

# 甘蔗赤腐病菌拮抗放线菌筛选及盆栽防效研究

何狄霏<sup>1</sup>, 田钰洁<sup>1</sup>, 董玲玲<sup>1</sup>, 李亚铭<sup>1</sup>, 何丽莲<sup>1,2\*</sup>, 李富生<sup>1,2\*</sup>

1. 云南农业大学农学与生物技术学院, 云南昆明 650201; 2. 云南农业大学甘蔗研究所, 云南昆明 650201

**摘要:** 为筛选出对甘蔗赤腐病具有良好防治效果的放线菌, 丰富甘蔗赤腐病的生防菌资源, 本研究从甘蔗根际土壤中筛选得到 JY53、WK29、JR28 三株对甘蔗赤腐病菌抑菌效果较优的放线菌, 经鉴定分别为弗吉尼亚链霉菌 (*Streptomyces virginiae*)、伊朗链霉菌 (*S. iranensis*) 和淡紫灰链霉菌 (*S. lavendulae*)。WK29 对 6 种植物病原菌的抑菌率为 68.41%~78.22%; JY53 对 5 种病原菌的抑菌率为 58.66%~72.85%; JR28 对 4 种植物病原菌的抑菌率为 27.69%~60.15%, 3 株菌均具有一定广谱性。进一步探究其抑菌机理发现, 菌株 JY53 通过产  $\beta$ -葡聚糖酶、嗜铁素及挥发性物质抑制病原菌生长, 菌株 WK29、JR28 则通过产蛋白酶、 $\beta$ -葡聚糖酶、纤维素酶、嗜铁素及挥发性物质抑制病原菌生长。盆栽试验表明, 放线菌 JY53、WK29、JR28 菌液处理后, 甘蔗赤腐病发病指数分别为 28.00、25.33、22.67, 显著低于 CK 的 64.00, 并且具有较好的促生长效果。本研究表明, JY53、WK29、JR28 三株放线菌对甘蔗赤腐病具有一定防治效果, 进一步丰富了甘蔗赤腐病生防菌资源。

**关键词:** 甘蔗赤腐病; 放线菌; 抑菌机理; 生物防治

中图分类号: S435.661; S476.1 文献标志码: A

## Screening of Antagonistic Actinomycetes Against Sugarcane Red Rot Pathogen and Efficacy of Potted Plant Control

HE Difei<sup>1</sup>, TIAN Yujie<sup>1</sup>, DONG Lingling<sup>1</sup>, LI Yaming<sup>1</sup>, HE Lilian<sup>1,2\*</sup>, LI Fusheng<sup>1,2\*</sup>

1. College of Agronomy and Biotechnology, Yunnan Agricultural University, Kunming, Yunnan 650201, China; 2. Sugarcane Research Institute, Yunnan Agricultural University, Kunming, Yunnan 650201, China

**Abstract:** The study was aimed to screen actinomycetes with good control effects on sugarcane red rot and enrich the resources of biocontrol bacteria for sugarcane red rot. JY53, WK29 and JR28 were screened from sugarcane rhizosphere soil, which showed superior antifungal effects against sugarcane red rot pathogen. They were identified as *Streptomyces virginiae*, *S. iranensis* and *S. lavendulae*, respectively. The antifungal rate of WK29 against six plant pathogens ranged from 68.41% to 78.22%. The antifungal rate of JY53 against five pathogens ranged from 58.66% to 72.85%. The inhibition rates of four plant pathogens by JR28 ranged from 27.69% to 60.15%. All the strains exhibited a certain broad-spectrum activity. Further exploration of the antifungal mechanism revealed that JY53 inhibited pathogen growth by producing  $\beta$ -glucanase, siderophore and volatile substances, while WK29 and JR28 inhibited pathogen growth by producing protease,  $\beta$ -glucanase, cellulase, siderophore and volatile substances. Pot experiment showed that after treatment with the bacterial solution of JY53, WK29 and JR28, the incidence indice of sugarcane red rot was 28.00, 25.33 and 22.67, respectively, significantly lower than 64.00 of the CK, and had a good growth promoting effect. This study indicates that actinomycetes JY53, WK29 and JR28, have certain effects on the prevention and control of sugarcane red rot disease, further enriching the resources of biocontrol bacteria for sugarcane red rot disease.

**Keywords:** sugarcane red rot; actinomycete; bacteriostasis mechanism; biological control

DOI: 10.3969/j.issn.1000-2561.2026.02.021

收稿日期 2025-10-16; 接受日期 2025-11-20

基金项目 云南省重大科技专项 (No. 202202AE090021); 云南省现代农业甘蔗产业技术体系建设专项 (2023—2024); 云南省省级甘蔗种质资源圃建设项目 (2021—2024)

作者简介 何狄霏 (1998—), 男, 硕士研究生, 研究方向: 作物生理生态与产量品质形成。\*通信作者 (Corresponding author): 何丽莲 (HE Lilian), E-mail: helilan905@sohu.com; 李富生 (LI Fusheng), E-mail: lfs810@sina.com。

甘蔗 (*Saccharum officinarum* L.) 是一年生或多年生的高光效 C4 作物, 全球年产新鲜甘蔗约 19 亿 t, 占世界食糖的近 80% 和生物乙醇的 40%, 产值达 800 亿美元<sup>[1-2]</sup>。在甘蔗的多种生物胁迫中, 由镰孢炭疽菌 (*Colletotrichum falcatum* Went) 引起的赤腐病是世界范围内严重制约甘蔗产业可持续发展的主要病害, 以为害甘蔗叶片中脉和蔗茎为主, 故常分为中脉赤腐病和蔗茎赤腐病。中脉赤腐病感病初期病斑呈血红色小点, 感病后期中心变成稻草色, 病斑通常沿着中脉上下延伸, 有时呈连串红色斑点, 与健康组织交替出现<sup>[3]</sup>。该病害最具破坏性的阶段为病原体侵染蔗茎时, 蔗茎纵剖通常可见茎内组织呈淡红色或红色云彩状斑块, 细闻有淀粉发酵的酸味<sup>[4]</sup>。甘蔗赤腐病的暴发能使甘蔗产量减少 5%~50%, 这一损失导致糖回收率仅为 31%<sup>[5]</sup>。目前, 甘蔗赤腐病的防治策略主要以抗性育种<sup>[6]</sup>、化学防治<sup>[7]</sup>、生物防治<sup>[8]</sup>为主。由于抗性育种周期长、抗性易丧失, 化学防治对环境危害较大, 且苯并咪唑类杀菌剂易使病原菌产生抗药性, 生物防治因其安全、绿色、无污染等优点, 成为甘蔗赤腐病防治研究领域的一大热点<sup>[9]</sup>。因此, 筛选对甘蔗赤腐病菌具有拮抗作用的生防菌株, 对丰富甘蔗赤腐病生防菌株资源, 以及甘蔗赤腐病的绿色安全防治具有重要意义。

近年来, 针对甘蔗赤腐病生物防治的研究主要围绕芽孢杆菌 (*Bacillus* spp.)、假单胞菌 (*Pseudomonas* spp.)、木霉 (*Trichoderma* spp.) 展开, 关于使用放线菌防治甘蔗赤腐病的研究鲜有报道。例如, XIA 等<sup>[10]</sup>筛选得到一株厦门芽孢杆菌 (*B. xiamenensis*) PM14, 接种到甘蔗植株上发现其能够提高抗氧化酶活性和脯氨酸含量, 进而诱导甘蔗产生系统性抗性, 有效增强植株对赤腐病的防御能力, 同时促进甘蔗的生长; SHAIR 等<sup>[11]</sup>报道, 对甘蔗赤腐病菌具有拮抗作用的假单胞菌 HU-8 和 HU-9, 能够介导甘蔗植株对赤腐病菌的防御反应; JOSHI 等<sup>[12]</sup>分离筛选得到 2 株木霉并制成菌剂, 通过药剂处理、土壤施用和二者结合 3 种不同的施药方式, 评价了木霉菌剂对甘蔗红腐病的抑制潜力。放线菌作为抗生素的重要来源, 其生防效果显著, 因此进入研究者视野, 国内外学者针对链霉菌防治作物病害展开了众多研究。比如, WANG 等<sup>[13]</sup>研究发现, 从甘蔗根际土壤中分离筛选得到灰褐赤链霉菌 (*S.*

