

菌株 HMQ20YJ11 的筛选鉴定及对辣椒疫病的抑制评价

郭致杰^{1,2,3}, 徐生军^{1,2,3}, 荆卓琼^{1,2,3}, 孙倩^{1,2,3}, 尚红梅⁴, 尚晓花⁴, 卓玛草⁴

(1. 甘肃省农业科学院植物保护研究所, 甘肃 兰州 730070; 2. 农业农村部天水作物有害生物野外科学观测实验站, 甘肃 甘谷 741200; 3. 农业农村部国家植物保护甘谷观测实验站, 甘肃 甘谷 741200; 4. 甘南州农业科学研究所, 甘肃 合作 747000)

摘要: 辣椒疫病是困扰世界辣椒产业的一个严重而持久的问题, 难以通过化学和农业手段加以控制。为筛选出具有防控疫病应用潜力的本地可培养有益细菌, 从民勤盐碱化土壤中分离到 42 株生防细菌, 采用对峙培养法进行筛选。结果表明, 菌株 HMQ20YJ11 对 9 种植物病原菌具有较强的拮抗活性。通过 16S rRNA 基因、*gyrA* 基因和 *gyrB* 基因序列分析鉴定, 菌株 HMQ20YJ11 为萎缩芽孢杆菌。菌株 HMQ20YJ11 能够产生 α -淀粉酶、氨、纤维素酶、吲哚-3-乙酸、果胶酶、蛋白酶、铁载体和溶解磷酸盐。在温室条件下, 与未处理对照相比, 菌株 HMQ20YJ11 可显著降低疫病的严重程度。田间进行测试的结果表明, 菌株 HMQ20YJ11 可显著降低疫病的严重程度, 具有防治疫病的潜力。由此可看出, 菌株 HMQ20YJ11 对植物病害具有拮抗作用, 可作为潜在的生物防治菌剂加以应用。

关键词: 萎缩芽孢杆菌; 拮抗活性; 筛选; 鉴定; 辣椒疫病; 辣椒疫霉菌

中图分类号: S436.418.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-2172(2022)01-0088-06

doi: 10.3969/j.issn.2097-2172.2022.01.017

Identification of *Bacillus atrophaeus* Strain HMQ20YJ11 and Evaluation of Its Inhibitory Activity against Pepper Phytophthora Blight

GUO Zhijie^{1,2,3}, XU Shengjun^{1,2,3}, JING Zhuoqiong^{1,2,3}, SUN Qian^{1,2,3}, SHANG Hongmei⁴, SHANG Xiaohua⁴, ZHUO Macao⁴

(1. Institute of Plant Protection, Gansu Academy of Agricultural Sciences, Lanzhou Gansu 730070, China; 2. Scientific Observing and Experimental Station of Crop Pests in Tianshui, the Ministry of Agriculture and Rural Affairs, P. R. China, Gangu Gansu 741200, China; 3. National Agricultural Experimental Station for Plant Protection at Gangu, the Ministry of Agriculture and Rural Affairs, P. R. China, Gangu Gansu 741200, China; 4. Gannan Agricultural Sciences Research Institute, Hezuo Gansu 747000, China)

Abstract: Pepper phytophthora blight is a severe and persistent problem in pepper industry worldwide, which is difficult to control through chemical and agricultural means. The current study was designed to screen native cultivable rhizobacteria with potential applications for biocontrol of phytophthora blight, a total of 42 strains were isolated from salinized soil and screened by dual culture assay. Results revealed that the strain HMQ20YJ11 showed strong antagonistic activity against 9 plant pathogens. Based on 16S rRNA gene, *gyrA* gene and *gyrB* gene sequence analysis identified strain HMQ20YJ11 as *Bacillus atrophaeus*. Strain HMQ20YJ11 demonstrated many characteristics that are beneficial for plants, such as production of α -amylase, ammonia, cellulase, indole-3-acetic acid, pectinase, protease, siderophores, and phosphate solubilization. In planta application of strain HMQ20YJ11 significantly decreased phytophthora blight severity compared to untreated controls under greenhouse conditions. The strain HMQ20YJ11 was tested in the field and demonstrated a dramatic decrease in disease severity, suggesting strain HMQ20YJ11 as potential biocontrol candidate for phytophthora blight. These results suggested that strain HMQ20YJ11 could provide protection against plant disease and could be used as a potential agent for biological control.

