

引用格式:

黄虹, 谭琳, 沈程文, 邓玉莲, 李桂花, 胡秋龙. 茶树根腐病拮抗细菌的筛选鉴定及其生防潜力[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2025, 51(1): 62–68.

HUANG H, TAN L, SHEN C W, DENG Y L, LI G H, HU Q L. Screening, identification and biocontrol potential of antagonistic bacteria against tea root rot[J]. Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences), 2025, 51(1): 62–68.

投稿网址: <http://xb.hunau.edu.cn>



茶树根腐病拮抗细菌的筛选鉴定及其生防潜力

黄虹^{1,2}, 谭琳³, 沈程文^{1,2}, 邓玉莲^{1,2}, 李桂花^{1,2}, 胡秋龙^{1,2*}

(1.茶学教育部重点实验室, 湖南 长沙 410128; 2.湖南农业大学园艺学院, 湖南 长沙 410128; 3.湖南农业大学植物保护学院, 湖南 长沙 410128)

摘要: 以茶树根腐病原菌(*Fusarium cugenangense*)为指示菌, 运用平板对峙法筛选分离感病根际土壤微生物, 获得1株拮抗效果最佳的细菌菌株TJ-1, 抑菌率可达74.67%; 通过生理生化试验以及16S rRNA测序, 鉴定菌株TJ-1为土地类芽孢杆菌(*Paenibacillus terrae*)。研究菌株TJ-1对病原菌菌丝生长的抑制效果、生长特性、产生的不同代谢物对病原菌的拮抗效果、对9种作物病原菌的拮抗效果及其促生潜力等, 结果表明, 拮抗菌TJ-1使病原菌菌丝缠绕萎缩, 分支部分变大; 拮抗菌生长至18 h进入稳定期; 生长最适 pH为 5~7, 在NaCl质量分数超过2%的条件下生长会受到明显抑制; 拮抗菌TJ-1对9种作物病原菌均有拮抗效果, 其中对茄子褐纹病原菌拮抗效果高达80.51%; 拮抗菌TJ-1产生的挥发性物质和非挥发性物质对病原菌都具有拮抗效果; 拮抗菌TJ-1具有溶解磷、固氮以及分泌铁载体等促生潜能。

关键词: 茶树根腐病; 尖孢镰刀菌; 拮抗菌; 土地类芽孢杆菌; 生物防治

中图分类号: S435.711

文献标志码: A

文章编号: 1007-1032(2025)01-0062-07

Screening, identification and biocontrol potential of antagonistic bacteria against tea root rot

HUANG Hong^{1,2}, TAN Lin³, SHEN Chengwen^{1,2}, DENG Yulian^{1,2}, LI Guihua^{1,2}, HU Qiulong^{1,2*}

(1.Key Laboratory of Tea Science of Ministry of Education, Changsha, Hunan 410128, China; 2.College of Horticulture, Hunan Agricultural University, Changsha, Hunan 410128, China; 3. College of Plant Protection, Hunan Agricultural University, Changsha, Hunan 410128, China)

Abstract: The *Fusarium cugenangense* (*F. cugenangense*) was used as indicators to screen the best antagonistic bacterial from rhizosphere soil of tea plants infected with root rot disease by plate confrontation method. Strain TJ-1 with the best antagonistic effect was obtained, and its antifungal rate was 74.67%. Strain TJ-1 was identified as *Paenibacillus terrae* by physiological and biochemical tests and 16S rRNA sequencing analysis. The inhibitory effect of strain TJ-1 on mycelia growth of *F. cugenangense*, the growth characteristics of strain TJ-1, the antagonistic effect of different metabolites of strain TJ-1 against *F. cugenangense*, the antagonistic effect of strain TJ-1 on other crop pathogens and the growth promoting potential of strain TJ-1 were further studied. The results showed that the antagonistic strain TJ-1 can cause entanglement and shrink of the mycelium of *F. cugenangense* and can enlarge the branch of the mycelium. After 18-hour-growth, the strain TJ-1 entered the stable phase. The optimal pH for strain TJ-1 is 5-7, and the growth was significantly inhibited in the environment containing more than 2% NaCl. The antagonistic strain TJ-1 has antagonistic effect on 9 kinds of crop

收稿日期: 2024-10-10

修回日期: 2024-12-18

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFD16000803-6); 湖南省重点研发计划项目(2022NK2051、2023NK2013); 湖南省科技创新重大项目(2021NK1020)

作者简介: 黄虹(2000—), 女, 湖南湘潭人, 硕士研究生, 主要从事茶树病害及其生物防治研究, huanghhhe@163.com; *通信作者, 胡秋龙, 博士, 副教授, 主要从事病原微生物与茶树互作、生防微生物资源利用研究, huqiulongnet@126.com

pathogens, and the antagonistic effect against *Phomopsis vexans* is up to 80.6%. Both volatile and non-volatile substances produced by antagonistic strain TJ-1 had antagonistic effect on *F. cugenangense*. The strain TJ-1 showed the ability of phosphorus dissolution, nitrogen fixation and iron production, indicating the strain has growth promoting potential.

