

高园园, 李思琦, 谭 贺, 等. 一株生防真菌 JX1 的分离鉴定及其对大蒜产量和土壤酚酸类物质的影响[J]. 江苏农业学报, 2025, 41(12): 2341-2349.

doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2025.12.007

一株生防真菌 JX1 的分离鉴定及其对大蒜产量和土壤酚酸类物质的影响

高园园¹, 李思琦¹, 谭 贺¹, 朱春雨¹, 贺俊亚¹, 冯雯杰¹, 刘国伟¹, 吕 尧², 任艳云¹
(1. 济宁市农业科学研究院, 山东 济宁 272031; 2. 山东农业大学园艺科学与工程学院, 山东 泰安 271018)

摘要: 大蒜根腐病是大蒜生产中最严重的病害之一, 严重影响大蒜的产量和品质。生防微生物因具有对环境友好、无害、促生、增产等优点而备受关注。本研究以实验室前期分离的大蒜根腐病主要病原菌尖孢镰刀菌(*Fusarium oxysporum*)为供试菌株, 筛选获得对大蒜根腐病具有较好拮抗效果的菌株 JX1, 经形态学和分子生物学鉴定为黄孢原毛平革菌(*Phanerochaete chrysosporium*)。菌株 JX1 对大蒜根腐病的田间防效达 56.13%, 菌株 JX1 灌根处理的大蒜产量(鲜重)比对照显著增加。在金乡、嘉祥、济宁农业科学研究院试验基地, 黄孢原毛平革菌对邻苯二甲酸、苯甲酸、邻香豆酸及阿魏酸等化感物质均具有较强的降解能力, 在金乡试验地降解效果最好, 对邻苯二甲酸和苯甲酸的降解率均在 65.00% 以上。本研究结果为大蒜病害的生态防控及土壤连作障碍的生态修复提供了理论支撑。

关键词: 大蒜根腐病; 生物防治; 黄孢原毛平革菌; 酚酸类物质

中图分类号: S633.4; S476 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2025)12-2341-09

Isolation and identification of a biocontrol fungus JX1 and its effects on garlic yield and soil phenolic acids

GAO Yuanyuan¹, LI Siqu¹, TAN He¹, ZHU Chunyu¹, HE Junya¹, FENG Wenjie¹, LIU Guowei¹, LYU Yao², REN Yanyun¹

(1. Jining Academy of Agricultural Science, Jining 272031, China; 2. College of Horticultural Science and Engineering, Shandong Agricultural University, Tai'an 271018, China)

Abstract: Garlic root rot is one of the most serious diseases in garlic producing areas, which seriously affects the yield and quality of garlic. Biocontrol microorganisms have attracted much attention because of their advantages of being friendly to environment, harmless to people and promoting crop growth and increasing yield. In this study, *Fusarium oxysporum*, the main pathogen of garlic root rot isolated in the laboratory, was used as the test strain, and JX1, which had a good antagonistic effect on garlic root rot disease, was screened and identified as *Phanerochaete chrysosporium* by morphology and molecular biology. The field control effect of strain JX1 on garlic root rot was 56.13%, and the yield (fresh weight) of garlic treated with strain JX1 through root drench was significantly higher than that of the control. In the experimental bases of

收稿日期: 2025-01-10

基金项目: 国家特色蔬菜产业技术体系项目(CARS-24-G-11); 2022年济宁市重点研发计划项目(2022NYNS025)

作者简介: 高园园(1982-), 女, 山东东平人, 硕士, 高级农艺师, 主要从事大蒜育种与生物防治工作。(E-mail) zgy_115@163.com

通讯作者: 任艳云, (E-mail) renyanyun@126.com

Jinxiang, Jiexiang and Jining Academy of Agricultural Sciences, *Phanerochaete chrysosporium* had strong ability to degrade phthalic acid, benzoic acid, *o*-coumaric acid, ferulic acid and other allelopathic substances. The degradation effect was the best in the Jinxiang experimental site. The degradation rate of phthalic acid and benzoic acid was above 65.00%. The research results provide theoretical

support for the ecological control of garlic diseases and the ecological restoration of soil continuous cropping obstacles.

Key words: garlic root rot; biological control; *Phanerochaete chrysosporium*; phenolic acids

大蒜(*Allium sativum* L.)是百合科葱属多年生植物,具有重要的营养价值和药用价值,在世界各地被广泛种植^[1-3]。中国是大蒜种植面积最大的国家^[4]。金乡作为中国大蒜之乡,大蒜常年种植面积约 4×10^4 hm²,是当地重要的出口创汇的农产品^[5]。由于常年连作,大蒜种植过程中出现生长势弱、病害严重、土壤质量下降等问题,严重影响大蒜的产量和品质^[6-7]。

根腐病是大蒜最严重的病害之一,尖孢镰刀菌(*Fusarium oxysporum*)是其主要致病菌,可侵染植株根系及鳞茎组织。根腐病在大蒜的各生育期均有发生,在世界范围内造成大蒜鳞茎 60% 的产量损失^[8-9]。目前生产上根腐病的防治过度依赖化学农药,从而导致病原菌抗性增强、农残增加及环境污染等问题,在一定程度上制约着大蒜产业的绿色健康发展^[10]。