Key words: *Bacillus atrophaeus*; Antagonistic activity; Screening; Identification; Pepper phytophthora blight; *Phytophthora capsici*

辣椒 (*Capsicum annuum* L.) 属一年生或有限多年生草本茄科植物, 是一种日益重要的经济作物, 可作为蔬菜、香料和食品着色剂, 此外还具备一定的药用价值^[1-3]。随着辣椒栽培面积的不断增

收稿日期: 2022-08-09

基金项目: 甘肃省农业科学院农业科技创新专项 (2020GAAS24、2021GAAS54); 甘肃省农业科学院科技成果转化项目 (2021GAAS-CGZH01); 兰州市科技计划项目 (2021-1-174); 甘南州科技计划项目 (2021-2)。

作者简介: 郭致杰 (1972—), 男, 甘肃民勤人, 副研究员, 主要从事农业外来入侵物种和农业有害生物综合防控技术研究工作。Email: guozhijie@gsagr.ac.cn。

加, 生产常伴随着高度的集约化种植, 造成复种指数高, 给土传病害的病原提供了赖以生存的寄主和繁殖场所, 导致土壤中病原菌的大量积累, 土传病害的发生越来越严重, 其中由辣椒疫霉菌引起的疫病, 已经严重制约了辣椒生产的发展。目前, 为了避免和控制这种病害, 种植者通常很大程度上依赖于化学杀菌剂。然而, 由于病原菌在植物维管组织内传播以及其在土壤中休眠结构的长期存活, 化学杀菌剂的效果有限。同时, 化学杀菌剂的大量使用导致病原菌产生抗药性、生态环境污染、生物多样性破坏, 并在食物中积累有害的化学残留物等一系列食品安全和生态环境问题。为了减少化学农药的使用, 国家农业部于 2015 年审议通过了《到 2020 年农药使用零增长行动方案》, 强调了绿色防控病害的作用。生物防治能够克服化学防治带来的一系列弊端, 能间接产生一定的经济效益、生态效益和社会效益, 符合建设可持续发展的、生态友好的绿色农业系统的发展趋势。因此, 与化学防治相比, 生物防治剂是作物管理计划中环境友好和生物安全的组成部分^[4-6]。

利用具有植物促生长特性的天然拮抗微生物进行生物防治, 可以降低病原菌对受影响作物的危害程度, 提高作物的产量。这些潜在的天然拮抗微生物由芽孢杆菌等不同属的微生物组成, 以游离生物的形式存在于土壤中, 具有促进植物生长的作用, 保护作物免受病害危害^[7]。其中, 芽孢杆菌是一类主要的天然拮抗微生物, 它可以形成内生孢子, 在恶劣的环境条件下可在土壤中长期生存。芽孢杆菌在植物生长和健康方面发挥着至关重要的作用, 因为它们可以通过产生植物激素来全面改善植物生长, 保护植物免受病原菌和其他非生物胁迫, 稳定土壤团聚体, 维持土壤养分和结构等^[8-10]。在温室和露地多应用芽孢杆菌来防控由辣椒疫霉菌引起的疫病^[11-12], 然而, 促进一种农作物生长的生防菌剂并不一定对其他农作物有类似的影响^[13]。一些细菌对几种农作物产生了普遍的促进生长作用, 而其他的细菌则表现出强烈的寄主农作物选择性, 并对单个农作物或有限的农作物进行定殖。此外, 生防微生物与土壤生态环境中的微生物群落之间常存在相互作用, 外源生防微生物的引入可引起农作物根际土壤微生物群落的组成发生变化, 因此生防菌剂的使用有很大的地域适应性。我们的研究旨在从土壤中分离、筛选、鉴定土著的可培养细菌, 并评价其对辣椒的促生长和抑病作用, 为开发稳定有效的

生物防治剂提供潜在菌株。

1 材料与方法

1.1 供试材料

1.1.1 供试生防细菌及菌株供试 生防细菌分别为灰葡萄孢菌 (*Botrytis cinerea*)、松针刺盘孢菌 (*Colletotrichum fioriniae*)、尖孢炭疽菌 (*Colletotrichum acutatum*)、禾谷镰刀菌 (*Fusarium graminearum*)、尖孢镰刀菌 (*F. oxysporum*)、茄病镰刀菌 (*F. solani*)、轮枝镰刀菌 (*F. verticillium*)、辣椒疫霉菌 (*Phytophthora capsici*)、立枯丝核菌 (*Rhizoctonia solani*) 和核盘菌 (*Sclerotinia sclerotiorum*)。供试生防菌株为萎缩芽孢杆菌 HMQ20YJ11。以上生防细菌及菌株均由甘肃省农业科学院植物保护研究所提供。

1.1.2 供试药剂 供试化学药剂为 1×10^{11} 芽孢/g 枯草芽孢杆菌可湿性粉剂(由德强生物股份有限公司提供)、50% 氟啶胺悬浮剂(由江阴苏利化学股份有限公司提供)。

