

DOI: 10.16861/j.cnki.zggc.2025.0858

荧光假单胞菌引发种子对西瓜细菌性果斑病抗性的影响

周 燕, 李灿鹏, 程 燎, 程文婕, 向左芹, 戴思慧, 何长征

(湖南农业大学园艺学院·岳麓山实验室 长沙 410128)

摘要:为提高西瓜对细菌性果斑病(bacterial fruit blotch, BFB)的抗性,以红都西瓜为试材,采用不同浓度的荧光假单胞菌(*Pseudomonas fluorescens*)2P24菌悬液对西瓜种子进行生物引发处理,以无菌水处理为对照(CK),探讨其对种子萌发、幼苗生长及细菌性果斑病抗性的影响。结果表明,与CK相比,10⁷ CFU·mL⁻¹ 2P24处理显著提高了西瓜种子的发芽率、发芽势、发芽指数和胚根长度,种子中POD和SOD活性较CK分别显著提高了113.73%和87.01%,并显著促进幼苗根长、鲜质量、干质量和茎粗的增加。接种细菌性果斑病病原菌*Acidovorax citrulli*后,该处理有助于维持幼苗光系统II(PSII)的稳定性,减缓 F_v/F_m 、PI_ABS、 ϕE_o 、 ψ_o 等叶绿素荧光参数的下降;叶片中POD、CAT和SOD活性较CK分别显著提高了13.65%、76.71%和68.34%,降低MDA含量,并显著降低病情指数。综上,适宜浓度的荧光假单胞菌2P24种子生物引发可通过“促萌发-促生长-保护PSII-激活抗氧化防御”等多重途径显著增强西瓜幼苗对细菌性果斑病的抗性。本研究结果为瓜类细菌性果斑病的生物防治提供了理论依据和技术参考。

关键词:西瓜种子;种子生物引发;荧光假单胞菌;细菌性果斑病

中图分类号:S651

文献标志码:A

文章编号:1673-2871(2026)05-085-08

Effects of seed bio-priming with *Pseudomonas fluorescens* 2P24 on watermelon resistance to bacterial fruit blotch

ZHOU Yan, LI Canpeng, CHENG Liao, CHENG Wenjie, XIANG Zuoqin, DAI Sihui, HE Changzheng
(College of Horticulture, Hunan Agricultural University/Yuelu Mountain Laboratory, Changsha 410128, Hunan, China)

Abstract: To improve watermelon resistance to bacterial fruit blotch (BFB), Hongdu watermelon seeds were used as test material. Seeds were subjected to bio-priming treatment with *Pseudomonas fluorescens* 2P24 suspensions at different concentrations, with sterile water treatment serving as the control (CK). The study investigated the effects of these treatments on seed germination, seedling growth, and resistance to bacterial fruit blotch. The results showed that, compared with CK, the 10⁷ CFU·mL⁻¹ 2P24 treatment significantly increased watermelon seed germination rate, germination vigor, germination index, and radicle length. POD and SOD activity in the seeds were significantly higher than those in CK by 113.73% and 87.01%, respectively, and the treatment significantly promoted increases in seedling root length, fresh mass, dry mass, and stem diameter. Following inoculation with the bacterial fruit blotch pathogen *Acidovorax citrulli*, this treatment helped maintain the stability of photosystem II (PSII) in seedlings and slowed the decline of chlorophyll fluorescence parameters such as F_v/F_m , PI_ABS, ϕE_o , and ψ_o . Leaf POD, CAT, and SOD activity were significantly increased by 13.65%, 76.71%, and 68.34%, respectively, compared to the control, reducing MDA content and significantly lowering the disease severity index. In summary, seed bio-priming with *Pseudomonas fluorescens* 2P24 at an appropriate concentration can significantly enhance the resistance of watermelon seedlings to bacterial fruit blotch through multiple pathways, including “promoting germination, promoting growth, protecting PSII, and activating antioxidant defenses”. The results of this study provide a theoretical basis and technical reference for the biological control of bacterial fruit blotch in cucurbits.

Key words: Watermelon seed; Seed bio-priming; *Pseudomonas fluorescens*; Bacterial fruit blotch

收稿日期: 2025-12-15; 修回日期: 2026-01-29

基金项目: 岳麓山实验室种业专项(YLS-2025-ZY02015); 国家西甜瓜产业技术体系(CARS-25)

作者简介: 周 燕, 女, 在读硕士研究生, 研究方向为瓜类栽培。E-mail: 3174725374@qq.com

通信作者: 何长征, 男, 教授, 主要从事蔬菜育种与栽培技术研究。E-mail: hecz@hotmail.com

西瓜是世界十大水果之一,我国西瓜栽培面积和产量均居世界首位,是促进农民增收和乡村振兴的重要经济作物^[1]。近年来,细菌性果斑病已成为危害葫芦科作物的主要种传病害之一^[2]。瓜类细菌性果斑病(bacterial fruit blotch, BFB)是由嗜酸菌属西瓜种(*Acidovorax citrulli*)引起的一种传染性较强的检疫性细菌病害^[3-4]。该病原菌可通过种子远距离传播,在西瓜和甜瓜生产上造成幼苗猝倒、叶片水渍斑、果实腐烂等症状,一旦暴发往往导致严重减产,甚至绝收,已成为制约我国西瓜和甜瓜产业可持续发展的重要因素之一。

目前对瓜类细菌性果斑病的防控措施主要包括检疫、无病留种和加强田间栽培管理等,化学药剂防治仍是生产上最常采用的手段^[5]。然而,铜制剂等化学农药在生产中的长期大量使用,导致果斑病菌对其产生不同程度的抗性,使病害防治效果逐年下降,增加了防控难度^[6]。在化学防治受限和绿色生产需求日益提升的背景下,开发安全、高效、环境友好的生物防治技术显得尤为迫切。