生物防治具有环境友好性、生态安全性、多重作用机制和作物促生效应等综合优势,成为现代农业绿色发展极具潜力的植物病害防控策略^[11]。目前关于大蒜病害生防细菌和放线菌筛选方面的研究已有报道。杨冬静等^[12]从土壤中分离筛选到 1 株对大蒜叶枯病菌具有较强的拮抗活性的解淀粉芽孢杆菌 XZ-1。李佳暄等^[13]从大蒜种植土壤中分离得到 2 株对大蒜紫斑病有拮抗作用的贝莱斯芽孢杆菌 JS51 和 JS62,盆栽试验和大田试验的防治效果分别达到 61.63% 和 55.05%,与化学药剂咪鲜胺锰盐的防效相当。Cavalcanti 等^[14]的研究结果表明,部分拮抗微生物对菌核菌有一定的控制潜力,其中以解淀粉芽孢杆菌和短小芽孢杆菌为主,酵母菌中以假丝酵母为主。邬昊月等^[15]从海南海口椰树根际土壤中分离得到的生防链霉菌 HN5-13 对大蒜根腐病具有良好的抑制作用。张亚楠等^[16]筛选的暹罗芽孢杆菌 37402-1 对大蒜根腐病具有较好的拮抗效果,同时可以促进大蒜的单产提升。但国内关于生防真菌用于大蒜根腐病防治方面的研究较少。

本研究拟从大蒜健康植株中筛选获得对大蒜根腐病原菌具有较好抑制作用的生防真菌,明确其种类,进行田间应用效果评价,分析其对土壤酚酸类物质的降解效果,为下一步研究高效生物菌肥奠定

基础。本研究结果将丰富生防类菌种资源,为缓解大蒜连作障碍提供新的思路。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试病原菌为尖孢镰刀菌(*Fusarium oxysporum*)。该菌株系笔者前期从大蒜根腐病样本中分离筛选获得。供试大蒜品种为嘉祥紫皮蒜。真菌培养基为马铃薯蔗糖(PDA)培养基,培养所用温度为 28 ℃。

1.2 拮抗菌的筛选

采用组织分离法从大蒜鳞芽中分离真菌^[17]。从平板中挑取不同特征的菌落进行分离纯化,保存备用。拮抗菌筛选参考姚晨斌等^[18]的对峙培养法。在 PDA 平板距离圆心 2 cm 处接种大蒜根腐病原真菌,28 ℃ 培养 2 d 后,在同一直线距圆心反方向等距离处接种待测菌株,28 ℃ 继续培养 5~7 d,以只接种病原菌为对照,设置 3 次重复,测定抑菌直径,计算抑菌率。

1.3 拮抗真菌的鉴定

1.3.1 形态学鉴定 将筛选出的拮抗真菌于 28 ℃ 培养 5 d,观察菌落形态和菌体形态,参照《真菌鉴定手册》^[19]对菌株进行初步鉴定。

1.3.2 分子生物学鉴定 待测菌株的 DNA 提取采用真菌基因组 DNA 提取试剂盒进行。通用引物: ITS1 (5'-TCCGTAGGTGAACCTGCGG-3')、ITS4 (5'-TCCTCCGCTTATTGATATGC-3')。PCR 反应体系: DNA 模板 0.5 μL, 10×Buffer 2.5 μL, dNTP 1.0 μL, 酶 0.2 μL, 正反向引物各 0.5 μL, 加超纯水至 25.0 μL。反应条件: 94 ℃ 预变性 4 min; 94 ℃ 变性 45 s, 55 ℃ 退火 45 s, 72 ℃ 延伸 1 min, 30 个循环; 最后 72 ℃ 延伸 10 min。PCR 产物由生工生物工程(上海)股份有限公司进行测序。

1.3.3 构建系统发育树 从美国国家生物技术信息中心(NCBI)网站下载与待测菌株相似的序列进行比对,用邻接法(NJ)在 MEGA7.0 软件中构建系统发育树。

1.4 拮抗菌的田间防效试验

将菌株 JX1 接种到 PDA 液体培养基中,在 28

℃恒温摇床中于 180 r/min 培养 5 d,制成含量为 1×10^8 CFU/mL 的发酵液备用。枯草芽孢杆菌购自邢台思倍特生物科技有限公司,哈茨木霉菌购自北海业盛旺生物科技有限公司。

试验在济宁市农业科学研究院试验地进行,采用随机区组设计,小区面积 4 m^2 。设置 4 个处理,分别为清水对照、菌株 JX1 发酵液、枯草芽孢杆菌稀释液、哈茨木霉菌稀释液;每个处理 3 次重复。

试验在 3 月下旬大蒜返青期进行,每隔 7 d 灌根 1 次,施用量为 1 株 20 mL,共 3 次。最后 1 次施药后,间隔 7 d 调查大蒜根腐病发病情况。病害分级标准参考张博^[20]的方法,按公式(2)和公式(3)计算病情指数和发病率^[15]。

病情指数 = $\sum(\text{病级株数} \times \text{病级数}) / (\text{植株总数} \times \text{最高级数}) \times 100$ (2)

发病率 = $\text{发病株数} / \text{植株总株数} \times 100\%$ (3)

1.5 拮抗菌的田间促生试验

试验在济宁农业科学院试验地进行,种植大蒜品种为济蒜 1 号,采用随机区组设计,小区面积 4 m^2 ,设置 2 个处理:(1)清水对照(CK),(2)菌株 JX1 发酵液,每个处理 3 次重复。3 月底进行第 1 次灌根,每株 10 mL,每隔 7 d 灌根 1 次,共 4 次。在大蒜成熟期,每个小区选取 10 株大蒜进行株高、株幅、假茎高、假茎粗、根长、根数、鳞茎横径和鳞茎纵径等指标的测量,每个小区选取中间行的 30 头大蒜进行测产。

