病的危害。数据显示,采用该协同防控模式后,大豆根腐病发病率较单一使用化学农药模式降低了30%~45%,同时大豆产量较普通种植模式提升了15%左右,蛋白质含量也提高了2.0%~3.2%^[53]。

从机制上看,复合生物防治菌剂中的哈茨木霉等通过重寄生、分泌抗生素等方式直接抑制病原菌;轮作能够改变根际微生物群落,为生防菌创造适宜环境,增强其定殖能力;有机肥则通过改善土壤理化性质,促进有益微生物繁殖,优化根际微生态。三者协同,实现了对大豆根腐病的高效防控及大豆产量与品质的提升。

5 结论与展望

5.1 结论

目前,大豆根腐病的绿色防控已逐步从依赖化学农药转向生物-生态协同策略,并取得了一系列重要进展。在机制研究层面,明确了生物防治菌剂的多重抑菌机制(如芽孢杆菌的脂肽类抗生素抑菌、木霉菌的重寄生作用)、免疫激发子的信号传导路径(壳寡糖激活MAPK通路、蛋白类激发子诱导水杨酸信号)及根际微生物的生态位竞争机制(假单胞菌铁载体竞争、AMF共生屏障);在技术开发层面,成功研制出耐逆生物防治菌剂、纳米载体激发子等新型技术产品,并构建了“菌剂-轮作-有机肥”区域适配技术体系;在应用推广层面,已在我国大豆主产区黑龙江省绥化等地构建了可复制的防控模式,平均降低发病率30%~45%,同时提升大豆蛋白质含量2.0%~3.2%^[54]。生物防治与生态调控的协同策略通过“病原菌抑制-免疫激活-微生态修复”的三维机制,突破了传统防治的技术瓶颈,为大豆根腐病绿色防控提供了兼具科学性与实用性的新路径。该策略的核心价值在于实现了从“单一杀菌”到“生态重塑”的防控理念转型,不仅能够有效控制病害,更通过优化根际微生态提升了大豆品质与土壤可持续生产力。

5.2 展望

尽管生物-生态协同策略已展现出显著潜力,但其在复杂田间环境中的稳定性和精准性仍面临挑战,如生防菌定殖受土著微生物竞争影响波动较大、免疫激发子与植物免疫系统的协调性有待提升,微生态调控的靶向性尚需加强。面向农业

可持续发展的需求,未来研究可围绕以下方向深化,推动防控技术从“经验驱动”向“精准设计”转型:

(1)微生物组定向调控技术:从功能筛选到系统构建。当前微生物菌剂的应用效果受限于生防菌与土壤土著菌群的互作效率及根系微环境适配性。未来需借助宏基因组学、代谢组学等技术,解析生防菌与病原菌、土著有益菌的互作网络,挖掘关键功能基因与代谢通路,构建“核心抑菌菌剂-辅助功能菌群-植物信号响应”的三元协同体系。例如,通过基因编辑增强生防菌的趋化性和抗逆基因表达,同时复配能分泌根系分泌物激活剂的促生菌,形成具有环境自适应能力的人工微生物群落,提升生防菌在逆境中的定殖持久性和抑菌效能。

(2)智能传感与精准施用技术:构建动态防控决策系统。现有防控措施的施用多依赖经验,缺乏对土壤微生物生态动态变化的实时响应。需整合物联网传感器、高通量测序和机器学习技术,开发土壤病原菌与有益菌丰度的实时监测平台,结合气象数据、作物生长模型等构建动态预测模型。通过智能算法优化生物防治菌剂和免疫激发子的施用时机与剂量,实现“数据采集-风险预警-精准干预”的闭环调控,降低人工成本的同时提升防控效率,尤其在连作障碍严重区域具有重要应用价值。

(3)多学科交叉创新:打造全链条一体化技术体系。单一技术的孤立应用难以应对病原菌复杂的致病机制,需加强合成生物学、材料科学与农业工程的深度融合。在微生物改造方面,利用合成生物学设计能响应土壤信号(如 pH、病原菌代谢物)的工程菌,使其在感知病原菌感染时定向释放抗生素;在载体技术方面,开发可降解纳米材料包裹的免疫激发子,延长持效期并减少环境损耗;在农业装备方面,研制集成微生物菌剂包衣、有机肥精准深施的智能播种机,实现种子处理、土壤改良与微生物接种的同步作业,构建“种子-土壤-微生物”协同的立体防控体系。

(4)生态安全与可持续性评估:建立风险平衡调控模型。长期大规模施用生物防治菌剂和免疫激发子可能对土壤微生物多样性和生态功能产生潜在影响,需开展多区域、多年份的定位试验,评估协同策略对土壤碳氮循环、微生物网络结构的长期效应。通过构建“防控效果-生态代价”的动态平衡模型,确定生物防治菌剂的环境安全阈值