种子生物引发(seed bio-priming)是近些年在国外应用较多的一项种子处理新技术。该技术利用特定浓度的有益微生物对种子进行预处理,随后干燥恢复到接近原始含水量^[7]。在这一过程中,微生物能够在种皮表面定殖形成生物膜,与胚根建立早期互作关系,诱导种子形成一道抵御外界胁迫的生物屏障,从而减轻多种土传病害对萌发和出苗的不利影响,并提高出苗整齐度和幼苗活力。研究表明,新型哈茨木霉菌株对玉米种子进行生物处理可显著降低禾谷镰刀菌引起的病害发生率,并提高种子发芽率^[8];采用耐盐碱的哈茨木霉分离株对种子进行生物处理可减轻盐碱胁迫对小麦的不良影响,改善植株在胁迫条件下的生长状况^[9];Xiang等^[10]对香蕉组培苗进行贝莱森芽孢杆菌EB1的生物引发处理,显著降低了香蕉枯萎病的病情程度并诱导了较强的抗病性。这些研究表明,种子生物引发是兼具促生和防病潜力的绿色防控技术。

荧光假单胞菌(*Pseudomonas fluorescens*)广泛分布于植物根际,是一类兼具促生和拮抗作用的重要根际促生菌(plant growth-promoting rhizobacteria, PGPR),也是研究最早、报道最多、应用前景较好的生防菌群之一^[11-14]。前人研究发现,荧光假单胞菌能够通过诱导植物产生系统抗性(induced systemic resistance, ISR)来抑制病原菌侵染^[15-16]。其作用机制主要包括:在根际定殖并在幼苗表面形成保

护层,阻碍病原菌黏附和侵入^[17];同时产生水杨酸、脂多糖、吩嗪类抗生素、铁载体等多种代谢产物,与病原菌竞争营养和空间,直接或间接抑制病害发生。此外,荧光假单胞菌还可通过调节植物体内抗氧化酶体系和渗透调节物质含量,增强植物对生物和非生物胁迫的耐受能力。

目前关于荧光假单胞菌通过种子生物引发增强西瓜对细菌性果斑病抗性的研究报道较少,尤其是其对西瓜种子萌发、幼苗生长以及光合系统和抗氧化防御体系的影响尚不清楚。鉴于此,笔者选用荧光假单胞菌2P24制备不同浓度菌悬液,对红都西瓜种子进行生物引发处理,系统评价其对种子萌发和幼苗生长的促进作用,并通过盆栽防效试验分析其对瓜类细菌性果斑病的防治效果。同时,测定幼苗叶片的叶绿素荧光参数及防御酶活性等生理指标,探讨2P24与西瓜幼苗之间的互作机制,以期利用荧光假单胞菌等有益微生物开展西瓜细菌性果斑病的生物防治提供理论依据和技术参考。

1 材料与方法

1.1 材料

供试西瓜品种为红都有籽西瓜,种子由湖南雪峰种业有限责任公司提供;荧光假单胞菌2P24由湖南农业大学植物保护学院提供。

供试病原菌为西瓜嗜酸菌(*Acidovorax citrulli*)菌株,由中国农业科学院植物保护研究所提供。

1.2 方法

试验于2025年3—10月在湖南省长沙市湖南农业大学园艺学院岳麓山实验室人工气候箱进行,采用随机区组试验设计,共计5个处理。

1.2.1 2P24对病原细菌的抑菌效果评估 采用打孔法测定生防菌2P24对细菌性果斑病菌的体外抑菌效果。将病原菌西瓜嗜酸菌菌悬液均匀涂布于KB琼脂平板表面,待表面干燥后使用无菌打孔器在平板上打孔,孔径为8 mm。然后向每个孔中加入30 μL 的2P24菌悬液,使其均匀充满孔洞。设未加2P24菌悬液为空白对照。平板置于28 $^{\circ}\text{C}$ 培养箱中培养24 h,观察并测量透明抑菌圈直径。每个处理设3次重复。

1.2.2 引发处理与种子发芽试验 以荧光假单胞菌2P24菌悬液对西瓜种子进行生物引发处理,设4个菌液浓度: 10^9 CFU \cdot mL⁻¹(P1)、 10^7 CFU \cdot mL⁻¹(P2)、 10^5 CFU \cdot mL⁻¹(P3)、 10^3 CFU \cdot mL⁻¹(P4),以无菌水处理为对照(CK)。选取颗粒饱满、大小均一、

无虫蛀的西瓜种子,引发前用 1.5%次氯酸钠溶液浸种消毒 10~15 min,然后用无菌水充分冲洗 3 次以上,去除残留消毒液。

将消毒后的种子放入 12 cm×12 cm×5 cm 的育苗盒中,盒内铺 2 张灭菌滤纸,加入相应浓度的 2P24 菌悬液进行引发处理,每处理设 4 个重复盒,在 25 °C 黑暗条件下引发 24 h;对照组以无菌水同法处理。引发结束后将种子风干至接近初始含水量,备用。

在发芽试验时,将回干后的种子用清水浸泡 2 h,擦干表面水分后,以 25 粒种子为 1 个重复放入同规格育苗盒中,盒内铺 2 张滤纸并加入 3~5 mL 无菌水,种子下方再覆盖 1 张滤纸。每处理设 4 个重复,置于 28 °C 培养箱中催芽,每天记录萌发粒数并及时更换滤纸和补水,连续观察 7 d。

1.2.3 防效试验 在 KB 固体培养基上挑取病原菌 *A. citrulli* 单菌落接种于 50 mL 的 KB 液体培养基中,置于 28 °C、200 r·min⁻¹ 条件下振荡培养 6~8 h。用无菌水稀释菌悬液,使其 OD₆₀₀≈0.3 (约 10⁸ CFU·mL⁻¹)^[18],随后再稀释至 1×10⁷ CFU·mL⁻¹ 作为接种液。