*griseorubiginosus*) BTU6, 该菌株可通过调节甘蔗植株中与胁迫抗性相关的酶活性和代谢物质, 显著增强甘蔗对黑穗病的抗性; 基因组分析表明, BTU6 具有生物合成几丁质酶、 $\beta$ -1,3-葡聚糖酶和多种次生代谢产物的能力, 在生物胁迫条件下对保障甘蔗植株健康具有重要作用。孙天宇等<sup>[14]</sup>从土样中筛选出 6 株对青枯劳尔氏菌抑制效果较好的放线菌, 盆栽防效达到 69.23%~100.00%, 且具有多种胞外酶活性、较强的 pH 和盐耐受能力等。陈婧等<sup>[15]</sup>研究发现, 直丝紫链霉菌 (*S. rectiviolaceus*) YC2-3 处理的治疗组和预防组均可降低小麦茎基腐病的发病率和病情指数; 基因组分析表明, 该菌株具有合成多种抗生素的核心基因。综上所述, 在植物相关的众多微生物中, 链霉菌因其出色的生物活性代谢物合成能力及显著的抗真菌特性, 成为农业生防领域的宝贵资源。但应用于甘蔗赤腐病防治的生防放线菌相对较少, KATHIRESAN 等<sup>[16]</sup>分离筛选得到 10 株放线菌, 其对镰孢炭疽菌 (*C. falcatum*) 的抑制带宽为 3.0~27.5 mm, 而目前尚未见其在植株上开展防效验证的研究报道。因此, 有必要进一步分离、筛选对甘蔗赤腐病具有较好防治效果的生防放线菌。

本研究采用稀释涂布平板法分离培养甘蔗根际可培养放线菌, 通过平板对峙法和菌丝生长速率法筛选目标菌株; 利用显微结构观察、培养特征分析、生理生化试验和分子生物学鉴定技术, 明确目标菌株的分类地位; 在此基础上, 测定其抑菌谱, 并进一步通过测定目标菌株的产胞外酶能力、产嗜铁素能力及挥发性物质抑菌能力, 解析其抑菌机理; 最后, 通过盆栽试验验证目标菌株的生防促生长潜力, 以期放线菌在甘蔗赤腐病生物防治中的应用提供理论支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

1.1.1 供试土壤 供试土壤采自健康和感染赤腐病盆栽甘蔗植株根际, 置于-80℃冰箱保存, 备用。

1.1.2 供试病原菌 甘蔗赤腐病菌 (*Colletotrichum falcatum* Went)、甘蔗梢腐病菌 (*Fusarium moniliforme*)、立枯丝核菌 (*Rhizoctonia solani*)、尖孢镰刀菌 (*Fusarium oxysporum*)、烟草赤星病菌 (*Alternaria alternata*)、玉米小斑病菌 (*Bipolaris maydis*)、烟草炭疽病菌 (*Colletotrichum gloeo-*

*sporioides*) 均由云南农业大学甘蔗研究所保存。

1.1.3 供试商业菌剂 枯草芽孢杆菌微生物菌剂购自潍坊神能生物科技有限公司; 哈茨木霉微生物菌剂购自广州慕恩生物科技有限公司。

1.1.4 供试甘蔗品种 供试甘蔗为新台糖 22 号, 由云南农业大学甘蔗研究所资源圃提供。

1.1.5 供试培养基 参照蒋冬阳等<sup>[17]</sup>的方法配制高氏一号培养基、马铃薯浸汁培养基、葡聚糖酶鉴定培养基、纤维素酶鉴定培养基、蛋白酶鉴定培养基、嗜铁素鉴定培养基; 依据《放线菌快速鉴定与系统分类》<sup>[18]</sup>配制培养特征观察培养基、生理生化鉴定培养基。

## 1.2 方法

1.2.1 拮抗放线菌的分离 采用稀释涂布平板法<sup>[19]</sup>分离放线菌。取 10 g 土壤样品加至装有 90 mL 无菌水的 250 mL 锥形瓶, 于 28 °C、180 r/min 振荡 1 h, 静置 5 min, 上清液置于装有 9 mL 无菌水的灭菌试管中, 将上清液梯度稀释为  $10^{-3}$ 、 $10^{-4}$ 、 $10^{-5}$ , 各取 100  $\mu$ L 稀释液涂布于添加 0.05 g/L 重铬酸钾的高氏 1 号培养基, 于 28 °C 培养 3~5 d, 挑取不同形态的放线菌转接 2 次获得纯培养物, 用 70% 甘油保存于 -80 °C 冰箱中, 备用。

1.2.2 拮抗放线菌的筛选 采用平板对峙法<sup>[20]</sup>对拮抗放线菌进行初筛。打取直径为 5 mm 的放线菌菌饼接种于 PDA 平板培养基, 十字交叉 4 点接种, 接种点距培养皿中心 25 mm, 于 28 °C 培养 1 d。随后打取直径为 7 mm 的甘蔗赤腐病菌接种于培养基中央, 以未接放线菌的培养基为对照, 每个处理 3 次重复。于 28 °C 继续培养至对照病原菌菌落长满培养皿, 采用十字交叉法测量各处理病原菌菌落直径, 计算抑菌率。抑菌率=(对照菌落直径-处理菌落直径)/对照菌落直径 $\times$ 100%。

采用菌丝生长速率法<sup>[21]</sup>对初筛抑菌效果较好的放线菌进行复筛。打取 3 个直径为 7 mm 的放线菌菌饼, 接种于装有 50 mL 高氏一号液体培养基的锥形瓶中, 于 28 °C、180 r/min 振荡培养 7 d。取 30 mL 菌液于 10 000 r/min 离心 10 min, 上清液使用 0.22  $\mu$ m 无菌滤器过滤得到无菌发酵液。将无菌发酵液与 PDA 培养基以 1:10 (V/V) 混匀倒平板, 冷却凝固后在平板培养基中央接入直径为 5 mm 的病原菌菌饼。以加入同一比例无菌水的培养基为对照, 每个处理 3 次重复。于 28 °C 培养至对照病原菌菌落长满平板, 采用十字交叉法测量各处理病原菌菌落直径, 计算抑菌率。

1.2.3 拮抗放线菌的分类鉴定 采用插片法<sup>[22]</sup>观察拮抗放线菌的菌丝和孢子形态结构。依据《放线菌快速鉴定与系统分类》<sup>[18]</sup>描述的方法, 将拮抗放线菌划线分别接种于马铃薯浸汁培养基、查氏培养基、甘油-天冬酰胺培养基、无机盐淀粉培养基、酵母膏-麦芽汁培养基、燕麦培养基、营养琼脂培养基, 观察培养特征, 并进行淀粉水解试验、甲基红试验、接触酶试验、H<sub>2</sub>S 产生试验、明胶液化试验、硝酸还原试验及碳源利用试验, 观察拮抗放线菌的生理生化特征。

按照天根细菌基因组 DNA 提取试剂盒说明书提取拮抗放线菌总 DNA, 以此为模板采用 16S rRNA 基因引物对进行 PCR 扩增<sup>[23]</sup>。PCR 产物利用 1% 琼脂糖凝胶电泳检测合格后, 送生工生物工程(上海)股份有限公司进行测序。获得的 16S rRNA 基因序列上传至 NCBI (<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/>) 数据库进行 BLAST 序列比对, 并下载相似度较高的菌株序列, 利用 MEGA 11 软件进行同源性分析, 采用邻接法构建系统进化树。

1.2.4 拮抗放线菌的抑菌谱测定 采用平板对峙法测定拮抗放线菌对甘蔗梢腐病菌、立枯丝核菌、尖孢镰刀菌、烟草赤星病菌、玉米小斑病菌、烟草炭疽病菌 6 种植物病原真菌的抑菌效果, 每个处理 3 次重复。方法同 1.2.2。

1.2.5 拮抗放线菌抑菌机理初探 (1) 产胞外酶能力测定。分别将放线菌点接至葡聚糖酶鉴定培养基、纤维素酶鉴定培养基、蛋白酶鉴定培养基平板, 于 28 °C 下培养 7 d, 观察菌落外围有无透明圈或橘黄色晕圈出现。

