

引用:范宗强,李欣苒,冯靖涵,等. 解淀粉芽孢杆菌 9-2 防控黄瓜枯萎病及其诱导系统抗性研究[J]. 聊城大学学报(自然科学版),2025,38(4):625-632.

Citation:FAN Zongqiang, LI Xinran, FENG Jinghan, ZHENG Lixue, WANG Hui, PENG Xiangqian, CHEN Fang. Study on the control of cucumber fusarium wilt and its induced resistance by *Bacillus amyloliquefaciens* 9-2[J]. Journal of Liaocheng University (Natural Science Edition), 2025, 38(4): 625-632.

文章编号 1672-6634(2025)04-0625-08

DOI 10.19728/j.issn1672-6634.2025010005

解淀粉芽孢杆菌 9-2 防控黄瓜枯萎病 及其诱导系统抗性研究

范宗强,李欣苒,冯靖涵,郑丽雪,王会,彭向前,陈芳

(聊城大学 药学与食品工程学院,大分子药物与规模化制备全国重点实验室,
山东省蛋白与多肽类药物应用技术重点实验室(筹),山东 聊城 252059)

摘要 [目的]为探究解淀粉芽孢杆菌 9-2 对黄瓜枯萎病菌的生防效果及诱导抗性机理。[方法]采用平板对峙试验和盆栽试验,探究了菌株 9-2 的应用对病原菌菌丝形态、叶部防御性酶活性、丙二醛含量及黄瓜枯萎病病情指数等指标的影响。[结果]解淀粉芽孢杆菌 9-2 能显著抑制黄瓜枯萎病菌生长,抑菌圈周围菌丝出现粗细不均、膨胀、断裂等现象。盆栽试验表明解淀粉芽孢杆菌 9-2 能有效防治黄瓜枯萎病,防治效果为 69.11%。9-2 处理组黄瓜幼苗的株高、茎粗、鲜重、干重分别比对照增加了 16.46%、6.37%、11.09% 和 12.00%($P < 0.05$)。此外,菌株 9-2 的应用在不同程度上提高了黄瓜叶部苯丙氨酸解氨酶、多酚氧化酶、过氧化物酶和过氧化氢酶的活性,同时减少了丙二醛(MDA)的含量;4 种防御性酶活性的增幅在接种病原菌处理后更大。[结论]解淀粉芽孢杆菌 9-2 能够抑制病原菌生长,诱导黄瓜产生系统抗性,从而有效防治黄瓜枯萎病。

关键词 解淀粉芽孢杆菌 9-2;黄瓜枯萎病;诱导抗性;生物防治

中图分类号 S436

文献标志码 A

开放科学(资源服务)标识码(OSID)



Study on the control of cucumber fusarium wilt and its induced resistance by *bacillus amyloliquefaciens* 9-2

FAN Zongqiang, LI Xinran, FENG Jinghan, ZHENG Lixue,
WANG Hui, PENG Xiangqian, CHEN Fang

(School of Pharmaceutical Sciences and Food Engineering, state key Laboratory of Macromolecular Drugs and Large-scale Preparation, Shandong key Laboratory of Applied Technology for Protein and Peptide Drugs,
Liaocheng University, Liaocheng 252059, China)

Abstract [Objective] To explore the control efficiency and main mechanism of *Bacillus amyloliquefaciae* 9-2 against Fusarium wilt in cucumber. [Methods] Plate confrontation test and pot experiment were used to

收稿日期:2025-01-08

基金项目:国家自然科学基金项目(31401799);山东省自然科学基金项目(ZR2020MC126);山东省研究生教育教学改革研究重点项目(SDYJG19056);山东省抗体制药协同创新中心开放课题(CICGAD1816);聊城大学畜牧学重点学科开放课题(319462207-23)资助

通信作者:陈芳,女,汉族,博士,教授,研究方向:微生物与生物防治,E-mail:chenfang20045@163.com。

evaluate the effects of the 9-2 application on the pathogen mycelial morphology, activity of defense enzymes in leaves and malondialdehyde content, and the disease index of cucumber Fusarium wilt. [Results] *B. amyloliquefaciens* 9-2 could significantly suppress the mycelium growth of *F. oxysporum*, and the mycelium around the inhibition zone showed uneven thickness, swelling, and breakage. The pot experiment showed that *B. amyloliquefaciens* 9-2 achieve the disease control efficiency against cucumber Fusarium wilt, reaching 69.11%. The plant height, stem diameter, fresh weight, dry weight of cucumber seedlings in 9-2 treatment were enhanced by 16.46%, 6.37%, 11.09% and 12.00% compared to control treatment, respectively. In addition, 9-2 application increased the activities of phenylalanine amylase, polyphenol oxidase, peroxidase and catalase, and decreased the content of malondialdehyde in cucumber leaves, the increase in the activity of the four defensive enzymes was more pronounced following pathogen inoculation. [Conclusion] *B. amyloliquefaciens* 9-2 can suppress the pathogen growth and induce disease resistance of cucumber, effectively controlling cucumber Fusarium wilt.

