

DOI:10.13718/j.cnki.zwyx.2026.02.001

生防菌与杀菌剂复配在防控植物病害中的研究进展

伍超¹, 卿龙豪¹, 李坤椽¹, 王伟宁²,
张永华², 兰海心², 刘强树², 傅泰露²,
薛杨³, 罗朝鹏⁴, 杨超²

1. 西南大学 植物保护学院, 重庆 400715;
2. 中国烟草总公司 重庆市公司 万州分公司, 重庆 409100;
3. 西南大学 化学化工学院, 重庆 400715;
4. 中国烟草总公司 郑州烟草研究院, 郑州 450001

摘要: 面对日益严峻的植物病害问题, 传统单一化学药剂防治已难以同时满足环境安全与防控效率的双重需求, 而以生物防治为代表的绿色防控技术因其环境友好性而受到广泛关注。在传统农业生产中, 长期过度依赖化学药剂不仅造成环境污染, 还会加剧病原菌抗药性的产生, 并对人类健康构成潜在威胁。生防菌作为重要的生物防治因子, 与化学药剂进行复配使用被认为是一种有效的改进策略。菌药复配能够提高对植物病害的防治效果, 减少化学药剂使用量, 从而实现减量增效的目标。本文系统综述了木霉菌、芽孢杆菌等主要生防菌与化学药剂复配的研究进展, 重点介绍了相容性测定、复配方式、增效机制以及根际定殖等方面的研究成果, 并对未来研究方向进行了展望, 以期对植物病害的综合治理提供参考。

关键词: 生防菌; 化学药剂; 植物病害;

减量增效

中图分类号: S471

文献标识码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



文章编号: 2097-1354(2026)02-0001-11

Research Progress on the Combination of Biocontrol Agents and Chemical Fungicides in the Prevention and Control of Plant Diseases

WU Chao¹, QING Longhao¹, LI Kunyuan¹, WANG Weining²,

收稿日期: 2025-10-20

基金项目: 中国烟草总公司重庆市公司科技计划(B20241NY1310)。

作者简介: 伍超, 硕士研究生, 主要从事烟草植保技术研究及应用。

通信作者: 杨超, 硕士。

ZHANG Yonghua², LAN Haixin², LIU Qiangshu², FU Tailu²,
XUE Yang³, LUO Zhaopeng⁴, YANG Chao²

1. College of Plant Protection, Southwest University, Chongqing 400715, China;

2. Wanzhou Branch, Chongqing Company of China Tobacco Corporation, Chongqing 409100, China;

3. College of Chemistry and Chemical Engineering, Southwest University, Chongqing 400715, China;

4. Zhengzhou Tobacco Research Institute of China Tobacco Corporation, Zhengzhou 450001, China

Abstract: With the increasingly severe occurrence of plant diseases, traditional single chemical control strategies have become insufficient to meet the dual demands of environmental protection and control efficiency. Biological control methods have attracted extensive attention due to their environmental friendliness. In conventional agricultural production, excessive reliance on chemical fungicides has resulted in a series of problems, including environmental pollution, increased pathogen resistance, and potential risks to human health. Biocontrol agents, as an important biological control resource, have been proposed to be used in combination with chemical fungicides to address these issues. The combined application of biocontrol agents and chemical fungicides can enhance disease control efficacy, reduce the amount of chemical fungicides used, and achieve the goal of reduced input with improved efficiency. This paper systematically reviews the research progress on the combination of major biocontrol agents, such as *Trichoderma* and *Bacillus*, with chemical fungicides, focusing on compatibility assessment, combination strategies, synergistic mechanisms, and rhizosphere colonization. In addition, future research directions are discussed, aiming to provide references for the integrated management of plant diseases.

Key words: biocontrol agents; chemical pesticides; plant disease; reduced dosage and enhanced efficiency

在现代集约化农业生产体系中,植物病害发生频率高,这很大程度上导致农业生产对化学农药的依赖不断加深。然而,化学农药的大量使用会引发一系列问题,例如,农药残留造成的环境污染、病原菌抗药性的产生以及对人畜安全的潜在危害等^[1-4]。近年来,生防菌因其环境友好性和对植物病害防控效果良好,逐渐成为植物病害管理中的重要策略,并受到广泛关注^[5]。然而,单独使用生防菌同样难以完全解决植物病害防控问题。生防菌与化学药剂各自具有不同的优势与局限:生防菌对环境和人畜安全友好、污染小,但其作用速度较慢、定殖率较低,且在大田条件下易受环境因素影响,多以预防为主,当病害已经发生时防治效果往往较差;相比之下,化学杀菌剂见效快,在病害发生后施用能够迅速控制病害发展,但其对环境和人畜安全存在一定风险,并可能造成较严重的环境污染^[6-9]。

针对上述问题,国内外学者逐渐开展生防菌与化学药剂复配应用的研究。当前复配方式呈现出多样化趋势,包括菌药复配、生防菌代谢产物与化学药剂复配以及先施用生防菌再施用化学药剂等多种模式^[10-12]。通过将生防菌与杀菌剂复配使用,可以在一定程度上综合二者优势,弥补单一使用时存在的不足,例如,克服生防菌见效慢的问题,同时降低化学药剂对环境和人畜健康的不利影响,从而提高病害防控效果并减少杀菌剂带来的环境风险。

木霉菌(*Trichoderma* spp.)和芽孢杆菌(*Bacillus* spp.)是目前生防菌与杀菌剂复配研究中应用最广泛的两类微生物。关于这两类生防菌的生防功能已有大量研究,证实其对多种植物病害具有显著的防治效果。在通过相容性测定后,将生防菌与化学杀菌剂联合施用,不仅能够显