(2) 产嗜铁素能力测定。定性测定: 分别将放线菌点接至嗜铁素鉴定培养基平板, 于 28 °C 下培养 7 d, 观察菌落外围有无透明圈。

定量测定: 参照 MACHUCA 等<sup>[24]</sup>的方法测定菌株的产嗜铁素能力。将菌株以 1% 的接种量接种至 MKB 液体培养基中, 于 30 °C、160 r/min 的摇床中培养 3 d 后, 将菌液于 10 000 r/min 离心 10 min。将菌株上清液与 CAS 检测液以 1:1 (V/V) 比例混匀后反应 1 h, 于波长 630 nm 处测定反应混合物的光密度值, 以去离子水作为空白对照调零。菌株的光密度值记为  $A_s$ , 对照记为  $A_r$ , 最后计算嗜铁素的相对含量 ( $A_s/A_r$ )。

(3) 挥发性物质抑菌能力测定。采用双皿倒扣法<sup>[25]</sup>测定拮抗放线菌挥发性物质对赤腐病病原菌的抑菌能力。将拮抗放线菌划线接种于

高氏一号平板上，于 28 ℃ 恒温培养 3 d，另外打取新鲜的病原菌菌饼，接种至新的 PDA 平板中央，将接种病原菌的新平板倒扣在接种优良放线菌的平板上，用保鲜膜将 2 个培养皿密封，于 28 ℃ 恒温培养 5 d，以未经拮抗放线菌挥发性物质处理的病原菌平板作为对照。每组处理重复 3 次。采用十字交叉法测定病原菌菌落直径，计算抑菌率。

1.2.6 温室盆栽测定苗期防效 设置 7 个处理：（1）清水为空白对照；（2）多菌灵；（3）商业芽孢杆菌菌剂；（4）商业木霉菌菌剂；（5）JY53 菌液；（6）WK29 菌液；（7）JR28 菌液。具体步骤：砍取粗细、长度基本一致的甘蔗单芽茎，用多菌灵浸泡脱毒后在清水中进行催芽，7 d 后选取长势一致的种苗移栽至规格为 15 cm×15 cm 的塑料花盆中，每盆 1 株，每个处理 5 盆，3 次重复。待生长整齐后开始施浇菌液，菌液浓度为  $1\times10^5$  CFU/mL，每盆 50 mL，每隔 7 d 施浇 1 次，施浇 3 次。多菌灵及商业菌剂的施用量和频率按说明书施用：多菌灵按 1500 倍稀释，每盆 50 mL，因

间隔期为 20 d，试验期间施浇 1 次；商业芽孢杆菌制剂按 1000 倍稀释，每盆 50 mL，因间隔期为 30 d，试验期间施浇 1 次；商业木霉制剂按 500 倍稀释，每盆 50 mL，因间隔期为 20~30 d，试验期间施浇 1 次。随后采用伤根法接种浓度为  $1\times10^7$  CFU/mL 的赤腐病病原菌孢子液。30 d 后统计发病植株数，并参照 XIE 等<sup>[26]</sup>的方法进行发病等级分级，并计算病情指数和相对防效。

1.3 数据处理  
使用 Microsoft Excel 2016 软件对试验数据进行处理和绘图，利用 IBM SPSS Statistics 27 统计学软件 ANOVA 进行邓肯氏差异显著性分析。

2 结果与分析

2.1 拮抗放线菌分离与初筛

从供试土壤中分离得到 364 株放线菌。以甘蔗赤腐病菌为靶菌株，采用平板对峙法初筛得到具有拮抗作用的放线菌 19 株，其中抑菌率大于 70% 的有 6 株，分别为 WR12、WR37、JY53、JR28、WK29、WR1（表 1）。

表 1 拮抗放线菌初筛  
Tab. 1 Initial screening of actinomycetes

| 菌株<br>Strain | 病原菌菌落直径<br>Colony diameter of pathogen/mm | 抑菌率<br>Inhibition rate/% | 菌株<br>Strain | 病原菌菌落直径<br>Colony diameter of pathogen/mm | 抑菌率<br>Inhibition rate/% |
|--------------|-------------------------------------------|--------------------------|--------------|-------------------------------------------|--------------------------|
| WR12         | 18.36±0.36 <sup>a</sup>                   | 78.40±0.43 <sup>a</sup>  | WY18         | 29.38±0.14 <sup>e</sup>                   | 65.44±0.16 <sup>h</sup>  |
| WR37         | 20.26±0.21 <sup>m</sup>                   | 76.17±0.24 <sup>b</sup>  | WK30         | 29.44±0.09 <sup>e</sup>                   | 65.36±0.11 <sup>h</sup>  |
| JY53         | 20.32±0.18 <sup>m</sup>                   | 76.09±0.21 <sup>b</sup>  | WR2          | 30.43±0.27 <sup>f</sup>                   | 64.20±0.31 <sup>i</sup>  |
| JR28         | 21.41±0.03 <sup>l</sup>                   | 74.81±0.04 <sup>c</sup>  | WK64         | 30.50±0.30 <sup>f</sup>                   | 64.13±0.36 <sup>i</sup>  |
| WK29         | 21.47±0.10 <sup>l</sup>                   | 74.74±0.11 <sup>c</sup>  | WK8          | 31.42±0.05 <sup>c</sup>                   | 63.03±0.06 <sup>j</sup>  |
| WR1          | 22.51±0.09 <sup>k</sup>                   | 73.53±0.10 <sup>d</sup>  | JR13         | 33.26±0.12 <sup>d</sup>                   | 60.87±0.15 <sup>k</sup>  |
| JC55         | 25.57±0.07 <sup>j</sup>                   | 69.92±0.09 <sup>e</sup>  | JC42         | 37.41±0.21 <sup>c</sup>                   | 55.99±0.25 <sup>l</sup>  |
| WR25         | 26.00±0.08 <sup>i</sup>                   | 69.41±0.10 <sup>f</sup>  | JR35         | 42.36±0.23 <sup>b</sup>                   | 50.16±0.27 <sup>m</sup>  |
| WC25         | 28.47±0.25 <sup>b</sup>                   | 66.50±0.29 <sup>e</sup>  | WY17         | 42.50±0.10 <sup>b</sup>                   | 50.00±0.12 <sup>m</sup>  |
| JC14         | 29.30±0.05 <sup>e</sup>                   | 65.54±0.07 <sup>h</sup>  | CK           | 85.00±0.00 <sup>a</sup>                   |                          |

注：同列不同小写字母表示差异显著（ $P<0.05$ ）。  
Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant difference ( $P<0.05$ ).

2.2 拮抗放线菌复筛效果

采用菌丝生长速率法对初筛抑菌率大于 70% 的放线菌进行复筛。结果表明，6 株放线菌的无菌发酵液均对赤腐病菌具有抑制效果，菌株 JY53、WK29、JR28 的抑菌效果较好，抑菌率分别为 87.53%、85.84%、84.93%（表 2）。因此将菌株 JY53、WK29、JR28 作为后续试验菌株，用于进一步研究分析。

2.3 拮抗放线菌的鉴定

对菌株 JY53、WK29、JR28 进行培养特征观察，结果表明，菌株 JY53 的气生菌丝在甘油-天冬酰胺培养基、营养琼脂培养基中呈白色，在其余培养基中呈紫色或淡紫色；基内菌丝在无机盐淀粉培养基、营养琼脂培养基中呈白色，在其余培养基中呈黄色或橙黄色，二者均无横隔、具分支；孢子丝呈直链状，孢子为椭圆形（图 1A，表



表 2 拮抗放线菌复筛  
Tab. 2 Antagonistic actinomycetes rescreening

| 菌株<br>Strain | 病原菌菌落直径<br>Colony diameter of pathogen/mm | 抑菌率<br>Inhibition rate/% |
|--------------|-------------------------------------------|--------------------------|
| JY53         | 10.60±0.09 <sup>e</sup>                   | 87.53±0.10 <sup>a</sup>  |
| WK29         | 12.04±0.67 <sup>f</sup>                   | 85.84±0.78 <sup>b</sup>  |
| JR28         | 12.81±0.55 <sup>e</sup>                   | 84.93±0.64 <sup>c</sup>  |
| WR12         | 18.34±0.05 <sup>d</sup>                   | 78.43±0.05 <sup>d</sup>  |
| WR37         | 28.69±0.07 <sup>c</sup>                   | 66.25±0.08 <sup>e</sup>  |
| WR1          | 34.54±0.18 <sup>b</sup>                   | 59.36±0.22 <sup>f</sup>  |
| CK           | 85.00±0.00 <sup>a</sup>                   |                          |

注：同列不同小写字母表示差异显著 ( $P<0.05$ )。  
Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant difference ( $P<0.05$ ).

