

引用格式:

郑迪文, 周游, 谢芳玲, 谢宗宝, 刘峰, 朱宏建. 辣椒疫霉病菌拮抗菌的筛选鉴定及生防潜力[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2023, 49(4): 442–447.

ZHENG D W, ZHOU Y, XIE F L, XIE Z B, LIU F, ZHU H J. Screening and identification of antagonistic strain against *Phytophthora capsici* and the biocontrol potential[J]. Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences), 2023, 49(4): 442–447.

投稿网址: <http://xb.hunau.edu.cn>



## 辣椒疫霉病菌拮抗菌的筛选鉴定及生防潜力

郑迪文<sup>1</sup>, 周游<sup>1</sup>, 谢芳玲<sup>1</sup>, 谢宗宝<sup>1</sup>, 刘峰<sup>2,3</sup>, 朱宏建<sup>1\*</sup>

(1.湖南农业大学植物保护学院, 湖南长沙 410128; 2.岭南现代农业科学与技术广东省实验室, 广东广州 510006; 3.湖南农业大学园艺学院, 湖南长沙 410128)

**摘要:** 从湖南省长沙、衡阳、岳阳等地辣椒种植区土样中分离筛选出 6 株拮抗辣椒疫霉病菌的放线菌, 采用含毒介质法检测, 发现 L57-60 菌株发酵液的 5 倍稀释液对辣椒疫霉病菌的抑制效果达到 98.61%; 通过形态学特征观察、生理生化特性鉴定以及 16S rDNA、*recA* 基因、*atpD* 基因和 *rpoB* 基因联合建树分析, 确定 L57-60 菌株为橄榄色链霉菌(*Streptomyces olivaceus*)。抗菌谱测定结果表明, L57-60 菌株发酵液对辣椒枯萎病菌(*Fusarium oxysporum*)、烟草炭疽病菌(*Colletotrichum micotianae*)、水稻纹枯病菌(*Thanatephorus cucumeris*)等 12 种病原菌均有拮抗作用。运用正交试验对 L57-60 菌株发酵培养基的碳源和氮源配比进行优化, 结果最适培养基为高氏 1 号培养基, 大米粉质量分数 4%, 黄豆粉质量分数 0.5%。盆栽试验结果表明, L57-60 菌株发酵液对辣椒疫霉的防效达到 73.1%。

**关键词:** 辣椒疫病; 橄榄色链霉菌; 发酵培养基优化; 盆栽防效

中图分类号: S436.418.1

文献标志码: A

文章编号: 1007-1032(2023)04-0442-06

## Screening and identification of antagonistic strain against *Phytophthora capsici* and the biocontrol potential

ZHENG Diwen<sup>1</sup>, ZHOU You<sup>1</sup>, XIE Fangling<sup>1</sup>, XIE Zongbao<sup>1</sup>, LIU Feng<sup>2,3</sup>, ZHU Hongjian<sup>1\*</sup>

(1.College of Plant Protection, Hunan Agricultural University, Changsha, Hunan 410128, China; 2.Guangdong Laboratory for Lingnan Modern Agricultural, Guangzhou, Guangdong 510006, China; 3.College of Horticulture, Hunan Agricultural University, Changsha, Hunan 410128, China)

**Abstract:** Six strains of antagonistic actinomycetes against *Phytophthora capsici* were isolated and screened from soil samples of pepper planting areas in Changsha, Hengyang and Yueyang, Hunan Province. The results showed that the 5 times sterile dilution of the fermentation broth of strain L57-60 had 98.61% inhibition effect on *Phytophthora capsici*. Strain L57-60 was identified as *Streptomyces olivaceus* by morphological characteristics, physiological and biochemical identification, combined with joint tree established based on 16S rDNA, *recA*, *atpD* and *rpoB* genes. Antimicrobial spectrometry showed that fermentation broth of strain L57-60 showed antagonistic effect on 12 pathogens including *Fusarium oxysporum* in pepper, *Colletotrichum micotianae* in tobacco and *Thanatephorus cucumeris* (Frank) Donk. The fermentation medium of strain L57-60 was optimized by orthogonal experiment. The results showed that the optimal fermentation medium formula for strain L57-60 was composed of corn flour 4%, soybean flour 0.5%. Pot experiment showed the control effect of strain L57-60 against *Phytophthora capsici* was 73.1%.