著减少化学药剂的使用量,而且二者之间往往能够产生协同增效作用,从而提高对植物病害的综合防控效果。因此,生防菌与化学药剂复配在植物病害防控中具有实现减量增效和促进农业绿色可持续发展的重要意义。本文主要综述生防真菌和生防细菌与化学药剂复配的研究进展,以期今后生防菌与化学药剂复配技术的发展提供参考。

1 生防真菌与杀菌剂复配的减量增效作用

1.1 生防木霉菌与杀菌剂复配

1.1.1 生防木霉菌的生防机制

生防木霉菌最典型的生防机制之一是重寄生作用。该过程通常包括对病原菌的识别、接触、缠绕、穿透以及寄生等多个阶段^[13]。在寄生过程中,木霉菌能够通过分泌多种胞外酶降解病原菌细胞壁,从而导致其死亡。这些酶主要包括几丁质酶、纤维素酶、木聚糖酶以及蛋白酶等细胞壁降解酶^[14]。此外,木霉菌还可通过产生铁载体等物质,与病原菌竞争环境中的铁元素,从而抑制病原菌的生长^[15]。

木霉菌另一重要的生防机制是产生大量具有抗菌活性的次生代谢产物,例如,萜类化合物、抗菌肽、醇类化合物以及酯类化合物等,这些物质能够直接抑制病原菌的生长^[16-18]。同时,木霉菌还能够诱导植物产生系统性抗性,例如,上调病程相关蛋白(Pathogenesis-related protein, PR protein)基因的表达,并提高过氧化物酶(Peroxidase, POD)、苯丙氨酸解氨酶(Phenylalanine ammonia-lyase, PAL)、超氧化物歧化酶(Superoxide dismutase, SOD)和过氧化氢酶(Catalase, CAT)等防御相关酶活性^[19-21]。除此之外,木霉菌还具有促进植物生长的作用,可提高植物总根长以及叶绿素 a、叶绿素 b、脯氨酸、可溶性糖和可溶性蛋白水平,从而增强植物抗逆性,并提高产量^[22]。

1.1.2 生防木霉菌与杀菌剂复配的研究现状

木霉菌作为重要的生防真菌,能够产生多种次生代谢产物,具有较强的生防能力,在农业生产中得到广泛应用,对多种植物病害具有良好的防控效果^[23]。近年来,研究者基于优势互补的思路,将生防菌与化学药剂进行复配,以获得更高效的控病效果。在已有研究中,哈茨木霉(*Trichoderma harzianum*)、棘孢木霉(*Trichoderma asperellum*)、里氏木霉(*Trichoderma reesei*)以及钩状木霉(*Trichoderma hamatum*)等生防菌种应用较为广泛;与之复配的化学药剂包括烯酰吗啉、代森锰锌、苯醚甲环唑、井冈霉素等。这些复配组合在研究中均表现出较好的病害防控效果。

木霉菌能够与多种化学药剂复配使用,从而显著降低化学药剂的施用量,对环境和人畜安全且更为友好。刘畅等^[24]将棘孢木霉与30%霜霉·啞菌酯进行复配,研究其对烟草镰刀菌根腐病的防治效果;结果表明,当0.0643 mL/L的30%霜霉·啞菌酯与 2.36×10^2 cfu/mL的棘孢木霉 Tr-0111按5:5复配时,对烟草镰刀菌根腐病的室内防效可达78.18%,显著高于单独施用生防菌或化学药剂的处理。贺字典等^[25]研究了多种木霉菌与化学药剂复配对北苍术白绢病的增效作用,结果表明噻呋酰胺分别与棘孢木霉和深绿木霉(*Trichoderma atroviride*)复配后,对北苍术白绢病的田间防治效果分别达到80.76%和78.82%,均高于单独施用噻呋酰胺的防治效果。

Wang等^[26]将苯醚甲环唑与哈茨木霉 SH2303复配用于防治玉米小斑病,结果表明复配剂的田间防效与单独使用化学药剂相比无显著差异,但能够减少化学杀菌剂的使用量并达到预期

防治效果。同时研究发现,在施用复配剂 24 h 后, PAL、SOD 和 CAT 等防御酶活性显著提升,玉米抗病相关基因 *PR1*、*OPR1* 等的表达量也显著提高^[27]。四霉素分别与哈茨木霉和棘孢木霉联合使用,对黄瓜棒孢叶斑病均表现出明显的防控作用,并显著提高黄瓜叶片中 PAL、SOD 和 CAT 的活性。

此外,50%烯酰吗啉和 687.5 g/L 氟菌·霜霉威分别与木霉菌复配后,对病害的防治效果均达到 70%以上。与单独施用化学药剂相比,复配剂在施用 21 d 后的防效仍保持较高水平,说明复配剂的防治效果及持效期均未降低^[28]。将棘孢木霉 SC012 与恶霉灵复配后,对尖孢镰刀菌的防治效果高于单独施用恶霉灵,即使将复配剂浓度减半,其防治效果仍与单独施用恶霉灵无显著差异,从而减少了恶霉灵在田间的使用量^[29]。此外,里氏木霉与低剂量代森锰锌复配后,对尖孢镰刀菌菌丝生长的抑制率较单独使用木霉菌提高了 36%^[30]。