1.1.3 指示作物 指示辣椒品种为长丰辣椒, 由湖南湘研种业有限公司选育并提供。

1.1.4 防治对象 防治对象为辣椒疫病 (Pepper *Phytophthora blight*)。

1.2 试验方法

1.2.1 细菌的分离和保存 土壤样品采集于甘肃省武威市民勤县盐碱化地块。采样地块随机选取 5 个点, 取 0~5 cm 盐碱化土壤, 混合后用密封袋带回, 用 0.2 cm 网眼的筛子除去土块和植物残体, 室温风干。采用梯度稀释制成最终浓度为 $\times 10^{-5}$ 的土壤悬浮液^[14]。选择 $\times 10^{-3}$ 、 $\times 10^{-4}$ 、 $\times 10^{-5}$ 3 个浓度的悬浮液, 各吸取 100 μ L, 加到 NaCl 含量为 100 g/kg 的 LB 培养基平板上, 用涂布棒涂布均匀, 做 3 个重复。将培养基平板在 28 $^{\circ}$ C 恒温下培养 5 d, 选择不同形态的菌落转移到新的 NaCl 含量为 100 g/kg 的 LB 培养基平板上进行纯化培养, 4 $^{\circ}$ C 保存待测。菌株用冻存管(甘油含量为 20%)置于 -80 $^{\circ}$ C 超低温冰箱中冷冻长期保存。

1.2.2 生防细菌筛选和拮抗能力测定 利用平皿对峙培养法筛选和测定生防细菌拮抗灰葡萄孢菌 (*Botrytis cinerea*)、松针刺盘孢菌 (*Colletotrichum fioriniae*)、禾谷镰刀菌 (*Fusarium graminearum*)、尖孢镰刀菌 (*F. oxysporum*)、茄病镰刀菌 (*F. solani*)、轮枝镰刀菌 (*F. verticillium*)、辣椒疫霉菌 (*Phytophthora capsici*)、立枯丝核菌 (*Rhizoctonia solani*) 和核盘菌 (*Sclerotinia sclerotiorum*) 的能力^[11]。

1.2.3 利用基因序列分析 鉴定菌株 HMQ20YJ11

用 Fast TIANamp Bacteria DNA Kit [天根生化科技(北京)有限公司]提取生防细菌 HMQ20YJ11 的全基因组 DNA。使用通用引物组 27F 和 1492R, *gyrA*-F 和 *gyrA*-R, UP1 和 UP2r 分别扩增 16S rRNA 基因、*gyrA* 基因和 *gyrB* 基因。25 μ L 反应混合物在 PCR 热循环仪上进行扩增。PCR 产物送生工生物工程(上海)股份有限公司进行测序。将测序结果在 NCBI 数据库中进行比对,从 NCBI 基因库数据库中下载相关物种的 16S rRNA、*gyrA* 和 *gyrB* 基因序列,利用 MEGA 6.0 进行系统发育研究。

1.2.4 离体防病促生相关活性测定 对菌株 HMQ20YJ11 进行产生纤维素酶和蛋白酶、果胶酶和 α -淀粉酶、氨、IAA 和铁载体和磷酸盐溶解的体外活性测定^[14-19],这些活性由特定培养基上细菌菌落周围的颜色变化和明显的光环表征。

1.2.5 菌株 HMQ20YJ11 菌剂对辣椒疫病的苗盘防控效果 测定菌株 HMQ20YJ11 接种在 LB 固体培养基上进行活化后,转接于装有 50 mL LB 液体培养基的 100 mL 的三角瓶中,28 $^{\circ}$ C、150 rpm 振荡培养 24 h 获得种子液。将种子液按体积比 1:100 的比例接种于发酵培养基(1/2PDB + 1/2LB)中,28 $^{\circ}$ C、150 rpm 振荡培养 24 h。

将长丰辣椒种子在 1 g/kg 的次氯酸钠溶液中表面消毒 20 min,然后用无菌水清洗 4 次。种子播种在装满园艺土壤的 50 孔苗盘,每孔播 1 粒。幼苗在无病虫、温度控制在 20~30 $^{\circ}$ C 的温室里生长 56 d 后,接种病原菌前 3 d 将 20 mL 菌株 HMQ20YJ11 发酵液(活菌浓度 10^8 CFU/mL)分别浇入植株根部的园艺土壤,防止多余的液体从苗盘底部流出。清水、枯草芽孢杆菌、氟啶胺分别作为空白对照和阳性对照采用与上述相同的处理方法处理植株。每处理重复 3 次,共 30 株。用移液管取 10 mL *P. capsici* 接种物(1×10^5 孢子囊/mL)浇入每个植株根部的园艺土壤中。将接种后的植物放置在生长室中,保持湿度超过 90%,温度控制在 20~30 $^{\circ}$ C。在接种病原菌后的第 7 天调查病情级数,计算防控效果。病情分级标准:0 级为健康无症;1 级为幼苗根茎部轻微变黑,叶片不萎焉