1.6 拮抗菌施用对大蒜根际土壤中酚酸类物质的影响

1.6.1 试验试剂 酚酸类物质(对羟基苯甲酸、邻香豆酸、苯甲酸、邻苯二甲酸、香草醛、阿魏酸、丁香酸等)标准品(上海源叶生物科技有限公司产品)、甲醇(分析纯,上海凌峰化学试剂有限公司产品)、甲酸(分析纯,南京化学试剂股份有限公司产品)、无水硫酸镁(分析纯,南京化学试剂股份有限公司产品)、氢氧化钠(分析纯,成都市科隆化学有限公司产品)、无水硫酸镁(分析纯,成都市科隆化学有限公司产品)、固相萃取(SPE)小柱(安捷伦科技有限公司产品)、色谱级甲醇和乙腈(德国默克集团产品)。

1.6.2 田间试验设计与土壤样品采集 试验分别在金乡县鸡黍镇(JS)、嘉祥县满硐镇(MD)、济宁农业科学院(NK)试验地进行,采用随机区组排列,每

个试验地均设置 2 种处理(表 1),分别为:①清水对照;②拮抗菌 JX1 发酵液(含量为 1×10^8 CFU/mL)灌根处理。每个处理设置 3 次重复,小区面积 4 m^2 。选取健康大蒜鳞芽进行种植,翌年 3 月底进行第 1 次灌根,每株 10 mL,每隔 7 d 灌根 1 次,共 4 次。在大蒜成熟期(5 月 10 日)采用“Z”形随机采集 0~20 cm 耕层的土壤样品,土样自然风干过筛后备用。

表 1 不同处理方式

Table 1 Different processing methods

处理编号	处理方式
JSCK	金乡县鸡黍镇清水对照
JSJX1	金乡县鸡黍镇拮抗菌 JX1 发酵液灌根处理
MDCK	嘉祥县满硐镇清水对照
MDJX1	嘉祥县满硐镇拮抗菌 JX1 发酵液灌根处理
NKCK	济宁农业科学院清水对照
NKJX1	济宁农业科学院拮抗菌 JX1 发酵液灌根处理

灌根处理 JX1 含量为 1×10^8 CFU/mL。

1.6.3 试验方法

1.6.3.1 酚酸类物质的提取 取 1 g 土壤样品,加入 5 mL 1 mol/L NaOH,在摇床上于 4 ℃ 提取 16 h;10 000 g 离心 5 min,取上清液,沉淀加 5 mL NaOH 超声 30 min;10 000 g 离心 5 min,取上清液,合并 2 次上清液;用浓盐酸将 pH 调节至 2.0,加入 5 mL 分析纯乙酸乙酯,在涡旋振荡器上涡旋 1 min 萃取,取上层乙酸乙酯相,萃取 3 次;收集乙酸乙酯相,加入 1 g 无水 MgSO_4 以去除其中残留的水分,10 000 g 离心 2 min,取上清液,用氮气吹干,用 0.4 mL 甲醇复溶,过 0.22 μm 滤膜,保存于 $-20 \text{ }^\circ\text{C}$ 冰箱中备用。

1.6.3.2 酚酸类物质含量的测定 利用安捷伦高效液相色谱仪(1260-6420A)测定标准溶液和土壤浸提液中的酚酸类物质含量。色谱柱为 Waters BEH C18 ($2.1 \text{ mm} \times 100.0 \text{ mm} \times 1.7 \mu\text{m}$);柱温为 30 ℃;流动相 A:0.1% (体积分数)甲酸,B:色谱甲醇,流速:0.3 mL/min,进样体积:1 μL 。液相梯度参数见表 2。质谱参数设置为:电喷雾离子源(ESI)负离子模式,多反应监测(MRM)扫描,气帘气压为 103.4 kPa,喷雾电压为 $-4\ 000 \text{ V}$,雾化气压为 448.2 kPa,辅助气压力为 482.6 kPa,雾化温度为 400 ℃。

表 2 液相梯度参数

Table 2 Gradient parameters of high performance liquid chromatography

液相洗脱时间(min)	流动相 A 占比(%)
0	20
1.0	20
3.0	50
9.0	80
10.5	80
10.6	20
13.5	/

/表示试验结束。

1.7 数据统计与分析

数据分析与处理采用 SPSS25.0 软件。

2 结果与分析

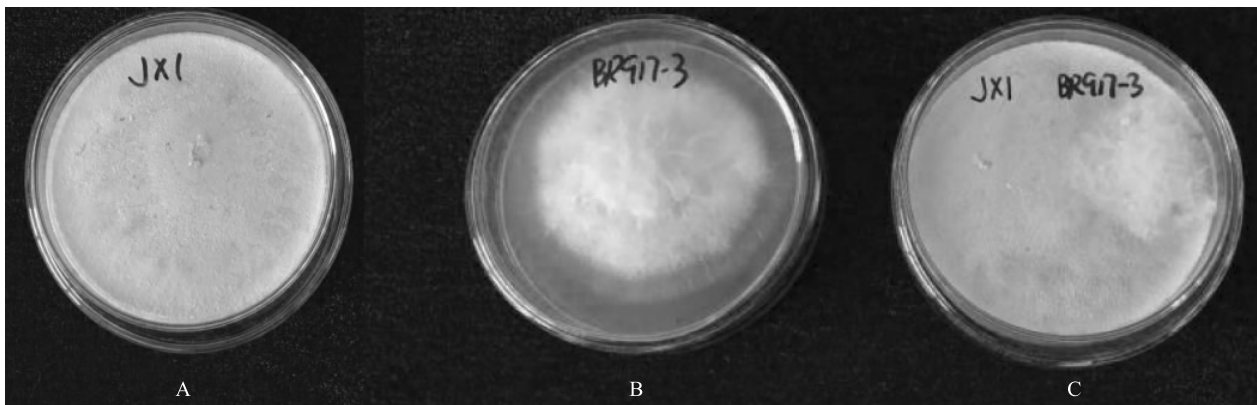
2.1 拮抗真菌的筛选

根据菌落形态特征,从平板中挑选单菌落进行分离培养。从大蒜鳞芽中仅分离得到 2 株真菌,通过对峙培养法筛选出菌株 JX1,对根腐病主要致病菌尖孢镰刀菌的抑菌效果较好,能明显抑制病原菌生长,抑菌效果如表 3、图 1 所示,处理菌落直径为 20 mm,抑菌率达 72.22%。