井冈霉素 A 是一种由吸水链霉菌变种或放线菌发酵产生的葡萄糖苷类化合物,可通过被真菌吸收后抑制菌体的正常生长发育,对水稻纹枯病、烟草靶斑病和玉米纹枯病等真菌病害产生良好的防治效果^[31-33]。然而,井冈霉素 A 的大量使用同样可能对环境造成一定污染。鉴于其良好的防治效果,有研究将其与棘孢木霉 GDSF1009 联合使用以防治玉米纹枯病,结果表明二者复配能够显著抑制丝核菌的生长,同时井冈霉素 A 对棘孢木霉 GDSF1009 的生长、基本代谢以及主要生防机制均无显著影响^[34]。

1.2 其他生防真菌与杀菌剂复配的研究现状

除木霉菌外,其他生防真菌与化学药剂复配的研究也逐渐增多,例如,寡雄腐霉菌(*Pythium oligandrum*)。寡雄腐霉菌能够降解植物病原真菌的细胞壁,并分泌抗菌物质抑制病原菌的生长繁殖。在农业生产中,已有利用寡雄腐霉菌防治辣椒、烟草和马铃薯等作物真菌病害的相关报道^[35-36]。贾海江等^[37]分别采用寡雄腐霉菌和氟噻唑吡乙酮对烟草黑胫病病原菌进行毒力测定,并根据毒力回归方程筛选复配浓度开展室内和田间试验,结果表明,该复配剂能够有效控制烟草黑胫病,防效达到 84.57%,且灌根处理还能够显著促进烟株生长发育。毕秋燕等^[38]将寡雄腐霉菌孢子与烯酰吗啉按 6:4 进行复配,并研究其对葡萄霜霉病的防治效果,结果表明复配处理的防效显著高于单独施用,同时在复配条件下可减少 60%的烯酰吗啉使用量。

2 生防芽孢杆菌与杀菌剂复配的减量增效作用

2.1 生防芽孢杆菌的生防机制

生防细菌是生防菌中种类最多的一类,也是研究最为深入的一类,其中以芽孢杆菌属的研究最为突出,包括枯草芽孢杆菌(*Bacillus subtilis*)、贝莱斯芽孢杆菌(*Bacillus velezensis*)、解淀粉芽孢杆菌(*Bacillus amyloliquefaciens*)等^[39-41]。生防芽孢杆菌的重要生防机制之一是产生伊枯草素、泛革素和表面活性素等具有抑菌活性的脂肽类代谢产物,这些代谢产物能够抑制多种植物病原菌的生长,例如,尖孢镰刀菌(*Fusarium oxysporum*)、烟草疫霉(*Phytophthora nicotianae*)和核盘菌(*Sclerotinia sclerotiorum*)等^[42]。此外,芽孢杆菌能够产生嗜铁素以富集环境中的铁离子,并与病原菌竞争铁元素资源,从而减少病原菌可利用的铁离子并抑制其生长,同时嗜铁素还可在芽孢杆菌群体之间发挥信号传递作用^[43]。

生防芽孢杆菌还能够诱导植物产生诱导系统抗性(Induced Systemic Resistance, ISR),从而提高植物的抗病能力;该过程主要依赖于茉莉酸和乙烯信号通路,并可引起 SOD、PAL 和 POD 等防御相关酶活性的升高^[44]。研究表明,芽孢杆菌诱导植物产生 ISR 的机制与其分泌的

多种代谢产物的协同作用密切相关^[45]。此外,在芽孢杆菌生长过程中还会产生多种溶菌物质,这些物质能够作用于病原菌细胞壁,使其产生穿孔、畸形等结构变化,甚至导致菌丝断裂和解体,从而发挥溶菌作用^[46]。

2.2 生防芽孢杆菌与杀菌剂复配的研究现状

在芽孢杆菌与化学药剂复配研究中,枯草芽孢杆菌、贝莱斯芽孢杆菌和解淀粉芽孢杆菌应用最为广泛。由于其生防功能研究较为深入,这些菌株能够有效防控多种植物病害,因此被广泛应用于生防菌与化学药剂复配研究。Gumarães 等^[47]将枯草芽孢杆菌 BLOUFLA2 联合环丙咪唑+噁菌酯应用于玉米穗腐病防治,结果表明,通过两次施药,生防菌与杀菌剂混合施用相较于单独施用能够显著降低发病率,同时保证籽粒品质和产量,而单独施用杀菌剂或生防菌均难以达到该效果。

仇月等^[48]研究发现,贝莱斯芽孢杆菌 SDTB038 能够在含有胍菌酯和苯醚甲环唑的培养基上正常生长,表明其与上述化学药剂具有良好的相容性。在两种杀菌剂与生防菌复配施药 21 d 后,对草莓枯萎病的协同防治效果分别达到 62.5% 和 74.01%,且与单独施用化学杀菌剂相比,复配组合的持效期更长。黄慧婧^[49]将贝莱斯芽孢杆菌 TR-1 与 10 种化学杀菌剂进行复配筛选,通过初筛和复筛确定最佳复配组合为柠铜·络氨铜与 TR-1。在温室和田间试验中,该复配组合对番茄青枯病的防效分别达到 85.48% 和 79.31%。