或可恢复性萎焉;2 级为幼苗根茎部变黑达 1~2 cm,叶片不可恢复性萎焉,下部叶片偶有脱落;3 级为幼苗根茎部变黑超过 2 cm,叶片明显萎焉或脱落;4 级为幼苗根茎部变黑缢缩,除生长点外全部落叶或植株萎焉;5 级为全株枯死。

1.2.6 生防细菌对辣椒疫病的盆栽防控效果测定 如 1.2.5 所述方法处理辣椒种子。将种子播种在装满园艺土壤的 105 孔苗盘里,每孔播 1 粒种子。幼苗生长在无病虫的温度控制在 20~30 $^{\circ}$ C 的温室里 28 d 后,移栽到装满园艺土壤的塑料盆中(直径 10 cm),继续在无病虫、温度控制在 20~30 $^{\circ}$ C 的温室里生长 28 d。在接种病原菌前 3 d 和 4 h,将 50 mL 菌株 HMQ20YJ11 发酵液(活菌浓度 10^8 CFU/mL)分别浇入植株根部的园艺土壤,防止多余的液体从塑料盆底部流出。清水、枯草芽孢杆菌和氟啶胺分别作为空白对照和阳性对照采用与上述相同的方法处理植株。每处理重复 3 次,共 30 株。用移液管取 10 mL *P. capsici* 接种物(1×10^5 孢子囊/mL)浇入到每个植株根部的园艺土壤中。接种后的植物置于生长室中,保持湿度超过 90%,温度控制为 20~30 $^{\circ}$ C。在接种病原菌后的第 14 天调查病情级数,计算防控效果。病情分级标准同上。

1.2.7 生防细菌对辣椒疫病的田间防控效果 测定 2021 年辣椒生长季,在甘肃省农业科学院植物保护研究所兰州试验站进行人工接种田间试验,测定菌株 HMQ20YJ11 对辣椒疫病的防治效果。如上所述准备菌株 HMQ20YJ11 发酵液和辣椒幼苗。5 月 17 日,将辣椒幼苗(苗龄 63 d)分别移栽到 300 m² 试验地,行、株距分别为 50、30 cm。处理设定菌株为 HMQ20YJ11、枯草芽孢杆菌、氟啶胺和清水(空白对照),进行随机区组试验,每个处理重复 3 次。8 月 1 日、8 日、15 日,将 100 mL 菌株 HMQ20YJ11 发酵液(活菌浓度 10^8 CFU/mL)、枯草芽孢杆菌和氟啶胺(依照供应商推荐的剂量)和清水分别浇入植株根部。8 月 15 日,将 10 mL *P. capsici* 接种物(1×10^5 孢子囊/mL)浇入到每个植株根部周围土壤中。在接种病原菌后的第 15 d 调查病情级数,计算防控效果。病情分级标准:0 级为

表 1 基因扩增的 PCR 通用引物

目的基因	引物	序列 (5'-3')	退火温度/ $^{\circ}$ C
16S rRNA	27F	AGAGTTTGATCCTGGCTCAG	55
	1492R	GGTTACCTTGTTACGACTT	
<i>gyrA</i>	<i>gyrA</i> -F	CAGTCAGGAAATGCGTACGTCCTT	58
	<i>gyrA</i> -R	CAAGGTAATGCTCCAGGCATTGCT	
<i>gyrB</i>	UP1	GAAGTCATCATGACCGTTCTGCAYGCNGGNGGNAARTTYGA	60
	UP2r	AGCAGGGTACGGATGTGCGAGCCRTCACRTCCNGTCAT	

健康无症; 1 级为地上部仅叶、果有病斑; 2 级为地上茎、枝有褐腐斑; 3 级为茎基部有褐腐斑; 4 级为地上茎、枝与茎基部均有褐腐斑, 并且部分枝条枯死; 5 级为全株枯死。

