

广西枝孢瓶霉 HX2 厚垣孢子可湿性粉剂制备及盆栽效果

王兴浩^{1,2#}, 曾凤花^{1#}, 龙艳艳¹, 刘红全², 于延鑫¹, 喻吉会¹, 谢玲^{1*}, 张艳^{1*}

1 广西农业科学院植物保护研究所, 农业农村部华南果蔬绿色防控重点实验室, 广西作物病虫害生物学重点实验室, 广西 南宁

2 广西民族大学 海洋与生物技术学院, 广西 南宁

王兴浩, 曾凤花, 龙艳艳, 刘红全, 于延鑫, 喻吉会, 谢玲, 张艳. 广西枝孢瓶霉 HX2 厚垣孢子可湿性粉剂制备及盆栽效果[J]. 微生物学报, 2026, 66(7): 3544-3557.

WANG Xinghao, ZENG Fenghua, LONG Yanyan, LIU Hongquan, YU Yanxin, YU Jihui, XIE Ling, ZHANG Yan. Preparation of chlamydospore wettable powder of *Cladophialophora guangxiense* HX2 and pot experiment evaluation of its efficacy[J]. Acta Microbiologica Sinica, 2026, 66(7): 3544-3557.

摘要: 【目的】以深色有隔内生真菌 (dark septate endophyte, DSE) 广西枝孢瓶霉 (*Cladophialophora guangxiense*) HX2 为研究对象, 制备对番茄青枯病具有显著防治效果的 HX2 厚垣孢子可湿性粉剂。【方法】通过单因素试验筛选可湿性粉剂的载体、润湿剂、分散剂及紫外保护剂种类与用量, 采用盆栽试验评价了 4 种浓度 (T1: 1×10^8 CFU/mL; T2: 1×10^7 CFU/mL; T3: 1×10^6 CFU/mL; T4: 1×10^5 CFU/mL) 浸种番茄种子 30 min 后, 对番茄植株生长、番茄青枯病防治效果以及过氧化物酶 (peroxidase, POD)、多酚氧化酶 (polyphenol oxidase, PPO)、苯丙氨酸解氨酶 (phenylalanine ammonia-lyase, PAL)、过氧化氢酶 (catalase, CAT) 和超氧化物歧化酶 (superoxide dismutase, SOD) 5 种防御酶活性的影响。【结果】单因素试验结果表明, 最佳配方为厚垣孢子浆 25%, 分散剂聚乙二醇 (polyethylene glycol, PEG8000) 和润湿剂吐温-60 (质量比为 1:3) 总用量 8%, 紫外保护剂抗坏血酸 (ascorbic acid, VC) 0.5%–1.5%, 并以白炭黑为载体配齐 100%。按此配方制备的可湿性粉剂中厚垣孢子含量为 2.35×10^8 CFU/g, 润湿时间为 24.25 s, 悬浮率为 73.8%, pH 为 5.71, 含水量为 16.67%, 细度为 98.81%, 各项指标均符合《农用微生物菌剂》国家标准 (GB 20287—2006)。盆

资助项目: 广西壮族自治区重点研发计划 (桂农科 AB241484049, 桂科 AB25069066); 广西农业科学院基本科研业务专项项目 (桂农科 2021YT065, 桂农科 2026YT134, 桂农科 2026YP147, 桂农科 2025YP058); 广西作物病虫害生物学重点实验室自主研究课题 (22-035-31-23ST03)

This work was supported by the Key Research and Development Program of Guangxi Zhuang Autonomous Region (Guinongke AB241484049, Guike AB25069066), the Special Fund for Basic Scientific Research Operations of Guangxi Academy of Agricultural Sciences (Guinongke 2021YT065, Guinongke 2026YT134, Guinongke 2026YP147, Guinongke 2025YP058), and the Independent Research Project of Guangxi Key Laboratory of Biology for Crop Diseases and Insect Pests (22-035-31-23ST03).

[#]These authors contributed equally to this work.

*Corresponding authors. E-mail: XIE Ling, xieling20011@126.com; ZHANG Yan, yanzhiduoduo@gxaas.net

Received: 2025-12-31; Accepted: 2026-03-19; Published online: 2026-03-31

栽试验结果显示, T2 浓度处理促生效果显著, 根长、株高、茎粗、鲜重、干重分别较对照增加 47.39%、31.82%、24.64%、89.45%、90.97%; 接种病原 30 d 后对番茄青枯病防效达 50.9%, 显著高于哈茨木霉处理, 并能显著提升 5 种防御酶活性。【结论】本研究成功制备的 HX2 厚垣孢子可湿性粉剂对番茄青枯病具有显著防效, 可为该制剂的规模化推广应用提供技术支撑。

关键词: 厚垣孢子; 可湿性粉剂; 番茄青枯病; 防御酶活性

Preparation of chlamydospore wettable powder of *Cladophialophora guangxiense* HX2 and pot experiment evaluation of its efficacy

WANG Xinghao^{1,2#}, ZENG Fenghua^{1#}, LONG Yanyan¹, LIU Hongquan², YU Yanxin¹, YU Jihui¹, XIE Ling^{1*}, ZHANG Yan^{1*}

1 Key Laboratory of Green Prevention and Control on Fruits and Vegetables in South China, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Guangxi Key Laboratory of Biology for Crop Diseases and Insect Pests, Plant Protection Research Institute, Guangxi Academy of Agricultural Sciences, Nanning, Guangxi, China

2 School of Marine Sciences and Biotechnology, Guangxi Minzu University, Nanning, Guangxi, China

Abstract: [Objective] To prepare the chlamydospore wettable powder with significant control efficacy against tomato bacterial wilt from *Cladophialophora guangxiense* HX2, a dark septate endophyte (DSE). [Methods] Single-factor experiments were carried out to screen the types and dosages of carriers, wetting agents, dispersants, and ultraviolet protectants for the wettable powder. Pot experiments were conducted to evaluate the effects of soaking tomato seeds with four concentrations (T1: 1×10^8 CFU/mL; T2: 1×10^7 CFU/mL; T3: 1×10^6 CFU/mL; T4: 1×10^5 CFU/mL) for 30 min on tomato plant growth, tomato bacterial wilt, and activities of five defense enzymes—peroxidase (POD), polyphenol oxidase (PPO), phenylalanine ammonialyase (PAL), catalase (CAT), and superoxide dismutase (SOD). [Results] The formulation was optimized as follows: 25% chlamydospore suspension, 8% dispersant polyethylene glycol (PEG8000) and wetting agent Tween-60 at a mass ratio of 1:3, 0.5%–1.5% UV protectant ascorbic acid (VC), and white carbon black as the carrier to make up the remaining proportion to 100%. The wettable powder prepared according to this formulation had the chlamydospore content of 2.35×10^8 CFU/g, the wetting time of 24.25 s, a suspension rate of 73.8%, pH 5.71, the moisture content of 16.67%, and the fineness of 98.81%. All indicators met the requirements of the national standard GB 20287—2006 *Microbial Inoculants in Agriculture*. The results of pot experiments indicated that the T2 treatment exhibited a significant plant growth-promoting effect, increasing the root length, plant height, stem diameter, fresh weight, and dry weight by 47.39%, 31.82%, 24.64%, 89.45%, and 90.97%, respectively, compared with the control group. On day 30 after pathogen inoculation, the control efficacy of this treatment against tomato bacterial wilt reached 50.9%, which was significantly

higher than that of the *Trichoderma harzianum* treatment. Moreover, the T2 treatment significantly enhanced the activities of the five defense enzymes. **[Conclusion]** The HX2 chlamydospore wettable powder prepared in this study has good control efficacy against tomato bacterial wilt. This study provides a technical basis for the large-scale popularization and application of this agent.