Chen 等^[50]将氟烯菊酯与 10^8 CFU/mL 贝莱斯芽孢杆菌 SDTB038 进行复配,用于防治番茄枯萎病,结果表明该组合具有显著的协同防治效果,防效达到 84.0%;同时,与对照相比,该复配组合还使番茄产量提高了 35.6%;解淀粉芽孢杆菌 SDTB009 对尖孢镰刀菌具有良好的体外拮抗活性,并且对高浓度苯醚甲环唑表现出一定抗性;二者联合使用对番茄枯萎病具有较好的防治效果。同时研究发现,苯醚甲环唑可通过参与调控解淀粉芽孢杆菌表面活性素生物合成、氨基酸代谢及糖酵解相关基因的表达,从而提高其生防能力,这进一步证明了二者之间存在协同作用^[51]。

高强等^[52]筛选获得一株多粘类芽孢杆菌 CY2,并将其发酵液与氟噻唑吡乙酮按 1:2 体积比进行复配;结果表明该复配剂与单独使用氟噻唑吡乙酮相比防治效果无显著差异,但能够显著减少化学农药的使用量。苟剑渝^[53]等采用抑菌圈法发现贝莱斯芽孢杆菌 Y19 与 38% 吡唑醚菌酯·啶酰菌胺悬浮剂具有较好的生物相容性;将 Y19 (1×10^7 CFU/mL) 与 38% 吡唑醚菌酯·啶酰菌胺 (15 mg/L) 按 2:8 复配后,对多主棒孢霉的抑菌效果最佳,毒力比率为 1.21;室内盆栽试验结果表明,该复配剂的防效 (57.6%) 高于 38% 吡唑醚菌酯·啶酰菌胺和生防菌 Y19 单剂处理的防效。

3 生防菌与杀菌剂的生物相容性测定、复配方法及增效机制

3.1 生防菌与杀菌剂生物的相容性测定

生防菌与杀菌剂进行复配应用时,首先需要开展相容性测定。生防菌与杀菌剂的相容性可通过驯化试验或利用生防菌的天然抗药性来实现^[54]。目前,利用芽孢杆菌属、木霉属等多类生防菌与化学杀菌剂进行相容性筛选并开展复配应用于植物病害防治的研究已有较多报道^[55]。一般而言,生防木霉对多种化学药剂具有较好的相容性,但不同生防菌株与同一种化学药剂之间仍存在差异,同时同一生防菌与不同化学药剂之间的相容性也存在明显差异。例如,哈茨木霉与绿色木霉对 80% 福美双、75% 百菌清、50% 噁菌胺、400 g/L 噁霉胺、26.7% 啶酰菌胺+

6.7%吡唑醚菌酯复配剂、37.5%啞菌环胺+25%咯菌腈复配剂以及50%环酰菌胺均表现出不同程度的相容性；在上述药剂中，环酰菌胺与两种木霉菌的相容性最好，其次为啞菌环胺，而福美双和啞菌胺与木霉菌的相容性最差^[56]。

3.2 生防菌与杀菌剂的复配方法

在已有研究中，通过测定生防菌制剂与化学药剂对病原菌的毒力并计算其 EC_{50} 值，再根据 EC_{50} 值将生防菌与化学药剂按不同比例进行复配，是最常用的复配方法之一^[57]。 EC_{50} 值表示抑制 50% 菌落生长所需的药剂浓度。利用化学药剂与生防菌各自的 EC_{50} 值进行比例复配，通常能够有效抑制病原菌的生长，从而产生类似“1+1=2”甚至“1+1>2”的效果。黄鑫等^[58]测定出啞菌环胺·咯菌腈和泛菌 D25 对番茄灰霉病菌的 EC_{50} 值分别为 0.043 mg/L 和 7.0×10^4 CFU/mL，并采用混和平板法证明啞菌环胺·咯菌腈与泛菌 D25 具有良好的相容性。当二者按 1:1 复配时，毒性比率达到 1.394 3，表现出明显的增效作用，对番茄灰霉病的防效达到 72.29%。杨胜雨等^[59]测定出解淀粉芽孢杆菌 SJ1606 代谢产物与丙环唑对花生褐斑病菌的 EC_{50} 值分别为 1 149.89 mg/L 和 4.05 mg/L，当二者按 1:9 复配时，对病原菌的抑制效果最佳，毒性比率达到 1.39。

此外，以生防菌和化学药剂的某一固定浓度进行复配也是一种常见方法。在这种方法中，为实现化学药剂减量使用，通常需要将化学药剂浓度控制在较低水平，同时保持适当的生防菌浓度。刘继红等^[60]将放线菌 Sc113 和 Fo47 配制为 10^7 CFU/g，并与 50% 多菌灵可湿性粉剂混合使用，结果表明该复配剂能够有效防治棉花枯萎病，其防效均高于对照处理，分别达到 64.99% 和 57.10%。

需要注意的是，生防菌与化学药剂复配后有时可能出现防效下降的情况，因此多数研究者会采用联合毒力分析方法对复配效果进行评价，例如，Horsfall 法联合毒力分析^[61]或利用增效系数 SR ^[62]进行评估。

Horsfall 法联合毒力计算公式为：

$$I_R = E_{ab} / E_{th} \quad (1)$$

式中： I_R 为增效比率，当 $I_R > 1$ 时表示增效作用， $I_R = 1$ 表示相加作用， $I_R < 1$ 表示拮抗作用； E_{ab} 为复配剂的实际防治效果； E_{th} 为复配剂的理论防治效果，即各单剂防效与其复配比例的乘积之和。

