

DOI:10.16861/j.cnki.zggc.2025.0659

# 番茄灰霉病病原菌拮抗菌株 1-3-3 发酵滤液 抑菌效果稳定性研究

张雪辉<sup>1</sup>,董美杉<sup>1</sup>,张思雨<sup>2</sup>,冀胜利<sup>3</sup>,唐蕊<sup>1</sup>

(1.邢台学院化学工程与生物技术学院 河北邢台 054001; 2.燕山大学 河北秦皇岛 066000;

3.邢台学院党委办公室 河北邢台 054001)

**摘要:**为探究番茄灰霉病病原菌拮抗菌株 1-3-3 发酵滤液抑菌效果的稳定性,本研究以温度、紫外线照射、离子、有机溶剂为控制变量,采用平板法测试该菌株发酵滤液对番茄灰霉病病原菌的抑菌活性。结果表明,一定范围的温度、紫外线处理均可提高发酵滤液的抑菌活性;7 种离子中,Na<sup>+</sup>加入发酵滤液静置 2 h 后能显著增强发酵滤液的抑菌活性,Ca<sup>2+</sup>加入发酵滤液 0 h 和静置 2 h 的处理抑菌活性波动较大,而 K<sup>+</sup>、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>、Mg<sup>2+</sup>、Al<sup>3+</sup>和 Fe<sup>3+</sup>对发酵滤液抑菌活性的影响较小;排除有机溶剂本身具有的抑菌效果,不同有机溶剂加至滤液 2 h 后,除无水乙醇外,发酵滤液的抑菌效果均显著提升。综上,菌株 1-3-3 发酵滤液可经受不同温度、紫外线、离子和有机溶剂的处理而表现出良好的抑菌活性,该研究结果为其微生物制剂的开发及施用条件优化提供了数据支撑,表明该发酵滤液具有较大的应用开发潜力。

**关键词:**解淀粉芽孢杆菌;番茄灰霉病;发酵滤液;抑菌效果;稳定性

中图分类号:S608+S436

文献标志码:A

文章编号:1673-2871(2026)05-222-06

## Study on the stability of antifungal activity of fermentation filtrate from antagonistic strain 1-3-3 against *Botrytis cinerea*

ZHANG Xuehui<sup>1</sup>, DONG Meishan<sup>1</sup>, ZHANG Siyu<sup>2</sup>, JI Shengli<sup>3</sup>, TANG Rui<sup>1</sup>

(1. School of Chemical Engineering and Biotechnology, Xingtai University, Xingtai 054001, Hebei, China; 2. Yanshan University, Qinhuangdao 066000, Hebei, China; 3. Office of the CPC Committee, Xingtai University, Xingtai 054001, Hebei, China)

**Abstract:** To explore the stability of the antifungal activity of the fermentation filtrate from antagonistic strain 1-3-3 against *Botrytis cinerea*, this study adopted temperature, ultraviolet (UV) irradiation, ions and organic solvents as control variables, and employed the plate method to determine the antifungal activity of the fermentation filtrate against *Botrytis cinerea*. The results showed that temperature and UV irradiation within a certain range could improve the antifungal activity of the fermentation filtrate; among the seven tested ions, Na<sup>+</sup> significantly enhanced the antifungal activity of the filtrate after 2 h of standing, the antifungal activity of the fermentation filtrate treated with Ca<sup>2+</sup> fluctuated greatly at 0 hour and after 2 h of standing, while K<sup>+</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Al<sup>3+</sup> and Fe<sup>3+</sup> exerted little effect on the antifungal activity; excluding the inherent antifungal effect of organic solvents themselves, the antifungal activity of the mixed system was significantly improved for all treatments except absolute ethanol after adding different organic solvents into the filtrate for 2 h. In conclusion, the fermentation filtrate of strain 1-3-3 can maintain favorable antifungal activity under treatment with different temperatures, ultraviolet rays, ions and organic solvents. This study provides data support for the development of microbial preparations and the optimization of application conditions of the filtrate, indicating its great potential for application and development.