Keywords *B. amyloliquefaciens* 9-2; cucumber Fusarium wilt; induced resistance; biological control

0 引言

黄瓜(*Cucumis sativus* L.)是中国温室农田栽培中最常见的一种蔬菜作物,其果实中含有丰富的蛋白质、钙、磷、铁和抗坏血酸等物质,受到广大人群的喜爱^[1]。随着园艺设施的不断发展,黄瓜的种植面积也逐渐增加^[2]。许多生物和非生物因素会导致黄瓜产量低下,由尖孢镰刀菌(*Fusarium oxysporum*)引起的枯萎病是最突出的生物因素之一,在全球许多地区严重制约着黄瓜的产量^[3]。现有的枯萎病防治方法主要包括选育抗病品种、嫁接防治、化学防治和生物防治。选育抗病品种虽能培育出具有抗病特性的优良品种,但受到诸多因素的限制,如种质资源相对匮乏、筛选周期较长等。嫁接防治能够提高作物产量,有效降低枯萎病的发生率,但操作难度高,并可能影响果实的品质^[4]。化学防治作为控制枯萎病最常用的方法,具有起效快,效果好的优点;但长期使用化学药物会导致土壤和水体污染,危害人类健康,也会导致病原体产生抗药性^[5]。生物防治由于具有对环境影响小,不会产生抗药性,对人畜相对安全等特点,已成为枯萎病化学防治的最有前途的替代方案之一,在设施和有机蔬菜生产中发挥着重要作用^[6]。

作为生物防治的常见手段,生防菌剂的应用已经取得了显著的成果^[7]。芽孢杆菌属作为生物防治中研究和使用的菌种,对多种病原体表现出强大的抑菌活性,同时具有极高的耐热性和耐干性;这些特性使它们能够发展成为易于储存并具有长保质期的商业产品^[8-9]。芽孢杆菌能够通过抗生素分泌、营养和生物生态位竞争、严重寄生等直接抑制植物病害,也能通过诱导植物抗性来间接抑制植物病害^[10]。其中,诱导抗性主要体现在植物防御性酶活性的提高和抗性相关基因表达水平的上调^[11-12]。汪飞等^[13]发现解淀粉芽孢杆菌 B1619 能够显著提高番茄幼苗的生物量,增加叶绿素含量,提高番茄免疫力,对番茄猝倒病具有较好的预防作用。枯草芽孢杆菌 Ya-1 能够显著提高辣椒叶片苯丙氨酸解氨酶(PAL)和过氧化物酶(POD)等防御性酶活性,降低丙二醛含量,有效防治辣椒枯萎病^[14]。张德珍^[15]发现,解淀粉芽孢杆菌 JF-1 对黄瓜枯萎病菌的抑菌率为 68.10%,且菌株 JF-1 的应用能有效防治黄瓜枯萎病。解淀粉芽孢杆菌 9-2 由本课题组早期分离于感病中药材“天南星”的根际土壤,已被证实能够抑制多种病原真菌的生长,提高根际土壤关键酶的活性,改善根际土壤环境^[16]。

本研究旨在通过平板对峙试验和温室盆栽试验研究解淀粉芽孢杆菌 9-2 对黄瓜枯萎病的防治效果,进而探究 9-2 诱导黄瓜抗枯萎病菌的主要机制,以期对黄瓜枯萎病的绿色防控提供理论支持。

1 材料与方法

1.1 材料

细菌菌株:解淀粉芽孢杆菌 9-2 为本实验室冻存菌株(保藏号:CGMCC9257)。

真菌菌株:黄瓜枯萎病菌(*Fusarium oxysporum* f. sp. *cucumerinum* (FOC))由聊城大学农学院提供,4℃保存于 PDA 培养基平板中。

黄瓜品种:试验黄瓜品种为津研四号,采购自潍坊寿禾种业有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 菌种活化。在无菌条件下,使用接种环挑取少量冻存管中的解淀粉芽孢杆菌 9-2,在含 LB 固体培养基的平板中划线,于 30℃ 恒温培养箱中,倒置培养 24 h。然后将 9-2 单菌落转接至盛有 LB 液体培养基(50 mL)的培养瓶,在转速为 180 r/min 的摇床(37℃)中培养 18 h。在无菌条件下,利用打孔器打取 6 mm 尖孢镰刀菌菌饼,转接至含 PDA 培养基平板的中心处,于 28℃,培养 6 d。