收稿日期: 2022-11-26

修回日期: 2023-05-15

基金项目: 岭南现代农业科学与技术广东省实验室项目(NT2021004); 湖南省科学技术厅麓山种业项目(2021NK1006); 湖南省教育厅高校科技创新平台建设项目(20K071)

作者简介: 郑迪文(1997—), 男, 湖南衡阳人, 硕士研究生, 主要从事植物病理学研究, 414040734@qq.com; \*通信作者, 朱宏建, 博士, 副教授, 主要从事植物病理学研究, hongjian62@163.com

**Keywords:** pepper blight; *Streptomyces olivaceus*; fermentation medium optimization; potted control effect

辣椒疫病是辣椒的主要病害之一, 寄主广泛并具有很强的环境适应能力<sup>[1-3]</sup>。对辣椒疫病的防治主要依赖化学药剂<sup>[4]</sup>。但随着化学药剂的长期使用, 抗药性、环境污染以及防治效率降低等问题也相继出现<sup>[5]</sup>, 因而生物防治成为研究热点。周成萍等<sup>[6]</sup>从原始林区采集的土壤中分离获得 1 株对辣椒疫霉菌抑制效果明显的放线菌 WZ60, 田间防效可达 90%。刘晓瑜等<sup>[7]</sup>从 15 株植物内生菌中筛选获得 1 株链霉菌, 发现其发酵液粗提物和挥发性物质能够明显地抑制辣椒疫霉菌菌丝生长, 并且其孢子液不仅能够提高辣椒幼苗对辣椒疫病的抗性, 还能促进辣椒幼苗的生长。王鑫<sup>[8]</sup>发现 2 株链霉菌能够促进辣椒根系 AM 真菌共生结构的形成及其生态功能的发挥。黄大野等<sup>[9]</sup>发现 1 株淡紫色褐链霉菌与烯酰吗啉具有相容性, 联合使用可以减少烯酰吗啉在防控辣椒疫病中的药剂使用量。尽管筛选的对辣椒疫病具有生防效果的链霉菌比较多, 但能够应用到生产实际的菌株仍然稀少。笔者从湖南省长沙、衡阳、岳阳等地辣椒种植区采集土样, 分离纯化出 472 株放线菌株, 与辣椒疫霉菌进行拮抗试验, 最终筛选并鉴定了 1 株对辣椒疫霉菌具有明显抑制效果的生防链霉菌; 对其发酵培养基进行了优化, 通过测定抑菌谱以及盆栽防效试验, 评价其生防潜力, 以期对辣椒疫病的有效防治提供生防资源。

## 1 材料与方 法

### 1.1 材 料

2022 年 3—5 月, 分别从湖南省长沙、衡阳、岳阳等地辣椒种植区采集健康辣椒的根际土壤 18、23、26 份, 装入无菌密封塑料袋, 置于 4 °C 冰柜中储藏。

供试靶标菌为辣椒疫霉菌(*Phytophthora capsici*)。供试病原菌有尖孢炭疽病菌(*Colletotrichum acutata*)、辣椒枯萎病菌(*Fusarium oxysporum*)、烟草炭疽病菌(*Colletotrichum micotianae*)、水稻纹枯

病菌(*Thanatephorus cucumeris*)、冬瓜枯萎病菌(*Fusarium oxysporum* f. sp. *cucurmerimum*)、马铃薯早疫病菌(*Alternaria solani*)、辣椒白绢病菌(*Sclerotium rolfsii*)、水稻恶苗病菌(*Fusarium moniliforme*)、白菜黑斑病菌(*Alternaria brassicae*)、交链格孢(*Alternaria alternate*)、西瓜枯萎病菌(*Fusarium oxysporum* f. sp. *Hiveum*)、瓜果腐霉(*Pythium aphanidermatum*)、葡萄座腔菌(*Botryosphaeria dothidea*)、小麦赤霉病菌(*Fusarium graminearum*), 由湖南农业大学植物保护学院保存。