Keywords: tea root rot; *Fusarium cugenangense*; antagonistic bacteria; *Paenibacillus terrae*; biological control

茶树根腐病在华南茶区最为普遍和严重^[1]。茶树根腐病由于发病部位隐蔽,在其侵染早期常不易被察觉。随着病情的发展,茶树根系腐烂发黑,部分须根脱落坏死,严重时可导致茶园大面积茶树死亡^[2]。有关茶树根腐病的防治研究主要集中在化学防治上,在生物防治方面研究较少。YANG 等^[3]在 2023 年首次报道尖孢镰刀菌(*Fusarium cugenangense*)可引起茶树根腐病。DHAR PURKAYASTHA 等^[4]从茶树根际分离的黏质沙雷氏菌(*Serratia marcescens*)对茶树根腐病具有生物防治效果,并发现该细菌产生多种水解酶和促进植物生长代谢物。黏质沙雷氏菌对茶树的 9 种不同的茶树叶部和根部病原菌具有显著的拮抗作用。MANJUKARUNAMBIKA 等^[5]对比化学药剂和生防药剂对茶树红根腐病的防治效果,发现假单胞菌和木霉生防剂的药效同化学药剂相当,且施用生防菌剂后茶叶产量和植株生长量均优于对照的。生产实践中,茶树根腐病的化学防治易杀死非靶标生物,导致茶园微生物减少,进而破坏茶园中生态系统的平衡^[6]。与化学防治相比,运用生物制剂,包括生物活体或其代谢产物杀灭有害生物^[7]的生物防治措施对环境危害低,具有可持续和环境友好的优点。笔者以茶树根腐病原菌(*F. cugenangense*)^[3]为指示菌,筛选并鉴定病株根际土壤中对病原菌具有最佳拮抗作用的细菌,分析拮抗细菌的生长特性,检测其对 9 种常见植物病原真菌的抑制效果,并分析其代谢产物的抑菌活性以及其促生特性,以期对茶树根腐病的生物防治提供依据。

1 材料与方法

1.1 材料

于 2022 年 9 月采集湖南农业大学长安基地感染根腐病的茶树根际土壤。

9 种植物病原菌分别为草莓疫病菌(*Phytophthora fragariae*)、辣椒枯萎病菌(*Fusarium oxysporum*)、马铃薯早疫病病菌(*Alternaria*

alternate)、柑橘沙皮病菌(*Diaporthe citri*)、茄子褐纹病菌(*Phomopsis vexans*)、茭白镰刀菌(*Fusarium graminearum*)、棉花枯萎病菌(*Verticillium dahlia*)、玉米疫病菌(*Exserohilum turcicum*)、黄精炭疽病菌(*Colletotrichum spaethianum*),均保存于湖南农业大学病原微生物实验室。

1.2 方法

1.2.1 茶树根腐病拮抗菌的分离筛选及鉴定

采用梯度稀释涂布法分离病株根际土壤细菌,将 10 g 土壤加入 90 mL 无菌水的锥形瓶并进行振荡^[8],15 min 后,稀释土壤上清液浓度,将稀释梯度调为 10^{-6} ~ 10^{-1} 。取稀释后的悬浊液 200 μ L 涂布于 NA 平板培养基上,置于 25 $^{\circ}$ C 恒温培养箱中倒置培养。观察涂布土壤上清液平板的菌落生长情况,挑取细菌单菌落进行分离纯化,于 25 $^{\circ}$ C 恒温培养箱中倒置培养^[9]。

采用平板对峙培养法,取茶树根腐病原菌菌饼(5 mm)接种至 PDA 培养基中央,在距病原菌菌饼 2 cm 处两侧的位置分别平行划线接种活化的菌株,以只接种病原菌的 PDA 培养基作空白对照,每个处理 3 次重复,倒置培养于 25 $^{\circ}$ C 恒温箱中。观察平板菌落形态,选取有明显抑菌效果的菌株进行编号并计算筛选出的拮抗菌对病原菌的抑菌率^[10]。