Keywords: chlamydospores; wettable powder; tomato bacterial wilt; defense enzyme activity

番茄作为我国乃至全球重要的经济作物,其产量与品质直接关系到农业生产安全和农民经济收益^[1]。然而,在集约化、规模化种植模式下,土传病害频发与蔓延已成为制约其优质高产的关键问题^[2]。其中,番茄青枯病在生产上危害严重,该病害由茄科罗尔斯通氏菌(*Ralstonia solanacearum*)引起,是一种典型的土传维管束病害,具有传播速度快、寄主范围广、防治难度大等特点,发病后番茄植株常快速萎蔫枯死,一般田块发病率可达 20%–30%,严重地块甚至绝收,给番茄产业造成惨重经济损失^[3-4]。由于化学防治效果不理想,加之抗病资源有限,环境友好的生物防治一直是研究热点。

目前,针对番茄青枯病的生防微生物多以芽孢杆菌(*Bacillus* spp.)等细菌为主^[5-8]。刘玉敏等^[6]分离得到的贝莱斯芽孢杆菌(*B. velezensis*) SB10 菌体重悬液和发酵液均对茄科罗尔斯通氏菌具有预防和治疗作用。Mekonnen 等^[7]发现芽孢杆菌(*Bacillus* sp.)分离株 BDUA1 在温室条件下可显著降低番茄细菌性萎蔫病发病率。慕雪男等^[8]从番茄根系中分离的暹罗芽孢杆菌(*B. siamensis*) A72 对番茄青枯病具有较好的防治效果,并对番茄植株具有较好的促生功能。然而,由于田间土壤环境复杂且青枯病菌生理小种高度分化,生防菌普遍存在定殖能力弱、防效不稳定的问题,亟待开发定殖能力强、防效稳定的新型生防微生物^[9]。

深色有隔内生真菌(dark septate endophytes, DSE)是一类广泛定殖于植物根系内部或表面、形成深色有隔菌丝和微菌核的内生真菌类群,可与多种植物形成共生关系^[10]。研究表明,DSE 可通过促进养分吸收、分泌生长调节物质、

诱导植物抗性及抑制病原菌生长等途径,增强植物对生物与非生物胁迫的耐受性,在作物病害生物防治中极具应用潜力^[11-12]。张晓容等^[13]发现,DSE 甘瓶霉(*Phialophora mustea*)接种可增强植物抗氧化酶活性,缓解由尖镰孢菌(*Fusarium oxysporum*)导致的脂膜过氧化胁迫,提高番茄抗性。胡佳铭等^[14]研究表明,DSE 瓜朱姆泛孢霉(*Pantospora guazumae*)菌株能抑制番茄灰霉病菌灰葡萄孢(*Botrytis cinerea*)菌丝生长,抑制率达 73.5%,且兼具促生作用。DSE 因可定殖在植物体内与宿主形成共生体,受外界环境影响相对较小,其对多种植物病害的生防效果已得到证实。课题组在前期 DSE 资源调查中发现,枝孢瓶霉属(*Cladophialophora*)是 DSE 类群中常见的优势属,该属在全球范围内各类生境的 DSE 群落中均占据优势地位,且相关菌株通过种子或种苗处理对青枯病表现出良好的防效^[15-16]。DSE 菌株枝孢瓶霉(*C. immunda*) LC3 菌液浸泡番茄种子和浸泡生姜种苗根部 30 min 对青枯病的盆栽防效分别达 63.2% 和 52.4%^[9];枝孢瓶霉属(*Cladophialophora*)合成菌群在生姜苗期施用 1 次,青枯病田间发病率和病情指数均显著低于市售木霉(*Trichoderma* spp.)、芽孢杆菌(*Bacillus* spp.)复合菌剂施用 5 次的处理,且显著提高了生姜产量^[17]。可见,DSE 的内生定殖特性和防效稳定性使其在作物青枯病防治上具有良好的应用前景。

研究发现,广西枝孢瓶霉(*C. guangxiense*) HX2 对番茄的侵染可调控水杨酸代谢、乙烯激活信号通路、光合作用及苯丙烷生物合成等途径,显著上调 *LAA4*、*ERF1* 和 *Hqt* 等抗病基因的表达,并显著抑制致病基因 *Hsc70* 的表达,对

番茄青枯病具有优良的防治效果^[18]。同时,该菌株能够形成抗逆性极强的厚垣孢子,在逆境中可长期存活,为其在田间环境中的定殖和病害防控提供了有利条件,具备开发为生防菌剂的优良特性。目前,该菌株已完成液体厚垣孢子培养条件的优化。为满足生产应用需求,本研究拟研制可湿性粉剂,相较于水剂,其具有体积小、质量轻、便于长途运输的优势,可满足不同生产场景的需求。本研究同时探究了其对于番茄青枯病防控的适宜施用条件,以期番茄青枯病的绿色防控提供新的技术手段和菌剂产品,减少化学农药的使用,促进农业生态环境的可持续发展。

1 材料与方法

1.1 材料

1.1.1 供试生物材料

广西枝孢瓶霉(*C. guangxiense*) HX2 菌株(专利保藏编号为 CGMCC41498)由广西农业科学院植物保护研究所植物病害生物防治团队分离保存。

番茄茄科罗尔斯通氏菌(*R. solanacearum*) Gg24 由广西大学农学院袁高庆教授团队惠赠。

供试番茄品种为‘艺丰一代’,购自南宁市艺丰农业科技有限公司。

1.1.2 培养基

PDA 培养基(g/L): 马铃薯 200.0, 葡萄糖 20.0, 琼脂 15.0。

糖蜜液体培养基(g/L): 糖蜜 84.0, 大豆粉 25.0, 玉米粉 26.0。

LA 培养基(g/L): 胰蛋白胨 10.0, 酵母提取物 5.0, NaCl 10.0, 琼脂 15.0。

LB 培养基(g/L): 胰蛋白胨 10.0, 酵母提取物 5.0, NaCl 10.0。

1.1.3 主要试剂和仪器

硅藻土(diatomite)、白炭黑(silica)、滑石粉(talc powder)、碳酸钙(calcium carbonate)、高岭

土(kaolin)、草木灰(plant ash)、木质素磺酸钠(sodium lignosulfonate, SLS)、六偏磷酸钠(sodium hexametaphosphate, SHP)、焦磷酸钠(sodium pyrophosphate, SPP)、聚乙二醇(polyethylene glycol, PEG8000)、吐温-60(Tween-60)、皂苷(saponin, SP)、十二烷基硫酸钠(sodium dodecyl sulfate, SDS)、三聚磷酸钠(sodium tripolyphosphate, STPP)、羧甲基纤维素钠(sodium carboxymethyl cellulose, CMC)、糊精(dextrin)、海藻酸钠(sodium alginate)、黄原胶(xanthan gum)、矿源黄腐植酸钠(mineral-sourced sodium fulvate)、抗坏血酸(ascorbic acid, VC),广西南宁壹棵松生物科技有限公司;哈茨木霉(2×10^8 CFU/g, 粉剂),堇沃园艺洛阳有限责任公司;过氧化物酶(peroxidase, POD)试剂盒、多酚氧化酶(polyphenol oxidase, PPO)试剂盒、苯丙氨酸解氨酶(phenylalanine ammonialyase, PAL)试剂盒、过氧化氢酶(catalase, CAT)试剂盒和超氧化物歧化酶(superoxide dismutase, SOD)试剂盒,苏州格锐思生物科技有限公司。

电热鼓风干燥箱,上海博迅医疗生物仪器股份有限公司医疗设备厂;洁净工作台,苏州安泰空气技术有限公司;霉菌培养箱,天津市泰斯特仪器有限公司;高温灭菌锅,致微(厦门)仪器有限公司;多功能微孔板检测仪,广西南宁市博美生物科技有限公司;制冰机,南京贝登医疗股份有限公司;台式微量高速冷冻离心机, Hettich 公司;紫外可见分光光度计,赛默飞世尔科技(中国)有限公司。

1.2 厚垣孢子浆的制备

将保存的 HX2 菌株接种于 PDA 培养基平板上,28 °C 培养活化 10 d 后,挑取菌落破碎稀释,孢子浓度调整为 1×10^5 个/mL,转接 3 mL 于 115 mL 糖蜜培养基中,置于恒温摇床中 28 °C、170 r/min 条件下培养 14 d,备用。将厚垣孢子发酵液通过 3 层无菌纱布过滤得到厚垣孢子浆,利用血球计数法计算厚垣孢子含量,备用。

1.3 载体的筛选

将质量分数为 25% 的厚垣孢子浆分别与下述质量分数为 75% 的载体材料混合均匀：硅藻土、白炭黑、滑石粉、碳酸钙、高岭土及草木灰。所有载体在使用前均经 121 °C 灭菌 30 min。将混合后的样品置于(40±1) °C 的烘箱中 6 h，以不添加载体的厚垣孢子浆作为对照。干燥后的混合物研磨成粉末(过 200 目筛)得到厚垣孢之母粉，随后进行厚垣孢子萌发率、悬浮率、润湿时间和吸附率的测定。