### 1.2 方 法

#### 1.2.1 辣椒疫霉菌拮抗菌的分离筛选及鉴定

采用稀释涂布平板法<sup>[10]</sup>分离土样中放线菌菌株; 挑取单菌落, 采用平板对峙法<sup>[11]</sup>和含毒介质法<sup>[12]</sup>筛选辣椒疫霉菌的拮抗菌, 对产生抑菌带的菌株进行纯化保存。挑选抑菌效果最佳的菌株进行形态学鉴定<sup>[13]</sup>、生理生化特性测定<sup>[14]</sup>以及分子生物学鉴定<sup>[15]</sup>。

#### 1.2.2 辣椒疫霉菌拮抗菌发酵培养基配方的优化

采用单因素控制变量法<sup>[16]</sup>, 对辣椒疫霉菌拮抗菌发酵培养基(高氏 1 号)<sup>[17]</sup>中的碳源(葡萄糖、可溶性淀粉、大米粉、玉米粉)和氮源(黄豆粉、酵母粉、蛋白胨、硫酸铵)进行优化; 采用正交法<sup>[18]</sup>对碳源和氮源的配比进行优化。

#### 1.2.3 辣椒疫霉菌拮抗菌的抑菌谱及盆栽防效测定

1) 参照李婧婷等<sup>[19]</sup>的方法, 以尖孢炭疽菌、辣椒枯萎病菌、烟草炭疽病菌等 14 种病原真菌为指示菌, 测定拮抗菌的抑菌谱。

2) 种植辣椒 48 盆, 待辣椒长出 6 片真叶, 先灌根 30 mL 药液, 在灌根 1 d 后接种  $1 \times 10^5$  cfu/mL 的辣椒疫霉孢子液 5 mL 后, 设置 6 个处理组: A 组, 无菌玉米培养液; B 组, 稀释 400 倍的甲霜灵锰锌可湿性粉剂; C 组, 拮抗菌株发酵液; D 组, 稀释 2 倍的拮抗菌株发酵液; E 组, 稀释 3 倍的拮

抗菌株发酵液；F组，稀释4倍的拮抗菌株发酵液。7d后开始调查辣椒苗发病情况，计算病情指数和防治效果<sup>[20]</sup>。

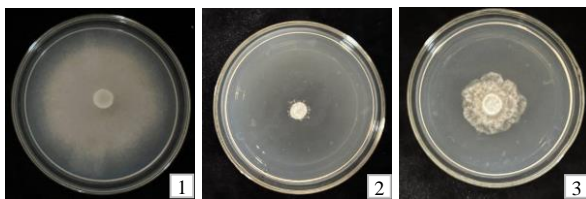
### 1.3 数据处理

采用Excel 2010和SPASS 20.0统计软件处理分析试验数据；运用MEGAX软件绘制系统发育树。

## 2 结果与分析

### 2.1 辣椒疫霉菌拮抗菌的筛选及鉴定结果

从湖南省长沙、衡阳、岳阳等地辣椒种植区采集的67份土壤中分离出472株放线菌，以辣椒疫霉菌为指示菌，共筛选出6株拮抗链霉菌，其中L57-60菌株的抑菌效果最佳，该菌株的5倍无菌发酵液的抑制率能达到98.61%(图1)。观察发现，菌株L57-60的发酵液能使辣椒疫霉菌的菌丝发生扭曲、变形(图2)。



1 CK; 2 稀释5倍液; 3 稀释10倍液。

图1 L57-60菌株发酵液的抑菌效果

Fig.1 Bacteriostatic effect of fermentation broth of strain L57-60

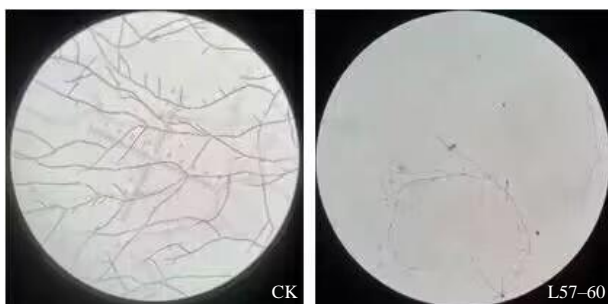


图2 L57-60菌株发酵液对辣椒疫霉菌菌丝的抑制作用

Fig.2 Effect of fermentation broth of strain L57-60 on mycelia of *Phytophthora capsici*