2 结果与分析

2.1 菌株 HMQ20YJ11 的筛选和拮抗能力

根据宏观形态特征, 从盐碱化土壤中选择性分离出 42 株细菌。通过平板对峙培养法筛选和测定所有细菌菌株对 9 种植物病原菌菌丝生长的抑制能力 (表 2)。筛选得到 6 个最有效的拮抗菌株, 其中菌株 HMQ20YJ11 拮抗能力最强, 选择该菌株进一步研究。菌株 HMQ20YJ11 对灰葡萄孢菌、松针刺盘孢菌、禾谷镰刀菌、尖孢镰刀菌、茄病镰刀菌、轮枝镰刀菌、辣椒疫霉菌、立枯丝核菌和核盘菌的抑制率分别为 63.72%、48.53%、46.56%、42.07%、57.40%、63.04%、44.52%、54.38%、53.84%, 抑菌带宽分别为 7.77、5.88、2.92、5.69、4.69、4.38、6.84、9.49、9.52 mm。

表 2 菌株 HMQ20YJ11 对多种植物病原菌的拮抗能力

植物病原菌	抑菌带 /mm	抑菌率 /%
灰葡萄孢菌	7.77±0.26	63.72
松针刺盘孢菌	5.88±0.18	48.53
禾谷镰刀菌	2.92±0.05	46.56
尖孢镰刀菌	5.69±0.08	42.07
茄病镰刀菌	4.69±0.34	57.40
轮枝镰刀菌	4.38±0.43	63.04
辣椒疫霉菌	6.84±0.15	44.52
立枯丝核菌	9.49±0.67	54.38
核盘菌	9.52±0.52	53.84

2.2 菌株 HMQ20YJ11 鉴定

通过 16S rRNA 基因、*gyrA* 基因和 *gyrB* 基因序列分析, 菌株 HMQ20YJ11 与萎缩芽孢杆菌序列相似性最高, 形成了一个独立的类群 (图 1), 据此将菌株 HMQ20YJ11 鉴定为萎缩芽孢杆菌。

2.3 菌株 HMQ20YJ11 的离体防病促生相关活性

在 1% 羧甲基纤维素和 7% 脱脂牛奶的培养基中, 接种点周围形成清晰的光晕, 表明该菌株产生纤维素酶和蛋白酶。在淀粉琼脂平板上接种点周围形成清晰的光晕, 表明该菌株产生 α -淀粉酶。菌株 HMQ20YJ11 在添加 1% 果胶的基础培养基中接种点周围形成明显的光晕, 表明其产生果胶酶。在铬 azurol S (CAS) 试验中, 7 d 后, 它在培养基中产生橙色晕, 表明产生了铁载体。菌株 HMQ20YJ11 在含磷酸三钙的 PVK 固体培养基中接种点周围形成清晰的光晕, 表明该菌株具有溶解磷的能力。从奈斯勒试剂颜色变化可以看出, 菌株 HMQ20YJ11 产生氨。比色法检测 IAA 的结果表明, 菌株

HMQ20YJ11 在添加 L-色氨酸的液体培养基中生长 72 h 后, 产生了浓度为 31.37 $\mu\text{g/mL}$ 的 IAA (图 2)。

2.4 温室试验评价菌株 HMQ20YJ11 的防病效果

采用苗盘试验和盆栽试验观察了菌株 HMQ20YJ11 对辣椒疫病的防控效果。可以看出,

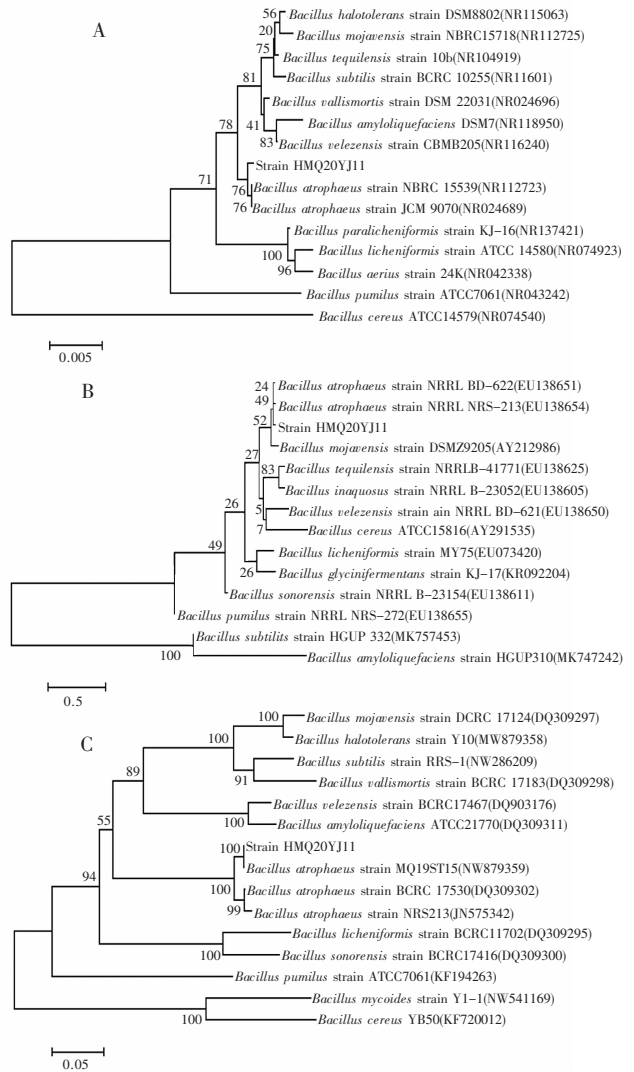
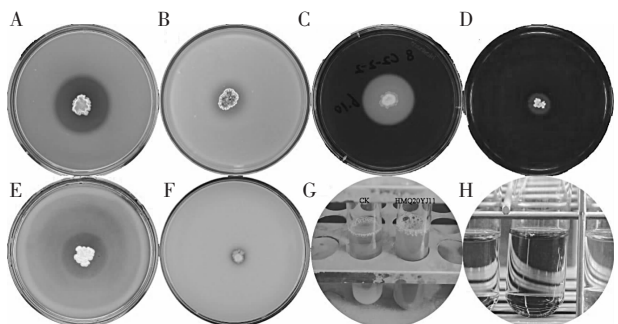