1.2.2 平板抑菌测定。以 6 mm 病原菌菌饼为中心,等距离(2.5 cm)在 PDA 培养基平板上的四个点放置无菌滤纸片,加入 10 μL 浓度为 10^6 CFU · mL⁻¹ 的细菌悬液,对照组加入等体积的无菌水,每处理三次重复,于 28℃,恒温培养 6 d。参照相关文献^[17]报道的方法,测量菌落直径,采用十字交叉法计算抑菌率,定义对照菌落直径为 R_D ;处理菌落直径为 R_C ;抑菌率为 I_Y ;其具体公式如(单位为 mm)

$$I_Y = \frac{R_D - R_C}{(R_C - 6)} \times 100\%。$$

1.2.3 枯萎病菌菌丝形态的观察。在光学显微镜下,观察抑菌圈附近的病原菌菌丝形态,以正常生长的病原菌菌丝作为对照。

1.2.4 菌种悬浮液的制备。将 9-2 单菌落接种至含 100 mL PDB 培养基的培养瓶中,于 37℃、180 r/min 下,培养 18 h。吸取 2 mL 发酵液,转接至含 100 mL PDB 培养基的培养瓶中,于 37℃、180 r/min,培养 36 h。然后于 4℃,10 000 g 离心 10 min,弃掉上清液,使用无菌水重悬菌体并将浓度调整至 1×10^9 CFU · mL⁻¹。

待 1.2.1 所培养病原菌长出明显孢子,使用无菌水冲洗平板表面,收集冲洗液,用六层无菌纱布进行过滤,获得病原菌孢子悬浮液,并用无菌水将其浓度调节至 1×10^8 个 · mL⁻¹。

1.2.5 盆栽试验设计。种植前,黄瓜种子在温水(25℃,5 h)中浸泡,剔除漂浮的种子,然后在 28℃,80% 相对湿度的培养箱中萌发。发芽后,将幼苗移入基质孔板中培养一周,然后移栽到含正常土壤、营养基质、干猪粪和蛭石(5:2:2:1, v/v)的塑料花盆中(直径 25 cm),于自然光照下培养(白天 27 ± 1 ℃,夜间 17 ± 1 ℃)。参照 Shi 等^[18]人使用的方法对黄瓜幼苗进行接种处理。具体方法如下:在第二片真叶完全发育时,预先接种 40 mL 9-2 细菌悬浮液,在接种细菌悬液第 3 d 时,再接种 40 mL 病原菌孢子悬浮液,对照组采用无菌水处理。接种方式采用灌根法,使用无菌注射器将菌液缓慢注入至距离土壤表层约 4 cm 的根际周围。试验共设 4 个处理组,即(1) CK:80 mL 无菌水;(2) 9-2:40 mL 9-2 细菌悬浮液(1×10^9 CFU · mL⁻¹) + 40 mL 无菌水;(3) 9-2 + FOC:40 mL 9-2 细菌悬浮液 + 40 mL 病原菌孢子悬浮液(1×10^8 个 · mL⁻¹);(4) FOC:40 mL 无菌水 + 40 mL 病原菌孢子悬浮液。每个处理 4 次重复,种植 48 株;每盆三株。在病原菌接种处理 1 d 时,随机选取植株并做好标记,每株采集 6 g 叶片,每处理三次重复。此后每 2 d 采集一次,持续到第 11 d。

1.2.6 发病情况的统计调查。接种病原菌处理第 20 d 时,参照相关标准^[19],统计未取样黄瓜幼苗的发病情况,计算病情指数及防治效果。具体而言,发病情况被分为 5 级:0:无症状;1:子叶轻微萎蔫;2:植株轻微萎蔫;3:植株萎蔫,矮化;4:植株死亡。定义发病的株数为 N_F ;发病相应等级 G_F ;植株总数为 N_Z ;发病最高等级数 G_Z ;病情指数为 D_B ,其对照病情指数 D_D ;处理病情指数 D_C ;防治效果为 C_F ;其病情指数 D_B 及防治效果 C_F 的计算公式如

$$D_B = \frac{\sum(N_F \times G_F)}{(N_Z \times G_Z)} \times 100\%, C_F = \frac{(D_D - D_C)}{(D_D)} \times 100\%。$$

1.2.7 黄瓜生长指标的测量。参照相关研究^[20]所报道的方法测量黄瓜植株的高度、茎粗、鲜重和干重。

1.2.8 黄瓜叶片防御性酶活性及丙二醛含量的测量。使用相关试剂盒(北京索莱宝科技有限公司),对采集的叶片进行防御性酶(PAL、PPO、POD、CAT)活性及 MDA 含量的测定。

1.2.9 数据分析。采用 GraphPad Prism 8 软件进行作图,使用 SPSS 17.0 软件进行数据分析,应用 ANOVA 进行 Duncan's 多重差异分析($P<0.05$,差异显著)。

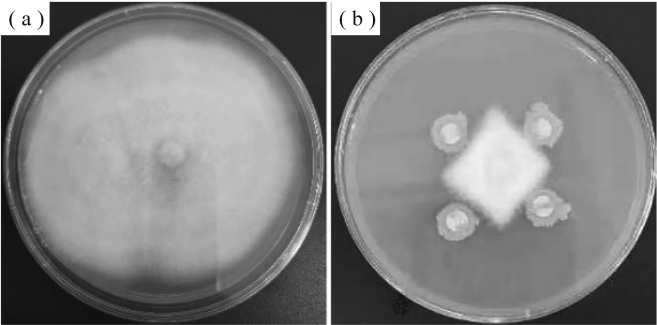
2 结果与分析

2.1 解淀粉芽孢杆菌 9-2 对黄瓜枯萎病菌的抑制作用

如图 1 所示,对照组病原菌菌丝生长正常,而 9-2 处理组滤纸片周围菌丝生长缓慢,9-2 对黄瓜枯萎病菌的抑菌率为 71.41%,表明解淀粉芽孢杆菌 9-2 能够显著抑制枯萎病菌的生长。