厚垣孢子萌发率测定方法：称取 1 g 母粉稀释 10 倍后，吸取 0.2 mL 涂布于 PDA 平板上，28 °C 下培养 30 h 后置于显微镜下，记录厚垣孢子萌发个数(萌发标准为芽管长度超过本身直径的一半)，每个处理设置 3 个重复，取其平均值作为结果分析，以每平板 100 个涂布个数为基数，萌发率以百分数表示。

悬浮率测定方法：参考 GB/T 14825—2006 进行测定^[19]。

润湿时间测定方法：参考 GB/T 5451—2001 进行测定^[19]。

吸附率测定方法：准确称取各载体 2 g，放入洁净的杯中，使用胶头滴管，将浓度为 1.0×10^8 CFU/mL 的 HX2 厚垣孢子液逐滴加入不同载体中，用玻璃棒搅拌至载体聚成一团，再称量吸附厚垣孢子液后的总质量，计算载体对 HX2 厚垣孢子液的吸附率，如公式(1)所示。

载体吸附率(g/g)=(吸附厚垣孢子液后载体的质量-吸附前载体的质量)/吸附前载体的质量 (1)

1.4 分散剂和润湿剂的筛选及用量优化

将分散剂(SLS、SHP、SPP、PEG8000、CMC)与润湿剂(吐温-60、SP、SDS、STPP)按 1% 的质量分数与母粉混合，以不添加任何助剂的母粉作为对照(CK)，根据 1.3 节方法进行厚垣孢子萌发率、润湿时间和悬浮率等各项性能指标的测定(下同)，初步筛选出最佳分散剂和润湿剂。

将初步筛选确定的最佳分散剂与最佳润湿剂，分别按质量比 5:1、4:1、3:1、2:1、1:1、1:2、1:3、1:4、1:5 的比例与母粉进行复配，每组设置 3 个平行重复。复配后烘干制成粉剂，通过测定上述已明确的各项性能指标，结合综合评价结果确定分散剂与润湿剂二者之间的最佳质量配比。基于上述试验确定的分散剂与润湿剂最佳质量比，固定二者配比不变，分别按母粉质量的 1%、2%、3%、4%、5%、6%、7%、8%、9% 和 10% 依次与母粉充分混合均匀，每组设置 3 个平行重复，烘干制成粉剂后测定其各项性能指标，最终确定复配助剂体系的最佳总用量。

1.5 紫外保护剂的选择及用量优化

分别选取糊精、海藻酸钠、黄原胶、矿源黄腐植酸钠和抗坏血酸(VC)作为菌剂的紫外保护剂，按 0.5%、1.0%、1.5% 和 2.0% 的比例与加入复配助剂后的母粉混合，称取 1 g 稀释 10 倍后，吸取 0.2 mL 涂布于 PDA 平板上，打开培养皿盖，与 CK (不添加紫外保护剂)一同置于无菌环境中的 20 W 紫外灯(光强 120 lx)下 30 cm 处，照射 3 min，记录厚垣孢子萌发率(方法同 1.3 节)。

1.6 HX2 厚垣孢子可湿性粉剂加工工艺

根据单因素试验结果，可湿性粉剂的最终配方为厚垣孢子浆 25%，分散剂 PEG8000 和润湿剂吐温-60 (质量比为 1:3)总用量 8%，紫外保护剂 VC 0.5%–1.5%，以白炭黑为载体配齐 100%。将按上述配方配制完成的可湿性粉剂置于(40±1) °C 的烘箱中恒温放置 6 h，随后研磨粉碎，过 200 目筛，即得到厚垣孢子可湿性粉剂最终产品。

1.7 HX2 厚垣孢子可湿性粉剂质量检测

含孢量、杂菌率、水分含量、细度及 pH 测定参照 GB 20287—2006 标准^[19]。润湿时间和悬浮率测定方法同 1.3 节。

1.8 HX2 厚垣孢子可湿性粉剂对番茄生长的影响

将番茄种子经 0.5% 次氯酸钠溶液表面消毒 15–20 min, 随后用无菌水冲洗 3–5 次, 以去除外源微生物。将消毒完成的种子置于无菌水中, 于 $(28 \pm 1)^\circ\text{C}$ 下催芽 72 h, 厚垣孢子可湿性粉剂设置 4 个处理组: T1、T2、T3 和 T4, 依次分别将上述制备的 HX2 厚垣孢子可湿性粉剂稀释成浓度为 1×10^8 、 1×10^7 、 1×10^6 、 1×10^5 CFU/mL 的悬浊液浸种 30 min; 对照组(CK)用清水浸种 30 min, 试验共设 5 个处理。经上述处理后的番茄种子播种于规格为 55 cm $\times$ 25 cm、含 50 个育苗孔的育苗盘中, 各孔内均装填等量灭菌育苗基质, 每孔播 1 粒种子, 每个重复 15 株苗, 每处理 3 个重复, 15 d 后测量其根长、株高、茎粗、鲜重、干重。

1.9 HX2 厚垣孢子可湿性粉剂对番茄青枯病的防治试验

分别设置 6 个处理组, T5: 用 2 g/L 的哈茨木霉稀释液在幼苗期(3–5 片真叶)时喷施第一次, 在接种病原后喷施第二次, 其余处理组设置同 1.8 节。

番茄青枯菌液制备: 将病原菌 Gg24 接种于 LA 培养基上活化, 2 d 后挑取单菌落接种至 LB 培养基, 于 30°C 、180 r/min 培养 2 d 后, 采用紫外可见分光光度计测量菌液浓度, 配成 $OD_{600}=1.0$ 的菌液备用, 利用直径为 0.4 mm 的大头针刺伤番茄根部后, 每株灌根接种 10 mL Gg24 菌液, 分别于 15 d 和 30 d 后调查发病情况。参照《农药田间药效试验准则第 32-部分: 杀菌剂防治番茄青枯病》NYT1464.32—2010^[9], 计算病情指数和防效, 如公式(2)、(3)所示。

病情指数 = $\frac{\sum (\text{各病级株数} \times \text{各级代表值})}{(\text{调查总株数} \times \text{最高级代表值})} \times 100$ (2)

防效 = $\frac{(\text{对照病情指数} - \text{处理病情指数})}{\text{对照病情指数}} \times 100\%$ (3)

分级标准为 0 级: 无病, 植株生长正常,

无任何萎蔫症状, 无可见病害表现; 1 级: 1–2 片叶萎蔫, 植株其余部分生长正常, 仅少数叶片出现萎蔫, 不影响整体生长; 2 级: 3–4 片叶萎蔫, 植株生长受到一定影响, 部分叶片萎蔫, 植株生长势减弱; 3 级: 全株大部分叶片萎蔫, 植株生长严重受阻, 无恢复能力重度发病, 多数叶片萎蔫, 植株基本失去正常生长能力; 4 级: 全株枯死, 植株完全死亡。

1.10 番茄植株防御酶活性测定

试验处理后, 分别于第 1、7、14 天采集番茄植株相同部位叶片样本, 选择最优 HX2 厚垣孢子可湿性粉剂处理组、CK 和 T5 测定其防御酶(POD、PPO、PAL、CAT、SOD)活性, 试验方法及原理详见试剂盒使用说明书。

1.11 数据分析

数据采用 Microsoft Excel 2021 和 DPS 7.05 软件进行统计分析。采用单因素方差分析中的 Duncan's 新复极差法进行差异显著性检验, 作图软件使用 Origin 2024。

2 结果与分析

2.1 载体筛选结果

如表 1 所示, 综合比较 HX2 厚垣孢子浆加入不同载体后的悬浮率、吸附率、润湿时间及对厚垣孢子萌发的影响, 最终选择白炭黑作为粉剂的最佳载体。以白炭黑为载体时, HX2 厚垣孢子可湿性粉剂的悬浮率(18.13%)、厚垣孢子萌发率(78.71%)和吸附率(2.52 g/g)均为最高, 润湿时间(24.97 s)在 6 种载体中处于中等水平。

2.2 分散剂和润湿剂的选择及配比优化结果

由表 2 可知, 最佳分散剂和润湿剂分别为 PEG8000 和吐温-60, 其悬浮率分别为 37.50% 和 21.05%, 润湿时间分别为 35.41 s 和 30.43 s, HX2 厚垣孢子可湿性粉剂的厚垣孢子萌发率分别为 71.60% 和 71.52%。进一步将 PEG8000、吐温-60 与母粉按一定比例混合, 结果表明, 当