增效系数 (SR) 计算公式为：

$$EC_{50}(th) = \frac{a + b}{\frac{a}{EC_{50}(A)} + \frac{b}{EC_{50}(B)}} \quad (2)$$

$$SR = \frac{EC_{50}(th)}{EC_{50}(ob)} \quad (3)$$

式中： A 、 B 分别代表两种药剂， a 、 b 分别代表两种药剂的配比， ob 为实际防效值， th 为理论防效值。当 $SR > 1.5$ 时为增效作用； $0.5 < SR < 1.5$ 时为相加作用； $SR < 0.5$ 时为拮抗作用。

此外，还可以采用共毒系数法和等效线法对生防菌与化学药剂复配的效果进行评价^[63]。

3.3 生防菌与杀菌剂复配的增效机制

目前关于生防菌与杀菌剂复配增效机制的研究仍相对有限，其中以诱导植物抗病性和增强生防菌抗菌物质产生能力方面的研究较为深入。例如，苯醚甲环唑与哈茨木霉 SH2303 联合使

用能够在 24 h 内更有效地激活玉米防御相关酶活性,如 SOD、CAT 和 PAL,并显著上调 PR1 等防御相关基因的表达水平。将甲基硫菌灵与哈茨木霉联合用于防治水稻立枯病,其防效明显高于单独使用药剂,同时该处理组中 POD 和几丁质酶(Chitinase)的活性显著高于其他处理^[64]。

改变微生物群落结构也是菌药复配产生增效作用的重要机制之一。李星辰^[65]将贝莱斯芽孢杆菌与春雷霉素复配用于防治梨火疫病,防效达到 79.53%;扫描电镜观察结果表明,菌药复配能够显著提高贝莱斯芽孢杆菌的定殖能力;高通量测序分析表明,在复配剂喷施 7 d 后,贝莱斯芽孢杆菌在香梨叶际细菌群落中的比例达到 31.38%,显著高于单独施用贝莱斯芽孢杆菌的处理;与单剂处理相比,复配组合有利于贝莱斯芽孢杆菌占据叶片生态位并成为叶际附生菌群中的优势种群,从而显著降低梨火疫病菌的菌群数量,提高对叶片的保护作用并增强防病效果。

4 生防菌在植物根际的定殖情况

生防菌施用后通常首先出现在植物根际土壤中,随后根据其自身生物学特性进一步定殖于植物根部、茎部等部位。由于多数土传病害主要通过植物根部侵染植株,因此生防菌在植物根际的定殖能力与其防治效果密切相关。王艺璇等^[66]在对生防菌 ZYGT1811 进行灌根处理 6 d 后发现,该菌在小麦根际土壤、根、茎和叶中的定殖量均达到最大,分别为 3.24×10^6 、 1.76×10^6 、 9.00×10^5 、 6.47×10^4 CFU/g,而在 21 d 时其定殖量出现下降趋势。谢林艳等^[67]研究发现,菌株 YC89 能够在 4 个甘蔗品种的根际、根、茎和叶中均实现定殖,并且在接种后 30 d 仍能够回收到该菌株;其中,菌株 YC89 在甘蔗根际中的定殖能力最强,在叶片中的定殖量最少,同时对甘蔗赤腐病具有良好的防治效果,其中对“新台糖 22”品种赤腐病的防效最高,可达到 61.11%。然而,目前关于生防菌与化学药剂复配后生防菌在植物根部定殖情况的研究仍然较少,尤其是复配体系中化学药剂是否会影响生防菌定殖能力,仍有待进一步研究。

5 展望

生防菌在大田应用过程中仍受到多种因素的影响,例如,作物种类、施用方式、土壤养分状况、微生物多样性、连作年限以及病原菌数量等。不同环境条件会对生防菌的生长和活性产生不同程度的影响,而生防菌在植物根际的有效定殖是其发挥生防作用的重要前提^[68]。因此,在生防菌与化学药剂复配应用过程中,生防菌在植物根际的定殖效率既是关键因素,也是当前研究中的难点之一。

生防芽孢杆菌主要通过产生表面活性素、伊枯草素和细菌素等抗菌物质抑制病原菌生长。因此,通过发酵芽孢杆菌获得其上清液中的代谢产物,并将这些代谢物与化学药剂进行复配,也是一种可行策略。在这种情况下,由于不直接使用活菌,通常无需进行严格的相容性测定。生防木霉同样能够产生多种抗菌物质,例如,几丁质酶、蛋白酶、淀粉酶和脂肪酶等裂解酶,可通过降解病原菌细胞结构发挥抑菌作用^[69]。当采用生防菌代谢产物与化学药剂进行复配时,不仅无需过多考虑相容性和根际定殖问题,同时也能够在一定程度上减少大田环境因素对复配剂效果的影响。

目前,关于生防菌与化学药剂复配的研究仍需从以下几个方面进一步深入开展:①复配药剂对生防菌次生代谢产物产生的影响;②在田间应用过程中,生防菌作用时间与化学药剂作用

时间是否存在重叠,以及是否可以通过调整施用顺序实现先施用化学药剂或先施用生防菌的策略;③复配剂施用后对田间其他微生物群落结构的影响;④病原菌对复配剂的抗性是否会逐渐增强,是否会出现类似单一化学药剂使用时的抗药性问题,从而导致复配剂用量逐年增加;⑤菌药复配产生增效作用的具体机制仍有待深入研究。

总体来看,生防菌与化学药剂复配虽然在初期投入上相对较高,但从长远角度来看,该策略能够有效降低病害管理的总体成本,具有较好的经济效益。复配技术在植物病害综合管理中展现出较大的应用潜力和实际价值,不仅能够提高病害防控效率,还能够在保障农业生产安全的同时推动农业可持续发展。因此,进一步探索和优化生防菌与化学药剂的复配策略、增效机制及其相互作用关系,将为农业生产提供新的病害管理思路,具有重要的研究意义和应用价值。