**Key words:** *Bacillus amyloliquefaciens*; Tomato gray mold; Fermentation filtrate; Antifungal activity; Stability

番茄灰霉病是影响番茄产量、品质、安全等的主要病害之一,病原菌为子囊菌门核盘菌科葡萄孢属的灰葡萄孢(*Botrytis cinerea* Pers.)真菌<sup>[1]</sup>。目前,针对番茄灰霉病的防治主要采取化学防治、物理防

治和生物防治等措施。化学防治见效快,但污染环境、破坏生态平衡,还会使病菌产生抗药性;而物理防治耗费劳力,成本高<sup>[2]</sup>;生物防治主要是利用有益微生物或其代谢产物抑制或消灭有害生物

收稿日期:2025-09-14;修回日期:2026-01-11

作者简介:张雪辉,男,教授,研究方向为微生物资源挖掘与利用。E-mail:200210651@xttc.edu.cn

通信作者:唐蕊,女,教授,研究方向为微生物资源挖掘与利用。E-mail:txzyzxh@126.com

的防治方法。相比其他防治方法,生物防治具有安全、无污染等特点,已成为当今病害防治的研究热点。

解淀粉芽孢杆菌作为一种典型的革兰氏阳性细菌,在农业病害的生物防治领域具有重要的应用价值。张丽芳等<sup>[3]</sup>研究表明,解淀粉芽孢杆菌 B235 能够显著降低花生根腐病的发生率,可促进花生生长并提升产量,且能保持土壤微生态稳定,推广应用前景广阔。杨冬静等<sup>[4]</sup>研究表明,解淀粉芽孢杆菌 XZ-1 发酵液原液、10 倍及 100 倍稀释液对甘薯黑斑病的防治效果分别达 65.02%、58.19% 和 54.14%,显著优于化学药剂多菌灵。杜鸿燕等<sup>[5]</sup>研究发现,解淀粉芽孢杆菌在葡萄白粉病的 2 个发病高峰期的防效分别为 70.00% 和 65.00%,均显著优于化学杀菌剂(腈菌唑和吡唑醚菌酯)的防治效果,展现了其推广应用潜力。

解淀粉芽孢杆菌 HM-7 为本课题组从土壤中筛选得到的生防菌株,前期研究证实其对黄瓜枯萎病菌具有高效拮抗作用,后续进一步研究发现其对番茄灰霉病等多种病原菌亦有显著的抑制效果<sup>[6]</sup>。本研究使用的拮抗菌株 1-3-3 是以菌株 HM-7 为出发菌株,经紫外诱变后筛选得到的对番茄灰霉病病原菌拮抗效果显著提升的突变株。本研究采用稀释倒平板法测定其发酵滤液抑菌活性,研究温度、紫外线、离子、有机溶剂等环境因素对发酵滤液抑菌效果的影响,为番茄灰霉病病原菌拮抗菌株 1-3-3 的生物防治制剂的开发及其应用条件提供数据支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试菌株及试剂

试验于 2024 年 9 月至 2025 年 6 月在邢台学院微生物实验室进行,番茄灰霉病病原菌、解淀粉芽孢杆菌 1-3-3 均由邢台学院微生物实验室提供;供试硫酸链霉素(USP 级),购自博美生物科技有限公司;供试试剂 NaCl、KCl、NH<sub>4</sub>Cl、CaCl<sub>2</sub>、MgCl<sub>2</sub>、AlCl<sub>3</sub>·6H<sub>2</sub>O、FeCl<sub>3</sub> 等均为分析纯,购自天津市河东区红岩试剂厂;甲醇、无水乙醇、乙腈、丙酮等均为分析纯,购自天津市康科德科技有限公司。

### 1.2 供试培养基

培养番茄灰霉病病原菌的培养基为 PDA 培养基,其配方为去皮马铃薯( $\rho$ ,后同)200 g·L<sup>-1</sup>、葡萄糖 20 g·L<sup>-1</sup>、琼脂 20 g·L<sup>-1</sup>、pH 自然,121 °C 灭菌 30 min,试验中每瓶定量 75 mL。

培养解淀粉芽孢杆菌 1-3-3 的培养基为牛肉膏蛋白胨液体培养基,其配方为牛肉膏 3 g·L<sup>-1</sup>、蛋白胨 10 g·L<sup>-1</sup>、氯化钠 5 g·L<sup>-1</sup>、pH 7.0,121 °C 灭菌 20 min,试验中每瓶定量 100 mL。