同时,挑取与拮抗菌对峙培养面的部分茶树根腐病菌丝在光学显微镜下进行观察,对照组为只接种病原菌的 PDA 培养基^[11]。

将分离纯化的拮抗菌活化后,接种在 PDA 培养基上,于 25 $^{\circ}$ C 恒温培养箱培养 24 h,观察并分析菌落的形态并对菌落进行拍照,记录菌落的大小、颜色及形态。

参照文献[12-13]的方法,测定拮抗菌株生理生化指标,包括革兰染色、淀粉水解试验、过氧化氢酶试验、酪素水解试验、硫化氢试验、V-P 试验、精氨酸脱氢酶试验、甲基红试验等。

按照 EasyPure[®] Genomic DNA Kit 试剂盒说明书提取拮抗菌株基因组 DNA,以提取的 DNA 为模

板,利用通用引物 27 F(5'-AGAGTTTGATCCTGG CTCAG-3')和 1492 R(5'-TACGGCTACCTTGTTAC GACTT-3')扩增其 16S rRNA 基因序列。PCR 反应体系:DNA 模板 2 μ L,上、下游引物各 1 μ L, ddH₂O 6 μ L, Taq PCR Master Mix 酶 10 μ L。PCR 反应条件:94 $^{\circ}$ C 预变性 5 min; 94 $^{\circ}$ C 变性 30 s, 55 $^{\circ}$ C 退火 30 s, 72 $^{\circ}$ C 延伸 1 min, 共 30 个循环; 72 $^{\circ}$ C 延伸 5 min; 4 $^{\circ}$ C 保存。将 PCR 扩增产物送至生工生物工程(上海)股份有限公司测序。将测序得到的菌株 TJ-1 基因序列提交至 NCBI 进行 BLAST 比对分析后,利用 MEGA 11 软件的邻接法构建系统发育进化树,进而确定拮抗菌株的种属分类^[14]。

1.2.2 拮抗菌的生物学特性分析

1) 以 2% 的接种量将拮抗菌株种子液加入 150 mL 的 LB 液体培养基中,在 25 $^{\circ}$ C、180 r/min 的摇床中进行培养。将未接种拮抗菌的 LB 培养基作为空白对照,每隔 2 h 用分光光度计测定菌液在 600 nm 波长处的吸光值,绘制拮抗菌的生长曲线图^[15]。

2) 拮抗菌株在不同 pH 和不同质量分数 NaCl 胁迫下的生长情况:分别配制 pH 为 3~9 的 LB 液体培养基^[16]和 NaCl 质量分数分别为 0.5%、1.0%、2.0%、3.0%、4.0%、5.0% 的 LB 液体培养基,将 pH 都调至 7,按 2% 的接种量将拮抗菌株加入 LB 液体培养基,在 25 $^{\circ}$ C、180 r/min 的摇床中进行培养。24 h 后,将未接种拮抗菌的 LB 培养基作为空白对照,测定菌液在 600 nm 波长处的吸光值^[17]。

3) 采用平板对峙法对拮抗菌株的抗菌谱进行测定,取供试病原菌菌饼(5 mm)置于 PDA 培养基中央,挑取拮抗菌在病原菌等距离处两侧划线,以只接种各病原菌的培养基为对照,倒置于 25 $^{\circ}$ C 恒温箱培养。待对照组病原菌长满培养基时,测量处理组与对照组病原菌直径,计算其抑菌率^[18]。

4) 采用平板对扣法分析拮抗菌株挥发性物质的抑菌效果,将涂布拮抗菌菌液的 PDA 培养基与接种病原菌菌饼的 PDA 培养基对扣密封培养,以涂布 LB 液体培养基为对照,于 25 $^{\circ}$ C 恒温培养箱进行培养。培养至对照组病原菌菌饼长满培养基,计算拮抗菌挥发性物质对病原菌的抑制率^[19]。采用圆盘滤膜法分析菌株 TJ-1 非挥发性物质的抑菌效果,将双层滤膜平铺于 PDA 培养基,并在 PDA 培养基中央接种直径为 5 mm 的拮抗菌菌饼,培养 2 d 后,将滤

膜与拮抗菌菌饼去除,在原位置接种直径为 5 mm 的病原菌菌饼,每处理设 3 个重复,于 25 $^{\circ}$ C 恒温培养箱中进行培养。培养至对照组病原菌菌饼长满培养基,计算拮抗菌非挥发性物质对病原菌的抑制率^[20]。