参考文献:

- [1] MORALES-CEDENO L R, DEL CARMEN OROZCO-MOSQUEDA M, LOEZA-LARA P D, et al. Plant Growth-Promoting Bacterial Endophytes as Biocontrol Agents of Pre- and Post-Harvest Diseases: Fundamentals, Methods of Application and Future Perspectives [J]. *Microbiological Research*, 2021, 242: 126612.
- [2] RAZA W, LING N, ZHANG R F, et al. Success Evaluation of the Biological Control of Fusarium Wilts of Cucumber, Banana, and Tomato since 2000 and Future Research Strategies [J]. *Critical Reviews in Biotechnology*, 2017, 37(2): 202-212.
- [3] BRINGEL F, COUÉE I. Plant-Pesticide Interactions and the Global Chloromethane Budget [J]. *Trends in Plant Science*, 2018, 23(2): 95-99.
- [4] 陈志谊, 刘永峰, 刘卮洲, 等. 植物病害生防芽孢杆菌研究进展 [J]. *江苏农业学报*, 2012, 28(5): 999-1006.
- [5] ZHANG N, WANG Z Q, SHAO J H, et al. Biocontrol Mechanisms of Bacillus: Improving the Efficiency of Green Agriculture [J]. *Microbial Biotechnology*, 2023, 16(12): 2250-2263.
- [6] 和国优, 郭建伟, 孔垂思. 生防菌对烟草青枯病控制的研究进展 [J]. *江苏农业科学*, 2023, 51(23): 9-16.
- [7] 刘帅康, 黎昕, 丰慧, 等. 青枯病生物防治研究进展 [J]. *植物医学*, 2023, 2(4): 39-46.
- [8] 韩秀平. 果树病虫害防治过程中生物农药的应用 [J]. *北京农业*, 2011(15): 46-47.
- [9] CUI L K, GAO P F, GUO J L, et al. Mating Type and Sensitivity of *Phytophthora nicotianae* from Tobacco to Metalaxyl and Dimethomorph in Henan Province, China [J]. *Journal of Phytopathology*, 2018, 166(9): 648-653.
- [10] 孟素玲, 田彦梅, 顾欣, 等. 木霉的协同防病作用研究进展 [J]. *中国生物防治学报*, 2022, 38(3): 739-747.
- [11] 周慧, 段海明, 杨胜雨, 等. 生防菌代谢产物与化学杀菌剂对棉花枯萎病菌的抑制活性研究 [J]. *安徽科技学院学报*, 2024, 38(1): 65-70.
- [12] GUIMARÃES R A, ZANOTTO E, PERRONY P E P, et al. Integrating a Chemical Fungicide and Bacillus Subtilis BIOUFLA2 Ensures Leaf Protection and Reduces Ear Rot (*Fusarium verticillioides*) and Fumonisin Content in Maize [J]. *Journal of Phytopathology*, 2021, 169(3): 139-148.
- [13] 孟素玲, 田彦梅, 顾欣, 等. 木霉的协同防病作用研究进展 [J]. *中国生物防治学报*, 2022, 38(3): 739-747.
- [14] 杨萍, 杨谦. 木霉重寄生过程分子机制的研究进展 [J]. *中国农学通报*, 2012, 28(27): 163-166.
- [15] SEGARRA G, CASANOVA E, AVILÉS M, et al. *Trichoderma asperellum* Strain T34 Controls Fusarium Wilt Disease in Tomato Plants in Soilless Culture through Competition for Iron [J]. *Microbial Ecology*, 2010, 59(1): 141-149.
- [16] VINALE F, MARRA R, SCALA F, et al. Major Secondary Metabolites Produced by Two Commercial *Trichoderma* Strains Active Against Different Phytopathogens [J]. *Letters in Applied Microbiology*, 2006, 43(2):