菌株L57-60在蔗糖察氏平板上生长良好，其气生菌丝呈浅褐灰色，基丝为黄褐色，表面不光滑(图3)。生理生化特性测定结果表明，菌株L57-60可利用葡萄糖、乳糖、甘露醇、蔗糖、麦芽糖、肌醇、山梨醇、酪氨酸、鼠李糖和半乳糖，

不能利用阿拉伯糖、果糖和木糖；能够水解淀粉，不产硫化氢，明胶液化快，能够在纤维素上生长。结合形态学观察和生理生化特性测定结果，初步鉴定该菌株为链霉菌属(*Streptomyces*)。

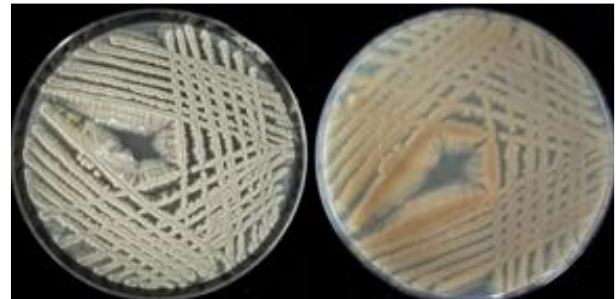


图3 L57-60菌株在蔗糖察氏培养基上的菌落形态

Fig.3 Colony morphology of strain L57-60 on Czapek's medium with sucrose

通过试剂盒提取L57-60菌株DNA，分别用16S rDNA、*recA*、*atpD*、*rpoB*引物对进行PCR扩增，结果见图4。经测序可知，16S rDNA、*recA*、*atpD*、*rpoB*基因大小分别为1416、915、1012、972 bp。将序列置NCBI进行比对，L57-60菌株与橄榄色链霉菌(*Streptomyces olivaceus*)的*atpD*序列相似性达到97.78%。选取高度相似的序列并查找该序列对应物种的其他3个基因的序列，通过BioEdit和Clustal进行比对和编辑，并利用Mega X对同一物种的不同基因进行拼接后建树。结果表明，L57-60菌株与橄榄色链霉菌在同一分支上(图5)。

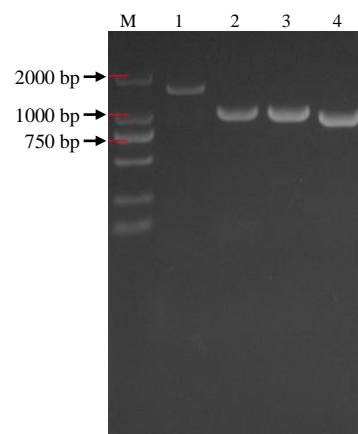


图4 16S rDNA、*recA*、*atpD*、*rpoB*引物PCR扩增凝胶电泳结果

Fig.4 Gel electrophoresis of PCR products with primers specific for 16S rDNA, *recA*, *atpD* and *rpoB*