当西瓜幼苗长至 4 叶 1 心时,用上述病原菌悬浮液对叶片进行喷雾接种,以叶面刚好有水滴但不大量滴落为准。每处理设 3 次重复,每次重复 5 株幼苗。接种后将植株置于 28 °C、相对湿度约 70% 的培养箱中黑暗静置 24 h,随后转入 16 h 光照/8 h 黑暗的光周期条件下继续培养。接菌 5 d 后调查各处理植株的发病情况并拍照记录,用以计算病情指数。

1.2.4 指标测定 从催芽开始,每天记录各处理萌发种子数。试验第 3 天统计发芽势(germination energy, GE),第 7 天统计发芽率(germination percentage, GP)、发芽指数(germination index, GI)并测定胚根长度。计算公式如下:GE/%=第 3 天萌发种子数/供试种子总数×100;GP/%=第 7 天萌发种子数/供试种子总数×100;GI/%=Σ(Gt/Dt)×100,其中 Gt 为第 t 天萌发的种子数,Dt 为相应的发芽天数。在发芽第 7 天采用直尺测定胚根长度(cm)。

取经不同浓度菌悬液引发处理及 CK 处理的种子,按试剂盒说明书测定抗氧化酶活性。超氧化物歧化酶(SOD)活性采用亚科因(武汉)生物技术有限公司试剂盒测定,过氧化物酶(POD)和过氧化氢酶(CAT)活性采用索莱宝(北京)科技有限公司试剂盒测定。

选用 32 孔育苗盘均匀填充营养基质并浇水,将不同处理的引发种子分别播入各孔,置于日间 28 °C、夜间 18 °C、相对湿度 70%~80% 条件下培养,光照 16 h/黑暗 8 h。待幼苗长至 3 叶 1 心时,每处理随机选取 10 株测定株高、根长、鲜质量、干质量和茎粗等生长指标。株高:使用直尺测量幼苗茎基部至顶端生长点之间的高度;根长:洗净根系后,使用直尺测量根基部至根尖的长度;鲜质量:植株使用天平称量,所得数值即为鲜质量;干质量:将测定鲜质量后的样品放入牛皮纸袋中,置于烘箱烘干至恒质量后测量;茎粗:使用游标卡尺在幼苗茎基部测量。

采用多功能植物效率分析仪(M-PEA)测定叶绿素荧光参数。分别在接种病原菌前(0 h)和接菌后(48 h),从各处理植株中随机选取功能叶,避开主脉和较粗侧脉,在叶片中部夹持并测定 F_v/F_m 、PI_ABS、 ϕE_o 、 ψ_o 、Vj 和 VI 等参数。每个时间点每处理随机选取 3 株,每株测定 1 片叶,视为 3 个独立重复。

接菌后 5 d 调查各处理植株发病情况并拍照记录,依据叶片病斑面积占叶面积的百分比进行 0~5 级分级。0 级:无病斑;1 级:病斑面积占叶面积≤10%;2 级:病斑较多,占叶面积>10%~30%;3 级:病斑融合成片,占叶面积>30%~50%;4 级:叶片形成多个大病斑,占叶面积>50%~70%,叶片部分干枯;5 级:大量病斑相互重叠,病斑面积占叶面积>71%。病情指数=Σ(各级病株数×相对级数值)/(调查总株数×最高级数值)×100。

1.3 数据分析

采用 IBM SPSS Statistics 27 软件进行统计分析,采用 Excel 软件绘制图表。

2 结果与分析

2.1 荧光假单胞菌 2P24 对西瓜细菌性果斑病病原菌的抑菌效果

由图 1 可知,在打孔直径为 8 mm 的条件下,菌株 2P24 在西瓜细菌性果斑病病原菌涂布的 KB 平板上形成了明显的透明抑菌圈,其直径达到 26 mm,说明荧光假单胞菌 2P24 对西瓜细菌性果斑病病菌具有较强的体外拮抗能力,能够明显抑制病原菌菌落生长。

2.2 不同浓度荧光假单胞菌引发对西瓜种子发芽的影响

由表 1 可知,不同浓度的荧光假单胞菌 2P24

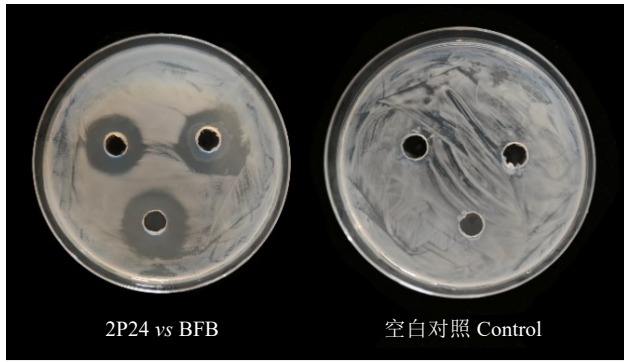


图1 菌株2P24对西瓜细菌性果斑病原菌 *Acidovorax citrulli* 的抑菌效果

Fig. 1 Inhibitory effect of strain 2P24 on *Acidovorax citrulli*, the causal agent of bacterial fruit blotch(BFB)of watermelon

引发处理均不同程度促进了西瓜种子萌发。与CK相比,P1~P4各处理的发芽率、发芽势、发芽指数及胚根长度整体上均呈升高趋势,其中P2处理的促进效果最显著。P2处理的发芽率、发芽势、发芽指数和胚根长度较CK分别提高了17.91%、44.90%、11.83%和54.95%,在发芽率、发芽势和胚根长度等指标上均达到显著差异水平。综合以上结果,在本试验条件下,10⁷ CFU·mL⁻¹的2P24菌悬液为促进西瓜种子萌发和胚根早期生长的适宜浓度。