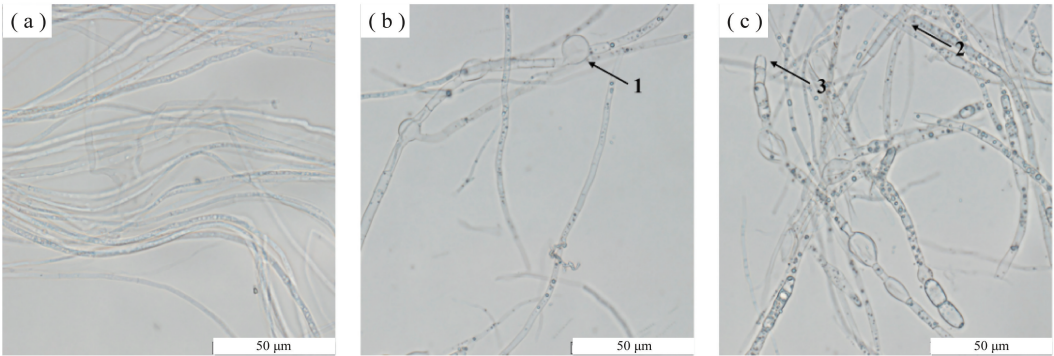
2.2 解淀粉芽孢杆菌 9-2 对黄瓜枯萎病菌菌丝形态的影响

在光学显微镜下观察到的枯萎病菌菌丝形态如图 2 所示,枯萎病菌正常生长的菌丝平滑且粗细均匀;而 9-2 处理抑菌圈周围菌丝存在膨大和畸形现象(箭头 1);同时也出现扭曲变形和菌丝断裂(箭头 2 和 3)。以上结果表明解淀粉芽孢杆菌 9-2 能够破坏病原菌菌丝形态,进而抑制枯萎病菌的生长。



注:(a) 对照;(b) 9-2 处理。

图 1 解淀粉芽孢杆菌 9-2 对黄瓜枯萎病菌生长的影响
Fig. 1 Effect of *Bacillus amyloliquefaciens* 9-2 on the growth of *Fusarium oxysporum*



注:(a) 对照;(b,c) 9-2 处理。

图 2 光学显微镜下病原菌的菌丝生长形态

Fig. 2 Mycelial growth morphology of pathogens under optical microscope

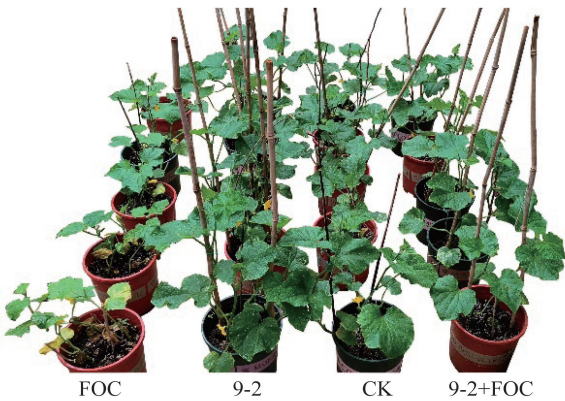
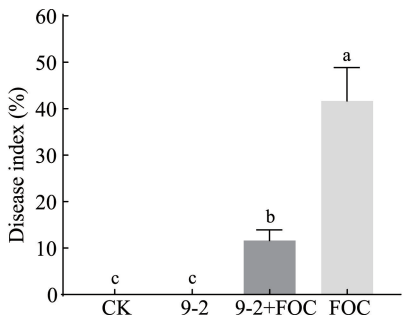


图 3 不同处理下黄瓜幼苗的生长状态

Fig. 3 Growth status of cucumber seedlings under different treatments



注: 数据为平均值±标准偏差,柱形图上不同小写字母表示在 0.05 水平上差异显著。

图 4 不同处理下黄瓜枯萎病的病情指数

Fig. 4 Disease index of cucumber *Fusarium* wilt under different treatments

2.3 解淀粉芽孢杆菌 9-2 对黄瓜枯萎病的防治效果

如图 3 所示,在病原菌处理第 20 d 时,对照组和 9-2 单独处理的黄瓜幼苗生长状态良好,未见发病特征。而单独接种病原菌处理的黄瓜幼苗出现叶片萎蔫和植株矮化现象,病情指数为 37.62%;相较之下,接种 9-2 再接种病原菌处理显著降低了黄瓜枯萎病的发病程度,防治效果为 69.11% (图 4)。