### 1.3 发酵滤液的制备

将拮抗菌解淀粉芽孢杆菌 1-3-3 放置室温 2 h 后,挑取少量菌体接种到 100 mL 牛肉膏蛋白胨液体培养基中,30 °C、200 r·min<sup>-1</sup> 振荡培养 96 h。

将培养好的菌液分装到离心管,3000 r·min<sup>-1</sup> 离心 20 min,吸取上清液继续离心,重复 3 次。离心后取上清液,用直径 0.22  $\mu$ m 过滤器过滤,重复 3 次,分装到已灭菌的 5 mL 离心管中,每支 1.5 mL,放入 4 °C 冷藏保存备用<sup>[7]</sup>。

### 1.4 发酵滤液抑菌活性测定

在 100 mL 无菌水中加入 1.25 g 硫酸链霉素,振荡溶解后用 0.22  $\mu$ m 过滤器将其过滤到无菌瓶中。加热 PDA 培养基使其充分融化,冷却至 55 °C 左右时加入 0.3 mL 硫酸链霉素溶液,摇匀,使其终浓度为 50  $\mu$ g·mL<sup>-1</sup><sup>[8]</sup>,向体系中加入 1 管发酵滤液,摇匀后倒平板,每瓶倾注不少于 3 皿,冷却凝固后,将培养基表面的水吹干。将直径为 8 mm 的番茄灰霉病病原菌菌饼接种在培养基中央,置于 25 °C 培养箱倒置培养。另将不加发酵滤液只接病原菌菌饼的平板作为空白对照<sup>[9]</sup>,当对照组病原菌长至距离培养皿边缘 0.5 cm 左右时,采用十字测量法<sup>[10]</sup>测出试验组和空白对照组平板中番茄灰霉病菌菌落的半径,按照如下公式计算灰霉病病原菌生长抑制率<sup>[11]</sup>:

抑制率/%=(空白对照组菌落半径-处理组菌落半径)/对照组菌落半径×100。

### 1.5 发酵滤液抑菌效果的稳定性

1.5.1 热稳定性试验 参照刘婷等<sup>[12]</sup>的方法,取 5 管发酵滤液分别放到 35、50、65、80、95 °C 水浴锅中处理 30 min,处理结束后立即放入冷水中使其冷却至室温,以始终置于室温的发酵滤液为对照(CK),进行抑菌活性测定,每个处理重复不少于 3 次。其他条件不变,再分别将水浴时间设置为 40、50、60 min,进行抑菌活性测定。

1.5.2 对紫外线的稳定性试验 参照刘婷等<sup>[12]</sup>的方法,取 9 mL 发酵滤液放到玻璃培养皿中,加入已灭菌的转子。打开紫外灯,待光源稳定后将培养皿放到磁力搅拌器上,使紫外灯到培养皿的距离固定为 25 cm,开始搅拌并计时,分别在 20、40、60、80、100 min 时吸取 1.5 mL 发酵滤液进行抑菌活性测

定,以不做紫外处理的发酵滤液为对照(CK),每个处理重复不少于3次。

1.5.3 对离子的稳定性试验 分别配制  $0.4 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$  的  $\text{NaCl}$ 、 $\text{KCl}$ 、 $\text{NH}_4\text{Cl}$ 、 $\text{CaCl}_2$ 、 $\text{MgCl}_2$ 、 $\text{AlCl}_3$ 、 $\text{FeCl}_3$  溶液,用直径  $0.22 \mu\text{m}$  的过滤器将其过滤到无菌瓶中。

参照刘婷等<sup>[12]</sup>和杨梓璐等<sup>[13]</sup>的方法,取7管发酵滤液分别加入  $0.5 \text{ mL}$  上述7种离子溶液,摇匀,使体系中  $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{NH}_4^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Al}^{3+}$ 、 $\text{Fe}^{3+}$  的浓度均为  $0.1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ ,立即(0 h)进行抑菌活性测定。另取1管发酵滤液加入  $0.5 \text{ mL}$  无菌水为对照(CK),每个处理重复不少于3次。