表 3 菌株 JX1 的抑菌效果

Table 3 The antifungal effect of strain JX1

菌株	对照菌落直径(mm)	处理菌落直径(mm)	抑菌率(%)
JX1	72	20	72.22



A: 菌株 JX1; B: 尖孢镰刀菌; C: 对峙培养。

图 1 菌株 JX1 对大蒜根腐病原菌的抑菌效果

Fig.1 Antibiotic effect of strain JX1 on garlic root rot

2.2 拮抗真菌的鉴定

菌落和菌体形态见图 2。菌株 JX1 的菌落正面呈白色,背面呈淡白黄色,在 28 ℃ 培养条件下菌丝生长旺盛,速度快,产生大量孢子,接种 4 d 后白色粉状物铺满整个平板。菌株 JX1 分生孢子呈卵圆形,两端钝圆光滑,分生孢子梗单生或丛生,分枝有 2~4 个产孢梗,顶部膨大,形成分生孢子,菌丝有直角分支,有隔膜。

采用琼脂糖凝胶电泳对 PCR 扩增产物进行检测,结果显示,目标条带大小为 614 bp。将菌株 JX1 的内转录间隔区(ITS)序列上传至 NCBI 网站进行比对,构建系统发育树。菌株 JX1 与黄孢原毛平革菌聚在一支(图 3),结合形态学特征,鉴定菌株 JX1

为毛平革菌属(*Phanerochaete*)黄孢原毛平革菌(*Phanerochaete chrysosporium*)。

2.3 拮抗菌的田间防治效果

田间防治效果试验结果(表 4)表明,与清水对照相比,供试的 3 种生防菌处理均能明显抑制大蒜根腐病的发生,枯草芽孢杆菌处理与哈茨木霉处理的根腐病发病率和田间防治效果接近,2 个处理间无显著差异;黄孢原毛平革菌 JX1 处理发病率显著低于枯草芽孢杆菌处理与哈茨木霉处理,黄孢原毛平革菌 JX1 处理大蒜根腐病防治效果达 56.13%,显著高于枯草芽孢杆菌处理与哈茨木霉处理,在 3 种生防菌处理中的防治效果最好。

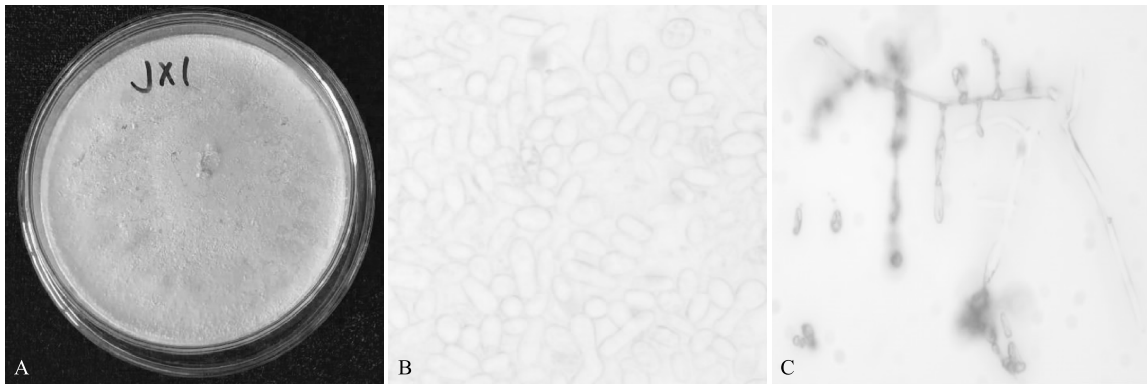


图 2 菌株 JX1 的菌落形态 (A) 和菌体显微观察形态 (B 和 C)

Fig.2 Colony morphology of strain JX1 (A) and microscopic morphology (B and C)

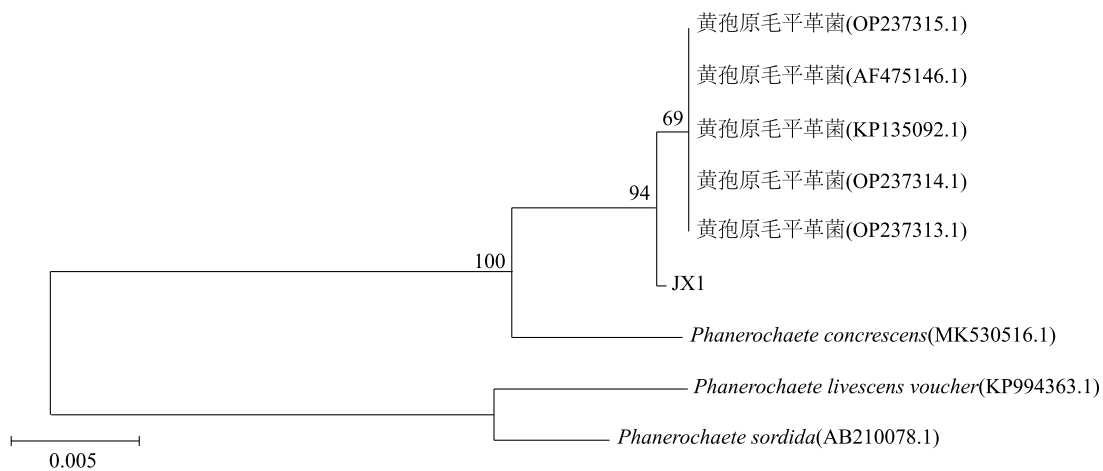


图 3 菌株 JX1 的系统发育树

Fig.3 Phylogenetic tree of strain JX1

表 4 不同菌剂处理对大蒜根腐病的防治效果

Table 4 Control efficacy of different treatments against garlic root rot

处理	病情指数	发病率 (%)	防治效果 (%)
CK	49.14a	81.67a	
JX1 菌液	12.89d	35.83c	56.13a
枯草芽孢杆菌	24.10c	45.00b	44.90b
哈茨木霉	27.20b	47.50b	41.84b