PEG8000 与吐温-60 的质量比在 2:1 至 1:3 区间内时润湿时间较短, 润湿性能较好; 当比例过高(1:4、1:5)或过低(5:1)时, 润湿时间显著增加, 润湿性能下降。悬浮率随吐温-60 比例升高逐渐提升, 厚垣孢子萌发率则在 1:3 时达到峰值(74.67%), 过高或过低的比例均导致萌发率下降, 说明该比例更有利于厚垣孢子维持活性。因此, 综合上述性能评价选用 1:3 的质量比进行用量优化。当助剂总用量为 8% 时, 润湿时间最短(11.07 s)、悬浮率最高(63.33%), 且厚垣孢子萌发率(81.49%)效果最优, 因此选用此条件进行后续筛选(图 1)。

2.3 紫外保护剂的筛选

由表 3 可知, 紫外照射条件下, 不同紫外

保护剂对 HX2 厚垣孢子可湿性粉剂中厚垣孢子萌发的影响存在差异。以抗坏血酸(VC)作为保护剂时, 添加浓度为 0.5%–1.5% 条件下, 厚垣孢子萌发率高于其他保护剂处理, 且萌发效果更稳定、更具经济价值, 与对照 CK (56.91%)差异显著, 表明 VC 对厚垣孢子萌发具有良好的紫外保护效果。

2.4 HX2 厚垣孢子可湿性粉剂质量检测结果

如表 4 所示, HX2 厚垣孢子可湿性粉剂厚垣孢子含量为 2.35×10^8 CFU/g, 不含杂菌, 悬浮率为 73.8%, 润湿时间为 24.25 s, pH 为 5.71, 细度为 98.81%, 含水量 16.67%, 各项指标均符合《农用微生物菌剂》国家标准(GB 20287—2006)。

表1 不同载体对HX2厚垣孢子可湿性粉剂的影响

Table 1 Effects of different carriers on the wettable powder of HX2 chlamydospores

Type of carriers	Wetting time/s	Suspension rate/%	Chlamydospore germination rate/%	Adsorption capacity/(g/g)
Diatomite	6.31±0.44e	1.52±0.29b	70.33±1.72bc	1.33±0.09b
Silica	24.97±1.16c	18.13±0.72a	78.71±2.47a	2.52±0.10a
Talc powder	67.13±2.58a	2.45±0.25b	73.27±2.48ab	0.73±0.01d
Calcium carbonate	44.86±2.32b	4.69±0.42b	65.93±2.05cd	0.60±0.09d
Kaolin	3.37±0.10e	4.74±0.96b	59.62±2.73d	1.04±0.16c
Plant ash	12.06±1.28d	3.49±0.29b	61.48±2.79d	1.02±0.07c
CK	–	–	78.56±2.48a	–

Different lowercase letters indicate significant difference ($P<0.05$) according to Duncan's multiple range test. The same below.

表2 HX2厚垣孢子可湿性粉剂润湿剂和分散剂的筛选

Table 2 Screening of wetting agents and dispersants for HX2 chlamydospore wettable powder

Type	Wetting agents and dispersants for	Wetting time/s	Suspension rate/%	Chlamydospore germination rate/%
Wetting agent	Tween-60	30.43±0.33f	21.05±1.22c	71.52±2.54a
Dispersant	PEG8000	35.41±0.89e	37.50±1.56ab	71.60±1.07a
Dispersant	SLS	47.72±0.82a	37.77±0.77ab	22.93±4.61e
Dispersant	SHP	44.54±0.25b	38.18±0.29a	60.66±2.48b
Wetting agent	SP	48.86±0.06a	35.92±0.41ab	35.63±0.44d
Dispersant	SPP	43.53±0.28b	36.46±1.08ab	47.61±2.64d
Wetting agent	SDS	37.89±0.14d	35.01±1.09b	49.88±1.59d
Wetting agent	STPP	42.52±0.86bc	37.12±0.89ab	18.16±2.07e
Dispersant	CMC	40.22±0.44c	36.41±0.86ab	59.68±2.77bc
	CK	28.91±1.40f	23.85±0.57c	78.56±2.90a

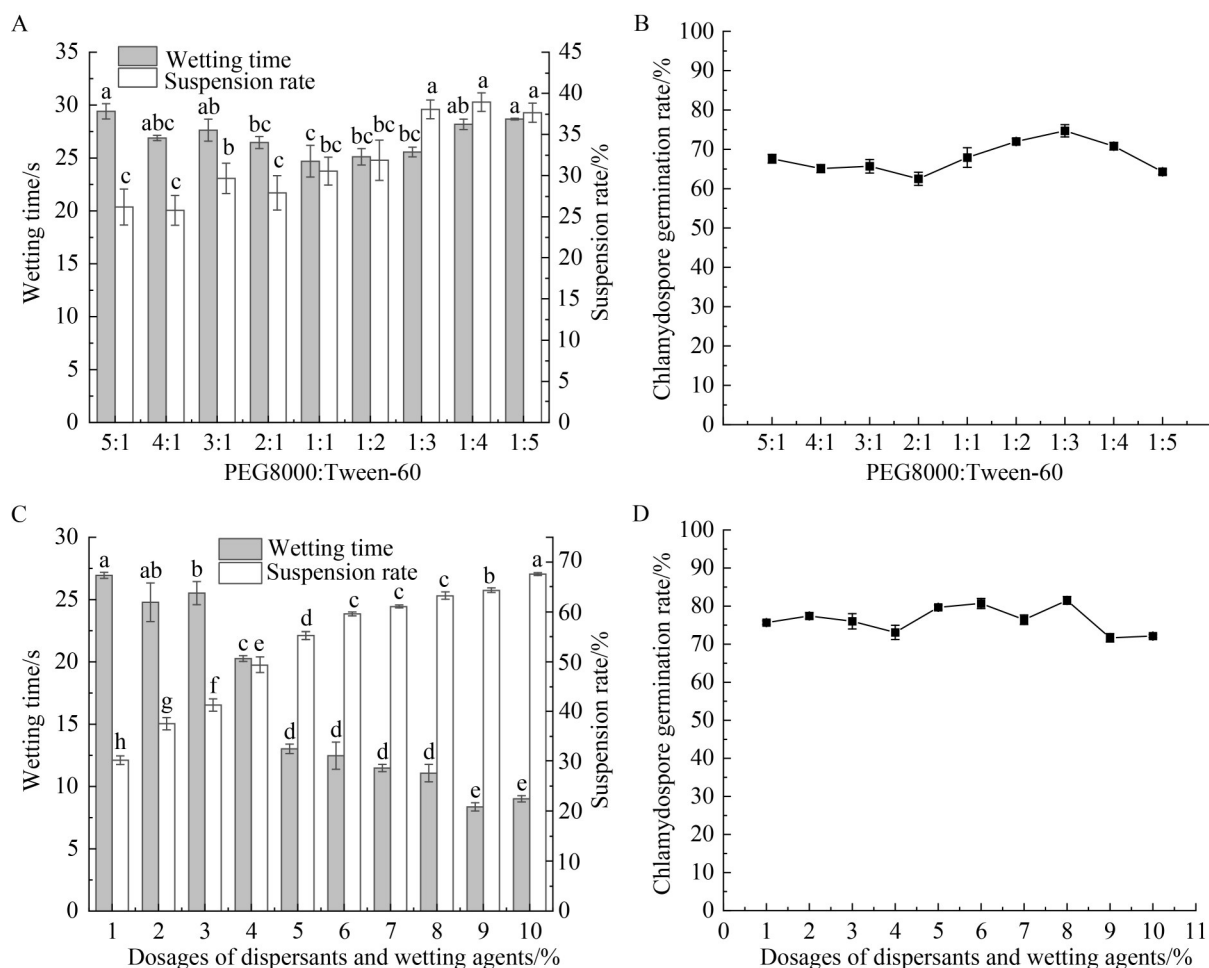


图1 HX2厚垣孢子可湿性粉剂分散剂和润湿剂的配比及用量优化

Figure 1 Optimization of ratio and dosage of dispersants and wetting agents for HX2 chlamydospore wettable powder. A, B: Determination of wetting time, suspension rate and chlamydospore germination rate for ratio optimization of dispersants and wetting agents; C, D: Determination of wetting time, suspension rate and chlamydospore germination rate for dosage optimization of dispersants and wetting agents.