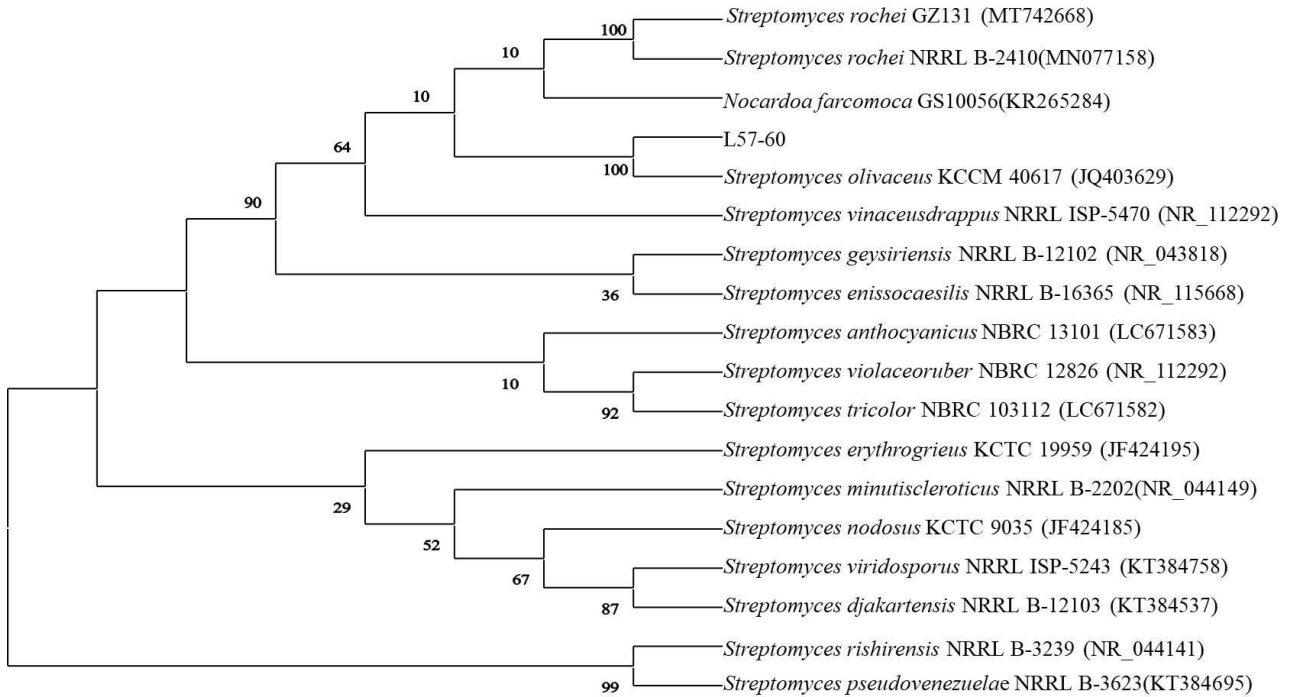


图 5 16S rDNA、*recA*、*atpD*、*rpoB* 多基因联合建树

Fig.5 Joint tree established based on 16S rDNA, *recA*, *rpoB* and *atpD* genes

2.2 辣椒疫霉菌拮抗菌发酵培养基的较优配方

单因素试验结果表明，当高氏 1 号培养基以大米粉和玉米粉为碳源时，拮抗菌发酵液抑菌率达 100%；以黄豆粉为氮源时，拮抗菌发酵液的抑菌率达 96.64%(表 1)。综合考虑发酵成本，选择大米粉和黄豆粉为碳源和氮源。

表 1 不同碳源和氮源的 L57-60 发酵液的抑菌率

Table 1 Bacteriostatic effects of fermentation broths of strain L57-60 cultivated with different carbon and nitrogen sources

碳源	抑菌率/%	氮源	抑菌率%
葡萄糖	(65.55 ±6.34)c	黄豆粉	(96.64 ±1.45)b
可溶性淀粉	(82.63 ±2.94)b	酵母粉	(96.08 ±0.97)a
大米粉	(100.00 ±0.00)a	蛋白胨	(93.84 ±2.42)a
玉米粉	(100.00 ±0.00)a	硫酸铵	(80.95 ±3.18)a

同列数据后的不同字母表示差异有统计学意义(P<0.05)。

选择大米粉作为碳源，黄豆粉作为氮源，设计 L<sub>16</sub>(4<sup>2</sup>)的正交试验，L57-30 发酵液抑菌率列于表 2。结果表明，第 9、10、12、13 号组合的抑菌率较高，其中质量分数 4%大米粉和质量分数 0.5%黄豆粉组合的抑菌率达 100%，说明发酵液抑菌效果最好，确定较优发酵培养基碳源为质量分数 4%大