5) 将拮抗菌株点接至阿须贝培养基上,于 25 $^{\circ}$ C 恒温培养箱中培养 48 h,观察有无菌体生长,如正常生长,说明菌株具有固氮能力,反之则没有;点接至 CAS 培养基上观察拮抗菌在 CAS 培养基上是否有黄绿色晕圈出现,于 25 $^{\circ}$ C 恒温培养箱中培养 48 h,检测其产铁载体能力^[21];点接至培养基上,于 25 $^{\circ}$ C 恒温培养箱中培养 48 h,观察拮抗菌在无机磷培养基、有机磷的培养基、纤维素酶检测培养基以及 β -1,3-葡聚糖酶检测培养基上是否有透明圈出现,检测拮抗菌的溶磷能力、产纤维素酶能力以及产 β -1,3-葡聚糖酶能力^[22]。

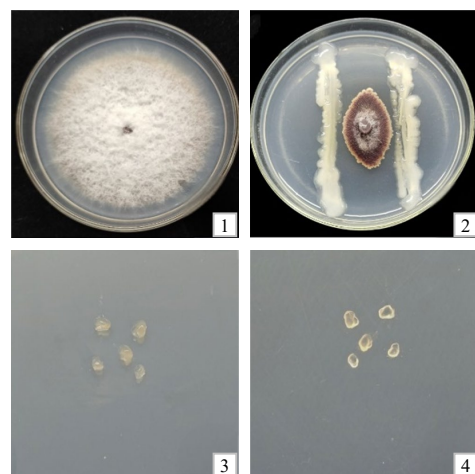
1.3 数据处理

采用 Microsoft Excel 2018 和 SPSS 20.0 软件对数据进行处理和统计分析。

2 结果与分析

2.1 茶树根腐病拮抗细菌的筛选及鉴定结果

采用平板对峙法从感染根腐病的茶树根际土壤中分离筛选纯化得到多株对茶树根腐病具有拮抗效果的细菌,其中 1 株拮抗菌对病原菌的拮抗率达 74.67%,将其命名为 TJ-1(图 1)。菌株 TJ-1 在 PDA 平板上培养 48 h 后,菌落正面呈淡黄色、不透明(图 1-3),表面光滑、黏稠,无色素产生,菌落

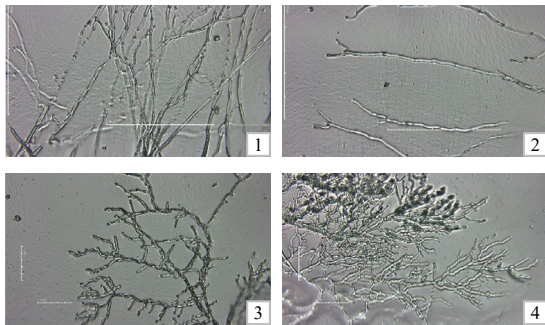


1 对照组 CK; 2 TJ-1 处理组; 3 TJ-1 拮抗菌株反面;
4 TJ-1 拮抗菌株正面。

图 1 拮抗菌株 TJ-1 对病原菌 *F. cugenangense* 的抑制效果

Fig.1 Inhibitory effect of antagonistic strain TJ-1 on root rot pathogen *F. cugenangense*

形状不规则;菌落背面呈淡黄色,透明(图 1-4)。在光学显微镜下观察接种 TJ-1 后病原菌的生长情况,发现处理组与对照组相比,菌丝分枝变多、部分膨大,萎缩缠绕成团(图 2),表明拮抗菌 TJ-1 可抑制茶树根腐病病原菌菌丝的生长。



1、2 对照组(CK); 3、4 TJ-1 处理组。

图 2 拮抗菌株 TJ-1 处理病原菌的菌丝状态

Fig.2 Mycelial status of pathogen *E. cugenangense* with antagonistic strain TJ-1 treatment

生理生化试验结果表明,菌株 TJ-1 的革兰染色结果呈阳性;淀粉水解试验、过氧化氢酶试验、酪素水解试验、V-P 试验、精氨酸脱氢酶试验结果呈阳性;硫化氢试验、甲基红试验结果呈阴性,与芽孢杆菌特征吻合。

对拮抗菌 TJ-1 基因组的 16S rRNA 片段进行 PCR 扩增并测序,得到长度约为 1 400 bp 的片段。将测序结果进行同源性比对,并构建系统发育树。拮抗菌的 16S rRNA 序列与 GenBank 中登录号为 LC127093.1 *Paenibacillus terrae* 的相似度为 100%,结合生理生化与形态学特征,鉴定其为土地类芽孢杆菌,登录号为 PQ451921(图 3)。