不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

2.4 拮抗菌田间促生试验结果

田间促生试验结果(表 5、图 4)表明,与对照相比,经过菌株 JX1 灌根处理的大蒜株高与株幅分别增加了 7.04% 和 9.53%, 差异均达到极显著水平; 大蒜植株假茎粗和根数分别比对照增加 21.38% 和

14.84%, 差异均达到极显著水平; 菌株 JX1 灌根处理的大蒜鲜重产量 29 741.40 kg/hm², 比对照显著增加 12.32%。综合各项生长发育指标可见, JX1 菌液的促生和增产作用较为显著, 具有良好的生防应用前景。

2.5 拮抗菌灌根处理对大蒜根际土壤中酚酸类物质含量的影响

采用高效液相色谱-串联质谱法对大蒜根际土壤酚酸类物质种类进行检测, 在 3 块试验地中均检出 7 种关键酚酸类化感物质: 对羟基苯甲酸、邻香豆酸、苯甲酸、邻苯二甲酸、香草醛、阿魏酸和丁香酸。上述酚酸类物质已被证实是引发连作障碍的主要化感因子。7 种酚酸类物质混合标准品的色谱如图 5 所示。通过高效液相色谱分析, 确定各酚酸类物质标准品的出峰顺序及保留时间, 并基于峰面积-浓度关系建立线性回归方程(表 6)。

表 5 菌株 JX1 对大蒜植株生长发育及产量的影响

Table 5 Effects of strain JX1 on growth, development and yield of garlic plants

处理	株高 (cm)	株幅 (cm)	假茎高 (cm)	假茎粗 (cm)	根长 (cm)	根数 (条)	鳞茎横径 (cm)	鳞茎纵径 (cm)	鲜重产量 (kg/hm ²)
对照	71.47	62.57	32.40	1.59	7.73	157.33	6.26	4.13	26 480.25
JX1	76.50 ^{**}	68.53 ^{**}	33.30	1.93 ^{**}	7.93	180.67 ^{**}	6.32	4.26 ^{**}	29 741.40 [*]

^{**}表示差异极显著($P < 0.01$); ^{*}表示差异显著($P < 0.05$)。

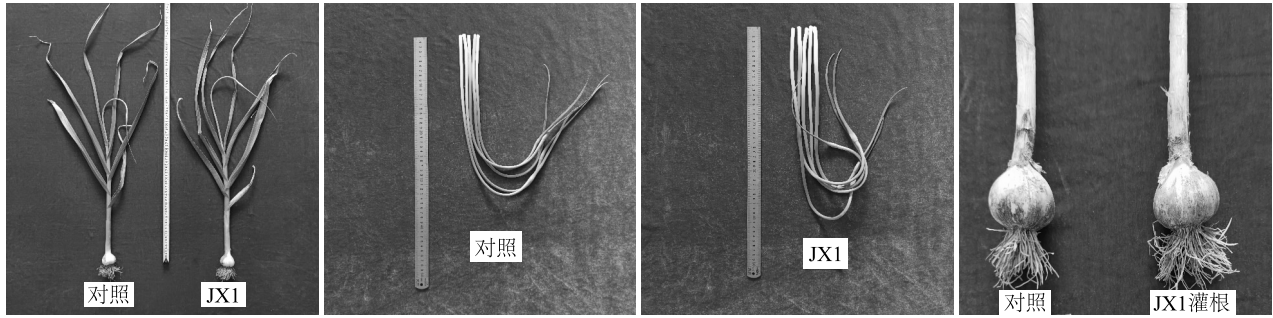


图 4 菌株 JX1 处理后的大蒜植株

Fig.4 Garlic plants treated with strain JX1

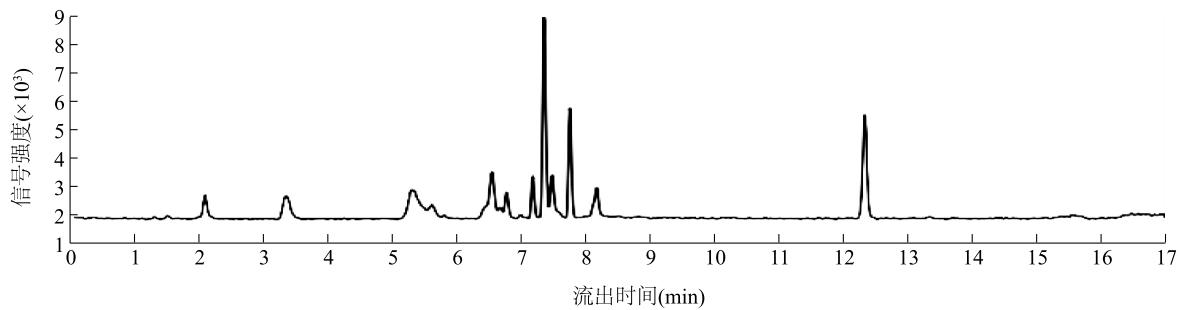


图 5 大蒜根际土壤中酚酸类物质标准品色谱图

Fig.5 Chromatographic diagram of phenolic acid standards in rhizosphere soil of garlic