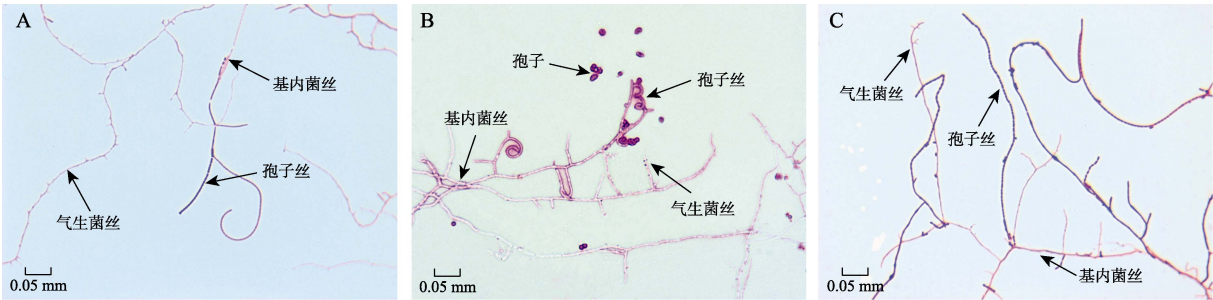


图 1 菌株 JY53 (A)、WK29 (B)、JR28 (C) 的显微结构  
Fig. 1 Microstructure of JY53 (A), WK29 (B) and JR28 (C)

表 3 菌株 JY53、WK29、JR28 在不同培养基上的培养特征  
Tab. 3 Growth characteristics of JY53, WK29 and JR28 on different media

| 培养基<br>Culture medium | JY53                  |                     |                          | WK29                  |                     |                          | JR28                  |                     |                          |
|-----------------------|-----------------------|---------------------|--------------------------|-----------------------|---------------------|--------------------------|-----------------------|---------------------|--------------------------|
|                       | 气生菌丝<br>Aerial hyphae | 基内菌丝<br>Base hyphae | 可溶性色素<br>Soluble pigment | 气生菌丝<br>Aerial hyphae | 基内菌丝<br>Base hyphae | 可溶性色素<br>Soluble pigment | 气生菌丝<br>Aerial hyphae | 基内菌丝<br>Base hyphae | 可溶性色素<br>Soluble pigment |
| 查氏培养基                 | 淡紫色                   | 黄色                  | 无                        | 灰色                    | 白色                  | 无                        | 淡紫色                   | 白色                  | 无                        |
| 甘油-天冬酰胺培养基            | 白色                    | 黄色                  | 无                        | 白色                    | 黄色                  | 无                        | 淡紫色                   | 黄色                  | 无                        |
| 无机盐淀粉培养基              | 紫色                    | 白色                  | 无                        | 白色                    | 黄色                  | 无                        | 淡紫色                   | 白色                  | 无                        |
| 酵母膏-麦芽汁培养基            | 淡紫色                   | 黄色                  | 无                        | 白色                    | 黄色                  | 无                        | 淡紫色                   | 黄色                  | 无                        |
| 燕麦片培养基                | 淡紫色                   | 橙黄色                 | 无                        | 白色                    | 橙黄色                 | 无                        | 紫色                    | 黄色                  | 无                        |
| 马铃薯浸汁培养基              | 淡紫色                   | 橙黄色                 | 无                        | 白色                    | 橙黄色                 | 无                        | 紫色                    | 褐色                  | 无                        |
| 营养琼脂培养基               | 白色                    | 白色                  | 无                        | 白色                    | 黄色                  | 无                        | 白色                    | 黄色                  | 无                        |

生理生化检测结果表明,菌株 JY53 的  $H_2S$  产生试验、明胶液化试验、硝酸还原试验均为阳性,能够利用葡萄糖、麦芽糖;菌株 WK29 的淀粉水解试验、接触酶试验、明胶液化试验、硝酸还原试验均为阳性,能利用葡萄糖;菌株 JR28 的淀粉水解试验、硝酸还原试验为阳性,能利用葡萄糖、蔗糖(表 4)。

通过扩增菌株 JY53、WK29、JR28 的 16S rDNA 序列并测序,测序结果上传至 GenBank 数

3)。菌株 WK29 在查氏培养基上气生菌丝呈灰色,基内菌丝呈白色,在其余培养基上气生菌丝均呈白色,基内菌丝均呈黄色或橙黄色,基内菌丝发达、无横隔、不断裂,气生菌丝分支广泛;孢子丝呈螺旋状,孢子为椭圆形或圆形(图 1B,表 3)。菌株 JR28 的气生菌丝在营养琼脂培养基上为白色,在其余培养基上为紫色或淡紫色,基内菌丝在马铃薯浸汁培养基上呈褐色,在查氏培养基、无机盐淀粉培养基上呈白色,在其余培养基上呈黄色,基内菌丝无横隔,气生菌丝分支多而短;孢子丝呈直链状,孢子为椭圆形(图 1C,表 3)。

数据库,登录号分别为 PX533038、PX533039、PX533040。在 NCBI 数据库中进行 BLAST 比对,选取相似性较高的不同菌株序列构建系统发育树(图 2),结果表明,菌株 JY53 与弗吉尼亚链霉菌(*Streptomyces virginiae*)同源性最高(99.65%),且聚为一支;菌株 WK29 与伊朗链霉菌(*Streptomyces iranensis*)同源性最高(99.86%),且聚为一支;而菌株 JR28 则与淡紫灰链霉菌(*Streptomyces lavendulae*)同源性最高(99.93%),

表 4 菌株 JY53、WK29、JR28 的生理生化特征  
Tab. 4 Physiological and biochemical characteristics of JY53, WK29 and JR28

| 项目 Item               | JY53 | WK29 | JR28 |
|-----------------------|------|------|------|
| 淀粉水解试验                | —    | +    | +    |
| 甲基红试验                 | —    | —    | —    |
| 接触酶试验                 | —    | +    | —    |
| H <sub>2</sub> S 产生试验 | +    | —    | —    |
| 明胶液化试验                | +    | +    | —    |
| 硝酸还原试验                | +    | +    | +    |
| 葡萄糖                   | +    | +    | +    |
| 麦芽糖                   | +    | —    | —    |
| 甘露醇                   | —    | —    | —    |

注：+表示阳性；—表示阴性。  
Note: + means positive; — means negative.

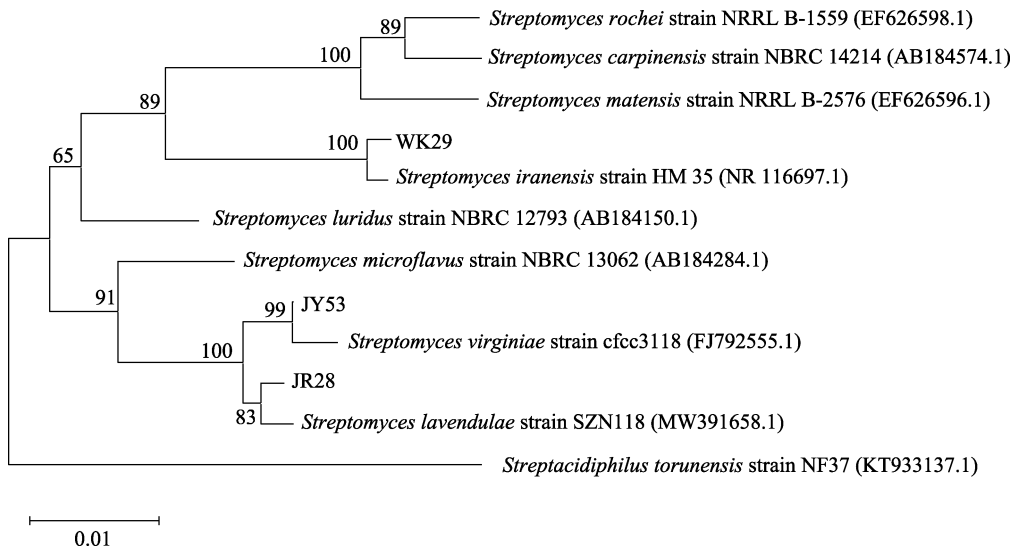


图 2 基于 16S rDNA 序列的系统发育树  
Fig. 2 Phylogenetic tree based on 16S rDNA sequence

表 5 菌株 JY53、WK29、JR28 对 6 种植物病原菌的抑菌率  
Tab. 5 Antifungal rates of JY53, WK29 and JR28 against six plant pathogens