- 143-148.
- [17] 刘畅. 棘孢木霉 CBS 433. 97 次级代谢产物分离及其生物活性分析 [D]. 宜昌: 三峡大学, 2021.
- [18] 卯婷婷. 钩状木霉 MHT1134 对辣椒枯萎病的生防作用及其机制研究 [D]. 贵阳: 贵州大学, 2021.
- [19] 刘爱荣, 陈双臣, 晋文娟, 等. 哈茨木霉接种尖孢镰刀菌后黄瓜根系次生代谢物的影响 [J]. 中国生物防治学报, 2012, 28(4): 545-551.
- [20] 张晓梦, 田永强, 潘晓梅, 等. 2 株木霉抑菌效果及其促植物生长机制 [J]. 南方农业学报, 2020, 51(11): 2713-2721.
- [21] 王前程, 张迎迎, 戴陶宇, 等. 拟康宁木霉 T-51 菌株对番茄枯萎病的生物防治及其机理研究 [J]. 西北植物学报, 2022, 42(6): 974-982.
- [22] 冯召, 杨盟权, 姚峰, 等. 干旱胁迫下哈茨木霉对烟草幼苗生理指标的影响 [J]. 江苏农业科学, 2024, 52(8): 86-93.
- [23] 张慧, 周于聪, 梁言, 等. 木霉菌抗菌活肽 peptaibols 合成调控机制研究进展 [J]. 菌物学报, 2021, 40(8): 1905-1917.
- [24] 刘畅, 李小杰, 张梦丹, 等. 棘孢木霉与 30% 霜霉·啞菌酯协同防治烟草镰刀菌根腐病 [J]. 中国烟草科学, 2024, 45(1): 48-53.
- [25] 贺字典, 韩亚梅, 金歌, 等. 木霉菌协同杀菌剂防治北苍术白绢病的增效作用 [J]. 中国生物防治学报, 2023, 39(5): 1244-1252.
- [26] WANG S Q, MA J, WANG M, et al. Combined Application of *Trichoderma harzianum* SH2303 and Difenoconazole-Propiconazolein Controlling Southern Corn Leaf Blight Disease Caused by *Cochliobolus heterostrophus* in Maize [J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2019, 18(9): 2063-2071.
- [27] 刘雪莹. 抗生素杀菌剂与木霉菌联合应用对黄瓜棒孢叶斑病的防治效果 [D]. 泰安: 山东农业大学, 2022.
- [28] 胡建坤, 黄蓉, 黄瑞荣, 等. 2 种化学杀菌剂与木霉及其组配制剂对辣椒疫病防控效果研究 [J]. 生物灾害科学, 2021, 44(4): 460-464.
- [29] ZHANG C Y, WANG W W, XUE M, et al. The Combination of a Biocontrol Agent *Trichoderma asperellum* SC012 and Hymexazol Reduces the Effective Fungicide Dose to Control *Fusarium* Wilt in Cowpea [J]. *Journal of Fungi*, 2021, 7(9): 685.
- [30] GONZALEZ M F, MAGDAMA F, GALARZA L, et al. Evaluation of the Sensitivity and Synergistic Effect of *Trichoderma Reesei* and Mancozeb to Inhibit under in Vitro Conditions the Growth of *Fusarium oxysporum* [J]. *Communicative & Integrative Biology*, 2020, 13(1): 160-169.
- [31] 邵美红, 程楚, 柯汉云, 等. 阿维菌素与井冈霉素混配对水稻主要病虫害的防治效果 [J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2024, 50(2): 308-316.
- [32] 汤佳英, 桑维钧, 张得平, 等. 广西烟草靶斑病原菌鉴定与防效试验 [J]. 江苏农业科学, 2024, 52(24): 127-132.
- [33] 李石初, 唐照磊, 杜青, 等. 玉米纹枯病的防治药剂筛选试验研究 [J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2021, 52(1): 19-22.
- [34] 夏海, 吴琼, 陆志翔, 等. 有效霉素 A 对棘孢木霉的影响及协同防治玉米纹枯病作用 [J]. 微生物学通报, 2018, 45(1): 1-10.
- [35] 殷洁, 袁玲. 寡雄腐霉菌剂对辣椒疫病的防治及促生效应 [J]. 园艺学报, 2017, 44(12): 2327-2337.
- [36] STRIDH L J, MOSTAFANEZHAD H, ANDERSEN C B, et al. Reduced Efficacy of Biocontrol Agents and Plant Resistance Inducers Against Potato Early Blight from Greenhouse to Field [J]. *Journal of Plant Diseases and Protection*, 2022, 129(4): 923-938.
- [37] 贾海江, 吕晓琳, 韦建玉, 等. 寡雄腐霉与氟噻唑吡乙酮协同防治烟草黑胫病研究 [J]. 中国烟草科学, 2022, 43(5): 44-49.