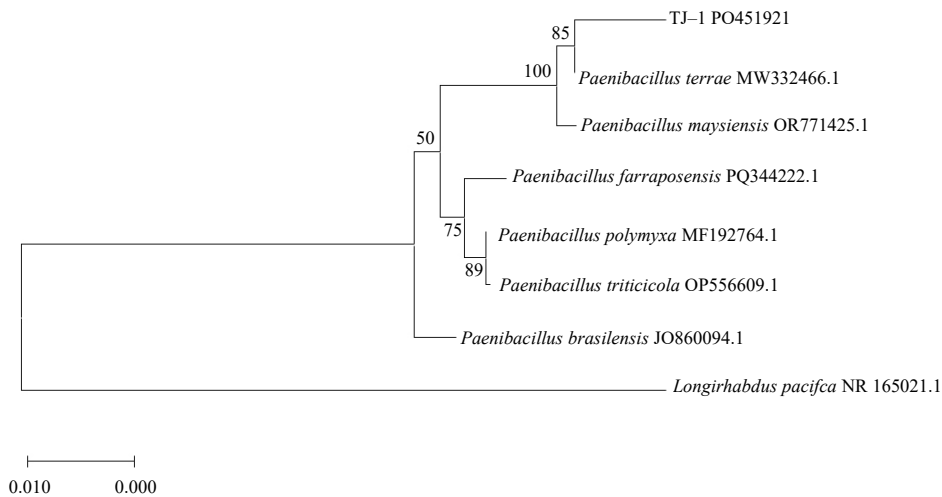


图 3 基于 16S rRNA 序列的拮抗菌 TJ-1 系统发育树

Fig.3 Phylogenetic tree of strain TJ-1 based on 16S rRNA sequences

2.2 茶树根腐病拮抗菌的生长特性

2.2.1 生长曲线

拮抗菌株的生长曲线如图 4 所示。在培养的前 6 h 处于迟缓生长期;此后至 18 h 处于对数生长期;18 h 至 24 h 后进入稳定期,生长速率较稳定;此后进入衰亡期(图 4)。由此可知,拮抗菌株 TJ-1 可选取培养 18~24 h 的培养液作为种子液。

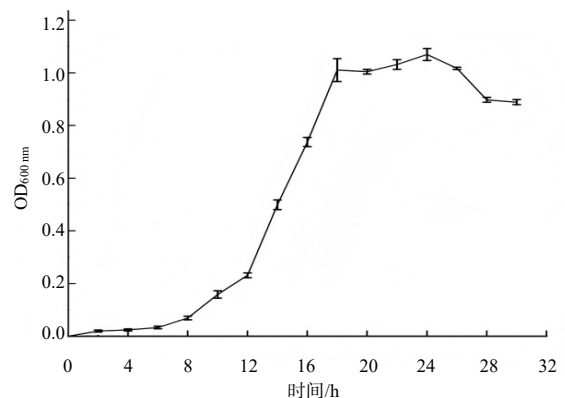
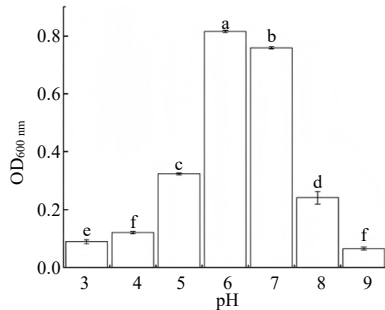


图 4 拮抗菌株 TJ-1 的生长曲线

Fig.4 Growth curve of antagonistic strain TJ-1

2.2.2 酸碱适应性和耐盐性

TJ-1 菌液吸光值随着培养基 pH 增大而升高, 在 pH 为 6.0 时达到峰值, OD_{600 nm} 值为 0.815。随后培养基 pH 大于 6.0 时, 菌液吸光值逐渐下降。



当 NaCl 质量分数为 2% 时, TJ-1 菌液吸光值达到 0.801, TJ-1 生长最好; 当 NaCl 质量分数达到 3% 时, TJ-1 的生长受到显著抑制。