| 病原真菌<br>Pathogenic fungi | 抑菌率 Inhibition rate/% |            |            |
|--------------------------|-----------------------|------------|------------|
|                          | JY53                  | WK29       | JR28       |
| 甘蔗梢腐病菌                   | 0                     | 68.41±1.27 | 0          |
| 立枯丝核菌                    | 58.68±0.46            | 69.29±0.27 | 0          |
| 尖孢镰刀菌                    | 63.30±0.16            | 73.08±0.19 | 27.69±1.52 |
| 烟草赤星病菌                   | 53.86±0.18            | 72.87±0.19 | 53.90±0.70 |
| 玉米小斑病菌                   | 51.35±0.77            | 78.22±0.38 | 34.60±0.53 |
| 烟草炭疽病菌                   | 72.85±0.28            | 70.88±0.94 | 60.15±0.18 |

2.5 拮抗放线菌抑菌机理初探

2.5.1 产胞外酶能力 产胞外酶能力检测结果如图 4A 所示，菌株 JY53 能够产  $\beta$ -葡聚糖酶，但不

且聚为一支。综合形态观察、培养特征观察、生理生化指标及 16S rDNA 鉴定结果，初步将菌株 JY53、WK29、JR28 分别鉴定为弗吉尼亚链霉菌（*S. virginiae*）、伊朗链霉菌（*S. iranensis*）、淡紫灰链霉菌（*S. lavendulae*）。

2.4 拮抗放线菌的抑菌谱

采用平板对峙法测定菌株 JY53、WK29、JR28 的抑菌谱，结果表明，菌株 WK29 的抑菌广谱性最佳，对 6 种植物病原菌的抑菌率为 68.41%~78.22%；菌株 JY53 次之，对甘蔗梢腐病菌无抑制作用，对其他病原菌的抑菌率为 58.66%~72.85%；菌株 JR28 抑菌广谱性稍差，对甘蔗梢腐病菌、立枯丝核菌无抑菌效果，对其他植物病原菌的抑菌率仅为 27.69%~60.15%（表 5，图 3）。

产蛋白酶、纤维素酶；菌株 WK29 和 JR28 均产蛋白酶、 $\beta$ -葡聚糖酶及纤维素酶。

2.5.2 产嗜铁素能力 CAS 固体检测培养基上 3 株放线菌周围均有橘黄色晕圈，初步认为均具备产嗜铁素能力（图 4B）。采用紫外分光光度法对 3 株放线菌产嗜铁素能力进行定量测定，根据嗜铁素相对含量（As/Ar）的大小来判断菌株分泌嗜铁素的能力，As/Ar 越小，表明菌株产嗜铁素量越多。由图 4C 可知，菌株培养 3 d 后嗜铁素相对含量为 JR28 > JY53 > WK29，且差异显著，表明菌株产嗜铁素的能力为 WK29 > JY53 > JR28。

2.5.3 挥发性物质的抑菌能力 采用双皿倒扣法测定放线菌菌株 JY53、WK29、JR28 挥发性物质对赤腐病菌的抑菌效果。结果表明，菌株 JY53

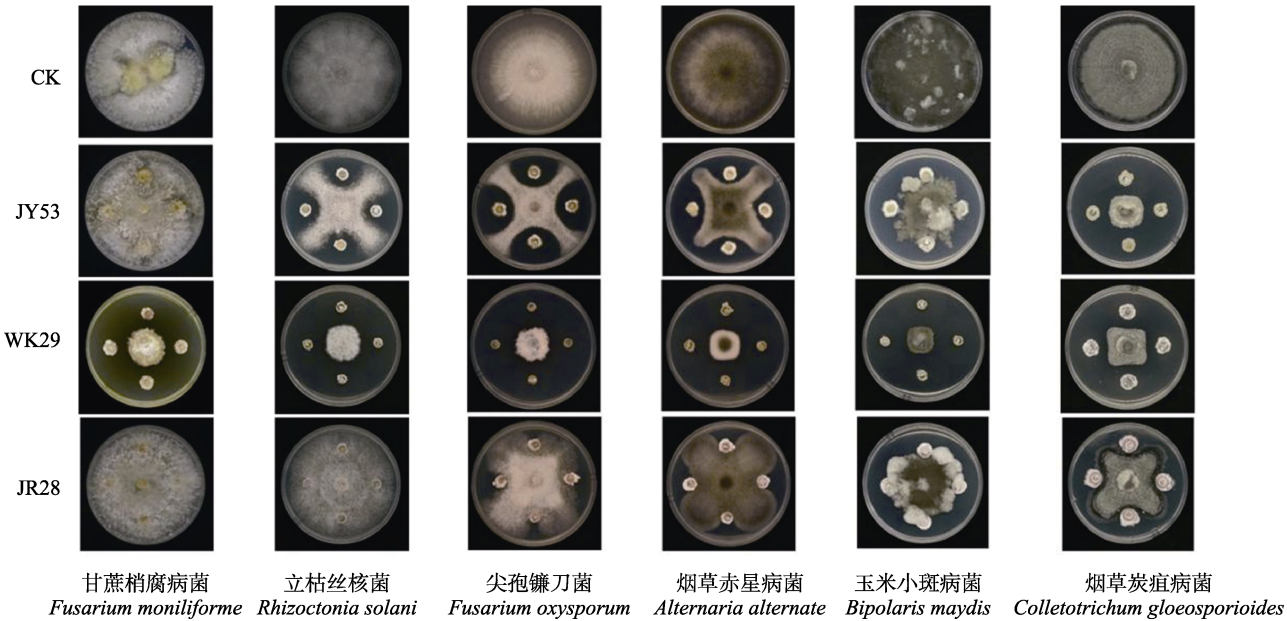


图 3 菌株 JY53、WK29、JR28 对 6 种植物病原菌的抑制效果  
Fig. 3 Inhibitory effects of strains JY53, WK29 and JR28 on six plant pathogens