表 6 大蒜根际土壤中酚酸类物质标准品的色谱结果

Table 6 Chromatographic results of phenolic acid standards in rhizosphere soil of garlic

出峰顺序	保留时间 (min)	酚酸类物质	线性回归方程	R ²
1	5.594	对羟基苯甲酸	$Y = 14.458 0x - 58.829 0$	0.999 6
2	6.427	邻苯二甲酸	$Y = 11.292 0x + 184.440 0$	0.999 3
3	6.440	苯甲酸	$Y = 2.217 3x + 112.870 0$	0.998 9
4	7.334	邻香豆酸	$Y = 112.090 0x + 4 129.100 0$	0.999 8
5	7.375	香草醛	$Y = 5.014 0x - 61.6770 0$	0.999 6
6	7.452	丁香酸	$Y = 0.736 4x - 0.929 0$	0.999 6
7	7.481	阿魏酸	$Y = 3.843 6x + 448.530 0$	0.999 7

由表 7 可知,接种黄孢原毛平革菌 JX1 能够改变大蒜根际土壤中酚酸类物质的含量。与对照相比,施入黄孢原毛平革菌 JX1 可极显著降低嘉祥试验地土

壤中邻苯二甲酸、苯甲酸、邻香豆酸、丁香酸的含量,对阿魏酸的降解率为 6.42%,但是对香草醛和对羟基苯甲酸未表现出降解效果。与对照相比,黄孢原毛平革菌 JX1 对金乡试验地土壤中的邻苯二甲酸和苯甲酸表现出极强的降解效果,降解率均在 65.00%以上,同时还可显著降低邻香豆酸和阿魏酸的含量,降解率分别为 12.84%和 12.82%,对丁香酸的降解率稍低。与对照相比,黄孢原毛平革菌 JX1 在济宁农业科学研究院试验地土壤中也表现出较强的降解能力,可显著或极显著降低对羟基苯甲酸、邻苯二甲酸、苯甲酸、香草醛的含量,对邻香豆酸和阿魏酸的降解效果不显著,对丁香酸的含量无明显影响。结果表明,施入黄孢原毛平革菌 JX1 能够有效降低土壤中酚酸类物质的含量,推测其降解效果可能与土壤本底酚酸类物质含量的高低存在相关性。

表 7 菌株 JX1 对大蒜根际土壤中酚酸类物质含量的影响

Table 7 Effects of strain JX1 on phenolic acids in rhizosphere soil of garlic

处理编号	对羟基苯甲酸含量 (ng/g)	邻苯二甲酸含量 (ng/g)	苯甲酸含量 (ng/g)	邻香豆酸含量 (ng/g)	香草醛含量 (ng/g)	阿魏酸含量 (ng/g)	丁香酸含量 (ng/g)
MDCK	360.22	698.94	476.95	1 137.71	99.09	519.85	231.21
MDJX1	363.16	522.24**	395.10**	909.86**	99.74	486.47	195.84**
JSCK	365.74	2 574.94	2 629.80	1 061.02	130.45	841.36	215.99
JSJX1	376.08	773.34**	897.25**	924.78*	131.53	733.49*	210.71
NKCK	696.02	1 111.25	840.48	1 781.18	185.88	1 241.91	468.55
NKJX1	634.35*	758.68**	480.69**	1 671.17	147.33**	1 201.83	500.66

MDCK、MDJX1、JSCK、JSJX1、NKCK、NKJX1 见表 1。**表示差异极显著($P < 0.01$), *表示差异显著($P < 0.05$)。

3 讨论

本研究筛选出 1 株具有较好拮抗效果的真菌 JX1, 鉴定菌株 JX1 为黄孢原毛平革菌 (*Phanerochaete chrysosporium*)。目前有关黄孢原毛平革菌应用的文献报道主要集中在木质降解和废水处理、土壤连作障碍修复等方面。范晓娟等^[21]研究发现黄孢原毛平革菌可以显著提高水葫芦的厌氧发酵效果。黄慧等^[22]将筛选出的黄孢原毛平革菌接种在粒度为 4~5 cm 的玉米秸秆上 35 d 后的降解效果最佳。黎想等^[23]的研究结果表明, 以酒石酸铵作为氮源, 接种量为 10 g/L, 废水温度为 25~35 ℃, pH 为 4~5, 黄孢原毛平革菌对果胶废水的果胶和化学需氧量 (COD) 的去除效率均在 80% 以上。金令凯等^[24]研究发现白腐真菌 *Phanerochaete chrysosporium*-gs075 对蒽醌染料活性艳蓝 KN-R 脱色率达 95% 以上, 染料对植物的毒害作用显著减轻。赵美花等^[25]的研究结果表明, 菌株 BKMF-1767 在温度为 30 ℃、接种量为 1%、Cd²⁺ 初始含量为 50 mg/L 的处理条件下, 对镉的去除率可达 64% 左右。张朝晖等^[26]研究发现, 优化葡萄糖加入量可以提高黄孢原毛平革菌对废水降解脱色的效果。李慧^[27]研究发现, 在模拟室外大田环境中, 黄孢原毛平革菌厚垣孢子加入土壤中对阿特拉津的降解率达到 80%~90%, 从而达到对污染土壤修复的目标。

黄孢原毛平革菌 (*Phanerochaete chrysosporium*) 属于担子菌纲非褶菌目伏革菌科原毛平革属, 是白腐真菌典型菌种。近年来, 关于黄孢原毛平革菌在植物病害防治应用方面的研究较多, Liu 等^[28]开展了黄孢原毛平革菌对小麦冠腐病的生物防治潜力研究, 发现黄孢原毛平革菌不仅能促进小麦的生长和