为考察发酵滤液对各离子的耐受性,重复上述步骤,将加入离子溶液的发酵滤液在室温下静置2 h,进行抑菌活性测定。

为考察离子本身是否对番茄灰霉病病原菌有抑制作用,设置分别单独加上上述7种离子溶液进行抑菌活性测定的试验处理<sup>[14]</sup>。

1.5.4 对有机溶剂的稳定性试验 参照刘婷等<sup>[12]</sup>和汤鸣强等<sup>[15]</sup>的方法,取4管发酵滤液分别加入甲醇、无水乙醇、乙腈、丙酮溶液各  $0.5 \text{ mL}$ ,摇匀后立即(0 h)进行抑菌活性测定。另取1管发酵滤液加入  $0.5 \text{ mL}$  无菌水为对照(CK),每个处理重复不少于3次。

为考察发酵滤液对各有机溶剂的耐受性,重复上述步骤,将分别加入上述有机溶剂的发酵滤液在室温下静置2 h,进行抑菌活性测定。

为考察有机溶剂本身是否对番茄灰霉病病原菌有抑制作用,设置分别单独加上上述有机溶剂进行抑菌活性测定的试验处理。

1.6 数据分析

试验数据以均值±标准差表示,采用 IBM SPSS

statistics 27.0 经邓肯氏新复极差法检验在  $P < 0.05$  水平的差异显著性,采用 Microsoft Excel 2019 作图。

2 结果与分析

2.1 发酵滤液的热稳定性试验测定结果

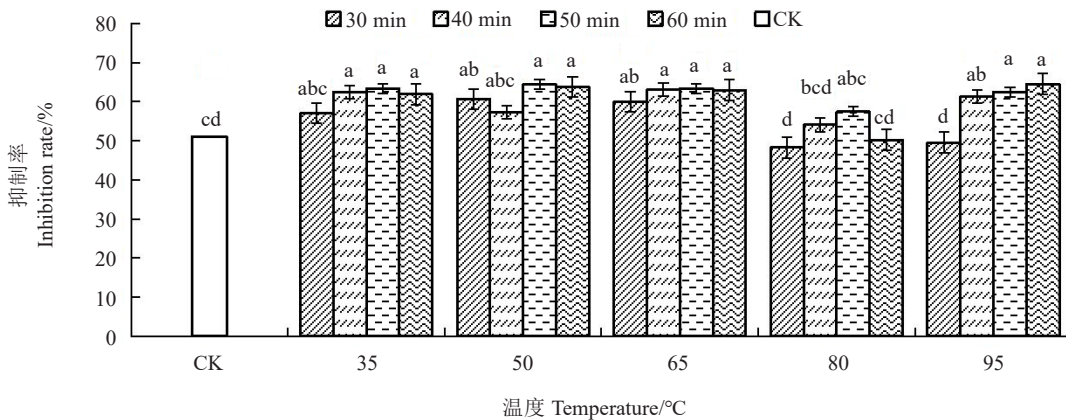
发酵滤液热稳定性试验测定结果如图1所示,发酵滤液在  $35 \text{ }^\circ\text{C}$  下处理  $30 \text{ min}$  对番茄灰霉病病原菌的抑制率与 CK 差异不显著,而较长时间的处理( $40$ 、 $50$  和  $60 \text{ min}$ )发酵滤液对番茄灰霉病病原菌的抑制率均较 CK 显著提高;在  $50 \text{ }^\circ\text{C}$  下除了处理  $40 \text{ min}$  的抑制率与 CK 差异不显著,其他处理均较 CK 显著提高;在  $65 \text{ }^\circ\text{C}$  下各个处理的抑制率均显著高于 CK;在  $80 \text{ }^\circ\text{C}$  下各个处理的抑制率与 CK 差异均不显著;在  $95 \text{ }^\circ\text{C}$  下除了处理  $30 \text{ min}$  的抑制率与 CK 差异不显著外,其他各处理抑制率均显著高于 CK。总体而言,在不同温度下经不同时间热处理的发酵滤液对番茄灰霉病病原菌的抑制率均与 CK 持平或显著提高,说明一定温度处理一段时间有助于提高菌株 1-3-3 的发酵滤液的抑菌效果。