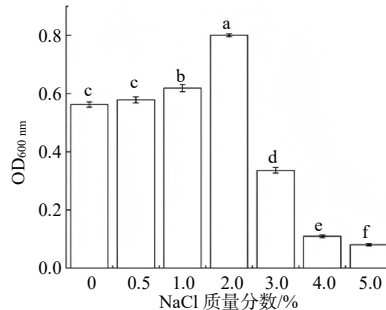


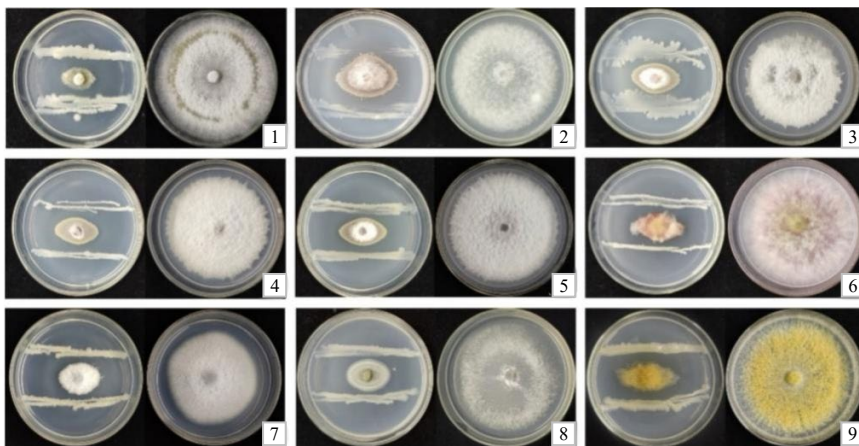
图5 拮抗菌 TJ-1 的酸碱适应性和耐盐性

Fig.5 Effects of different pH and NaCl concentration on the growth of antagonistic strain TJ-1

2.3 拮抗细菌的抑菌谱

由菌株 TJ-1 对多种植物病原菌的拮抗效果的检测结果可知, TJ-1 对 9 种植物病原菌的抑制效果都较好。其中, 对茄子褐纹病菌的抑制效果最好,

抑菌率为(80.51±1.67)%; 对辣椒枯萎病菌的抑菌率最低, 但也达到了(69.64±1.61)%, 说明菌株 TJ-1 具有广谱抑菌活性且抑菌效果较好(图 6、表 1)。



1 茄子褐纹病菌; 2 茭白镰刀菌; 3 柑橘沙皮病菌; 4 辣椒枯萎病菌; 5 马铃薯早疫病病菌; 6 草莓疫病病菌; 7 棉花枯萎病菌; 8 黄精炭疽病菌; 9 玉米疫病病菌。

图6 拮抗菌株 TJ-1 对不同病原菌的拮抗效果

Fig.6 Antagonistic effect of strain TJ-1 against different plant pathogens

表1 菌株 TJ-1 对不同植物病原菌的抑菌率

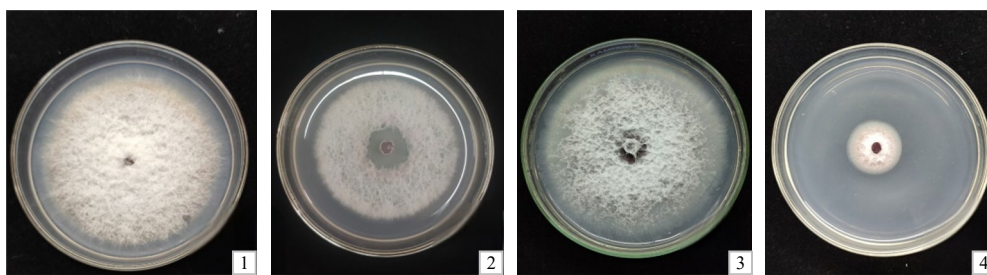
Table 1 Inhibition rate of strain TJ-1 to different plant

病原菌	抑菌率/%
茄子褐纹病菌	(80.51±1.67)a
茭白镰刀菌	(76.03±1.54)b
柑橘沙皮病菌	(71.77±1.47)cd
辣椒枯萎病菌	(69.64±1.61)d
马铃薯早疫病病菌	(76.82±0.09)b
草莓疫病病菌	(76.99±0.89)b
棉花枯萎病菌	(72.79±0.10)c
黄精炭疽病菌	(71.80±0.13)cd
玉米疫病病菌	(75.57±0.76)b

同列不同字母表示病原菌之间的差异有统计学意义($P < 0.05$)。

2.4 拮抗菌挥发性和非挥发性物质对病原菌的抑菌效果

菌株 TJ-1 产生的挥发性物质和非挥发性物质对茶树根腐病病菌都有抑制作用(图 7)。当对照组病原菌长满培养皿时, 菌株 TJ-1 的挥发性物质对茶树根腐病病菌的抑菌率为 27.21%, 且处理组病原菌边缘菌丝稀少; 菌株 TJ-1 的非挥发性物质对茶树根腐病抑制效果更为显著, 抑菌率可达 73.57%。