2.5 HX2 厚垣孢子可湿性粉剂对番茄生长的影响

种植 15 d 后对番茄植株各项生长指标进行统计分析, 结果表明不同浓度 HX2 厚垣孢子可湿性粉剂处理对番茄植株皆有不同程度的促进作用。由表 5 可知, T2 (1×10^7 CFU/mL) 的促生效果最为显著, 番茄根长、株高、茎粗、鲜重、干重分别较 CK 增加了 47.39%、31.82%、24.64%、89.45%、90.97%, 且与对照差异显著(图 2)。

2.6 HX2 厚垣孢子可湿性粉剂对番茄青枯病防治试验结果

由图 3 可知, 接种病原 15 d 和 30 d 时, 不同浓度 HX2 厚垣孢子可湿性粉剂处理的病情指数均低于 CK。其中 T2 处理的病情指数分别为 0.49 和 0.16, 防效分别为 28.67% 和 50.90%, 在接种病原 15 d 时, T2 防效略低于 T4 (43.31%) 和 T5 (38.85%); 但接种病原 30 d 后防治效果明显提升, 呈随时间递增的趋势(图 4)。

表3 HX2厚垣孢子可湿性粉剂紫外保护剂筛选

Table 3 Screening of UV protectants for HX2 chlamydospore wettable powder

UV protectant	Concentration/%	Chlamydospore germination rate/%
Dextrin	0.5	72.23±2.64abc
	1.0	67.43±1.17def
	1.5	72.90±1.93ab
	2.0	64.93±2.26ef
Sodium alginate	0.5	66.45±0.56ef
	1.0	72.32±1.00abc
	1.5	71.41±0.75abcd
	2.0	73.28±1.63ab
Xanthan gum	0.5	67.70±1.78def
	1.0	68.93±2.59bcde
	1.5	64.39±1.76f
	2.0	65.94±1.91ef
Mineral-sourced sodium fulvate	0.5	64.59±0.92ef
	1.0	72.74±0.49ab
	1.5	72.79±0.91ab
	2.0	68.20±1.23cdef
Ascorbic acid	0.5	74.43±2.55a
	1.0	75.74±1.95a
	1.5	75.10±0.82a
	2.0	72.99±0.12ab
CK	—	56.91±0.43g

表4 HX2厚垣孢子可湿性粉剂质量指标检测

Table 4 Determination of quality indicators for HX2 chlamydospore wettable powder

Index	National standard	Measuring value
Viable spore count/(CFU/g)	≥2×10 ⁸	2.35×10 ⁸
Contaminating microorganism rate/%	≤20%	0
Suspension rate/%	≥70	73.80±1.24
Wetting time/s	≤180	24.25±1.23
pH range	5.5–8.5	5.71±0.07
Fineness/%	≥80	98.81±0.07
Water content/%	≤35	16.67±0.44

2.7 番茄植株防御酶活性测定

为明确 HX2 厚垣孢子是否能激活番茄植株的防御系统，测定了 5 种防御酶(PAL、PPO、POD、CAT 和 SOD)在接种病原后第 1、7、

14 天的活性。由图 5 可知，与 CK 相比，T2 处理防御酶活性显著升高，且第 7 天时的 5 种酶活性均高于 T5 (哈茨木霉)。其中 PPO、POD 和 CAT 活性在第 7 天达到峰值，较 CK 分别提高了 1.69 倍、3.39 倍和 0.25 倍；PAL 和 SOD 活性在第 14 天达到最高，分别提高了 0.44 倍和 1.17 倍。上述结果表明，HX2 厚垣孢子可显著提高番茄植株防御酶活性，从而增强其对 *R. solanacearum* 的抗性。

3 讨论与结论

微生物可湿性粉剂的理化性质直接决定其田间应用效果，载体、分散剂、润湿剂及紫外保护剂的筛选是配方优化的核心环节^[20]。本研究通过综合评价吸附率、悬浮率、润湿时间及

表5 不同处理对番茄的促生作用

Table 5 Growth-promoting effects of different treatments on tomato plants

Treatment	Root length/cm	Plant height/cm	Stem diameter/cm	Fresh weight/g	Dry weight/g
CK	8.82±1.39d	11.88±0.39c	2.11±0.11b	11.28±0.25c	1.44±0.10c
T1 1×10 ⁸ CFU/mL	12.01±0.86b	16.57±0.51a	2.37±0.15ab	18.34±1.45b	1.97±0.38b
T2 1×10 ⁷ CFU/mL	13.20±1.07a	15.66±0.55b	2.63±0.03a	21.37±1.24a	2.75±0.20a
T3 1×10 ⁶ CFU/mL	13.30±1.36a	15.68±0.98b	2.58±0.05a	18.83±0.64b	2.71±0.32a
T4 1×10 ⁵ CFU/mL	10.91±0.37c	11.17±0.75c	2.16±0.10b	9.73±0.99d	1.49±0.25c



图2 不同处理番茄15 d后生长状态
Figure 2 Growth status of tomato plants under different treatments after 15 days.

厚垣孢子萌发率等指标，筛选出白炭黑作为最优载体，PEG8000 与吐温-60 作为最佳分散剂和润湿剂，按 1:3 比例混合、总添加量 8% 时各项指标最优，此时悬浮率提升至 63.33%，润湿时间缩短至 11.07 s，厚垣孢子萌发率达 81.49%。这与白炭黑的多孔结构特性密切相关，其高比表面积不仅能为厚垣孢子提供稳定的附着位点、减少孢子损伤，还能提升制剂的分散性能^[21]。分散剂 PEG8000 与润湿剂吐温-60 的协同作用可有效防止孢子团聚，快速降低制剂表面张力，提升其润湿铺展能力，显著优化了制剂的理化特性^[22-23]。此外，紫外保护剂筛选结果表明，

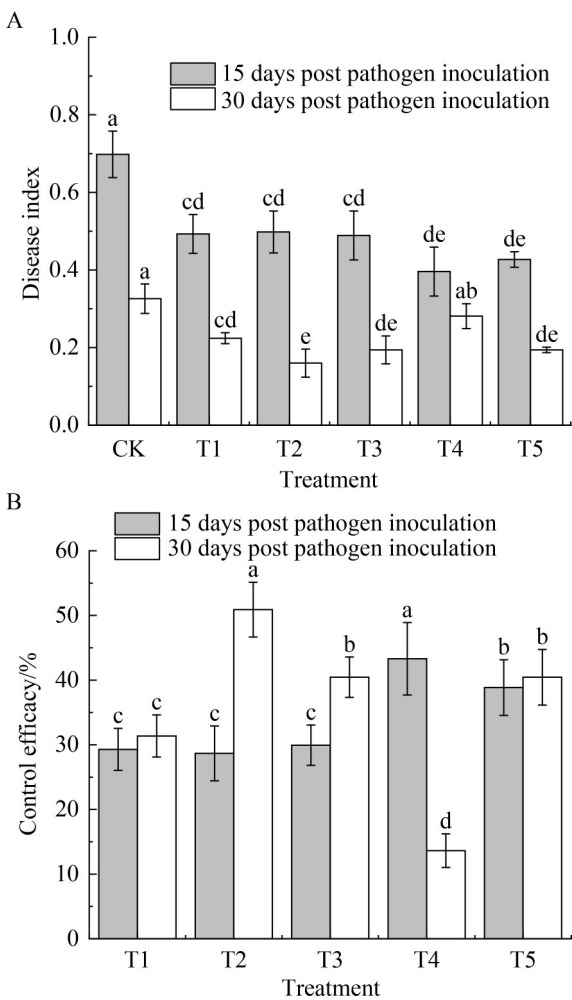


图3 不同处理对番茄青枯病的防治效果
Figure 3 Control effects of different treatments on tomato bacterial wilt. A: Disease index; B: Control efficacy.