2.4 解淀粉芽孢杆菌 9-2 对黄瓜幼苗的促生长作用

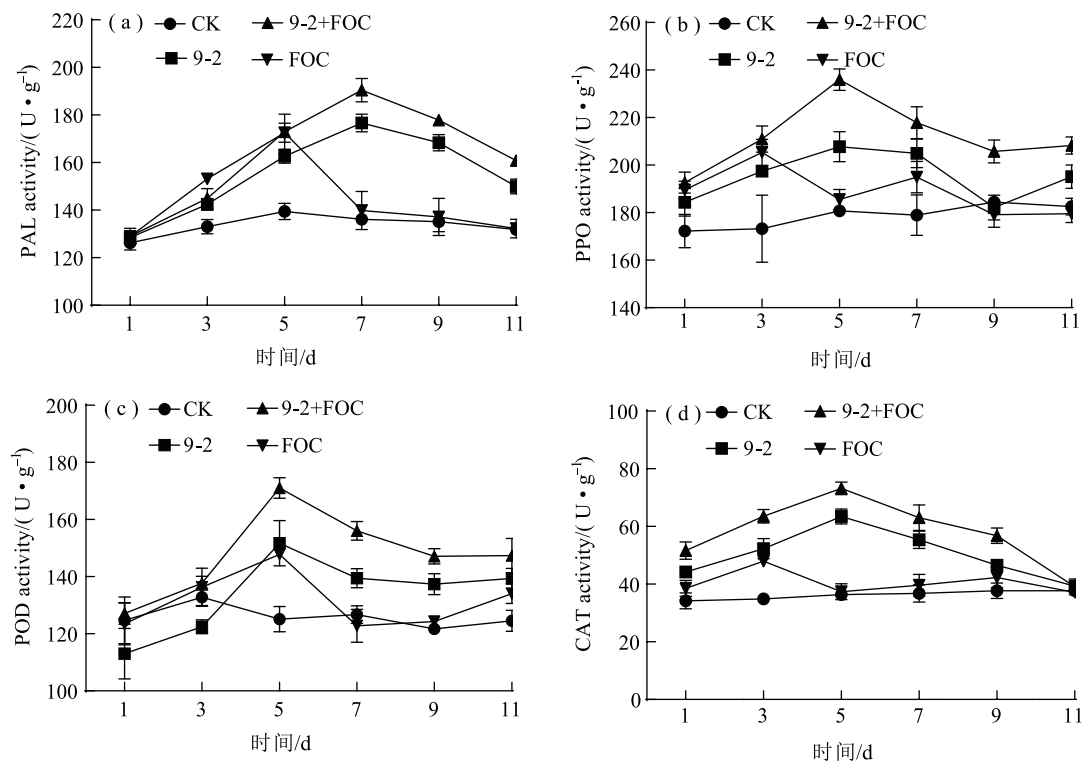
如表 1 所示,单独接种 9-2 处理的黄瓜植株的株高、茎粗、鲜重和干重较对照分别增加了 16.46%、6.37%、11.09% 和 12.00% ($P < 0.05$)。四种生长指标在接种 9-2 后再接种病原菌处理后均显著高于单独接种病原菌处理 ($P < 0.05$)。由此可见,解淀粉芽孢杆菌 9-2 的应用能够促进黄瓜幼苗的生长。

表 1 不同处理下黄瓜幼苗的生长指标

Tab. 1 Growth indices of cucumber seedlings under different treatments

组别	株高/cm	茎粗/mm	鲜重/g	干重/g
CK	12.88±0.56b	4.87±0.19b	10.91±0.65b	0.50±0.04b
9-2	15.00±0.78a	5.18±0.24a	12.12±0.46a	0.56±0.05a
9-2+FOC	11.88±0.70c	4.64±0.22c	10.35±0.51c	0.47±0.04b
FOC	9.29±0.86d	4.38±0.17d	8.69±0.84d	0.41±0.04c

注:数据为平均值±标准偏差,同列数据后不同小写字母表示在 0.05 水平上差异显著。



注:(a) 苯丙氨酸解氨酶(PAL);(b) 多酚氧化酶(PPO);(c) 过氧化物酶(POD);(d) 过氧化氢酶(CAT)。

图 5 不同处理下黄瓜幼苗叶片的防御性酶活性

Fig. 5 Defensive enzyme activities in cucumber leaves under different treatments

2.5 解淀粉芽孢杆菌 9-2 对黄瓜幼苗叶片防御性活性酶的影响

如图 5-A 所示,对照组黄瓜叶片 PAL 活性较为稳定,未发生明显变化。与对照组相比,单独接种病原菌处理的黄瓜叶片 PAL 活性在 1-5 d 上升,随后下降,于 5 d 时达到最大值,为 172.56 $\text{U} \cdot \text{g}^{-1}$,比对照增加了 23.77%,在 7-11 d 与对照相近。而单独接种 9-2 与接种 9-2 后再接种病原菌处理的黄瓜叶片 PAL 活性变化趋势相似,均于 1-7 d 上升,然后下降,于 7 d 时达到最大值,分别为 176.62 $\text{U} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 190.44 $\text{U} \cdot \text{g}^{-1}$,