1 对照组 CK; 2 TJ-1 挥发性物质处理组; 3 对照组 CK; 4 TJ-1 非挥发性物质处理组。

图 7 拮抗菌 TJ-1 产生的挥发性及非挥发性物质对病原菌的拮抗效果

Fig.7 Antagonistic effect of volatile and non-volatile substance produced by strain TJ-1 on pathogenic bacteria

2.5 拮抗菌的促生特性

拮抗菌株 TJ-1 的促生特性与活性物质检测试验结果表明, TJ-1 具有溶解无机磷、溶解有机磷、固氮的能力, 并且可以分泌铁载体、纤维素酶以及 β -1, 3-葡聚糖酶。拮抗菌在阿须贝培养基生长, 检测结果呈阳性; 拮抗菌在 CAS 培养基上有黄绿色晕圈出现, 检测结果呈阳性; 拮抗菌在无机磷培养基、有机磷的培养基、纤维素酶检测培养基以及 β -1,3-葡聚糖酶检测培养基上有透明圈出现, 检测结果呈阳性。

3 结论与讨论

生物防治是控制土传病害的有效方法之一^[23]。植物根际土壤微生物资源丰富, 是拮抗菌筛选的重要来源^[24]。从茶树病株根际土壤中筛选拮抗菌株, 菌株 JT-1 平板对峙下对茶树根腐病病原菌抑菌率为 74.67%, 通过形态学、生理生化指标测定以及 16S rRNA 鉴定为土地类芽孢杆菌。对拮抗菌的生物特性进行研究, 发现拮抗菌株 TJ-1 在 6 h 后进入对数生长期, 18~24 h 进入稳定期; 拮抗菌株最适 pH 为 5~7, 与茶树适宜生长的土壤 pH 相近; 拮抗菌对盐的耐受性比较弱。

在生物防治的微生物中, 芽孢杆菌占有重要位置^[9]。杨学宇等^[25]筛选并鉴定出的解淀粉芽孢杆菌对茶树轮斑病具有抑制作用, 也可作用于病原菌菌丝, 对 9 种作物病原真菌均有抑制效果。本研究中, 平板对峙培养时, 菌株 TJ-1 能使病原菌的菌丝萎缩缠绕、分枝部分膨大, 由此推测该菌株可抑制病原菌生长, 结果表明 TJ-1 对 9 种病原菌均有拮抗效果, 广谱性强。生防芽孢杆菌的代谢产物中通常存在多种溶菌物质与抗菌物质, 包括核糖体合成的抗菌蛋白与非核糖体合成的抗生素等^[26]。本研究的

拮抗菌与病原菌在平板对峙以及平板对扣培养过程中均对茶树根腐病病原菌有良好的拮抗效果, 说明拮抗菌株能产生某种抑菌活性代谢物质抑制病原菌的生长。同时拮抗菌 TJ-1 的非挥发性物质抑菌率优于挥发性物质的, 说明大部分抑菌物质很有可能以非挥发性物质存在。

笔者筛选的拮抗菌在平板上的抑菌效果较好, 但尚未在茶树上应用, 后续需要进行田间防效试验, 进一步了解拮抗菌的防治效果和防治机理, 以期为其在茶树根腐病的绿色防控中提供理论支持。

参考文献:

- [1] 陈雪芬. 我国茶树病害的发生趋势与绿色防控[J]. 中国茶叶, 2022, 44(6): 7-14.
- [2] 黄森. 茶苗根腐病移植防治观察初报[J]. 茶叶, 1958(2): 21, 55.
- [3] YANG Y S, YANG X Y, ZHANG Y D, et al. First report of *Fusarium cugenangense* causing root rot of tea plants (*Camellia sinensis*) in China[J]. Plant Disease, 2023, 108: e1.
- [4] DHAR PURKAYASTHA G, MANGAR P, SAHA A, et al. Evaluation of the biocontrol efficacy of a *Serratia marcescens* strain indigenous to tea rhizosphere for the management of root rot disease in tea[J]. PLoS One, 2018, 13(2): e0191761.
- [5] MANJUKARUNAMBIKA K, PONMURUGAN P, MARIMUTHU S. Efficacy of various fungicides and indigenous biocontrol agents against red root rot disease of tea plants[J]. European Journal of Plant Pathology, 2013, 137(1): 67-78.
- [6] 刘荣, 姚玉仙, 周爽爽, 等. 茶炭疽病的症状识别与防治研究[J]. 福建茶叶, 2022, 44(2): 24-26.
- [7] 陈宗懋. 茶园有害生物绿色防控技术发展与应用[J]. 中国茶叶, 2022, 44(1): 1-6.
- [8] 蒋攀婷, 伍玉玲, 何昊哲, 等. 芒果炭疽病拮抗菌 L18-7 菌株的筛选、鉴定及拮抗机制研究[J]. 西南农业学报, 2023, 36(4): 742-749.