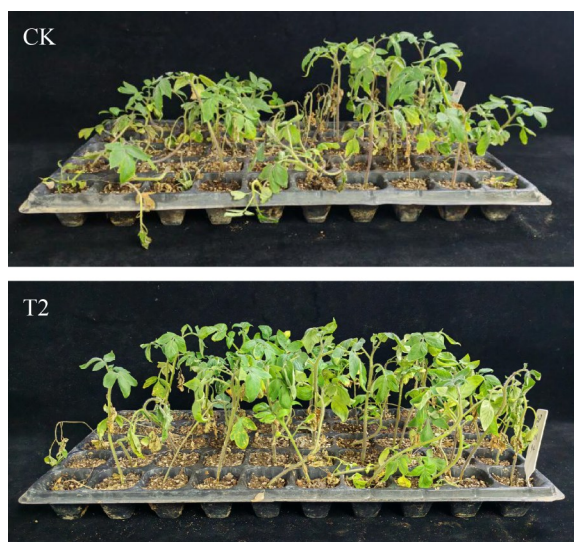


图4 番茄接种病原30 d后的生长状态

Figure 4 Growth status of tomatoes 30 days after pathogen inoculation.

0.5%–1.5% 抗坏血酸(VC)可使厚垣孢子萌发率维持在 70% 以上, 显著高于对照(56.91%)。这

是因为 VC 具有较强的抗氧化性, 能有效清除紫外照射产生的活性氧, 减少孢子 DNA 损伤, 为制剂在田间紫外环境下的稳定性提供保障^[24]。王喜刚等^[25]报道, 以 20% 厚垣孢子粉、68% 凹凸棒土为载体、4% 十二烷基硫酸钠为润湿剂、7% 羧甲基纤维素钠为分散剂、1% 抗坏血酸为紫外保护剂时, 哈茨木霉(*T. harzianum*) M-17 的各项指标最优, 厚垣孢子含量为 3.1×10^8 CFU/g, 润湿时间为 56.5 s, 悬浮率为 82.27%。张晶晶等^[26]以硅藻土为载体, 加入 25% 厚垣孢子粉、4% 十二烷基硫酸钠为润湿剂、5% CMC 为分散剂、1% 糊精为紫外保护剂, 配齐 100% 时, 木霉(*Trichoderma*)厚垣孢子可湿性粉剂的活孢子数为 2.5×10^9 CFU/g, 润湿时间为 58 s, 悬浮率为 78%。本研究以厚垣孢子浆 25%、分散剂 PEG8000 和润湿剂吐温-60 (质量比为 1:3)总用量 8%、紫外保护剂 VC 0.5%–1.5%, 并以白炭黑为

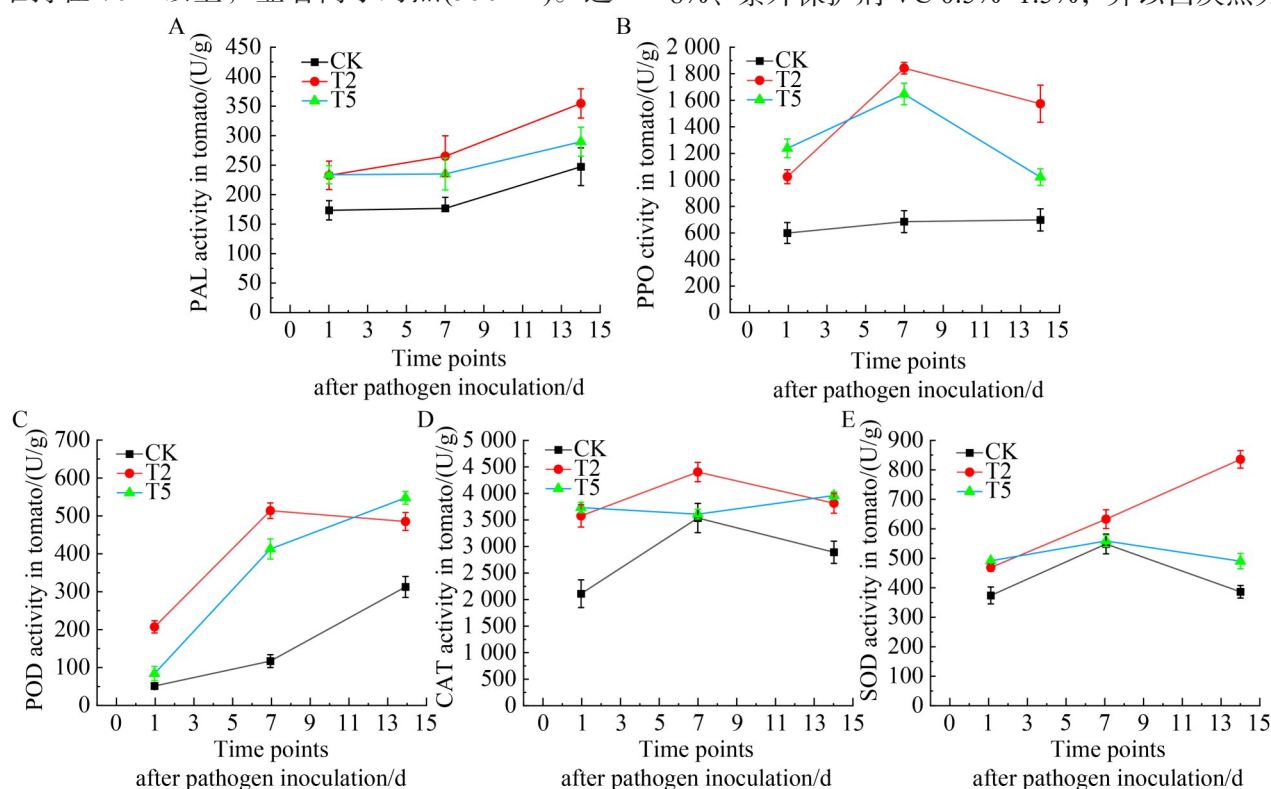


图5 番茄植株接种病原后不同时间段5种防御酶的变化

Figure 5 Changes in five defense enzymes of tomato plants at different time periods after pathogen inoculation.

A: Phenylalanine ammonialyase; B: Polyphenol oxidase; C: Peroxidase; D: Catalase; E: SOD.

载体配齐 100% 所制备的 HX2 厚垣孢子可湿性粉剂, 活孢子含量达 2.35×10^8 CFU/g, 悬浮率为 73.8%, 润湿时间为 24.25 s。与上述两者相比, 本研究制备的可湿性粉剂悬浮率和活孢子含量略低, 但润湿时间明显缩短, 可显著提升其润湿铺展能力。这可能与真菌种类不同、所用助剂差异有关。

本研究将 DSE 广西枝孢瓶霉 HX2 厚垣孢子制备为可湿性粉剂。研究表明, 该可湿性粉剂在 T2 (1×10^7 CFU/mL) 处理下能显著促进番茄生长, 其根长、株高、茎粗、鲜重、干重分别较 CK 增加了 47.39%、31.82%、24.64%、89.45%、90.97%。在番茄青枯病防治方面, T2 处理接种病原 15 d 和 30 d 后防效分别为 28.67% 和 50.90%, 显著优于低浓度处理 T4 (1×10^5 CFU/mL), 且后期防效接近甚至优于 T5 (哈茨木霉处理)。T2 处理防效随时间递增, 可能与厚垣孢子在番茄根际的定殖能力相关。HX2 厚垣孢子抗逆性强, 可在根系中长期存活并逐渐定殖, 随着定殖量增加, 其生防作用持续增强。前期研究显示将 HX2 孢子悬浮液 (1×10^6 CFU/mL) 与 *R. solanacearum* 同时接种可降低病情指数, 防效达 76.7%, 且该处理能促进番茄生长^[18]。这一结果与本研究一致, 但防效存在差异, 可能是由于病原菌与 HX2 菌株的接种方式和浓度不同所致, 总体而言, 二者均表现出显著防效, 而本研究构建的接种技术更贴合农业生产实际, 在操作可行性、田间适配性及规模化应用潜力方面具有明显优势。番茄青枯病由 *R. solanacearum* 侵入维管束引起, 需要较高浓度的生防菌形成优势菌群, 抑制病原菌侵染^[6]。赵琳琳等^[27]发现, 链霉菌 (*Streptomyces* sp.) TOR3209 以 1×10^7 CFU/mL 浓度接种对番茄枯萎病防治效果最佳。Bing 等^[28]研究表明, 贝莱斯芽孢杆菌 (*B. velezensis*) NEAU-CP5 以 10^8 CFU/mL 浓度处理番茄植株可显著降低番茄青枯病发病率。以上研究均表明 HX2 菌株具有同等优异的生防潜力。