分别比对照增加了 29.74% 和 39.90%。值得注意的是,相比单独接种病原菌处理,接种 9-2 后再接种病原菌处理的黄瓜叶片 PAL 活性增幅更大。

由图 5-B 和 5-C 可知,黄瓜叶片 PPO 和 POD 活性在单独接种 9-2 和接种 9-2 后再接种病原菌处理中均于 5 d 时达到最大值,活性分别为 $207.73 \text{ U} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 $235.99 \text{ U} \cdot \text{g}^{-1}$,高出对照 12.71% 和 30.56%,而 POD 活性在两处理中分别为 $151.71 \text{ U} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 $171.02 \text{ U} \cdot \text{g}^{-1}$,分别比对照高出 21.21% 和 36.64%。值得注意的是,接种 9-2 后再接种病原菌处理的两种酶的活性在 1-11 d 均高于其他处理。

如图 5-D 所示,单独接种病原菌处理的黄瓜叶片 CAT 活性在 1-3 d 上升,于 3 d 时达到最高值,活性为 $47.96 \text{ U} \cdot \text{g}^{-1}$,高于对照 37.58%;在其余时间段虽也有变化,但均与对照相近。单独接种 9-2 与接种 9-2 后再接种病原菌处理的黄瓜叶片 CAT 活性呈现先上升,后下降的变化趋势,均于 5 d 时达到最大值,活性分别为 $63.44 \text{ U} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 $73.19 \text{ U} \cdot \text{g}^{-1}$,分别比对照高出 74.57% 和 101.40%,但后者处理的叶片 CAT 活性的增幅更大。在处理第 11 d 时,各处理黄瓜叶片 CAT 活性相近。

综上可知,施用解淀粉芽孢杆菌 9-2 能够有效提升黄瓜体内防御性酶活性,增强黄瓜幼苗的抗病能力;当再接种病原菌后,4 种防御性酶活性的增幅更大。

2.6 解淀粉芽孢杆菌 9-2 对黄瓜幼苗叶片 MDA 含量的影响

由图 6 可知,对照组黄瓜叶片 MDA 含量相对稳定,未发生明显变化。单独接种 9-2 处理的黄瓜叶片 MDA 含量始终维持在较低的水平,并低于对照,在第 7 d 时达到最小值,为 $9.59 \text{ nmol} \cdot \text{mg}^{-1}$ 。单独接种病原菌处理的黄瓜叶片 MDA 含量呈现出先上升,后下降的趋势,于 5 d 时达到最大值,为 $22.58 \text{ nmol} \cdot \text{mg}^{-1}$,高出对照 98.77%。接种 9-2 后再接种病原菌处理的黄瓜叶片 MDA 含量的变化趋势与单独接种病原菌处理相似,于 5 d 时达到最大值,为 $17.46 \text{ nmol} \cdot \text{mg}^{-1}$,较单独接种病原菌处理下降了 29.32%。值得注意的是,接种 9-2 后再接种病原菌处理的黄瓜叶片 MDA 含量在 1-11 d 均低于单独接种病原菌处理。以

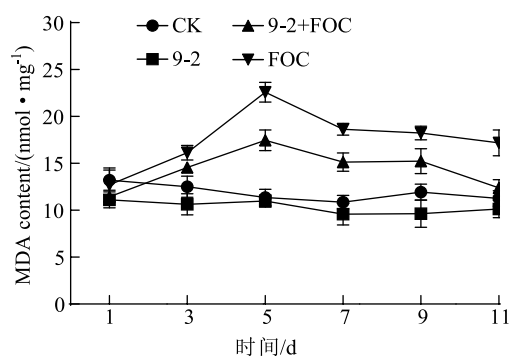


图 6 不同处理下黄瓜幼苗叶片的丙二醛含量

Fig. 6 MDA content in cucumber seedling leaves under different treatments

上结果表明,解淀粉芽孢杆菌 9-2 的应用能够降低黄瓜体内 MDA 的含量,减轻植物膜脂的过氧化程度,缓解植物所遭受的逆境伤害。

3 讨论

3.1 解淀粉芽孢杆菌 9-2 的应用能够有效防治黄瓜枯萎病

黄瓜是一种重要的经济作物,但在种植过程中极易发生各种真菌病害。黄瓜枯萎病作为危害最大的病害之一,会造成黄瓜产量 10%~50% 的损失^[21]。在最近的研究中,解淀粉芽孢杆菌 3-5 对黄瓜枯萎病菌表现出明显的抑菌效果,对黄瓜枯萎病的防治效果达到 72.10%^[22]。本研究中,菌株 9-2 能够引起病原菌菌丝产生膨胀和断裂等现象,这可能与解淀粉芽孢杆菌产生的抗菌脂肽羟基丁酮以及 2-癸酮等挥发性有机物(VOCs)有关。此外,解淀粉芽孢杆菌 9-2 能有效防治黄瓜枯萎病(69.11%),其防治效果与解淀粉芽孢杆菌 3-5 相近^[22]。