2.2 发酵滤液对紫外线的稳定性试验测定结果

发酵滤液对紫外线的稳定性试验测定结果如图2所示,与 CK(抑制率  $51.03\%$ )相比,经过紫外灯照射处理一定时间后,各处理对番茄灰霉病病原菌的抑制率均有一定程度的提升,抑制率为  $55.96\% \sim 60.17\%$ ,除紫外线处理  $60 \text{ min}$  外,其他处理抑制率均较 CK 显著提高。说明一定时间的紫外线处理有助于提高菌株 1-3-3 发酵滤液对番茄灰霉病病原菌的抑菌效果。

2.3 发酵滤液对离子的稳定性试验测定结果

发酵滤液对离子的稳定性试验测定结果如图3



注:不同小写字母表示处理间在 0.05 水平差异显著。下同。

Note: Different small letters indicate significant difference between different treatments at 0.05 level. The same below.

图1 发酵滤液的热稳定性试验测定结果

Fig. 1 Test results of thermal stability assay for the fermentation filtrate

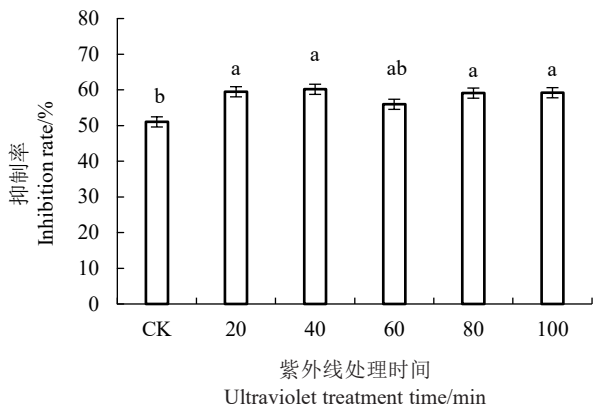


图2 发酵滤液对紫外线的稳定性试验测定结果  
Fig. 2 Test results of the stability test of the fermentation filtrate under ultraviolet light

所示,7种离子本身(无发酵滤液)对番茄灰霉病原菌的抑制率均在6.5%以下,说明单纯的各种离子作用不大,抑菌效果主要来自于发酵滤液;Na<sup>+</sup>加入

发酵滤液摇匀后立即测试(0 h),与CK抑制率差异不显著,而静置2 h后,抑制率较CK显著提高,达54.43%;K<sup>+</sup>、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>、Mg<sup>2+</sup>、Al<sup>3+</sup>和Fe<sup>3+</sup>分别加入发酵滤液后,0 h和2 h时抑制率均与CK无显著差异,说明抑菌活性稳定;Ca<sup>2+</sup>加入发酵滤液摇匀后立即测试(0 h),抑制率较CK显著下降,抑制率只有21.25%,而静置2 h后,抑制率显著提高,达47.71%,但与CK差异不显著。说明静置2 h后Na<sup>+</sup>可显著增强发酵滤液的抑菌活性,Ca<sup>2+</sup>加入发酵滤液0 h和静置2 h处理的抑菌活性波动较大,其他离子对发酵滤液抑菌活性影响不大。

2.4 发酵滤液对有机溶剂的稳定性试验测定结果

发酵滤液对有机溶剂的稳定性试验测定结果如图4所示,供试4种有机溶剂本身(无滤液)对番茄灰霉病原菌均有一定的抑制效果,且丙酮、乙腈抑制效果较明显;除乙腈外,甲醇、无水乙醇和丙酮加入发酵滤液0 h对番茄灰霉病原菌的抑制率