内生真菌的生防机制主要包括直接抑制病

原菌生长和诱导植物系统抗性(induced systemic resistance, ISR)两大途径^[29]。本研究通过测定植株防御酶活性发现, HX2 可湿性粉剂处理能显著激活番茄的抗氧化防御系统, 这是其发挥生防作用的关键机制之一。防御酶系统中, POD 和 PPO 参与酚类物质氧化和细胞壁木质化, 增强植株机械屏障^[30]; PAL 是植保素合成的关键酶, 可提升植株抗菌和抗病毒能力^[31]; SOD 和 CAT 则通过清除活性氧, 减轻病原菌侵染导致的氧化损伤^[32]。番茄植株经 T2 处理后, PPO、POD 和 CAT 活性在接种病原菌第 7 天达峰值, PAL 和 SOD 活性在第 14 天达最高, 与 CK 相比分别提高了 1.69 倍、3.39 倍、0.25 倍、0.44 倍和 1.17 倍。Kaari 等^[33]发现链霉菌(*Streptomyces* sp.) UP1A-1 处理的番茄植株在接种病原菌 1–9 d 时 POD、PPO 和 PAL 积累量最高, 前 2 种酶的变化趋势与本研究一致, 而 PAL 的峰值有所提前。Luo 等^[34]研究表明, 链霉菌(*Streptomyces* sp.) NEAU-174 菌株能显著降低番茄青枯病发病率, 增强番茄植株中 CAT、POD 和 SOD 等防御酶活性, 并降低丙二醛含量。以上研究均说明番茄植株防御酶活性变化与其对 *R. solanacearum* 的抗性密切相关。

综上所述, 本研究将广西枝孢瓶霉 HX2 菌株厚垣孢子制备为可湿性粉剂, 可促进番茄植株生长, 并对番茄青枯病具有显著的防治效果, 为该菌株的开发利用与规模化应用提供了科学依据。

作者贡献声明

王兴浩: 实验设计、数据分析、初稿撰写、论文修改; 曾凤花: 数据收集; 龙艳艳: 监督管理; 刘红全: 实验指导; 于延鑫: 数据整理; 喻吉会: 图表可视化; 谢玲: 实验指导、资源提供、论文修改; 张艳: 项目管理、审阅、论文修改。

作者利益冲突公开声明

作者声明不存在任何可能会影响本文所报告工作的已知经济利益或个人关系。

参考文献

- [1] 韦志勇. 南方双季优质稻-秋冬番茄绿色高效栽培技术[J]. 农业科技通讯, 2024(1): 116-119.
Wei ZY. Green and efficient cultivation technology of double-season high-quality rice in Southern China followed by autumn-winter tomatoes[J]. Bulletin of Agricultural Science and Technology, 2024(1): 116-119 (in Chinese).
- [2] 李阳奇, 李艳, 王旭浩, 王梦扬, 赵红星. 茄果类蔬菜连作障碍成因与防治措施研究进展[J]. 农业科技通讯, 2025(1): 191-194.
Li YQ, Li Y, Wang XH, Wang MY, Zhao HX. Research progress on causes and control measures of continuous cropping obstacles in solanaceous fruit vegetables[J]. Bulletin of Agricultural Science and Technology, 2025(1): 191-194 (in Chinese).
- [3] 吴思炫, 高复云, 张锐澎, 苏浩, 姚槐应, 范雪莲, 李雅颖. 番茄青枯病生物防治的研究进展[J]. 应用生态学报, 2023, 34(9): 2585-2592.
Wu SX, Gao FY, Zhang RP, Su H, Yao HY, Fan XL, Li YY. Research progress in biological control of tomato bacterial wilt[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2023, 34(9): 2585-2592 (in Chinese).
- [4] 徐明飞, 陈丽萍, 高安忠, 陈健锋, 周倩倩. 高山番茄青枯病防控技术研究进展[J]. 浙江农业科学, 2025, 66(11): 2712-2718.
Xu MF, Chen LP, Gao AZ, Chen JF, Zhou QQ. Current status, prevention and control technology prospects of bacterial wilt disease of alpine tomato[J]. Journal of Zhejiang Agricultural Sciences, 2025, 66(11): 2712-2718 (in Chinese).
- [5] Elsharkawy MM, Kamel SM, Fathallah G, Khedr AA. Efficacy of *Bacillus* spp. and *Trichoderma asperellum* for biological control of bacterial wilt disease in tomato: *in vitro* and *in vivo* evaluations[J]. Egyptian Journal of Biological Pest Control, 2025, 35: 39.
- [6] 刘玉敏, 谢小林, 陈猛, 周莲, 李成江, 王勇, 李燕旋, 朱红惠. 贝莱斯芽孢杆菌SB10的筛选、鉴定及其在番茄青枯病防治中的应用[J]. 江苏农业科学, 2024, 52(19): 134-143.
Liu YM, Xie XL, Chen M, Zhou L, Li CJ, Wang Y, Li YX, Zhu HH. Screening and identification of *Bacillus velezensis* SB10 and its application in tomato *Ralstonia solanacearum* biocontrol[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2024, 52(19): 134-143 (in Chinese).
- [7] Mekonnen H, Kibret M, Assefa F. Plant growth promoting rhizobacteria for biocontrol of tomato bacterial wilt caused by *Ralstonia solanacearum*[J]. International Journal of Agronomy, 2022, 2022: 1489637.
- [8] 慕雪男, 吴桐, 郑子薇, 张越, 王志刚, 徐伟慧. 一株番茄青枯病生防细菌的筛选、鉴定及其生防潜力分析[J]. 生物技术通报, 2025, 41(1): 276-286.
Mu XN, Wu T, Zheng ZW, Zhang Y, Wang ZG, Xu WH. Screening, identification and biocontrol potential analysis of an antagonistic strain against *Ralstonia solanacearum*[J]. Biotechnology Bulletin, 2025, 41(1): 276-286 (in Chinese).
- [9] 龙艳艳, 曾凤花, 赵惠莉, 陈艳露, 农倩, 张艳, 陈路通, 谢玲, 周生茂. 青枯病生防深色有隔内生真菌的筛选鉴定及其防治效果[J]. 南方农业学报, 2025, 56(11): 3432-3441.
Long YY, Zeng FH, Zhao HL, Chen YL, Nong Q, Zhang Y, Chen LT, Xie L, Zhou SM. Screening and identification of dark septate endophytic fungi for bacterial wilt control and its control effects[J]. Journal of Southern Agriculture, 2025, 56(11): 3432-3441 (in Chinese).
- [10] Addy HD, Piercey MM, Currah RS. Microfungal endophytes in roots[J]. Canadian Journal of Botany, 2005, 83(1): 1-13.
- [11] Nong Q, Zhang Y, Long YY, Chen YL, Qin LP, Lin SY, Zeng FH, Xie L. *Acidomelania saccharicola* sp. nov., a new species of dark septate endophytes in *Helotiales*, with potential of controlling *Fusarium* wilt of banana[J]. Biological Control, 2025, 206: 105781.
- [12] Oliveira DAJ, Pereira LO. Opening the black box of an underexplored and megadiverse group: history, taxonomy and functionality of dark septate endophytes (DSE)[J]. Fungal Biology Reviews, 2025, 54: 100457.
- [13] 张晓蓉, 李涛, 王超君, 朱玲玲, 徐露娟, 赵之伟. 深色有隔内生真菌甘瓶霉对番茄抗枯萎病的作用[J]. 中国生物防治学报, 2017, 33(3): 394-400.
Zhang XR, Li T, Wang CJ, Zhu LL, Xu LJ, Zhao ZW. Enhanced tolerance of tomatoes against *Fusarium oxysporum* by inoculation with dark septate endophyte[J]. Chinese Journal of Biological Control, 2017, 33(3): 394-400 (in Chinese).
- [14] 胡佳铭, 冯晓晓, 叶清玲, 金颖, 李泰莹, 吴慧明. 深色有隔内生真菌对番茄的促生及抗灰霉病效应[J]. 福建农业学报, 2025, 40(8): 822-829.
Hu JM, Feng XX, Ye QL, Jin Y, Li TY, Wu HM. Symbiotic effects of dark septate endophytes on growth and resistance to gray mold of tomato plants[J]. Fujian Journal of Agricultural Sciences, 2025, 40(8): 822-829 (in Chinese).
- [15] 谢玲. 广西两种生境深色有隔内生真菌多样性与生态功能研究[D]. 南宁: 广西大学, 2018.
Xie L. The species diversity and ecological function of dark septate endophytes in two ecosystems of Guangxi[D]. Nanning: Guangxi University, 2018 (in Chinese).
- [16] Netherway T, Bengtsson J, Buegger F, Fritscher J, Oja J, Pritsch K, Hildebrand F, Krab EJ, Bahram M. Pervasive associations between dark septate endophytic fungi with tree root and soil microbiomes across Europe[J]. Nature Communications, 2024, 15: 159.
- [17] 曾凤花, 谢玲, 黄皓, 周玉娇, 文俊丽, 赵惠莉, 龙艳艳, 周生茂. 枝孢瓶霉属合成菌群对生姜青枯病的生物防治[J]. 南方农业学报, 2025, 56(2): 643-654.
Zeng FH, Xie L, Huang H, Zhou YJ, Wen JL, Zhao HL, Long YY, Zhou SM. Biocontrol effects of *Cladophialophora* spp. synthetic fungus resistant to ginger bacterial wilt[J]. Journal of Southern Agriculture, 2025, 56(2): 643-654 (in Chinese).
- [18] Wei XH, Long YY, Chen YL, Mataka SN, Jiang X, Zhou Y, Sun ZX, Xie L. *Cladophialophora guangxiense* sp. nov., a new species of dark septate endophyte, mitigates tomato bacterial wilt and growth promotion activities[J].