米粉，氮源为质量分数 0.5%黄豆粉。

表 2 菌株 L57-60 发酵培养基碳源和氮源正交试验的抑菌率

Table 2 Bacteriostatic effects obtained from the orthogonal test for fermentation medium of strain L57-60 with different carbon and nitrogen sources

试验号	大米粉	黄豆粉	抑菌率 %
1	1	0.5	(94.23 ±3.33)bc
2	1	1.0	(89.74 ±5.55)c
3	1	1.5	(52.88 ±0.00)g
4	1	2.0	(58.66 ±4.19)f
5	2	0.5	(93.91 ±2.00)bc
6	2	1.0	(63.46 ±0.00)ef
7	2	1.5	(62.18 ±7.22)ef
8	2	2.0	(66.66 ±4.00)e
9	3	0.5	(99.36 ±1.11)ab
10	3	1.0	(96.47 ±1.47)ab
11	3	1.5	(89.42 ±1.66)c
12	3	2.0	(97.43 ±2.22)ab
13	4	0.5	(100.00 ±0.00)a
14	4	1.0	(83.33 ±0.55)d
15	4	1.5	(90.06 ±0.55)c
16	4	2.0	(95.51 ±0.55)ab

同列不同字母表示正交组合间抑菌率的差异有统计学意义(P<0.05)。

## 2.3 辣椒疫霉菌拮抗菌的抑菌谱及盆栽防效

选取 14 种植物病原真菌, 测定 L57-60 菌株的抑菌谱, 发现该菌株的抑菌谱较广, 对 12 种植物病原真菌有抑制作用, 其菌丝生长抑制率为 5.16%~85.19%(表 3)。其中, 对马铃薯早疫病菌、葡萄座腔菌的抑制效果较好, 其抑制率分别为 85.19%和 80.15%, 对白菜黑斑病菌、西瓜枯萎病菌没有抑制效果。

表 3 L57-60 菌株发酵液的抑菌谱

Table 3 Bacteriostatic spectrum of the fermentation medium of strain L57-60

病原菌	发酵液抑制率/%
尖孢炭疽病菌	(5.16±0.81)f
辣椒枯萎病菌	(59.59±3.06)b
烟草炭疽病菌	(20.47±4.59)de
水稻纹枯病菌	(60.22±4.06)b
冬瓜枯萎病菌	(17.36±9.08)e
马铃薯早疫病菌	(85.19±0.80)a
辣椒白绢病菌	(28.70±7.65)cd
水稻恶苗病菌	(66.37±1.88)b
白菜黑斑病菌	0
交链格孢	(37.63±1.98)c
西瓜枯萎病菌	0
瓜果腐霉	(60.21±2.46)b
葡萄座腔菌	(80.15±3.89)a
小麦赤霉病菌	(76.12±5.16)a

同列数据不同字母表示对病原菌抑制率间的差异有统计学意义( $P<0.05$ )。

接种辣椒疫霉孢子液 7 d 后, A 组、D 组、E 组和 F 组的辣椒植株茎基部溢缩, 出现褐色病斑。病情指数和盆栽防效列于表 4。结果显示, 使用玉米发酵培养基处理的植株病情指数最高, 发病情况比较严重; 使用稀释 400 倍的甲霜灵锰锌处理

表 4 L57-60 菌株对辣椒疫病的盆栽防效

Table 4 Potted control effect of strain L57-60 against *Phytophthora capsicum*

组别	药剂	病情指数	防效/%
A	玉米培养液	65.0	0.0
B	58%甲霜灵锰锌可湿性粉剂 400 倍液	10.0	84.6
C	L57-60 发酵液	17.5	73.1
D	L57-60 稀释 2 倍液	35.0	46.2
E	L57-60 稀释 3 倍液	40.0	38.5
F	L57-60 稀释 4 倍液	42.5	34.6

的植株病情指数最低, 盆栽防效为 84.6%; 使用 L57-60 发酵原液处理的植株病情指数较低, 其防治效果为 73.1%, 说明 L57-60 菌株发酵液对辣椒疫病具有较好的防治效果。