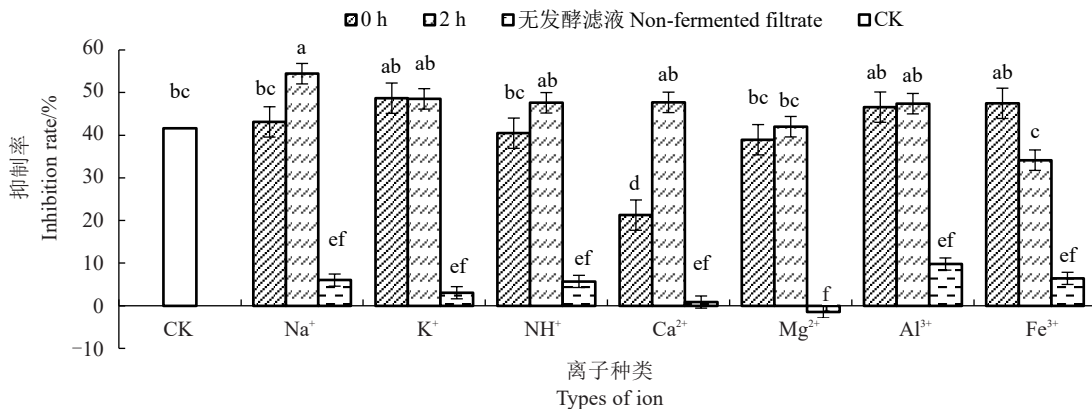


图3 发酵滤液对离子的稳定性试验测定结果  
Fig. 3 Test results of the stability of the fermentation filtrate toward ions

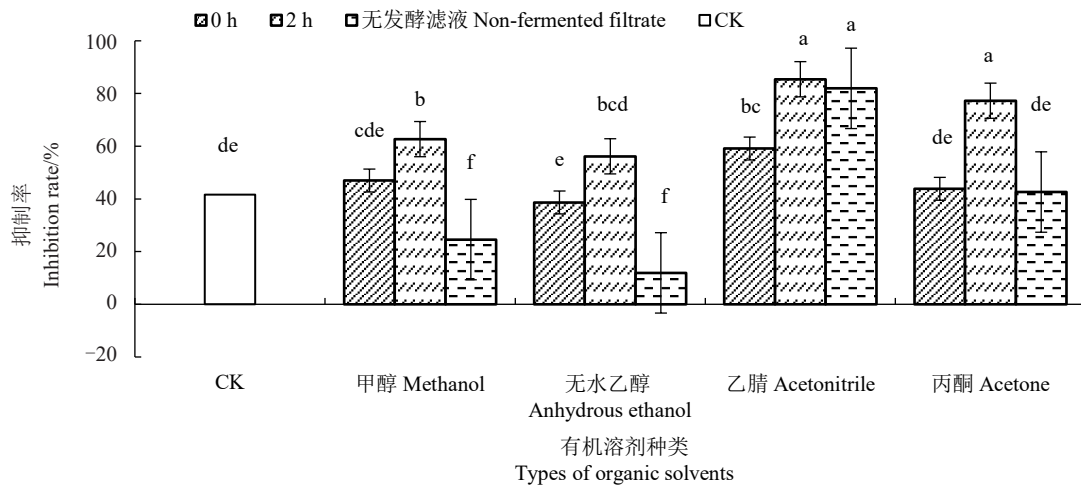


图4 发酵滤液对有机溶剂的稳定性试验测定结果  
Fig. 4 Test results of the stability of the fermentation filtrate toward organic solvents

与CK均无显著差异;静置2h后,与CK相比,发酵滤液分别加入4种有机溶剂后的抑制率均提高,除无水乙醇外,其他处理均较CK显著提高。由此得出:(1)各个有机溶剂本身均对番茄灰霉病原菌具有一定的抑制活性;(2)除乙醇外,其他有机溶剂加入发酵滤液后0h与CK抑制率差异均不显著,当静置2h后,发酵滤液加入有机溶剂处理抑制率均较CK提高,说明二者需要充分反应。(3)有机溶剂的加入不但不会使发酵滤液的抑制率显著降低,甚至会使其抑菌活性显著提高。

### 3 讨论与结论

解淀粉芽孢杆菌在自然界中分布广泛,对人畜无毒无害,具有广谱的抑制真菌和细菌活性的作用,且生长速度快、稳定性强,是一种理想的生防菌资源。解淀粉芽孢杆菌能产生多种对微生物具有拮抗作用的次生代谢产物,常见的有多肽类、脂肽类、抑菌蛋白类,此外大环内酯类寡肽酶、聚酮化合物也具有一定抑菌效果<sup>[16]</sup>。喻锦秀等<sup>[17]</sup>分离解淀粉芽孢杆菌P-14发酵液中的拮抗物质,得到5个组分,其中组分a被鉴定为脂肽类抗生素杆菌霉素D;同时对其挥发性物质进行了分离鉴定,共得到35种挥发性化合物,包含苯类、烷基类、醇类、酮类、醛类和酯类等物质。Zhang等<sup>[18]</sup>分离到的解淀粉芽孢杆菌对多种植物病原菌具有广谱抑菌性,鉴定抑菌物质为脂肽类抗生素伊枯草素和芬枯草菌素。本研究中解淀粉芽孢杆菌1-3-3亦可拮抗多种植物病原菌(未发表),但未对其抑菌活性物质进行分离鉴定等研究,还不能从机制上加以阐释,亟须对其可能产生的活性物质进行分离、鉴定,以期获得高效的抑菌物质用于番茄灰霉病的生物防治。