- Agronomy, 2024, 14(12): 2771.
- [19] 杨文娟, 余君, 杨春雷, 李浩, 杨锦鹏, 杨小琼, 杨勇, 向海波. 烟草化感自毒物质降解复合菌剂的优化及应用效果评价[J]. 微生物学报, 2024, 64(4): 1044-1063.
Yang WJ, Yu J, Yang CL, Li H, Yang JP, Yang XQ, Yang Y, Xiang HB. Optimization and evaluation of a compound bacterial agent degrading autotoxins of tobacco[J]. Acta Microbiologica Sinica, 2024, 64(4): 1044-1063 (in Chinese).
- [20] 刘振华, 罗远婵, 张道敬, 李元广. 农用微生物杀菌剂剂型研究进展[J]. 农药学报, 2014, 16(5): 497-507.
Liu ZH, Luo YC, Zhang DJ, Li YG. Research progress and prospects of microbial pesticide formulation for plant disease control[J]. Chinese Journal of Pesticide Science, 2014, 16(5): 497-507 (in Chinese).
- [21] 张腾, 盛静, 李红玉, 司马依江·马木提, 任天瑞. 农药水分散颗粒剂中常见填料的性能分析[J]. 农药科学与管理, 2015, 36(7): 35-41, 51.
Zhang T, Sheng J, Li YH, Simayil MMT, Ren TR. Performance analysis of common pesticide fillers in water dispersible granule[J]. Pesticide Science and Administration, 2015, 36(7): 35-41, 51 (in Chinese).
- [22] 郭伊萍, 王静文, 张亚轩, 刘铜. 短梗木霉与芽孢杆菌固体共培养物 WP 剂型研制[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2025, 47(5): 90-102.
Wu YP, Wang JW, Zhang YX, Liu T. Preparation of wettable powder for solid co-culture of *Trichoderma breve* LN006 and *Bacillus velezensis* ZJ[J]. Journal of Southwest University (Natural Science Edition), 2025, 47(5): 90-102 (in Chinese).
- [23] 解维星, 谢勇, 郭庆龙. 35% 氰霜唑·啞啉铜悬浮剂的配方研制[J]. 农药, 2021, 60(6): 408-411.
Xie WX, Xie Y, Guo QL. Formulation screening of Cyazofamid·Oxine-coppe 35% SC[J]. Agrochemicals, 2021, 60(6): 408-411 (in Chinese).
- [24] 张志清, 向建军, 周利茗, 蒲彪. 麦苗中阿魏酸、抗坏血酸(VC)、总黄酮协同抗氧化能力分析[J]. 中国粮油学报, 2013, 28(7): 5-11, 18.
Zhang ZQ, Xiang JJ, Zhou LM, Pu B. Synergistic antioxidant activity of ferulic acid, ascorbic acid (vitamin C) and flavonoids in wheat seeding[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2013, 28(7): 5-11, 18 (in Chinese).
- [25] 王喜刚, 郭成瑾, 焦杨, 赵沛, 田静, 张丽荣, 沈瑞清. 哈茨木霉 M-17 厚垣孢子可湿性粉剂的研制及其对马铃薯干腐病的田间防效[J]. 中国生物防治学报, 2024, 40(6): 1319-1330.
Wang XG, Guo CJ, Jiao Y, Zhao P, Tian J, Zhang LR, Shen RQ. Preparation of wettable powder formulation of *Trichoderma harzianum* M-17 chlamydospores and its field control effect on potato dry rot[J]. Chinese Journal of Biological Control, 2024, 40(6): 1319-1330 (in Chinese).
- [26] 张晶晶, 黄亚丽, 马宏, 贾振华, 刘昆昂, 史延茂. 木霉厚垣孢子可湿性粉剂的研制[J]. 植物保护, 2016, 42(5): 103-109.
Zhang JJ, Huang YL, Ma H, Jia ZH, Liu KA, Shi YM, Shi YM. Preparation of wettable powder formulation of *Trichoderma chlamydospores*[J]. Plant Protection, 2016, 42(5): 103-109 (in Chinese).
- [27] 赵琳琳, 张秀敏, 贺羽茜, 马佳, 张梦一, 王旭, 贾楠, 彭杰丽, 胡栋. 链霉菌 TOR3209 及其挥发性有机化合物对番茄枯萎病的生防作用和效果[J]. 微生物学报, 2026, 66(1): 231-245.
Zhao LL, Zhang XM, He YX, Ma J, Zhang MY, Wang X, Jia N, Peng JL, Hu D. Biocontrol evaluation of *Streptomyces* TOR3209 and its volatile organic compounds against tomato *Fusarium* wilt[J]. Acta Microbiologica Sinica, 2026, 66(1): 231-245 (in Chinese).
- [28] Bing H, Qi CP, Gu JZ, Zhao TX, Yu XY, Cai Y, Zhang YC, Li AL, Wang XJ, Zhao JW, Xiang WS. Isolation and identification of NEAU-CP5: a seed-endophytic strain of *B. velezensis* that controls tomato bacterial wilt[J]. Microbial Pathogenesis, 2024, 192: 106707.
- [29] 杨玉锋, 李保利. 植物内生真菌在植物病害生物防治中的作用[J]. 河南农业科学, 2011, 40(3): 25-28.
Yang YF, Li BL. The roles of endophytic fungi in biological control of plant diseases[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2011, 40(3): 25-28 (in Chinese).
- [30] Li GL, Meng FB, Wei XP, Lin M. Postharvest dipping treatment with BABA induced resistance against rot caused by *Gilbertella persicaria* in red pitaya fruit[J]. Scientia Horticulturae, 2019, 257: 108713.
- [31] Yuan YD, Li CT, Yang LP, Zhao YX, Xu C, Tao J. Harnessing rhizosphere bacteria for fungal disease management in *Paeonia lactiflora*[J]. Pesticide Biochemistry and Physiology, 2026, 217: 106885.
- [32] Nakata M, Shiono T, Watanabe Y, Satoh T. Salt stress-induced dissociation from cells of a germin-like protein with Mn-SOD activity and an increase in its mRNA in a moss, *Barbula unguiculata*[J]. Plant and Cell Physiology, 2002, 43(12): 1568-1574.
- [33] Kaari M, Joseph J, Manikkam R, Sreenivasan A, Venugopal G, Alexander B, Krishnan S. Anti-biofilm activity and biocontrol potential of *Streptomyces* cultures against *Ralstonia solanacearum* on tomato plants[J]. Indian Journal of Microbiology, 2022, 62(1): 32-39.
- [34] Luo YF, Li JX, Kong XY, Yao JW, Sun YN, Xiang WS, Wang XJ, Zhao JW. Identification and characterization of *Streptomyces* sp. strain NEAU-174 with biocontrol ability against tomato bacterial wilt[J]. Physiological and Molecular Plant Pathology, 2026, 141: 102985.