- [9] 王恩启, 武亚芬, 梁斌, 等. 一株番茄枯萎病拮抗菌的筛选、鉴定及其生长条件研究[J]. 青岛农业大学学报(自然科学版), 2023, 40(3): 174-181.
- [10] 章乐乐, 王冠, 柳凤, 等. 芒果炭疽病拮抗菌分离、鉴定及生防机制研究[J]. 生物技术通报, 2023, 39(4): 277-287.
- [11] 黄婉媛, 李彩斌, 彭宇, 等. 烟草根黑腐病拮抗菌的分离鉴定和生防作用特性研究[J]. 浙江农业学报, 2023, 35(4): 873-883.
- [12] 东秀珠, 蔡妙英. 常见细菌系统鉴定手册[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- [13] GEORGE M, JULIA A, TIMOTHY Y G, et al. Bergey's Manual of Systematic Bacteriology[M]. 9th ed. Baltimore: Williams and Wilkins Co., 1994.
- [14] 王国琴, 杜雪倩, 马聪, 等. 枸杞根腐病病原菌鉴定及其拮抗菌的筛选[J]. 干旱地区农业研究, 2023, 41(6): 245-253.
- [15] 何亚芳, 包慧芳, 王宁, 等. 甜瓜镰刀菌果腐病菌拮抗菌筛选及其拮抗性研究[J]. 园艺学报, 2023, 50(10): 2257-2270.
- [16] 滕峥, 杨翠凤, 刘正鲁, 等. 百香果茎基腐病拮抗菌筛选及其生物学特性[J/OL]. 分子植物育种, 2023, <https://kns.cnki.net/kcms2/detail/46.1068.s.20230525.1404.006.html>.
- [17] 史怡梦, 张旖璐, 张莹, 等. 紫花苜蓿根际芽胞杆菌 YB-2 的鉴定及其生防和促生能力分析[J]. 植物保护学报, 2023, 50(2): 391-401.
- [18] 张玉丹, 谭琳, 任佐华, 等. 茶炭疽病拮抗链霉菌的筛选鉴定与拮抗能力测定[J]. 中国生物防治学报, 2023, 39(3): 646-656.
- [19] 苏杭, 成胜, 孟祥佳, 等. 半夏立枯病菌拮抗内生细菌的分离鉴定及功能分析[J]. 南方农业学报, 2023, 54(11): 3277-3291.
- [20] 李小杰, 李成军, 姚晨虢, 等. 拮抗烟草疫霉菌的木霉菌株筛选鉴定及防病促生作用研究[J]. 中国烟草科学, 2020, 41(3): 65-70.
- [21] 褚睿, 李昭轩, 张学青, 等. 黄瓜枯萎病拮抗芽孢杆菌的筛选、鉴定及其生防潜力[J]. 生物技术通报, 2023, 39(8): 262-271.
- [22] 高晓梅, 李杨, 于淼, 等. 多功能根际生防促生放线菌的分离鉴定及其对辣椒的益生效果[J]. 农业资源与环境学报, 2023, 40(4): 906-916.
- [23] 张龄尹, 刘珊珊, 魏文哲, 等. 香蕉枯萎病抑菌菌群的构建及其生防效果研究[J]. 南京农业大学学报, 2024, 47(5): 898-906.
- [24] 张瑞福. 根际微生物: 农业绿色发展中大有所为的植物第二基因组[J]. 生物技术通报, 2020, 36(9): 1-2.
- [25] 杨学宇, 谭琳, 张玉丹, 等. 茶轮斑病病原菌的分离鉴定及其拮抗菌筛选[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2023, 49(2): 195-200.
- [26] 周瑚, 胡玲, 余曦玥, 等. 特基拉芽胞杆菌 JN-369 抗菌粗蛋白的理化性质和抑菌效果[J]. 中国生物防治学报, 2020, 36(2): 211-219.

责任编辑: 罗慧敏

英文编辑: 罗维