品质改良, 还能阻碍禾谷镰刀菌在小麦幼苗中的定殖, 降低病害发病率。杜宾^[29]研究发现, 黄孢原毛平革菌 B22 具有防治根结线虫和促进植物生长的特性。此外, 白腐菌在缓解由尖孢菌引起的切花菊枯萎病方面的有效性已得到证实^[30]。但是, 目前关于黄孢原毛平革菌作为生防菌在大蒜上应用的研究鲜有报道。

大蒜根系分泌物逐年累积产生的自毒作用, 是造成连作障碍的关键因素, 其中酚酸类物质作为根系分泌的关键化感组分发挥着重要作用^[31]。已有研究结果证明黄孢原毛平革菌对多种酚酸类物质具有降解作用。徐淑霞等^[32]在黄瓜土壤中施入黄孢原毛平革菌菌剂后, 酚酸类物质的降解率为 54.46%, 在一定程度上减轻了黄瓜连作障碍。李华玮等^[33]将黄孢原毛平革菌与酚酸类物质共存培养 3 d 后, 对香草酸、阿魏酸、对羟基苯甲酸的降解效果为 58.20%~98.39%, 降解效果显著。本研究结果与前人研究结果一致, 黄孢原毛平革菌对大蒜根际酚酸类化感物质表现出较强的降解能力, 其降解机理在于黄孢原毛平革菌在主要营养物受限制时能生成强大的酶系统, 并且对特定底物没有要求, 其中木素过氧化物酶和锰过氧化物酶对酚酸类化感物质具有广谱的降解作用^[34]。同时在田间试验中发现, 黄孢原毛平革菌 (*P. chrysosporium*) 对不同类型试验地和酚酸类物质的降解效率有所差异, 有待进行进一步试验分析其原因。

在黄孢原毛平革菌与尖孢镰刀菌对峙培养过程中, 黄孢原毛平革菌菌丝生长速度明显高于尖孢镰刀菌的生长速度, 培养 36 h 后, 黄孢原毛平革菌菌落直径能够达到 7.2 cm, 尖孢镰刀菌菌落直径仅为 2.0 cm, 当黄孢原毛平革菌接触到尖孢镰刀菌后, 尖

孢镰刀菌几乎不能正常生长,说明黄孢原毛平革菌与尖孢镰刀菌之间存在明显的营养竞争关系,黄孢原毛平革菌抑制了尖孢镰刀菌菌丝的生长和繁殖。在大蒜根际施入黄孢原毛平革菌后,根腐病害症状明显减轻。原因一方面是施入的黄孢原毛平革菌定殖于大蒜根际土壤中,与大蒜根腐病病原菌相互竞争,抑制病原菌的生长,从而达到生物防治的效果;另一方面,黄孢原毛平革菌对邻苯二甲酸、苯甲酸、邻香豆酸及阿魏酸等化感物质均具有较强的降解能力,减轻了酚酸类物质的自毒作用,增强了植株根系活力,提高了大蒜产量,对大蒜连作障碍的发生起到缓解、修复作用。

自然界存在的微生物资源种类丰富多样,随着研究人员对生防菌株资源的不断挖掘,其在农业领域的应用前景变得更为广阔^[35-36]。本研究筛选到的黄孢原毛平革菌菌株 JX1 既对大蒜根部病害有显著防治效果,又对邻苯二甲酸、苯甲酸、邻香豆酸及阿魏酸等酚酸类物质有显著降解效果,同时还具有促生增产作用,丰富了生防类菌种资源,为缓解大蒜连作障碍提供了新的思路。

参考文献:

- [1] 李乐溪,李丹,张亮,等. 大蒜内生菌的分离及拮抗菌株的筛选与鉴定[J]. 江苏农业科学,2018,46(5):97-101.
- [2] ZEWEDE T, FININSA C, SAKHUJA P K, et al. Association of white rot (*Sclerotium cepivorum*) of garlic with environmental factors and cultural practices in the North Shewa Highlands of Ethiopia[J]. Crop Protection,2007,26(10):1566-1573.
- [3] ZHANG B, ZHANG Y L, MA L G, et al. Identification of *Pythium* species as pathogens of garlic root rot[J]. Journal of Plant Pathology,2021,103(1):1-9.
- [4] 陈昆,刘世琦,张自坤,等. 钾素营养对大蒜生长、光合特性及品质的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2011,17(2):506-512.
- [5] 任东军,牛邦彦,尹彦舒,等. 大蒜根腐病病原菌 *Alternaria embellisia* DS55-6F 的分离鉴定及其生长特性研究[J]. 中国土壤与肥料,2022(11):223-229.
- [6] 张梦琦,陈云云,张熙,等. 多功能植物根际促生菌 DD3 的功能特性及对大蒜幼苗的促生效果[J]. 植物营养与肥料学报,2017,23(3):748-756.
- [7] 周洁,齐传东,吴金平,等. 恩施大蒜根腐病病原菌尖孢镰刀菌的生物学特性及室内药效试验[J]. 长江大学学报(自然科学版),2022,19(6):111-116.
- [8] DE SANTIS D, GARZOLI S, VETTRAINO A M. Effect of gaseous ozone treatment on the aroma and clove rot by *Fusarium proliferatum* during garlic postharvest storage[J]. Heliyon,2021,7(4):e06634.
- [9] CHAND S K, NANDA S, MISHRA R, et al. Multiple garlic (*Allium sativum* L.) microRNAs regulate the immunity against the basal rot fungus *Fusarium oxysporum* f. sp. *cepae* [J]. Plant Science,2017,257:9-21.
- [10] 谷玉铎,王树和,王盛豪,等. 核桃炭疽病生防菌的分离鉴定及生防潜力研究[J]. 中国生物防治学报,2024,40(5):1099-1112.
- [11] 姚锦爱,黄鹏,赖宝春,等. 贝莱斯芽胞杆菌 ZZBV-3 的鉴定及其对草莓根腐病的防效[J]. 中国生物防治学报,2021,37(1):172-177.
- [12] 杨冬静,张成玲,徐振,等. 一株解淀粉芽孢杆菌的分离鉴定及其生物学特性研究[J]. 江西农业学报,2017,29(9):69-74.
- [13] 李佳喧,马金骏,周冬梅,等. 大蒜紫斑病生防菌的筛选、鉴定及其田间应用[J]. 中国生物防治学报,2023,39(2):389-396.
- [14] CAVALCANTI V P, ARAÚJO N A F, MACHADO N B, et al. Yeasts and *Bacillus* spp. as potential biocontrol agents of *Sclerotinia sclerotiorum* in garlic[J]. Scientia Horticulturae,2020,261:108931.
- [15] 邹昊月,田琳,周旭,等. 生防链霉菌 HN5-13 的分离、筛选鉴定及其对大蒜根腐病的抑菌效果研究[J/OL]. 植物病理学报,2024 [2024-09-18]. <https://doi.org/10.13926/j.cnki.apps.000949>.
- [16] 张亚楠,王凯望,牛邦彦,等. 植物促生菌暹罗芽孢杆菌 37402-1 的功能特性及对大蒜的促生效果[J]. 中国土壤与肥料,2024(2):185-192.
- [17] 高园园,张龙平,任艳云,等. 山东省大蒜主产区根腐病病原菌分离与鉴定[J]. 江苏农业科学,2021,49(14):86-90.
- [18] 姚晨斌,李小杰,李琦,等. 烟草尖孢镰刀菌拮抗真菌的筛选鉴定及促生作用研究[J]. 中国生物防治学报,2021,37(5):1066-1072.
- [19] 魏景超. 真菌鉴定手册[M]. 上海:上海科学技术出版社,1979.
- [20] 张博. 山东省大蒜腐霉根腐病初步研究[D]. 乌鲁木齐:新疆农业大学,2008.
- [21] 范晓娟,朱红梅,韩士群,等. 白腐菌对水葫芦木质纤维素的降解及对厌氧发酵的影响[J]. 江苏农业学报,2013,29(5):1043-1050.
- [22] 黄慧,申源源,陈宏. 黄孢原毛平革菌对玉米秸秆木质素的降解研究[J]. 西南大学学报(自然科学版),2011,33(7):93-97.
- [23] 黎想,杨春平,郭俊元,等. 黄孢原毛平革菌处理果胶废水[J]. 环境工程学报,2014,8(6):2271-2276.
- [24] 金令凯,汪梦妮,叶梓沫,等. 黄孢原毛平革菌对 RBBR 脱色降解及其降解机制[J]. 菌物学报,2021,40(1):240-251.
- [25] 赵美花,张朝升,荣宏伟,等. 黄孢原毛平革菌对镉废水的处理效果及去除途径[J]. 中国给水排水,2018,34(3):72-76.
- [26] 张朝晖,夏黎明,林建平,等. 黄孢原毛平革菌对染料和印染废水的降解[J]. 应用与环境生物学报,2001,7(4):382-387.
- [27] 李慧. *Phanerochaete chrysosporium* 厚垣孢子的高产技术及在土壤修复中的应用[D]. 新乡:河南师范大学,2012.
- [28] LIU L, JIN Y Q, LIAN H J, et al. Exploring the biocontrol potential of *Phanerochaete chrysosporium* against wheat crown rot [J]. Journal of Fungi,2024,10(9):641.

- [29] 杜 宾. 黄孢原毛平革菌(*Phanerochaete chrysosporium*) B₂₂ 菌株对设施蔬菜根结线虫致死作用机制和应用研究[D]. 太原:山西农业大学, 2020.
- [30] LI P, CHEN J C, LI Y, et al. Possible mechanisms of control of *Fusarium* wilt of cut *Chrysanthemum* by *Phanerochaete chrysosporium* in continuous cropping fields; a case study[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1):15994.
- [31] 刘素慧, 刘世琦, 张自坤, 等. 大蒜根系分泌物对同属作物的抑制作用[J]. *中国农业科学*, 2011, 44(12):2625-2632.
- [32] 徐淑霞, 张世敏, 尤晓颜, 等. 黄孢原毛平革菌对黄瓜连作土壤酚酸物质的降解[J]. *应用生态学报*, 2008, 19(11):2480-2484.
- [33] 李华玮, 赵绪永, 李鹏坤. 作物连做障碍中酚酸类物质的生物降解研究[J]. *中国农学通报*, 2011, 27(18):168-173.
- [34] GU H P, YAN K, YOU Q, et al. Soil indigenous microorganisms weaken the synergy of *Massilia* sp. WF1 and *Phanerochaete chrysosporium* in phenanthrene biodegradation[J]. *The Science of the Total Environment*, 2021, 781:146655.
- [35] 王瑞飞, 孔盈利, 魏艺璇, 等. 菌剂对鸡粪-生物炭堆肥理化性质和微生物群落结构的影响[J]. *江苏农业学报*, 2023, 39(4):966-977.
- [36] 郑昕雨, 陈 鹏, 韩金吉, 等. 冻融循环对土壤团聚体与微生物特性影响研究进展[J]. *江苏农业学报*, 2023, 39(4):1080-1088.

(责任编辑:陈海霞)