生防菌及其产生的活性物质在病害防治中具有较大的应用潜力,但是部分活性物质易受到温度、pH和光照等的影响,从而影响其使用效果。本文研究了温度、紫外线、离子、有机溶剂等对番茄灰霉病拮抗菌株1-3-3的发酵滤液抑菌稳定性的影响,发现该菌株的发酵滤液在不同温度下经不同时间的各个处理的抑菌活性均与CK持平或显著提高,说明一定温度处理有助于提高1-3-3的发酵滤液的抑菌效果,特别是在95℃下处理60min对番茄灰霉病原菌的抑制率较CK显著提高,猜测可能是其所产蛋白类物质在高温下仍然能够保持结构和功能的稳定性。李佳欣等<sup>[19]</sup>研究发现,芽孢杆菌Y62中存在热稳定性强的 $\alpha$ -淀粉酶,可以在不加

任何保护剂的条件下经100℃处理仍能保持37.80%的活性。所以拮抗菌株1-3-3发酵液活性提高很有可能是因为其可以产生类似 $\alpha$ -淀粉酶的耐高温蛋白。本研究还发现一定时间的紫外线处理有助于提高番茄灰霉病原菌拮抗菌株1-3-3的发酵滤液的抑菌效果,具体机制有待于进一步研究,但说明其发酵滤液不怕光照,便于菌剂开发与施用。在离子对发酵滤液的影响试验中发现,供试7种离子本身抑菌活性不明显,发酵滤液中加入 $\text{Na}^+$ 静置2h后,可显著增强发酵滤液的抑菌活性, $\text{Ca}^{2+}$ 加入发酵滤液0h和静置2h的处理抑菌活性波动较大, $\text{K}^+$ 、 $\text{NH}_4^+$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Al}^{3+}$ 和 $\text{Fe}^{3+}$ 对发酵滤液抑菌活性影响不大,可为其生物防治制剂的开发和应用提供理论基础。与前人研究的芽孢杆菌拮抗物质抑菌活性不受 $\text{Na}^+$ 影响,但受 $\text{Ca}^{2+}$ 抑制的结果不一致<sup>[12]</sup>,具体机制有待进一步研究。在有机溶剂对发酵滤液的影响试验中发现各个有机溶剂本身均对番茄灰霉病原菌具有一定的抑制效果,加入有机溶剂0h时,除无水乙醇外,有机溶剂的加入不但不会使发酵滤液的抑菌活性降低,甚至会使其抑菌活性显著提高,发酵滤液加入有机溶剂2h后,各处理抑制率均较CK提高,说明发酵滤液对4种有机溶剂均具有很好的耐受能力,这为活性物质的提取、分离纯化和分析提供了有力的理论依据。

综上,番茄灰霉病拮抗菌株1-3-3的发酵滤液经一定范围的温度、紫外线处理可提高其抑菌活性;7种离子中, $\text{Na}^+$ 加入发酵滤液静置2h后能显著增强其抑菌活性, $\text{Ca}^{2+}$ 加入发酵滤液0h和静置2h的处理抑菌活性波动较大, $\text{K}^+$ 、 $\text{NH}_4^+$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Al}^{3+}$ 和 $\text{Fe}^{3+}$ 对发酵滤液抑菌活性影响较小;排除有机溶剂本身具有抑菌效果外,不同有机溶剂加至滤液2h后,除无水乙醇外,发酵滤液的抑菌效果均能显著提升。可见菌株1-3-3发酵滤液可经受不同温度、紫外线、离子和有机溶剂的处理而表现出良好的抑菌活性,这为其活性物质的提取分离、开发微生物制剂及其后期应用提供了有力的数据支撑。