表1 不同浓度2P24引发对西瓜种子萌发的影响
Table 1 Effects of seed bio-priming with different concentrations of strain 2P24 on watermelon seed germination

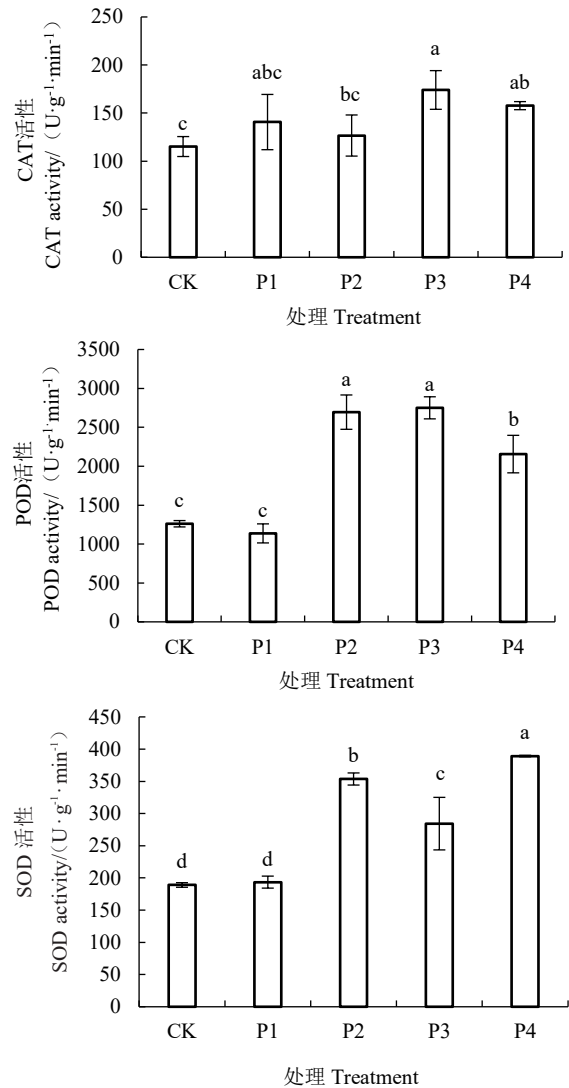
处理 Treatment	发芽率 Germination rate/%	发芽势 Germination potential/%	发芽指数 Germination index/%	胚根长度 Radicle length/cm
CK	67.00±11.02 b	49.00±10.00 c	18.18±2.63 a	5.35±1.51 c
P1	78.00±5.16 ab	57.00±7.57 abc	19.02±1.02 a	7.48±0.61 b
P2	79.00±3.83 a	71.00±2.00 a	20.33±0.81 a	8.29±0.61 ab
P3	74.00±2.31 ab	54.00±16.81 bc	17.80±1.56 a	7.78±0.76 ab
P4	77.00±8.25 ab	68.00±3.27 ab	19.71±1.15 a	8.91±0.48 a

注:同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著(P<0.05)。下同。

Note: Different small letters in the same column indicate significant difference between treatments (P<0.05). The same below.

2.3 不同浓度荧光假单胞菌引发对西瓜种子CAT、POD、SOD活性的影响

不同浓度2P24引发处理对西瓜种子抗氧化酶活性产生了显著影响(图2)。与CK相比,各处理种子的CAT活性均有提高,P3、P4处理达到显著水平,其中P3处理提升幅度最大,较CK显著提高了51.10%。POD活性在不同处理间差异明显,P2、P3、P4处理均显著高于CK,其中P2和P3处理的POD



注:不同小写字母表示处理间差异显著(P<0.05)。

Note: Different small letters indicate significant difference among treatments at P<0.05 level.

图2 不同浓度2P24引发对西瓜种子CAT、POD、SOD活性的影响

Fig. 2 Effects of seed bio-priming with different concentrations of strain 2P24 on CAT, POD and SOD activity in watermelon seeds

活性较CK分别提高了113.73%和118.14%。在SOD活性方面,P1处理与CK差异不显著,其余浓度处理均显著高于CK,其中P2和P4处理较CK分别提高了87.01%和105.83%。由此可见,中等浓度的2P24引发能够激活种子体内CAT、POD和SOD等抗氧化酶体系,提升种子清除活性氧(ROS)的能力,为后续萌发及幼苗生长奠定良好的生理基础。

2.4 不同浓度荧光假单胞菌引发对西瓜幼苗生长的影响

由表2可知,不同浓度2P24引发处理对西瓜

表 2 不同浓度 2P24 引发对西瓜幼苗生长的影响

Table 2 Effects of seed bio-priming with different concentrations of strain 2P24 on the growth of watermelon seedlings

处理 Treatment	根长 Root length/cm	株高 Plant height/cm	鲜质量 Fresh mass/g	茎粗 Stem diameter/cm	干质量 Dry mass/g
CK	12.77±2.83 b	11.90±0.51 ab	3.05±0.62 b	1.75±0.25 c	0.19±0.02 b
P1	13.96±3.89 ab	9.99±0.52 c	3.21±0.61 ab	2.23±0.29 a	0.19±0.03 b
P2	16.75±4.08 a	11.09±1.29 ab	3.70±0.73 a	2.06±0.22 ab	0.22±0.02 a
P3	13.95±3.38 ab	11.00±1.17 b	2.46±0.61 c	1.97±0.24 bc	0.19±0.01 b
P4	12.81±3.11 b	11.97±1.16 a	3.05±0.48 b	1.84±0.16 bc	0.19±0.02 b