3.2 解淀粉芽孢杆菌 9-2 的应用能够促进黄瓜植株生长

解淀粉芽孢杆菌能够分解环境中难溶性微量元素,提高植物根际营养物质的利用率^[25]。此外,解淀粉芽孢杆菌也可以产生脱落酸、细胞分裂素和赤霉素等物质,促进作物生长并提高抗逆性^[26]。在本研究中,黄瓜的株高、茎粗、鲜重及干重对菌株 9-2 的应用表现出积极的反应。相较于单独接种病原菌处理的黄瓜,接种 9-2 后再接种病原菌处理的黄瓜,其生物量更高,枯萎病病情指数更低。

3.3 解淀粉芽孢杆菌 9-2 的应用能够提高黄瓜植株体内防御性酶的活性,降低 MDA 的含量

植物自身防卫反应与酶催化的一系列复杂的生理生化代谢过程密切相关,而防御性酶通常被用作衡量植物体内防御反应的重要指标^[27]。PAL 是苯丙烷代谢途径中最关键的速率固定酶,负责合成具有抗菌和抵御病原菌侵染作用的酚类化合物和木质素等物质^[28]。PPO 通过氧化细胞内的内源多酚化合物来产生木质素和其他醌类化合物,增强植物对病原体入侵的抵抗力^[29]。当植物受到病原菌侵染后,体内往往会产生大量的活性氧,对植物细胞造成危害。POD 和 CAT 是已知的活性氧清除剂,能有效地保护植物免受活性氧的危害^[30]。在本试验中,无论是否接种病原菌,解淀粉芽孢杆菌 9-2 均能提高黄瓜叶部四种防御性酶的活性,并在 5 d 或 7 d 时达到峰值。当再接种病原菌后,四种防御性酶活性的增幅更大。该结果进一步表明菌株 9-2 的应用能够诱导黄瓜防御性酶活性的升高,增强黄瓜抗枯萎病的能力。该研究结果与前人报道的芽孢杆菌诱导植物防御性酶活性变化防治植物病害的结果相一致^[31-32]。此外,相比单独接种病原菌处理,接种 9-2 后再接种病原菌处理明显降低了黄瓜叶部丙二醛的含量。丙二醛(MDA)是细胞膜脂过氧化的最终产物,其含量与机体遭受逆境伤害的程度呈正相关^[33]。据此推断,菌株 9-2 的应用能够提高黄瓜体内防御性酶活性,降低 MDA 含量,诱发植物体内复杂的抗病性反应,缓解植物遭受的逆境伤害。

4 结论

解淀粉芽孢杆菌 9-2 的应用能有效抑制病原菌的生长,提高黄瓜的生物量。除此之外,菌株 9-2 的应用可以提高黄瓜叶部防御性酶水平并降低丙二醛含量,诱导黄瓜幼苗产生抗病性,最终减轻黄瓜枯萎病的发病程度。因此,9-2 在现代农业中作为生防剂具有很大的潜力。

参 考 文 献

- [1] 戴明,郭海滨. 北方蔬菜营养价值与栽培模式的发展分析[J]. 现代园艺, 2015(18): 33-34.
- [2] LIU H J, YUAN B Z, HU X D, et al. Cucumber production and the economic revenues under various nitrogen applications in an unheated solar greenhouse on the North China Plain[J]. Agronomy Journal, 2021, 113(4): 3444-3459.
- [3] TAN Y Q, DU C X, XU L, et al. Endophytic bacteria from diseased plant leaves as potential biocontrol agents of cucumber Fusarium wilt[J]. Journal of Plant Pathology, 2024, 106(2): 553-563.
- [4] 徐彦刚,贺振,李瑞,等. 黄瓜枯萎病研究进展[J]. 中国瓜菜, 2018, 31(6): 1-6.
- [5] 宋露洋,高沛,张涵,等. 苦瓜枯萎病生防细菌 ZB36 的分离鉴定及其定殖特性研究[J]. 河南农业大学学报, 2024, 58(2): 229-238.
- [6] 蒋冬阳,吴冰越,季文平,等. 拮抗放线菌 2-1-2F 的鉴定及其对黄瓜枯萎病的防效[J]. 中国生物防治学报, 2024, 40(2): 411-423.
- [7] 谢晚彬,李华平. 香蕉枯萎病生防细菌 ZJ6-6 的盆栽防治效果及其生防基因分析[J]. 中国南方果树, 2018, 47(6): 55-58.
- [8] 乔奕,郑美辰,盛鑫如,等. 瓦尼木层孔菌培养基优化及抗炎作用研究[J]. 聊城大学学报(自然科学版), 2023, 36(5): 91-98.
- [9] 郑丽雪,康秋艳,娄静怡,等. 枯草芽孢杆菌微囊泡的高效分离及其抗炎活性研究[J]. 聊城大学学报(自然科学版), 2024, 37(3): 90-98.
- [10] 陈莉,张奂棋,戴婷,等. 芽孢杆菌脂肽类抗生素的抑菌活性及其对植物病害的生物防效研究[J]. 农业灾害研究, 2024, 14(2): 25-27.
- [11] 柴庆凯,张斌,常若葵,等. 解淀粉芽孢杆菌 LJ02 对黄瓜抗灰霉病菌的生防效果及其诱导抗性机理的初步研究[J]. 植物病理学报, 2019, 49(6): 828-835.
- [12] 魏滢洁,田叶韩,王炎峰,等. 球毛壳菌与枯草芽孢杆菌组合对抗黄瓜枯萎病防御酶活性的影响[J]. 山东农业科学, 2019, 51(7): 72-79.
- [13] 汪飞,邱光,罗文芳,等. 解淀粉芽孢杆菌 B1619 对加工番茄幼苗促生及培育壮苗的影响[J]. 新疆农业科学, 2022, 59(5): 1252-1259.
- [14] 赵志祥,严秋荣,王宝,等. 芽孢杆菌 Ya-1 诱导辣椒防御酶活性提高和相关抗病基因的表达[J]. 分子植物育种, 2022, 20(8): 2699-2706.
- [15] 张德珍,李婷婷,代惠洁,等. 解淀粉芽孢杆菌 JF-1 对黄瓜的防病促生作用[J]. 北方园艺, 2020(10): 16-21.
- [16] 闫杨,刘月静,王帅珂,等. 生防芽孢杆菌对黄瓜根际土壤酶活性的影响[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(7): 108-111.
- [17] 李坤,洪秀杰,王欣悦,等. 贝莱斯芽孢杆菌 TC-52 的分离鉴定及其对水稻幼苗生长和立枯病的影响[J]. 江苏农业科学, 2024, 52