图 1 基于 16S rRNA 基因 (A)、*gyrA* 基因 (B) 和 *gyrB* 基因 (C) 序列构建的菌株 HMQ20YJ11 系统发育树



A 为蛋白酶; B 为 α -淀粉酶; C 为果胶酶; D 为铁载体; E 为纤维素酶; F 为磷酸盐溶解; G 为 NH_3 ; H 为 IAA

图 2 菌株 HMQ20YJ11 产生防病促生相关特性物质

经菌株 HMQ20YJ11 发酵液处理的辣椒植株病害严重程度显著低于未处理, 其效果优于生物杀菌剂枯草芽孢杆菌。菌株 HMQ20YJ11 发酵液处理的防控率分别为 52.59%、56.42%, 枯草芽孢杆菌处理的防控率分别为 28.45%、34.84%, 氟啶胺处理的防控率分别为 14.81%、77.42%(图 3)。

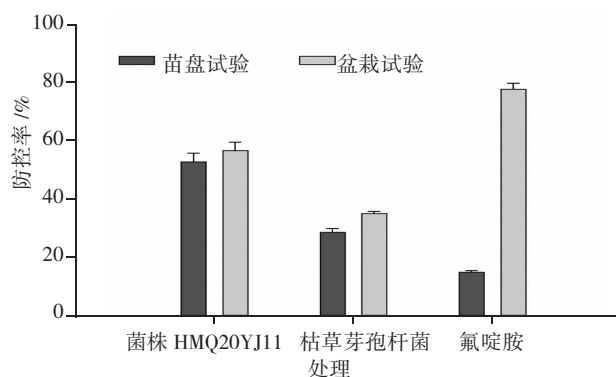


图 3 菌株 HMQ20YJ11 对辣椒疫病的苗盘试验和盆栽试验防控效果

2.5 田间试验评价菌株 HMQ20YJ11 的防病效果

从人工接种田间试验测定菌株 HMQ20YJ11 对辣椒疫病的防治效果可以看出, 接种辣椒疫霉菌后第 15 天, 菌株 HMQ20YJ11 对辣椒疫病的防控效果为 $(66.58 \pm 1.82)\%$, 枯草芽孢杆菌和氟啶胺的防控效果分别为 $(34.29 \pm 3.40)\%$ 、 $(81.39 \pm 2.67)\%$ (图 4)。

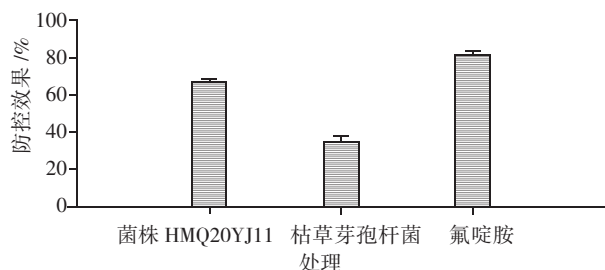


图 4 菌株 HMQ20YJ11 对辣椒疫病的田间试验防控效果

3 讨论与结论

农作物生产需要保护作物免受病原菌的危害, 否则会降低产量和质量。目前, 为了避免和控制病原菌, 种植者通常在很大程度上依赖化学药剂, 然而, 化学药剂的广泛使用会造成各种负面影响。因此, 取而代之的是更环保、更安全的植物保护方法, 特别是利用有益微生物的生物防治方法^[20]。在这些有益微生物中, 芽孢杆菌占主导地位, 越来越多的菌株被用作不同作物的生物肥料或生物农药。本研究从甘肃民勤县盐碱化地块土壤中分离到 1 株潜在的萎蔫芽孢杆菌 HMQ20YJ11。平板对峙培养试验表明, 菌株 HMQ20YJ11 对灰葡萄孢