和免疫激发子的合理施用周期,确保在有效控制病害的同时,维持土壤生态系统的稳定性和服务功能,为绿色防控技术的可持续应用提供科学依据。

未来,大豆根腐病的防控将依托微生物组解析、智能技术和跨学科创新,逐步构建“机制明晰、技术集成、生态安全”的一体化防控体系,为全球大豆产业的可持续发展提供坚实的科技支撑。

参考文献:

- [1] 王晓艳,文景芝.东北三省大豆根腐镰孢菌种类及其致病力分析[J].中国油料作物学报,2011,33(4):391-395.
- [2] TYLER B M. *Phytophthora sojae*: root rot pathogen of soybean and model oomycete[J]. Molecular Plant Pathology, 2007, 8(1):1-8.
- [3] 董吉卫,黄敏.大豆根腐病防治药剂研究进展[J].现代农药,2024,23(6):42-47.
- [4] 姜超,董禹含,孟利强,等.镰孢菌引发的大豆根腐病及其生物防治研究进展[J].大豆科学,2024,43(5):656-662.
- [5] 叶文武,郑小波,王源超.大豆根腐病监测与防控关键技术研究进展[J].大豆科学,2020,39(5):804-809.
- [6] 陈雨晖.大豆种质资源对尖孢镰孢菌抗性评估与抗病基因的挖掘[D].雅安:四川农业大学,2023.
- [7] PALIWAL K, JAJOO A, TOMAR R S, et al. Enhancing biotic stress tolerance in soybean affected by *Rhizoctonia solani* root rot through an integrated approach of biocontrol agent and fungicide[J]. Current Microbiology, 2023, 80(9): 304(1): 9200.
- [8] NEUPANE A, BULBUL I, WANG Z Y, et al. Long term crop rotation effect on subsequent soybean yield explained by soil and root-associated microbiomes and soil health indicators[J]. Scientific Reports, 2021, 11(1): 9200.
- [9] PATOLE S P, SALUNKHE R S, PHAPALE A D. Botanical management of *Rhizoctonia solani* in soybean[J]. International Journal of Plant Protection, 2016, 9(2): 561-565.
- [10] ABDELLATEF M, MAGDI A E, SAID M K. Chitosan is the ideal resource for plant disease management under sustainable agriculture[M]. IntechOpen, 2023.
- [11] MONOKROUSOS N, PAPTAEODOROU E M, ORFANOUDAKIS M, et al. The effects of plant type, AMF inoculation and water regime on rhizosphere microbial communities [J]. European Journal of Soil Science, 2020, 71(2): 265-278.
- [12] MATTHEW B, ZHU C. Integrating crop rotation for sustainable soil pathogen control [J]. Journal Of Soil Science And Plant Nutrition, 2023, 7(2):1-20.
- [13] JIA Y J, HUANG J X, QI L L, et al. *Bacillus subtilis* strain BS06 protects soybean roots from *Fusarium oxysporum* infection [J]. FEMS Microbiology Letters, 2021, 368(15): fnab102.