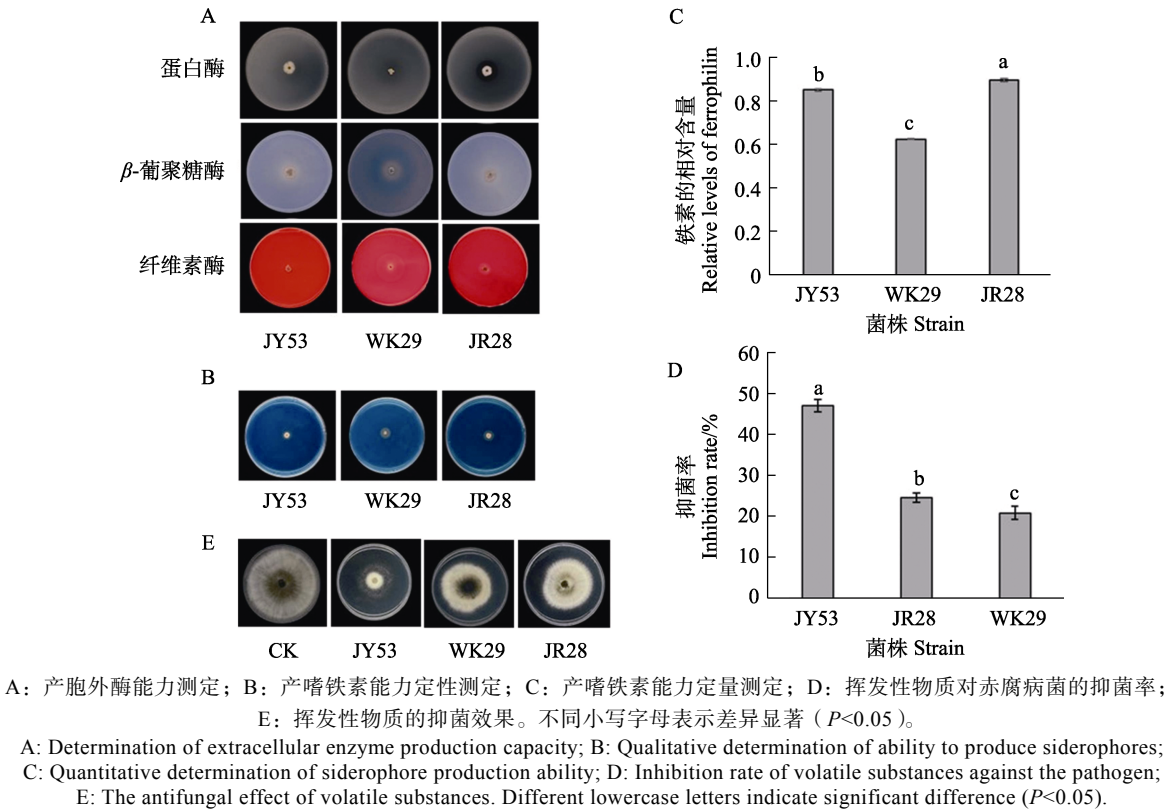


图 4 放线菌 JY53、WK29 和 JR28 的抑菌机制  
Fig. 4 Antifungal mechanism of JY53, WK29 and JR28

挥发性物质处理的赤腐病菌菌落直径最小，抑菌率达 46.85%；其次为菌株 JR28，抑菌率为 24.54%；WK29 的抑菌率最低，为 20.81 % (图 4D~图 4E)。

2.6 温室盆栽苗期防效测定

为探究根际放线菌株对甘蔗赤腐病的防治效

果，接种病原菌后，统计不同处理组的发病植株，计算病情指数。结果如表 6 所示，CK 甘蔗的病情指数为 64.00，商业菌剂木霉菌、芽孢杆菌处理组的甘蔗病情指数分别为 28.00、25.33，高于放线菌 JR28、WK29 处理组；放线菌 JR28、WK29 处

理组的病情指数与多菌灵处理组无显著差异。结果表明，放线菌菌液处理对甘蔗赤腐病具有一定的防治作用。此外，通过测定植株株高和茎粗对菌株促生效果进行评价，结果表明，与商业菌剂木霉菌、芽孢杆菌及多菌灵处理组相比，所有放线菌处理均能提高甘蔗株高和茎粗，其中促生效果最好的菌株 JR28 与商业菌剂木霉菌、芽孢杆菌、多菌灵处理组相比，株高分别提高了 17.31%、24.20%和 29.63%，说明根际放线菌不仅对甘蔗赤腐病有防治效果，还能促进甘蔗植株生长(表 6)。

表 6 不同处理对甘蔗赤腐病防效及促生效果评价  
Tab. 6 Evaluation of control and growth promotion effects of different treatments on sugarcane red rot disease

| 处理<br>Treatment | 株高<br>Plant height/cm   | 茎粗<br>Stem diameter/mm   | 病情指数<br>Disease index    | 相对防效<br>Relative control effect/% |
|-----------------|-------------------------|--------------------------|--------------------------|-----------------------------------|
| CK              | 22.81±1.36 <sup>e</sup> | 13.22±0.79 <sup>e</sup>  | 64.00±2.31 <sup>a</sup>  |                                   |
| 多菌灵             | 25.14±1.60 <sup>e</sup> | 14.09±0.73 <sup>d</sup>  | 20.00±2.31 <sup>c</sup>  | 68.75                             |
| 木霉              | 27.78±1.94 <sup>d</sup> | 15.09±1.15 <sup>c</sup>  | 28.00±2.31 <sup>b</sup>  | 56.25                             |
| 芽孢杆菌            | 26.24±1.90 <sup>d</sup> | 14.69±1.44 <sup>cd</sup> | 25.33±2.67 <sup>bc</sup> | 60.42                             |
| JY53            | 29.05±1.60 <sup>b</sup> | 15.98±1.04 <sup>b</sup>  | 28.00±2.31 <sup>b</sup>  | 56.25                             |
| WK29            | 32.17±1.68 <sup>a</sup> | 16.60±1.06 <sup>ab</sup> | 25.33±1.33 <sup>bc</sup> | 60.42                             |
| JR28            | 32.59±1.18 <sup>a</sup> | 17.06±0.83 <sup>a</sup>  | 22.67±1.33 <sup>bc</sup> | 64.58                             |

注：同列不同小写字母表示差异显著 (  $P<0.05$  )。  
Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant difference (  $P<0.05$  ).

3 讨论

赤腐病是甘蔗土传病害中具有较高普遍性和危害性的一种病害,当前针对该病害筛选得到的生防菌株以芽孢杆菌、假单胞菌和木霉菌为主<sup>[27]</sup>,挖掘和利用更为高效的生防菌株是甘蔗赤腐病绿色防控的关键。放线菌种类繁多,且次级代谢产物丰富,在促进植物生长和植物病虫害生物防治方面发挥着重要作用<sup>[28]</sup>。本研究采用平板对峙法和菌丝生长速率法对从甘蔗根际土壤中分离的 364 株菌株进行初筛和复筛,发现菌株 JY53、WK29、JR28 的发酵滤液对赤腐病菌的抑菌率达 84.93%~87.53%,说明该菌株对甘蔗赤腐病菌具一定拮抗作用,可据此开展后续鉴定和防治效果评价研究。

种属鉴定是生防菌应用的前提<sup>[29]</sup>。本研究通过形态结构观察、培养特征观察、生理生化鉴定及 16S rDNA 鉴定,将放线菌菌株 JY53、WK29 和 JR28 分别鉴定为弗吉尼亚链霉菌 ( *S. virginiae* )、伊朗链霉菌 ( *S. iranensis* )、淡紫灰链霉菌 ( *S. lavendulae* )。链霉菌属是最丰富且最重要的放线菌类群,广泛分布于土壤和多种生态环境中,是抗生素和细胞外水解酶等生物活性化合物的重要来源,同时也是作物病害生物防治中研究和应用非常广泛的一类生防菌<sup>[30-31]</sup>。蒋冬阳等<sup>[17]</sup>研究发现,弗吉尼亚链霉菌能产生蛋白酶、 $\beta$ -葡聚糖酶和几丁质酶,发酵菌液对黄瓜有明显的促

生作用,对黄瓜枯萎病的预防和治疗效果分别达 48.98%和 34.01%。张铭鑫等<sup>[32]</sup>筛选得到的淡紫灰链霉菌 XT-25 具有分泌蛋白酶、淀粉酶以及  $\beta$ -1,3-葡聚糖酶等抑菌物质的能力,挥发性气体对茄病镰孢菌 ( *Fusarium solani* ) 的抑菌率为 9.04%,对致病菌茄病镰孢菌和土赤壳菌 ( *Ilyonectria mors-panacis* ) 引致的西洋参根腐病的防治效果分别为 40.00 %和 24.74%。YANG 等<sup>[33]</sup>通过研究得出,伊朗链霉菌产生的 alligamycin A 具有较好的抗真菌活性,其抗真菌效果依赖于  $\beta$ -内酯环结构,并通过抑制关键细胞壁合成酶来破坏真菌细胞壁的稳定性的,在抗真菌药物开发中具有广阔的应用前景。近年来,已有多种链霉菌成功商业化<sup>[34]</sup>,为本研究筛选得到的链霉菌株的进一步开发应用提供参考依据。

田间环境复杂,病原菌种类繁多,广谱生防菌可以减少施药次数,降低劳动力和成本投入,更具商业价值。本研究结果显示,菌株 WK29 对 6 种植物病原菌的抑菌率为 68.41%~78.22%;菌株 JY53 对 5 种病原菌的抑菌率为 58.66%~72.85%;菌株 JR28 对 4 种植物病原菌的抑菌率为 27.69%~60.15%,表明菌株 JY53、WK29、JR28 具有开发为生防菌剂应用于多种作物病害防治的潜力。然而,这 3 种放线菌对不同植物病原菌的抑菌效果存在差异,可能源于其抑菌机理的不同。目前的研究表明,放线菌通过分泌胞外酶瓦解病