## 3 结论与讨论

结合菌株 L57-60 在特定培养基上的形态学特征、生理生化特性测定结果以及分子生物学鉴定结果, 鉴定其为橄榄色链霉菌 (*Streptomyces olivaceus*), 其发酵液对辣椒疫霉菌有较好的抑制作用。辣椒疫霉菌的菌丝在含发酵液的 PDA 平板上出现明显的扭曲、萎缩, 说明菌株 L57-60 的发酵产物中可能含有影响辣椒疫霉菌菌丝生长发育的物质。抑菌谱的测定结果表明, 菌株 L57-60 的抑菌谱较广, 发酵液盆栽防效达到 73.1%。

潘峰等<sup>[21]</sup>发现链霉菌对辣椒疫霉菌的抑制效果极好; EZZIYYANI 等<sup>[22]</sup>发现链霉菌联合使用对辣椒疫霉菌具有拮抗作用的哈兹木霉 (*Trichoderma harzianum*) 和罗氏链霉菌 (*S. rochei*), 可使土壤中的病原菌数量减少 75%, 对辣椒疫病具有良好的防效。除此之外, 还有许多报道提出在链霉菌的发酵液中发现对辣椒疫霉具有抑制作用的化合物: TIAN 等<sup>[23]</sup>发现链霉菌 *Streptomyces* sp. SN028 的发酵产物中含有 5 种对辣椒疫霉菌具有抑制作用的化合物; LI 等<sup>[24]</sup>发现一种链霉菌 *S.huasconensis* 发酵液中含有抗生素 X-14952B, 对辣椒疫霉具有较好的抑制效果<sup>[24]</sup>; CHANADECH 等<sup>[25]</sup>从 1 株灰橙链霉菌 (*S.griseoaurantiaeus*) 的发酵液中分离出能够抑制辣椒疫霉的化合物。HE 等<sup>[26]</sup>在 *S. lienomycini* A217 中分离出 1 种化合物, 其对辣椒疫霉的 EC<sub>50</sub> 值为 50.36 μg/mL。这些都说明链霉菌大多通过发酵产物中的特殊化合物来抑制辣椒疫霉菌的生长。近几年来, 在链霉菌的发酵产物中发现许多不同种类并具有新型结构的活性天然产物, 如大环内酯、生物碱、萜类、聚酮类、等物质<sup>[27]</sup>。后续将进一步对菌株 L57-60 发酵液组分及抑菌机理进行研究。

## 参考文献:

- [1] 高香辉, 朱丽娜, 谭泽宝, 等. 辣椒疫霉菌拮抗细菌的分离鉴定及防效试验[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2023, 49(2): 201-205.