幼苗生长均产生了一定的影响,但各生长指标对浓度的响应存在差异。与 CK 相比,各处理普遍提高了幼苗根长和茎粗,对株高的促进作用相对较小且不够稳定。其中,P2 处理在多项生长指标上表现最优,与 CK 相比,根长、鲜质量、茎粗和干质量分别显著提高了 31.17%、21.31%、17.71% 和 15.79%。P1、P3、P4 处理对部分指标也有一定的促进作用,但整体效果不及 P2 稳定和显著。以上结果表明,适宜浓度的荧光假单胞菌 2P24 种子生物引发不仅有利于萌发阶段种子活力的提升,也可在出苗后持续促进幼苗根系发育和地上部生长,增强西瓜幼苗早期的生长势,其中 10^7 CFU·mL⁻¹ 为本试验条件下的最佳浓度。

2.5 不同浓度荧光假单胞菌引发对西瓜幼苗细菌性果斑病抗性的影响

由图 3 可知,不同浓度 2P24 引发处理均能不同程度地降低西瓜细菌性果斑病的病情指数,且随 2P24 浓度升高整体上呈下降趋势。与 CK 相比,各处理组病情指数均显著降低,其中 P1 和 P2 处理下降幅度最大,表明种子生物引发处理在诱导西瓜幼苗抗病性方面具有显著效果。

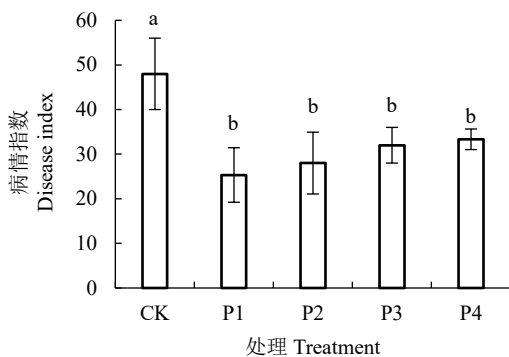


图 3 不同浓度 2P24 种子引发对西瓜幼苗细菌性果斑病病情指数的影响

Fig. 3 Effects of seed bio-priming with different concentrations of strain 2P24 on disease index of bacterial fruit blotch in watermelon seedlings

2.6 细菌性果斑病病原菌接菌前后不同浓度荧光假单胞菌引发西瓜叶片叶绿素荧光参数的变化

由图 4 可知,接种病原菌前,各处理间 F_v/F_m 、PI_ABS、 ϕE_o 、 ψ_o 、 V_j 和 VI 等叶绿素荧光参数差异均不明显,各项指标均处于健康植株的正常范围,说明不同浓度 2P24 引发本身对西瓜幼苗 PSII 的初始光化学状态影响较小。

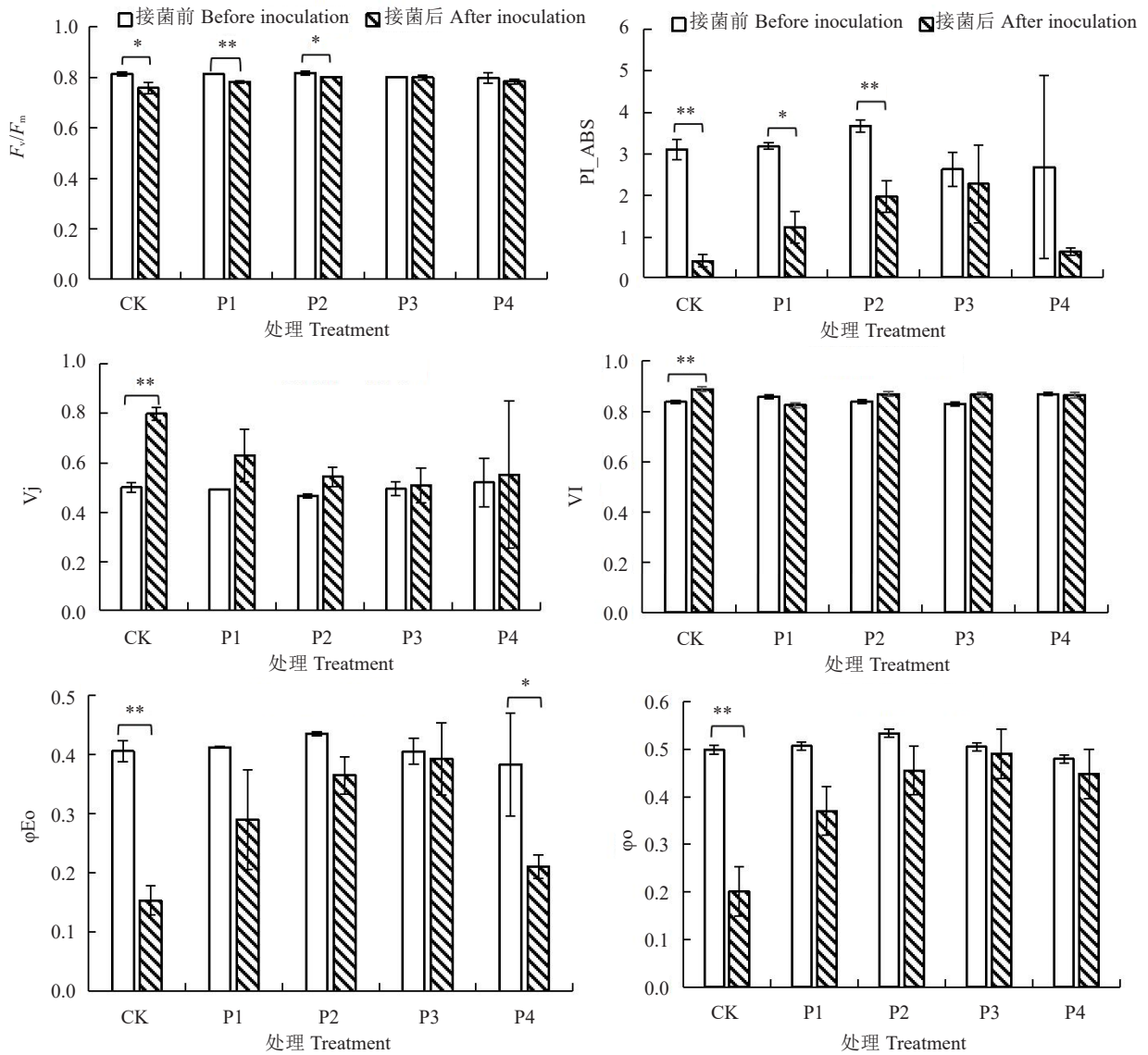
接菌 48 h 后,CK 植株 F_v/F_m 、PI_ABS 和 ϕE_o 等参数显著下降,而 V_j 和 VI 极显著升高, ψ_o 也极显著低于接菌前水平,表明病原侵染导致 PSII 反应中心受损,光能转化效率下降,电子传递受阻,是典型的光系统胁迫特征。各 2P24 处理植株在接菌后上述参数也出现一定程度的变化,但总体变化幅度明显小于 CK。尤其是在 P2 和 P3 处理中,接菌后 F_v/F_m 仍保持在 0.80 左右,与接菌前相比略有下降;而 PI_ABS、 ϕE_o 和 ψ_o 在接菌后均明显高于 CK, V_j 的升高幅度明显受到抑制。