菌、松针刺盘孢菌、禾谷镰刀菌、尖孢镰刀菌、茄病镰刀菌、轮枝镰刀菌、辣椒疫霉菌、立枯丝核菌和核盘菌的菌丝生长有较强的抑制作用。此外, 菌株 HMQ20YJ11 可产生水解酶, 如纤维素酶、蛋白酶、 α -淀粉酶、果胶酶和铁载体, 以及具有溶解磷酸盐的能力, 这是拮抗细菌的共同特征^[21]。菌株 HMQ20YJ11 对植物病原菌的抑制作用可能与纤维素酶、蛋白酶、 α -淀粉酶、果胶酶和铁载体等酶复合物的作用有关。芽孢杆菌产生纤维素酶、蛋白酶、果胶酶和铁载体, 使菌丝破裂和变形, 导致细胞结构和功能的改变^[22-24]。此外, 本研究分离到的菌株 HMQ20YJ11 也具有多种促生特性, IAA 能显著促进植物生长。溶解磷酸盐能有效增加植物对磷的吸收, 促进根系发育; 铁载体是由微生物产生的铁螯合物, 对作物生长至关重要。产生铁载体的细菌通过限制病原菌的铁供应来减缓病原菌的生长^[25]。因此, 菌株 HMQ20YJ11 可控制辣椒疫病, 促进辣椒植株生长。

田间试验结果表明, 菌株 HMQ20YJ11 显著降低了辣椒疫病的发病率, 防控效果优于枯草芽孢杆菌。然而, 温室试验和田间试验结果都表明, 拮抗微生物对病害发生率的影响不同, 菌株 HMQ20YJ11 优于枯草芽孢杆菌和氟啶胺。因此, 筛选具有抑病促生作用的拮抗微生物是提高辣椒生长和产量的有效措施。然而, 基本的环境条件, 如温度和湿度, 会极大地影响植物、病原菌和微生物菌剂之间的相互作用, 这些影响都可能影响生物防治的效果^[26-27]。综上所述, 菌株 HMQ20YJ11 对辣椒疫病具有较好的防控效果, 该菌株的应用可为辣椒疫病的生物防治提供支持。

参考文献:

- [1] 王兰兰. 甘肃辣椒育种工作现状及发展建议[J]. 甘肃农业科技, 2021, 52(3): 74-79.
- [2] 王学强, 李波, 米兴旺. 辣椒新品种强丰 103 选育报告[J]. 甘肃农业科技, 2021, 52(5): 1-3.
- [3] 李平, 魏建荣, 唐宗云, 等. 设施育苗辣椒早疫病病株空间分布型及其抽样技术研究[J]. 甘肃农业科技, 2021, 52(10): 31-34.
- [4] KASHYAP B K, SOLANKI M K, PANDEY A K, et al. Bacillus as plant growth promoting rhizobacteria (PGPR): a promising green agriculture technology[M]. In: ANSARI R A, MAHMOOD I (eds). Plant health under biotic stress. Springer Singapore, Singapore, 2019, 219-236.
- [5] KUMARI B, MALLICK M A, SOLANKI M K, et al. Plant growth promoting rhizobacteria (PGPR): modern prospects