- [14] LI X, MA F H, WANG X J, et al. Identification of bio-control bacterial strain KJB04-11 against soybean root rot disease and the produced lipopeptide antibiotics by the strain[J]. Chinese Journal of Ecology, 2012, 31(6): 1453-1460.
- [15] HASHEM A, TABASSUM B, FATHI ABD ALLAH E. *Bacillus subtilis*: a plant-growth promoting rhizobacterium that also impacts biotic stress[J]. Saudi Journal of Biological Sciences, 2019, 26(6): 1291-1297.
- [16] CABALLERO P, MACÍAS-BENÍTEZ S, REVILLA E, et al. Effect of subtilisin, a protease from *Bacillus* sp., on soil biochemical parameters and microbial biodiversity [J]. European Journal of Soil Biology, 2020, 101: 103244.
- [17] HAN S Y, CHEN J X, ZHAO Y J, et al. *Bacillus subtilis* HSY21 can reduce soybean root rot and inhibit the expression of genes related to the pathogenicity of *Fusarium oxysporum* [J]. Pesticide Biochemistry and Physiology, 2021, 178: 104916.
- [18] 郭荣君,李世东,张晶,等.基于营养竞争原理的大豆根腐病生防芽孢杆菌的筛选及其特性研究[J].植物病理学报,2010,40(3):307-314.
- [19] 杨帆,李新民,刘春来,等.四株生防菌对大豆根腐尖镰孢菌及根腐病的作用效果[J].黑龙江农业科学,2021(3):41-45.
- [20] 李晶,张淑梅,王玉霞,等.一种枯草芽孢杆菌 B29 菌株拌种剂对大豆根腐病的田间防效研究[J].微生物学通报,2009,36(6):842-846.
- [21] HARMAN G E, HOWELL C R, VITERBO A, et al. *Trichoderma* species: opportunistic, avirulent plant symbionts [J]. Nature Reviews Microbiology, 2004, 2: 43-56.
- [22] 王兴娥,赵永田,刘荣,等.木霉菌防治植物真菌病害的研究进展[J].植物医学,2024,3(4):11-19.
- [23] 陈捷.木霉菌诱导植物抗病性研究新进展[J].中国生物防治学报,2015,31(5):733-741.
- [24] 张武,杨树,项鹏,等.哈茨木霉拌种对大豆生长及大豆根腐病的影响[J].黑龙江农业科学,2023,(7):41-46.
- [25] GAO P X, QI K, HAN Y J, et al. Effect of *Trichoderma viride* on rhizosphere microbial communities and biocontrol of soybean root rot[J]. Frontiers in Microbiology, 2023, 14: 1204688.
- [26] 张付云,赵小明,白雪芳,等.壳寡糖诱导植物抗病性研究进展[J].中国生物防治,2008,24(2):174-178.
- [27] 赵小明.壳寡糖诱导植物抗病性及其诱抗机理的初步研究[D].大连:中国科学院研究生院(大连化学物理研究所),2006.
- [28] YIN H, DU Y G, DONG Z M. Chitin oligosaccharide and chitosan oligosaccharide: two similar but different plant elicitors[J]. Frontiers in Plant Science, 2016, 7: 522.
- [29] WANG G, CHEN X, YU C Z, et al. Release of a ubiquitin brake activates OsCERK1-triggered immunity in rice[J]. Nature, 2024, 629: 1158-1164.
- [30] PITZSCHKE A, SCHIKORA A, HIRT H. MAPK cascade signalling networks in plant defence[J]. Current Opinion in Plant Biology, 2009, 12(4): 421-426.
- [31] XU W H, JIANG C Q, KONG X Y, et al. Chitooligosaccharides and N-acetyl-D-glucosamine stimulate peripheral blood mononuclearcell-mediated antitumor immune responses[J]. Molecular Medicine Reports, 2012, 6(2): 385-390.
- [32] 韦柳利,孙艳春,徐彬钰,等.植物免疫诱剂对大豆主要根部和种子病害的防治效果[J].土壤与作物,2025,14(2):196-206.
- [33] 朱林.大豆疫霉病原相关模式分子 *PsXEG1* 的免疫活性和毒性功能分析[D].南京:南京农业大学,2016.
- [34] 孙亮.抗性诱导因子 *PsXEG1* 高效表达系统的建立及其诱导的大豆抗性检测[D].南京:南京农业大学,2019.
- [35] XIA Y Q, MA Z C, QIU M, et al. N-glycosylation shields *Phytophthora sojae* apoplastic effector PsXEG1 from a specific host aspartic protease[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2020, 117(44): 27685-27693.
- [36] 张伟琼,聂明,肖明.荧光假单胞菌生防机理的研究进展[J].生物学杂志,2007,24(3):9-11,24.
- [37] 陈绍兴,谢志雄.铁离子对荧光假单胞菌生长及产铁载体的影响[J].江苏农业科学,2008,36(4):294-295.
- [38] SUSILOWATI A, WAHYUDI A T, LESTARI Y, et al. Potential *Pseudomonas* isolated from soybean rhizosphere as biocontrol against soilborne phytopathogenic fungi[J]. HAYATI Journal of Biosciences, 2011, 18(2): 51-56.
- [39] 刘润进,陈应龙.菌根学[M].北京:科学出版社,2007:1-300.
- [40] 曲跃军,杜人杰,张翼.丛枝菌根真菌对植物病原菌的生物防治作用[J].园艺与种苗,2021,41(7):35-37.
- [41] 马超然.AMF调控蒺藜苜蓿根系内源激素响应和系统性抗旱机制研究[D].杨凌:西北农林科技大学,2020.
- [42] BULGARELLI R G, MARCOS F C C, RIBEIRO R V, et al. Mycorrhizae enhance nitrogen fixation and photosynthesis in phosphorus-starved soybean (*Glycine max* L. Merrill) [J]. Environmental and Experimental Botany, 2017, 140: 26-33.
- [43] ZHENG L S, ZHAO S P, ZHOU Y F, et al. The soybean sugar transporter GmSWEET6 participates in sucrose transport towards fungi during arbuscular mycorrhizal symbiosis[J]. Plant, Cell & Environment, 2024, 47(4): 1041-1052.
- [44] 程蛟.田间接种 AM 真菌对大豆生长效应的影响[D].哈尔滨:黑龙江大学,2012.
- [45] WEI W, XU Y L, LI S X, et al. Developing suppressive soil for root diseases of soybean with continuous long-term cropping of soybean in black soil of North East China[J]. Acta Agriculturae Scandinavica, Section B-Soil & Plant Science, 2015, 65(3): 279-285.
- [46] 王树起,韩晓增,乔云发,等.寒地黑土大豆轮作与连作不同年限土壤酶活性及相关肥力因子的变化[J].大豆科学,