综合来看,中等浓度 2P24 生物引发,特别是 P2 和 P3 处理,能够在细菌性果斑病菌侵染条件下有效减缓 F_v/F_m 、PI_ABS、 ϕE_o 、 ψ_o 和 VI 等 PSII 性能参数的下降,限制 V_j 的异常升高,有助于维持 PSII 的功能完整和电子传递效率,从而提高西瓜叶片对病原胁迫的光合耐受性,是 2P24 诱导系统抗性的重要生理表现。

2.7 细菌性果斑病病原菌接菌前后荧光假单胞菌引发西瓜幼苗叶片防御酶活性及 MDA 含量的变化

上述结果表明,P2 处理在促进种子萌发、幼苗生长、维持 PSII 稳定性及降低病情指数等方面综合表现较优,因此在防御酶活性和膜脂过氧化物分析中选取 P2 处理与 CK 进行比较。

由图 5 可知,接菌前 P2 处理和 CK 的幼苗叶片 CAT 活性及 MDA 含量差异均不显著,但 P2 处理的 POD 和 SOD 活性均极显著高于 CK,提示 2P24 种子引发在病原侵染前即可一定程度上提高植株基础防御水平。接种细菌性果斑病菌后,CK 的叶片



注：*、**分别表示在 $P < 0.05$ 、 $P < 0.01$ 水平上差异显著或极显著。下同。

Note: * and ** indicate significant difference or extremely significant difference at 0.05, 0.01 level, respectively. The same below.

图4 不同浓度2P24种子引发对西瓜幼苗叶片叶绿素荧光参数的影响

Fig. 4 Effects of seed bio-priming with different concentrations of strain 2P24 on chlorophyll fluorescence parameters of watermelon leaves

POD 和 SOD 活性均有所升高, CAT 活性有所降低, 但整体水平仍显著低于 P2 处理。与防御酶活性变化相反, 接菌后 P2 处理的叶片 MDA 含量极显著低于 CK, 表明 2P24 引发在增强防御酶活性的同时, 有效减轻了病原侵染导致的膜脂过氧化和细胞膜损伤。

3 讨论与结论

种子生物引发是利用有益微生物短期处理种子, 通过在种皮表面形成生物膜并与胚根建立早期互动, 改善种子生理状态和萌发环境的一项绿色技术。已有研究表明, 哈茨木霉、芽孢杆菌等微生物对玉米、小麦、香蕉等作物种子进行生物引发, 可显

著提高发芽率和幼苗活力, 并增强植株对逆境的耐受性^[8-10]。本研究结果显示, 适宜浓度的 2P24 (P2) 显著提高了西瓜种子的发芽率、发芽势和胚根长度, 并在萌发阶段显著增强了 POD、SOD 活性, 表明 2P24 可能通过提升种子抗氧化能力, 减缓萌发过程中活性氧的累积和膜脂过氧化, 从而促进种子萌发和根系伸长。

此外, P2 处理显著增加了幼苗根长、鲜质量、干质量和茎粗, 表明 2P24 引发效应可以从种子阶段延续到出苗期, 持续促进苗期生长。同时, 荧光假单胞菌被认为能够通过产生植物激素类似物、铁载体和多种代谢物, 刺激根系分支, 增强营养吸收。