原菌细胞壁<sup>[35]</sup>、与病原菌竞争铁营养<sup>[36]</sup>以及产生挥发性抑菌物质<sup>[37]</sup>等方式抑制病原菌生长。本研究进一步测定了 3 种放线菌的产胞外酶种类、产嗜铁素能力及挥发性物质抑菌能力,探究不同菌株抑菌广谱性差异的原因。研究表明,菌株 WK29 的产胞外酶种类最为丰富,产嗜铁素能力最强,且挥发性物质具有一定抑菌效果,这些特性可能共同导致其在抑菌广谱性测定中表现出较强的广谱抑菌性。这一发现为后续研究提供了方向,即依据菌株不同抑菌机理构建一个具有高效、稳定、广谱抑菌效果的合成菌群,以提高单一菌株抑菌能力。

平板抑菌效果仅是生防菌生防潜力的初步体现,具体防治效果还需结合植株展开<sup>[38]</sup>。本研究盆栽试验中,菌株 JR28 对甘蔗赤腐病的防治效果最佳,相对防效可达 64.58%,显著高于 CK,优于商业芽孢杆菌和商业木霉菌处理组。与谢林艳等<sup>[39]</sup>筛选到的对新台糖 22 号赤腐病防治效果为 61.11%的贝莱斯芽孢杆菌 (*Bacillus velezensis*) YC89 相比,本研究筛选到的淡紫灰链霉菌 JR28 的防治效果也较优,具备开发为甘蔗赤腐病生防菌剂的潜力。

综上所述,放线菌作为甘蔗赤腐病绿色防控的新型生防菌资源,具有进一步开发为生物菌剂的潜力,其生防机理和田间防效还需进一步研究。

## 参考文献

- [1] LU G L, LIU P R, WU Q B, ZHANG S Z, ZHAO P F, ZHANG Y B, QUE Y X. Sugarcane breeding: a fantastic past and promising future driven by technology and methods[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2024, 15: 1375934.
- [2] DINESH BABU K S, JANAKIRAMAN V, PALANISWAMY H, KASIRAJAN L, GOMATHI R, RAMKUMAR T R. A short review on sugarcane: its domestication, molecular manipulations and future perspectives[J]. *Genetic Resources and Crop Evolution*, 2022, 69(8): 2623-2643.
- [3] SHARMA G, ARYA J S A, SHARMA S R. Biology and management of sugarcane red rot: a review[J]. *Plant Archives*, 2017, 17(2): 775-784.
- [4] 林明江, 龚恒亮, 安玉兴, 陈立君, 管楚雄, 许汉亮, 郑学文, 陆斌, 卢建雄. 湛江蔗区甘蔗赤腐病的发生与成因初探[J]. *甘蔗糖业*, 2011(1): 34-37.  
LIN M J, GONG H L, AN Y X, CHEN L J, GUAN C X, XU H L, ZHENG X W, LU B, LU J X. Preliminary study on occurrence and causes of sugarcane red rot disease in Zhan-
- jiang[J]. *Sugarcane and Canesugar*, 2011(1): 34-37. (in Chinese)
- [5] GHAZANFAR M U, KAMRAN S. Evaluation of different plant extracts against *Colletotrichum falcatum* causing red rot in sugarcane under lab conditions[J]. *Journal of Environmental Agriculture*, 2016, 1: 68-73.
- [6] VISWANATHAN R. Sustainable sugarcane cultivation in India through threats of red rot by varietal management[J]. *Sugar Tech*, 2021, 23(2): 239-253.
- [7] 吴伟怀, 王彩霞, 梁艳琼, 贺春萍, 习金根, 郑金龙, 李锐, 郑肖兰, 易克贤. 11 种杀菌剂对甘蔗赤腐病菌的毒力测定[J]. *热带农业科学*, 2015, 35(6): 37-42.  
WU W H, WANG C X, LIANG Y Q, HE C P, XI J G, ZHENG J L, LI R, ZHENG X L, YI K X. *In vitro* inhibitory effects of 11 fungicides on mycelial growth of sugarcane red rot pathogen[J]. *Chinese Journal of Tropical Agriculture*, 2015, 35(6): 37-42. (in Chinese)
- [8] VISWANATHAN R, MALATHI P. Biocontrol strategies to manage fungal diseases in sugarcane[J]. *Sugar Tech*, 2019, 21(2): 202-212.
- [9] 李婕, 李文凤, 张荣跃, 单红丽, 王晓燕, 仓晓燕, 罗志明, 尹炯, 黄应昆. 甘蔗赤腐病发生流行特点及防控对策[J]. *中国糖料*, 2019, 41(2): 58-64.  
LI J, LI W F, ZHANG R Y, SHAN H L, WANG X Y, CANG X Y, LUO Z M, YIN J, HUANG Y K. Epidemic characteristics and control strategies of sugarcane red rot[J]. *Sugar Crops of China*, 2019, 41(2): 58-64. (in Chinese)
- [10] XIA Y, FAROOQ M A, JAVED M T, KAMRAN M A, MUKHTAR T, ALI J, TABASSUM T, REHMAN S, MUNIS M F H, SULTAN T, CHAUDHARY H J. Multi-stress tolerant PGPR *Bacillus xiamenensis* PM14 activating sugarcane (*Saccharum officinarum* L.) red rot disease resistance[J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2020, 151: 640-649.
- [11] SHAIR F, YASMIN H, HASSAN M N, ALZAHIRANI O M, NOURELDEEN A. *Pseudomonas* spp. mediate defense response in sugarcane through differential exudation of root phenolics[J]. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 2021, 28(12): 7528-7538.
- [12] JOSHI D, SINGH P, HOLKAR S K, KUMAR S. Trichoderma-mediated suppression of red rot of sugarcane under field conditions in subtropical India[J]. *Sugar Tech*, 2019, 21: 496-504.
- [13] WANG Z, SOLANKI M K, YU Z X, ANAS M, DONG D F, XING Y X, MALVIYA M K, PANG F, LI Y R. Genome characteristics reveal the biocontrol potential of actinobacteria isolated from sugarcane rhizosphere[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2021, 12: 797889.