- (10): 129-137.
- [18] SHI L, DU N S, SHU S, et al. *Paenibacillus polymyxa* NSY50 suppresses Fusarium wilt in cucumbers by regulating the rhizospheric microbial community[J]. Scientific Reports, 2017, 7: 41234.
- [19] LIU Z S, FAN C X, XIAO J W, et al. Metabolomic and transcriptome analysis of the inhibitory effects of *Bacillus subtilis* strain Z-14 against *Fusarium oxysporum* causing vascular wilt diseases in cucumber[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2023, 71(5): 2644-2657.
- [20] 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.
- [21] 路粉, 张军, 吴杰, 等. 设施黄瓜主要病害发生及综合防控[J]. 现代农药, 2024, 23(2): 22-25.
- [22] MA T, YANG C D, CAI F F, et al. Optimizing fermentation of *Bacillus amyloliquefaciens* 3-5 and determining disease suppression and growth in cucumber (*Cucumis sativus*) [J]. Biological Control, 2022, 176: 105070.
- [23] 敖静, 李杨, 刘晓辉, 等. 一株黄瓜枯萎病拮抗细菌的筛选鉴定及抑菌作用初探[J]. 云南农业大学学报(自然科学), 2022, 37(3): 429-434.
- [24] 罗晓娇, 孙静, 陆颖健. 解淀粉芽孢杆菌中脂肽的生物合成、抑菌机理及应用的研究进展[J]. 食品工业科技, 2022, 43(19): 462-470.
- [25] 赵月盈. 解淀粉芽孢杆菌抗病机制研究进展[J]. 亚热带农业研究, 2021, 17(3): 205-210.
- [26] 邱光, 张新风, 李建伟, 等. 解淀粉芽孢杆菌 B1619 对草莓保苗促生效果[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(4): 98-100.
- [27] 王静, 宁燕夏, 糟雪云, 等. 解淀粉芽孢杆菌 B6 防治西瓜枯萎病及对西瓜幼苗抗氧化酶的诱导作用[J]. 中国植保导刊, 2018, 38(6): 5-10.
- [28] 吴美艳, 罗兴录, 刘珊廷, 等. 木薯叶片 5 种防御酶活性与细菌性枯萎病抗性的关系[J]. 中国农业大学学报, 2022, 27(1): 109-115.
- [29] 杜蕙, 王春明, 郭建国, 等. 葡萄生单轴霉菌对葡萄几种防御酶活性的影响[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(15): 151-154.
- [30] 吴梦露, 李鹏, 于文清, 等. 水稻防御酶与其抗病性关系研究进展[J]. 分子植物育种, 2024, 22(7): 2413-2420.
- [31] 项佳胤, 商桑, 田丽波. 贝莱斯芽孢杆菌 N46 对苦瓜白粉病的防治机理研究[J]. 热带作物学报, 2024, 45(6): 1292-1302.
- [32] 张先成, 张云湖, 赵晓宇, 等. 枯草芽孢杆菌 B29 菌株对黄瓜植株的诱导抗性[J]. 武夷科学, 2009, 25(1): 24-29.
- [33] 沈登荣, 何超, 徐慧琼, 等. 端大蓟马取食对豆科植物防御酶活性及丙二醛含量的影响[J]. 安徽农业大学学报, 2017, 44(4): 716-719.

(责任编辑:刘庆松)