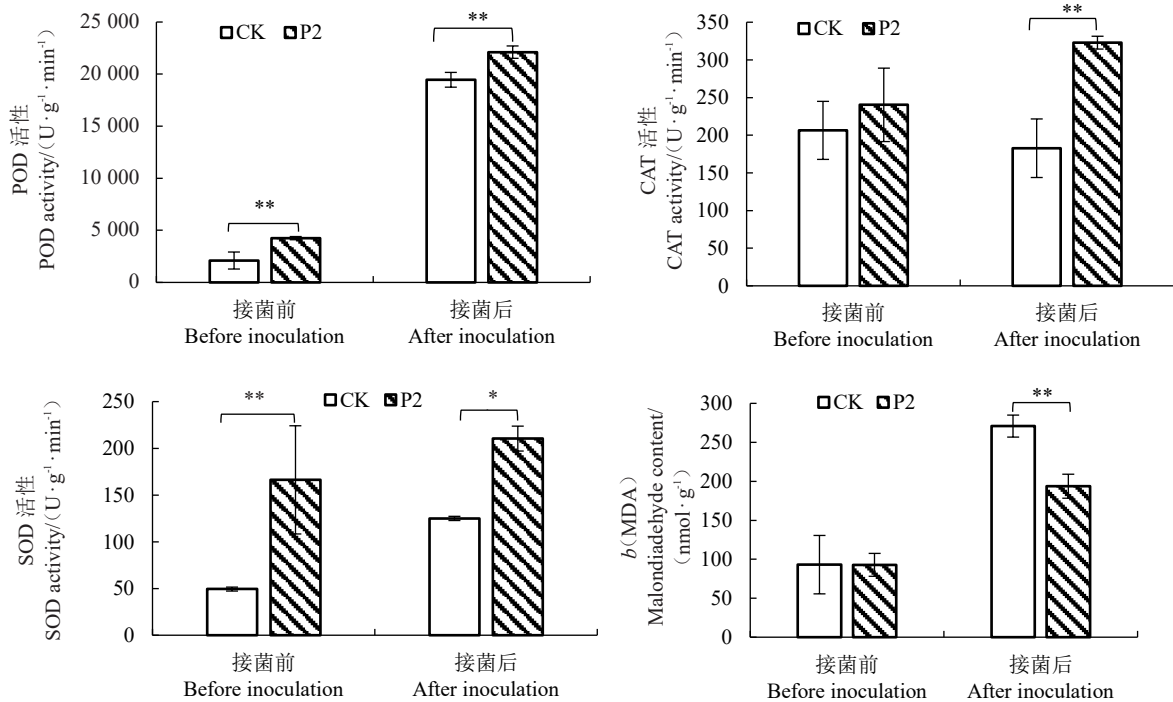


图5 2P24种子引发对西瓜幼苗叶片防御酶活性及MDA含量的影响

Fig. 5 Effects of seed bio-priming with strain 2P24 on defence enzyme activity and MDA content in watermelon leaves

本研究发现, P2处理下幼苗根系发育良好, 推测2P24可能通过改善根际微环境和调节植物激素平衡, 促进西瓜幼苗生长, 这与人关于PGPR促生机制的报道一致^[19-20]。

植物在病原菌侵染过程中往往伴随大量活性氧产生, 若不能及时清除, 将引起膜脂过氧化、细胞结构破坏以及光合系统受损。抗氧化酶体系是植物清除超氧阴离子和过氧化氢等活性氧的重要防线, 其中SOD、CAT和POD在维持细胞氧化还原稳态中发挥关键作用。许多PGPR菌株通过诱导宿主植物提高防御酶活性, 从而增强对病害的系统性抗性^[21-23]。本研究中, P2处理在接菌前即显著提高了种子及幼苗叶片的POD和SOD活性; 接菌后, P2处理叶片的SOD、CAT和POD活性均显著高于CK, 而MDA含量显著降低, 说明2P24引发可在病原侵染前后持续激活抗氧化体系, 快速清除侵染过程中积累的ROS, 减轻膜脂过氧化, 维持细胞膜稳定性。上述结果与PGPR诱导系统抗性(ISR)的典型生理特征相吻合。

叶绿素荧光参数能够敏感反映PSII反应中心的受损程度和光能转换效率。 F_v/F_m 是光系统II最大光化学效率的重要指标, PI_ABS综合反映能量吸收、捕获和电子传递等多个环节; ϕE_o 、 ψ_o 与电子从QA向后续受体传递的效率密切相关, 而Vj、VI

则反映电子传递链中不同位点的阻滞程度。病原侵染通常导致 F_v/F_m 、PI_ABS和 ϕE_o 降低、Vj升高, 表现为PSII受抑或部分失活^[24-25]。本研究中, CK植株在接菌后 F_v/F_m 、PI_ABS、 ϕE_o 和 ψ_o 显著下降, Vj和VI极显著升高, 表明病原侵染对PSII造成了明显损伤; 而P2、P3处理接菌后上述参数变化幅度明显减小, F_v/F_m 仍维持在约0.80的正常水平, PI_ABS、 ϕE_o 、 ψ_o 和VI均明显高于CK, 说明2P24引发能够有效缓解病原菌对PSII的破坏, 保持较高的光能利用和电子传递效率。结合防御酶活性和MDA含量的变化, 可以推测2P24通过启动抗氧化防御降低ROS的过量积累, 从而间接保护PSII的结构与功能。

细菌性果斑病病原菌*A. citrulli*具有典型的种传特性, 常规化学药剂防治容易诱导抗药性并带来环境和食品安全隐患^[5, 26]。本研究表明, 荧光假单胞菌2P24对果斑病菌具有明显体外抑菌活性, 其种子生物引发处理可在盆栽条件下显著降低西瓜幼苗期细菌性果斑病的病情指数, 防效显著优于CK。与传统药剂拌种或喷雾相比, 生物引发技术在用量低、持效期长且兼具促生作用等方面具有明显优势, 符合当前绿色防控和减药控害的发展方向。但当前针对西瓜品种的生物引发介导系统抗性(ISR)相关研究文献较为稀缺, 其在不同遗传背景

西瓜材料中是否具备潜在的广谱抗性诱导效应,仍有待进一步探究与验证,未来也可在大田条件下进一步验证 2P24 种子生物引发的诱导效应及防效稳定性,并结合转录组、代谢组等多组学手段解析其诱导抗性的信号网络,为西瓜及其他葫芦科作物细菌性果斑病的生物防治提供更加坚实的理论依据。

综上所述,不同浓度荧光假单胞菌(2P24)引发对西瓜种子萌发和幼苗生长均具有一定的促进作用,以 10^7 CFU·mL⁻¹(P2)处理综合效果最佳,显著提高了西瓜种子的发芽率、发芽势、胚根长度、POD 和 SOD 活性以及幼苗的根长、茎粗、鲜质量和干质量;接种细菌性果斑病病原菌后发现,2P24 种子引发能显著增强西瓜幼苗对细菌性果斑病的抗性,提高幼苗的 POD、CAT、SOD 活性,降低 MDA 含量,并有效减缓 F_0/F_m 、PI_ABS、 ϕE_0 、 ψ_0 和 VI 等 PSII 性能参数的下降,限制 V_j 的异常升高,有助于维持 PSII 的功能完整和电子传递效率。本研究结果为瓜类细菌性果斑病生物防控及后续生物引发研究提供了理论依据。