- 2009,28(4):611-615.
- [47] YU Y T, ZHANG Q, KANG J, et al. Effects of organic fertilizers on plant growth and the rhizosphere microbiome [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2024, 90(2): e01719-23.
- [48] 刘晓丽,赵娜,贾钰莹,等. 酚酸类物质在植物-土壤-环境中的作用[J]. *园艺与种苗*,2020,40(8):56-58,63.
- [49] 台莲梅,郭永霞,范文艳,等. 有机肥对连作大豆根腐病、生育及产量影响的研究[J]. *黑龙江八一农垦大学学报*, 2001,13(4):28-31.
- [50] HUANG X W, YUAN J, CHEN Y X, et al. Long-term cropping rotation with soybean enhances soil health as evidenced by improved nutrient cycles through keystone phylotypes interaction[J]. *Soil Ecology Letters*, 2024, 6(4): 240251.
- [51] RIGOBELLO E C, de ANDRADE L A, SANTOS C H B, et al. Effects of *Trichoderma harzianum* and *Bacillus subtilis* on the root and soil microbiomes of the soybean plant INTACTA RR2 PRO™ [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2024, 15: 1403160.
- [52] 丁建莉. 长期施肥对黑土微生物群落结构及其碳代谢的影响[D]. 北京:中国农业科学院,2017.
- [53] 陈瑾. 复合生防菌剂防治大豆根腐病的研究[D]. 大庆:黑龙江八一农垦大学,2010.
- [54] 李洪君. 绥化市北林区大豆根腐病防治技术研究[J]. *农业开发与装备*,2016(12):157.

Research Progress on Biological and Ecological Control Strategies for Soybean Root Rot

LIANG Wenwei^{1,2}, BI Yingdong¹, FAN Chao¹, LIU Jianxin¹, LIU Miao¹, YANG Guang¹, DI Shufeng¹, XU Jie³

(1. Institute of Crop Cultivation and Tillage, Heilongjiang Academy of Agricultural Sciences, Harbin 150023, China; 2. Heihe Branch, Heilongjiang Academy of Agricultural Sciences / Postdoctoral Innovation Practice Base, Heihe 161400, China; 3. Sifangshan Farm in Heilongjiang Province, Beidahuang Group, Zhaodong 151100, China)

Abstract: Soybean root rot, a key soil-borne disease restricting the sustainable development of the global soybean industry, has triggered a series of problems such as rising pathogen resistance and soil microecological imbalance due to long-term reliance on chemical pesticides. Traditional agricultural measures, such as long-cycle crop rotation and high-cost deep plowing, are difficult to meet the needs of modern production. The synergistic strategy of biological control and ecological regulation has become the core direction of green prevention and control. This paper systematically reviewed the three-dimensional synergistic mechanism of “pathogen inhibition-immunity activation-microecology restoration”, biocontrol agents (such as antibiotics secreted by *Bacillus* and hyperparasitic action of *Trichoderma*) directly inhibited pathogen growth. And plant immune elicitors (such as chitosan oligosaccharides and protein elicitors) activated the defense enzyme system through MAPK and salicylic acid signaling pathways. Ecological regulation measures (crop rotation and organic fertilizer application) reconstructed the rhizosphere microecology and increased the abundance of beneficial microbial communities. Multidimensional collaboration reduced the incidence of soybean root rot by 30% to 45%, simultaneously increasing protein content by 2.0% to 3.2%, and replicable control models had been formed in major soybean producing areas such as Suihua, Heilongjiang. Studies showed that biocontrol agents and ecological regulation inhibited pathogens through a dual barrier of “biological killing-ecological exclusion”, and achieved “short-term disease control-long-term quality improvement” by activating the plant immune system and optimizing the microecological environment. Future research could focus on directional regulation of the microbiome, precise application of intelligent sensing, and interdisciplinary technological innovation to construct an integrated “prevention-inhibition-restoration” precision control system, contributing to the sustainable development of the global soybean industry.

Keywords: soybean root rot; biological control; ecological regulation; rhizosphere microorganisms; green prevention and control