- [14] 孙天宇, 朱俊玉, 王世梅, 韦中, 徐阳春, 沈其荣. 番茄青枯病生防链霉菌的分离鉴定及生物学特性[J]. 微生物学报, 2025, 65(4): 1469-1481.  
SUN T Y, ZHU J Y, WANG S M, WEI Z, XU Y C, SHEN Q R. Isolation, identification, and biological characterization of *Streptomyces* strains against tomato bacterial wilt[J]. Acta Microbiologica Sinica, 2025, 65(4): 1469-1481. (in Chinese)
- [15] 陈婧, 王彤彤, 马青, 王阳. 生防链霉菌 YC2-3 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.  
CHEN J, WANG T T, MA Q, WANG Y. Screening, identification and detection of biocontrol effect of strain YC2-3 on wheat crown rot[J]. Acta Phytopathologica Sinica, 2023, 53(3): 473-484. (in Chinese)
- [16] KATHIRESAN K, BALAGURUNATHAN R, SELVAM M M. Fungicidal activity of marine actinomycetes against phytopathogenic fungi[J]. Indian Journal of Biotechnology, 2005, 4(2): 271-276.
- [17] 蒋冬阳, 吴冰越, 季文平, 陈宸, 陈夕军. 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.  
JIANG D Y, WU B Y, JI W P, CHEN C, CHEN X J. Identification of antagonistic actinomycetes 2-1-2F and its control effect on cucumber *Fusarium* wilt[J]. Chinese Journal of Biological Control, 2024, 40(2): 411-423. (in Chinese)
- [18] 阮继生, 黄英. 放线菌快速鉴定与系统分类[M]. 北京: 科学出版社, 2011: 52-98.  
RUAN J S, HUANG Y. Rapid identification and systematics of actinobacteria[M]. Beijing: Science Press, 2011: 52-98. (in Chinese)
- [19] 王炫栋, 杨孙玉悦, 高润杰, 余俊杰, 郑丹沛, 倪峰, 蒋冬花. 拮抗大豆斑疹病菌放线菌菌株的筛选和促生作用及防效研究[J]. 作物学报, 2022, 48(6): 1546-1557.  
WANG X D, YANG-SUN Y Y, GAO R J, YU J J, ZHENG D P, NI F, JIANG D H. Screening *Streptomyces* against *Xanthomonas axonopodis* pv. *glycines* and study of growth-promoting and biocontrol effect[J]. Acta Agronomica Sinica, 2022, 48(6): 1546-1557. (in Chinese)
- [20] ZOU Q, ZHANG Y M, NIU X X, YANG H M, CHU M, WANG N, BAO H F, ZHAN F Q, YANG R, LUO K, SHI Y W. Antifungal activity of rhizosphere *Bacillus* isolated from *Ziziphus jujuba* against *Alternaria alternata*[J]. Microorganisms, 2024, 12(11): 2189.
- [21] 李晓芳, 田叶韩, 彭海莹, 何邦令, 高克祥. 防治苦瓜枯萎病的拮抗放线菌分离筛选及鉴定[J]. 应用生态学报, 2020, 31(11): 3869-3879.  
LI X F, TIAN Y H, PENG H Y, HE B L, GAO K X. Isolation, screening and identification of an antagonistic actinomycetes to control *Fusarium* wilt of *Momordica charantia*[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, 31(11): 3869-3879. (in Chinese)
- [22] 郑菲菲, 吴志新, 李莉娟, 黎洁, 祝东梅. 传统插片法接种方法的改进与应用——以水产微生物学实验放线菌的形态结构观察为例[J]. 安徽农学通报, 2022, 28(1): 138-139.  
ZHENG F F, WU Z X, LI L J, LI J, ZHU D M. Improvement and application of traditional insertion inoculation method: a case study of observing the morphological structure of actinomycetes in aquatic microbiology experiments[J]. Anhui Agricultural Science Bulletin, 2022, 28(1): 138-139. (in Chinese)
- [23] 胡佳燕, 沈之涵, 温丽慧, 郁嘉豪, 章雨君, 蒋冬花. 水稻细菌性条斑病菌拮抗放线菌的鉴定及其防病和促生功能[J]. 中国农业科学, 2025, 58(17): 3434-3450.  
HU J Y, SHEN Z H, WEN L H, YU J H, ZHANG Y J, JIANG D H. Identification and evaluation of biocontrol actinomycetes against *Xanthomonas oryzae* pv. *oryzicola* for disease suppression and growth promotion in rice[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2025, 58(17): 3434-3450. (in Chinese)
- [24] MACHUCA A, MILAGRES A M F. Use of CAS - agar plate modified to study the effect of different variables on the siderophore production by *Aspergillus*[J]. Letters in Applied Microbiology, 2003, 36(3): 177-181.
- [25] KIM S H, LEE Y, BALARAJU K, JEON Y. Evaluation of *Trichoderma atroviride* and *Trichoderma longibrachiatum* as biocontrol agents in controlling red pepper anthracnose in Korea[J]. Frontiers in Plant Science, 2023, 14: 1201875.
- [26] XIE L Y, LIU L F, LUO Y J, RAO X B, DI Y N, LIU H, QIAN Z F, SHEN Q Q, HE L L, LI F S. Complete genome sequence of biocontrol strain *Bacillus velezensis* YC89 and its biocontrol potential against sugarcane red rot[J]. Frontiers in Microbiology, 2023, 14: 1180474.
- [27] 谢林艳, 狄义宁, 何丽莲, 刘鲁峰, 沈先岳, 李富生. 甘蔗赤腐病内生拮抗菌 YC89 的筛选及鉴定[J]. 微生物学报, 2020, 60(4): 739-748.  
XIE L Y, DI Y N, HE L L, LIU L F, SHEN X Y, LI F S. Screening and identification of endophytic antagonistic bacteria YC89 in sugarcane red rot[J]. Acta Microbiologica Sinica, 2020, 60(4): 739-748. (in Chinese)
- [28] KAARI M, MANIKKAM R, ANNAMALAI K K, JOSEPH J. Actinobacteria as a source of biofertilizer/biocontrol agents for bio-organic agriculture[J]. Journal of Applied Microbiology, 2023, 134(2): 1x047.
- [29] 杨波, 李云翔, 徐瑾瑜, 沙月霞. 黄芩根腐病生防放线菌的筛选、鉴定及其应用[J]. 中国生物防治学报, 2025, 41(3): 554-560.

- YANG B, LI Y X, XU J Y, SHA Y X. Screening, identification, and application effects of actinomycetes on *Astragalus membranaceus* root rot[J]. Chinese Journal of Biological Control, 2025, 41(3): 554-560. (in Chinese)
- [30] 吕昂, 张凯, 陈鑫, 朱坤森, 李国庆, 刘军. 链霉菌在作物病害生物防治中的应用研究进展[J]. 微生物学报, 2025, 65(9): 3869-3888.
- LYU A, ZHANG K, CHEN X, ZHU K M, LI G Q, LIU J. Progress in research on application of *Streptomyces* in bio-control of plant diseases[J]. Acta Microbiologica Sinica, 2025, 65(9): 3869-3888. (in Chinese)
- [31] PANG F, SOLANKI M K, WANG Z. *Streptomyces* can be an excellent plant growth manager[J]. World Journal of Microbiology and Biotechnology, 2022, 38(11): 193.
- [32] 张铭鑫, 彭娜, 王尧尧, 王仪, 李宝通, 刘慧芹, 高微微. 西洋参根腐病拮抗菌 XT-25 的生防作用研究[J]. 核农学报, 2024, 38(7): 1249-1257.
- ZHANG M X, PENG N, WANG Y Y, WANG Y, LI B T, LIU H Q, GAO W W. Study on the biocontrol effect of antagonistic bacteria XT-25 against *Panax quinquefolium* root rot[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2024, 38(7): 1249-1257. (in Chinese)
- [33] YANG Z J, QIAO Y J, STRØBECH E, MORTH J P, WALTHER G, JØRGENSEN T S, LUM K Y, PESCHEL G, ROSENBAUM M A, PREVITALI V, CLAUSEN M H, LUKASSEN M V, GOTFREDSEN C H, KURZAI O, WEBER T, DING N. Alligamycin A, an antifungal  $\beta$ -lactone spiroketal macrolide from *Streptomyces iranensis*[J]. Nature Communications, 2024, 15(1): 9259.
- [34] TORRES-RODRIGUEZ J A, REYES-PÉREZ J J, QUIÑONES-AGUILAR E E, HERNANDEZ-MONTIEL L G. Actinomycete potential as biocontrol agent of phytopathogenic fungi: mechanisms, source, and applications[J]. Plants, 2022, 11(23): 3201.
- [35] NUGUSE M, KEJELA T. Actinomycetes isolated from rhizosphere of wild *Coffea arabica* L. showed strong bio-control activities against coffee wilt disease[J]. PLoS One, 2024, 19(8): e0306837.
- [36] MACAGNAN D, ROMEIRO R S, POMELLA A W V, DESOUZA J T. Production of lytic enzymes and siderophores, and inhibition of germination of basidiospores of *Moniliophthora* (ex *Crinipellis*) *perniciosa* by phyloplane actinomycetes[J]. Biological Control, 2008, 47(3): 309-314.
- [37] 牛红杰, 荆玉玲, 郭荣君, 李世东. 具防病并提高植物耐旱功能的小链霉菌 HS57 的筛选[J]. 植物保护, 2020, 46(3): 131-137.
- NIU H J, JING Y L, GUO R J, LI S D. Screening of *Streptomyces parvus* HS57 with the biocontrol function and ability to enhance the plant's tolerance to water shortage stress[J]. Plant Protection, 2020, 46(3): 131-137. (in Chinese)
- [38] 章舸. 烟草疫霉拮抗放线菌的筛选及在烟草根际定殖研究[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2021.
- ZHANG G. Screening of antagonistic actinomycetes against *Phytophthora nicotianae* and colonization in tobacco rhizosphere[D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2021. (in Chinese)
- [39] 谢林艳, 何丽莲, 罗艳菊, 李玉梅, 排先迈, 刘鲁峰, 李富生. 生防菌 YC89 在不同甘蔗品种中定殖及防治赤腐病的研究[J]. 中国生物防治学报, 2024, 40(5): 1066-1073.
- XIE L Y, HE L L, LUO Y J, LI Y M, PAI X M, LIU L F, LI F S. Colonization of biocontrol bacteria yc89 in different sugarcane cultivars and its control effect on red rot disease[J]. Chinese Journal of Biological Control, 2024, 40(5): 1066-1073. (in Chinese)