参考文献

- [1] 姚东伟,陆世钧,孙建,等.制种方式和种子处理对西瓜种子产量和质量的影响[J].耕作与栽培,2022,42(5):33-36.
- [2] BAHAR O, KRITZMAN G, BURDMAN S. Bacterial fruit blotch of melon: Screens for disease tolerance and role of seed transmission in pathogenicity[J]. European Journal of Plant Pathology, 2008, 123(1): 71-83.
- [3] 贾云鹤,王喜庆,李坤,等.西瓜细菌性果实腐斑病的研究进展[J].黑龙江农业科学,2014(2):137-139.
- [4] 季苇芹,叶云峰,张爱萍,等.我国瓜类细菌性果斑病研究新进展[J].中国瓜菜,2022,35(9):1-8.
- [5] 阎莎莎,王铁霖,赵廷昌.瓜类细菌性果斑病研究进展[J].植物检疫,2011,25(3):71-76.
- [6] 赵文龙,杨玉文,王铁霖,等.瓜类细菌性果斑病菌对硫酸铜的敏感性检测与分析[J].植物保护,2013,39(6):100-105.
- [7] CALLAN N W. Bio-priming seed treatment for biological control of *pythium ultimum* preemergence damping-off in sh2 sweet corn[J]. Plant Disease, 1990, 74(5): 368-372.
- [8] NAYAKA C S, NIRANJANA R S, SHANKAR U A, et al. Seed biopriming with novel strain of *Trichoderma harzianum* for the control of toxigenic *Fusarium verticillioides* and fumonisins in maize[J]. Archives of Phytopathology And Plant Protection, 2010, 43(3): 264-282.
- [9] RAWAT L, SINGH Y, SHUKLA N, et al. Alleviation of the adverse effects of salinity stress in wheat (*Triticum aestivum* L.) by seed biopriming with salinity tolerant isolates of *Trichoderma harzianum*[J]. Plant and Soil, 2011, 347(1/2): 387-400.
- [10] XIANG D D, YANG X F, LIU B J, et al. Bio-priming of banana tissue culture plantlets with endophytic *Bacillus velezensis* EB1 to improve *Fusarium* wilt resistance[J]. Frontiers in Microbiology, 2023, 14: 1146331.
- [11] 梅小飞,王智荣,阚建全.荧光假单胞菌防治果蔬病害的研究进展[J].微生物学报,2019,59(11):2069-2082.
- [12] 黄阔,江其鹏,姚晓远,等.微生物菌剂对烟草根结线虫及根际微生物群落多样性的影响[J].中国烟草科学,2019,40(5): 36-43.
- [13] 李葵,刘娜,郑丽博.荧光假单胞菌植物病害防治及研究进展[J].分子植物育种,2018,16(11):3693-3697.
- [14] 刘杰贤,咸洪泉.荧光假单胞菌防治甜菜立枯病试验研究[J].中国甜菜糖业,1995(5):51-53.
- [15] PEER R V, NIEMANN G J, SCHIPPERS B. Induced resistance and phytoalexin accumulation in biological control of *Fusarium* wilt of carnation by *Pseudomonas* sp. Strain WCS417r[J]. Phytopathology, 1991, 81(7): 728-734.
- [16] WEI G. Induction of systemic resistance of cucumber to *Colletotrichum orbiculare* by select strains of plant growth-promoting rhizobacteria[J]. Phytopathology, 1991, 81(12): 1508-1512.
- [17] BARAHONA E, NAVAZO A, MARTINEZ-GRANERO F, et al. *Pseudomonas fluorescens* F113 mutant with enhanced competitive colonization ability and improved biocontrol activity against fungal root pathogens[J]. Applied and Environmental Microbiology, 2011, 77(15): 5412-5419.
- [18] 贾云鹤,王喜庆,闫闻,等.可杀得叁千对西瓜幼苗细菌性果斑病的防治效果[J].黑龙江农业科学,2019(6):66-68.
- [19] 杨晓帆,梁家慧,于文英,等.促生荧光假单胞菌对桃树根区土壤环境和植株生长的影响[J].植物营养与肥料学报,2022,28(8):1494-1508.
- [20] 张紫瑶,谈韞,樊航,等.绿色木霉和枯草芽孢杆菌对番茄苗期根系形态及土壤速效养分的影响[J].江苏农业科学,2022,50(9):111-115.
- [21] JONI F R, HAMID H, YANTI Y. Effect of plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) on increasing the activity of defense enzymes in tomato plants [J]. International Journal of Environment, Agriculture and Biotechnology, 2020, 5(6): 1474-1479.
- [22] MARIUTTO M, DUBY F, ADAM A, et al. The elicitation of a systemic resistance by *Pseudomonas putida* BTP1 in tomato involves the stimulation of two lipoxygenase isoforms[J]. BMC Plant Biology, 2011, 11(1): 29.
- [23] RAMAMOORTHY V, VISWANATHAN R, RAGUCHANDER T, et al. Induction of systemic resistance by plant growth promoting rhizobacteria in crop plants against pests and diseases[J]. Crop Protection, 2001, 20(1): 1-11.
- [24] 杨德翠,胡彦江.立枯丝核菌侵染对花生光合机构活性的影响[J].广东农业科学,2015,42(15):36-42.
- [25] 杨德翠,刘超,盖树鹏,等.牡丹柱枝孢叶斑病(*Cylindrocladium canadense*)对叶片光合系统功能的影响[J].园艺学报,2013,40(3):515-522.
- [26] WEI H Y, HAN S, MIJITI M, et al. Synergistic control of bacterial fruit blotch using *Bacillus velezensis* ZY1 and chemical bactericides[J]. Agronomy Science, 2024, 14(12): 2797.