- [38] 毕秋艳, 韩秀英, 马志强, 等. 寡雄腐霉与烯酰吗啉互作防治葡萄霜霉病和替代部分化学药剂减量用药应用 [J]. 植物病理学报, 2018, 48(5): 675-681.
- [39] 范宗强, 冯靖涵, 郑丽雪, 等. 枯草芽孢杆菌 B579 对黄瓜枯萎病的防治及其诱导抗性研究 [J]. 生物技术通报, 2024, 40(7): 226-234.
- [40] XU Y, WANG L L, LIANG W X, et al. Biocontrol Potential of Endophytic *Bacillus velezensis* Strain QSE-21 Against Postharvest Grey Mould of Fruit [J]. Biological Control, 2021, 161: 104711.
- [41] 濮永瑜, 包玲凤, 何翔, 等. 烟草青枯病和黑胫病拮抗细菌的筛选、鉴定及防效研究 [J]. 中国农学通报, 2022, 38(7): 116-123.
- [42] 曹艳子, 顾艳丽, 高丽, 等. 贝莱斯芽孢杆菌的研究现状与应用展望 [J]. 中国微生态学杂志, 2024, 36(3): 351-356, 362.
- [43] 刘邮洲, 沈佳慧, 乔俊卿, 等. 芽孢杆菌嗜铁素研究进展 [J]. 江苏农业学报, 2023, 39(1): 266-276.
- [44] 孙冰冰, 李伟, 魏军, 等. 生防芽孢杆菌的研究进展 [J]. 天津农业科学, 2015, 21(12): 102-107.
- [45] RODRÍGUEZ J, TONELLI M L, FIGUEREDO M S, et al. The Lipopeptide Surfactin Triggers Induced Systemic Resistance and Priming State Responses in *Arachis hypogaea* L. [J]. European Journal of Plant Pathology, 2018, 152(3): 845-851.
- [46] 陈志谊, 刘永峰, 刘邮洲, 等. 植物病害生防芽孢杆菌研究进展 [J]. 江苏农业学报, 2012, 28(5): 999-1006.
- [47] GUIMARÃES R A, ZANOTTO E, PERRY P E P, et al. Integrating a Chemical Fungicide and *Bacillus Subtilis* BIOUFLA2 Ensures Leaf Protection and Reduces Ear Rot (*Fusarium verticillioides*) and Fumonisin Content in Maize [J]. Journal of Phytopathology, 2021, 169(3): 139-148.
- [48] 仇月, 孙守民, 李鑫荣, 等. 贝莱斯芽孢杆菌 SDTB038 与化学药剂协同防治草莓枯萎病的研究 [J]. 中国生物防治学报, 2021, 37(5): 989-996.
- [49] 黄慧婧. 番茄青枯病生防细菌的筛选鉴定及其与杀菌剂协同增效特性研究 [D]. 长沙: 湖南农业大学, 2022.
- [50] CHEN Q Q, GAO J W, YANG X, et al. Synergistic Effects of *Bacillus velezensis* SDTB038 and Phenamacril on *Fusarium* Crown and Root Rot of Tomato [J]. Plant Pathology, 2023, 72(8): 1453-1462.
- [51] XU X M, WANG Y Q, LEI T, et al. Synergistic Effects of *Bacillus amyloliquefaciens* SDTB009 and Difenoconazole on *Fusarium* Wilt of Tomato [J]. Plant Disease, 2022, 106(8): 2165-2171.
- [52] 高强, 张晓阳, 张渐隆, 等. 生防菌 CY2 的筛选鉴定及其与氟噻唑吡乙酮复配防治烟草黑胫病的效果 [J]. 烟草科技, 2025, 58(3): 70-79.
- [53] 苟剑渝, 王浩强, 杨相, 等. 贝莱斯芽孢杆菌与化学药剂协同防治烟草棒孢霉叶斑病 [J]. 中国烟草科学, 2025, 46(1): 56-63, 69.
- [54] PALAZZINI J M, TORRES A M, CHULZE S N. Tolerance of Triazole-Based Fungicides by Biocontrol Agents Used to Control *Fusarium* Head Blight in Wheat in Argentina [J]. Letters in Applied Microbiology, 2018, 66(5): 434-438.
- [55] SINGH S, NIRMALKAR V K, TIWARI R K S, et al. Integration of *Trichoderma*, *Pseudomonas* and Fungicides for the Control of Collar Rot Disease of Chickpea (*Cicer arietinum* L.) [J]. International Journal of Agriculture, Environment and Biotechnology, 2017, 10(1): 125.
- [56] 李歆建, 杨成, 刘晓昂, 等. 木霉菌与多种杀菌剂生物相容性研究 [J]. 生物灾害科学, 2024, 47(1): 67-72.
- [57] 梁佳馨, 李红, 张兴辉, 等. 合欢内生菌发酵物与农药复配防治黄瓜枯萎病的协同作用 [J]. 中国植保导刊, 2024, 44(3): 10-13.
- [58] 黄鑫, 郑丽宁, 顾学虎, 等. 生防菌 D25 与啉环·咯菌腈复配对番茄灰霉病防治的增效作用 [J]. 中国生物防治学报, 2022, 38(4): 860-867.
- [59] 杨胜雨, 杨飞, 段海明, 等. 生防菌代谢物与杀菌剂复配对花生褐斑病菌的抑制活性 [J]. 江汉大学学报(自然科学版), 2023, 51(2): 61-67.

- [60] 刘继红, 甘良, 蓝星杰, 等. 生防菌与化肥和杀菌剂混用对棉花枯萎病的防病促生作用 [J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2016, 44(7): 165-172.
- [61] 王夏菲. 防治小麦主要根部病害悬浮种衣剂的开发研究 [D]. 郑州: 河南农业大学, 2025.
- [62] 尹秀娟. 烟草靶斑病菌防治复配药剂筛选及生防细菌与真菌病毒研究 [D]. 长沙: 湖南农业大学, 2022.
- [63] 黄慧婧, 罗坤. 芽孢杆菌与杀菌剂复配防治植物病害的研究进展 [J]. 微生物学通报, 2021, 48(3): 938-947.
- [64] ABD-EL-KHAIR H, ELSHAHAWY I E, KARIMA HAGGAG H E. Field Application of *Trichoderma* spp. Combined with Thiophanate-Methyl for Controlling *Fusarium solani* and *Fusarium oxysporum* in Dry Bean [J]. Bulletin of the National Research Centre, 2019, 43(1): 19.
- [65] 李星辰. 生防菌与化学杀菌剂联合防治梨火疫病的协同增效作用研究 [D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2025.
- [66] 王艺璇, 柳敬龙, 李惠霞, 等. 生防副地衣芽孢杆菌 ZYGT1811 的 GFP 标记及其在小麦植株和根际土的定殖动态 [J]. 中国生物防治学报, 2025, 41(6): 1403-1411.
- [67] 谢林艳, 何丽莲, 罗艳菊, 等. 生防菌 YC89 在不同甘蔗品种中定殖及防治赤腐病的研究 [J]. 中国生物防治学报, 2024, 40(5): 1066-1073.
- [68] 张万强, 任立瑞, 折红军, 等. 枯草芽孢杆菌生防机制与剂型加工及联用研究进展 [J]. 农药, 2024, 63(8): 547-553.
- [69] ABDEL RHIM A S, HEMEDA N F, ALI MWAHEB M, et al. The Role of *Trichoderma koningii* and *Trichoderma harzianum* in Mitigating the Combined Stresses Motivated by *Sclerotinia sclerotiorum* and Salinity in Common Bean (*Phaseolus vulgaris*) [J]. Plant Stress, 2024, 11: 100370.

责任编辑 苏荣艳