- for sustainable agriculture[M]. In: ANSARI R A, MAHMOOD I (eds). Plant health under biotic stress. Springer Singapore, Singapore, 2019, 109–127.
- [6] GORAI P S, GHOSH R, KONRA S, et al. Biological control of early blight disease of potato caused by *Alternaria alternata* EBP3 by an endophytic bacterial strain *Bacillus velezensis* SEB1 [J]. *Biological Control*, 2021, 156: 104551.
- [7] PIRTILÄ A M, MOHAMMAD P T H, BARUAH N, et al. Biofertilizers and biocontrol agents for agriculture: How to identify and develop new potent microbial strains and traits[J]. *Microorganisms*, 2021, 9: 817.
- [8] BACKER R, ROKEM J S, ILANGUMARAN G, et al. Plant growth-promoting rhizobacteria: context, mechanisms of action, and roadmap to commercialization of biostimulants for sustainable agriculture[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2018, 9: 1473.
- [9] BALDERAS-RUÍZ K A, GÓMEZ-GUERRERO C I, TRUJILLO-ROLDÁN M A, et al. *Bacillus velezensis* 83 increases productivity and quality of tomato (*Solanum lycopersicum* L.): Pre and postharvest assessment [J]. *Current Research in Microbial Sciences*, 2021, 2: 100076.
- [10] POVEDA J, GONZÁLEZ-ANDRÉS F. *Bacillus* as a source of phytohormones for use in agriculture[J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2021, 105: 8629–8645.
- [11] FIRA D, DIMKIĆ I, BERIĆ T, et al. Biological control of plant pathogens by *Bacillus* species[J]. *Journal of Biotechnology*, 2018, 285: 44–55.
- [12] LI H X, CAI X X, GONG J Y, et al. Long-term organic farming manipulated rhizospheric microbiome and *Bacillus* antagonism against pepper blight (*Phytophthora capsici*)[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2019, 10: 342.
- [13] BATISTA B D, LACAVALA P T, FERRARI A, et al. Screening of tropically derived, multi-trait plant growth-promoting rhizobacteria and evaluation of corn and soybean colonization ability [J]. *Microbiological Research*, 2018, 206: 33–42.
- [14] XU S J, KIM B S. Biocontrol of *Fusarium* crown and root rot and promotion of growth of tomato by *Paenibacillus* strains isolated from soil[J]. *Mycobiology*, 2014, 42: 158–166.
- [15] DINESH R, ANANDARAI M, KUMAR A, et al. Isolation, characterization, and evaluation of multi-trait plant growth promoting rhizobacteria for their growth promoting and disease suppressing effects on ginger [J]. *Microbiological Research*, 2015, 173: 34–43.
- [16] DEY R, PAL K K, BHATT D M, et al. Growth promotion and yield enhancement of peanut (*Arachis hypogaea* L.) by application of plant growth-promoting rhizobacteria[J]. *Microbiological Research*, 2004, 159: 371–394.
- [17] BRIC J M, BOSTOCK R M, SILVERSTONE S E. Rapid in situ assay for indoleacetic acid production by bacteria immobilized on anitrocellulose membrane[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1991, 57: 535–538.
- [18] SCHWYN B, NEILANDS J B. Universal chemical assay for the detection and determination of siderophores [J]. *Analytical Biochemistry*, 1987, 160: 47–56.
- [19] KUMAR RS, AYYADURAI N, PANDIARAJA P, et al. Characterization of antifungal metabolite produced by a new strain *Pseudomonas aeruginosa* PUPa3 that exhibits broad-spectrum antifungal activity and biofertilizing traits [J]. *Journal of Applied Microbiology*, 2005, 98: 145–154.
- [20] BHATTACHARYYA P N, JHA D K. Plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR): emergence in agriculture [J]. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 2012, 28: 1327–1350.
- [21] BELBAHRI L, CHENARI BOUKET A, REKIK I, et al. Comparative genomics of *Bacillus amyloliquefaciens* strains reveals a core genome with traits for habitat adaptation and a secondary metabolites rich accessory genome[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2017, 8: 1438.
- [22] BEN-KHEDHER S, KILANI-FEKI O, DAMMAK M, et al. Efficacy of *Bacillus subtilis* V26 as a biological control agent against *Rhizoctonia solani* on potato [J]. *Comptes Rendus Biologies*, 2015, 338: 784–792.
- [23] HAN Y, ZHANG B, SHEN Q, et al. Purification and identification of two antifungal cyclic peptides produced by *Bacillus amyloliquefaciens* L-H15[J]. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 2015, 176: 2202–2212.
- [24] NARENDRA-BABU A, JOGAIHAH S, ITO S I, et al. Improvement of growth, fruit weight and early blight disease protection of tomato plants by rhizosphere bacteria is correlated with their beneficial traits and induced biosynthesis of antioxidant peroxidase and polyphenol oxidase[J]. *Plant Science*, 2015, 231: 62–73.
- [25] NABILA N, KASIAMDARI R S. Antagonistic activity of siderophore-producing bacteria from black rice rhizosphere against rice blast fungus *Pyricularia oryzae* [J]. *Microbiology and Biotechnology Letters*, 2021, 49: 217–224.
- [26] VACHERON J, DESBROSSES G, BOUFFAUD M L, et al. Plant growth promoting rhizobacteria and root system functioning[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2013, 4: 356.
- [27] XU SJ, HONG SJ, CHOI W, et al. Antifungal activity of *Paenibacillus kribbensis* strain T-9 isolated from soils against several plant pathogenic fungi [J]. *The Plant Pathology Journal*, 2014, 30: 102–108.