- [2] 张世才, 李怡斐, 王春萍, 等. 重庆地区辣椒疫霉交配型分布及对烯酰吗啉的敏感性现状[J]. 植物保护, 2022, 48(2): 173–176.
- [3] 张卓. 沼泽红假单胞菌 PSB-06 防治辣椒疫病的微生物学机理研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2021.
- [4] 叶旻硕, 马艳, 黄有军. 生防芽孢杆菌防控辣椒疫病研究进展[J]. 中国农学通报, 2020, 36(15): 123–129.
- [5] 王荣波, 陈姝樽, 肖小露, 等. 枯草芽孢杆菌 BS193 对辣椒疫霉的拮抗作用及其相关生防因子检测[J]. 农业生物技术学报, 2022, 30(4): 772–782.
- [6] 周成萍, 曾会才. 1 株对辣椒疫霉具高抑菌活性放线菌 WZ60 的田间防治试验[J]. 热带作物学报, 2008, 29(1): 106–108.
- [7] 刘晓瑜, 窦桂铭, 马玉超. 生防链霉菌 SAT1 的分离、鉴定及其对辣椒疫霉的生物防治潜力[J]. 广东农业科学, 2014, 41(19): 75–79.
- [8] 王鑫. 辣椒根际菌根辅助放线菌的筛选及其抑病效应[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2022.
- [9] 黄大野, 余志斌, 杜公福等. 淡紫褐链霉菌 NBF715 防控辣椒疫病研究[J]. 北方园艺, 2022, 512(17): 51–56.
- [10] 陈婧, 王彤彤, 马青, 等. 生防链霉菌 YC<sub>2-3</sub> 的筛选、鉴定及其对小麦茎基腐病的防治效果[J]. 植物病理学报, 2023, 53(3): 473–484.
- [11] 张志刚, 王开梅, 吴兆圆, 等. 微生物源生防杀菌剂的筛选方法研究[J]. 湖北农业科学, 2022, 61(18): 78–83.
- [12] 邱萌萌, 吴玉斌, 陆洪省. 枯草芽孢杆菌对土壤群落结构的影响[J]. 南方农业, 2021, 15(3): 179–181.
- [13] 张琦, 申帅, 胡先奇. 蔬菜根结线虫生防放线菌 LY4 的筛选及其鉴定[J]. 江西农业大学学报, 2020, 42(6): 1107–1115.
- [14] 刘婷婷. 稻瘟病生防放线菌的分离鉴定及液体发酵条件的优化[D]. 长春: 吉林农业大学, 2020.
- [15] 牛红杰. 黄瓜枯萎病生防放线菌的分离筛选及其发酵工艺研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2019.
- [16] 朱宏建, 欧阳小燕, 周倩, 等. 一株辣椒尖孢炭疽病菌拮抗菌株的分离鉴定与发酵条件优化[J]. 植物病理学报, 2012, 42(4): 418–424.
- [17] 瞿佳, 孙晓宇, 陈锐, 等. 核桃黑斑病拮抗放线菌 WMF106 发酵条件优化和抑菌物质稳定性[J]. 微生物学通报, 2022, 49(1): 88–100.
- [18] 王雪妍, 马焕, 岳丹丹, 等. 一株西瓜细菌性果斑病生防菌的筛选、鉴定及其培养基优化[J]. 中国瓜菜, 2022, 35(9): 9–15.
- [19] 李婧婷, 韩亚梅, 金歌, 等. 棘孢木霉抑菌谱及木霉菌肥对北苍术根腐病的防治效果[J]. 河北科技师范学院学报, 2022, 36(4): 7–12.
- [20] ZHAN S A, WHITE T L, MARTINEZ M C, et al. Evaluation of plant growth-promoting rhizobacteria for control of *Phytophthora* blight on squash under greenhouse conditions[J]. *Biological Control*, 2010, 53(1): 129–135.
- [21] 潘峰, 汪丁兵, 周倩. 一株拮抗辣椒疫霉的放线菌及其防治效果[J]. 农药, 2021, 60(7): 529–532.
- [22] EZZIYYANI M, REQUENA M E, GILABERT C, et al. Biological control of *phytophthora* root rot of pepper using *trichoderma harzianum* and *Streptomyces rochei* in combination[J]. *Journal of Phytopathology*, 2010, 115(6): 342–349.
- [23] TIAN H, SHAFI J, JI M, et al. Antimicrobial metabolites from *Streptomyces* sp. SN<sub>0280</sub>[J]. *Journal of Natural Products*, 2017, 80(4): 1015–1019.
- [24] LI N, CHEN S M, YAN Z Q, et al. Antimicrobial activity and identification of the biosynthetic gene cluster of X-14952B from *Streptomyces* sp.135[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2021, 12: 703093.
- [25] CHANADECH S, RUEN-NGAM D, INTARAUDOM C, et al. Isolation of manumycin-type derivatives and genome characterization of a marine *Streptomyces* sp. C1-2[J]. *Research in Microbiology*, 2021, 172(2): 103812.
- [26] HE H, HAO X, ZHOU W, et al. Identification of antimicrobial metabolites produced by a potential biocontrol Actinomycete strain A217[J]. *Journal of Applied Microbiology*, 2020, 128(4): 1143–1152.
- [27] 张权, 钱声艳. 链霉菌来源生物碱及药理活性研究进展[J]. 天然产物研究与开发, 2019, 31(8): 1461–1473.

责任编辑: 罗慧敏

英文编辑: 罗维