#### 参考文献

- [1] DEAN R, VAN KAN J A L, PRETORIUS Z A, et al. The Top 10 fungal pathogens in molecular plant pathology[J]. *Molecular Plant Pathology*, 2012, 13(4): 414-430
- [2] 丁永辉,陈玲英,梅丽娟.番茄灰霉病拮抗菌K-2的筛选及鉴定[J].金陵科技学院学报,2015,31(2):74-78.
- [3] 张丽芳,曹阳,张兰.解淀粉芽孢杆菌B235对花生根腐病的防治效果研究[J].花生学报,2024,53(1):72-78.
- [4] 杨冬静,孙厚俊,张成玲,等.解淀粉芽孢杆菌菌株XZ-1对甘

- 薯黑斑病的生物防治效果研究[J].西南农业学报,2018,31(4):736-741.
- [5] 杜鸿燕,何涛,刘凤弼,等.解淀粉芽孢杆菌对葡萄白粉病的防控效果研究[J].云南农业大学学报(自然科学),2021,36(6):944-948.
- [6] 唐蕊,张雪辉,郑佳.拮抗菌 HM-7 培养基的优化[J].中国瓜菜,2019,32(7):37-40.
- [7] 王芬,韩鹏.红提葡萄霜霉病拮抗菌 SZ9、LT3 抑菌活性物质稳定性研究[J].天津农业科学,2015,21(8):109-111.
- [8] 戴水莲,林警,高丽.PDA 培养基中加入青霉素、链霉素的抗菌作用试验简报[J].中国食用菌,2007,26(4):53-54.
- [9] 张子奇,李光哲,丁佳玉,等.烟草赤星病拮抗菌 YZ01 发酵条件优化及抑菌活性物质初探[J].中国生物防治学报,2024,40(2):347-358.
- [10] 董格.*Bacillus mojavensis* strain W-1 拮抗黄曲霉活性物质的稳定性研究[D].山东济宁:曲阜师范大学,2018.
- [11] 官颖.一株抗水稻稻瘟病芽孢杆菌的分离及其活性成分分析[D].四川雅安:四川农业大学,2018.
- [12] 刘婷,尹启蒙,周滢晴,等.一株副溶血性弧菌拮抗菌的筛选、鉴定及其抑菌物质特性研究[J].食品与发酵工业,2022,48(1):76-83.
- [13] 杨梓璐,石懿平,郑火建,等.产胺菌拮抗菌的筛选鉴定及其抑菌物质特性研究[J].湖北民族大学学报(自然科学版),2023,41(3):308-313.
- [14] 畅涛,杨成德,薛莉,等.珠芽蓼内生菌 ZA1 对马铃薯的防病促生研究[J].草业学报,2015,24(12):83-91.
- [15] 汤鸣强,林天然,李小芳,等.烟草青枯病拮抗菌的分离筛选与抑菌活性物质研究[J].湖北农业科学,2021,60(18):92-96.
- [16] 张娟,杨彩梅,曹广添,等.解淀粉芽孢杆菌及其作为益生菌的应用[J].动物营养学报,2014,26(4):863-867.
- [17] 喻锦秀,何振,李密,等.油茶炭疽病拮抗细菌 P-14 的拮抗物质分析[J].林业科学研究,2019,32(1):118-124.
- [18] ZHANG D, QIANG R, ZHAO J, et al. Mechanism of a volatile organic compound (6-methyl-2-heptanone) emitted from *Bacillus subtilis* ZD01 against *Alternaria solani* in potato[J]. Frontiers in Microbiology, 2022, 12: 808337.
- [19] 李佳欣,顾燕,汤伟,等.一株热反硝化地芽孢杆菌 Y62 产耐高温  $\alpha$ -淀粉酶的异源表达[J].食品研究与开发,2023,44(10):194-200.

(上接第 221 页)

- [35] 申朝阳,高林广,周浩露,等.普通尿素与控释尿素配施对谷子产量及氮素利用的影响[J].干旱地区农业研究,2024,42(5):63-70.
- [36] 肖晨星,高璐阳,马志明,等.包膜控释肥料研究进展[J].肥料与健康,2023,50(2):6-10.
- [37] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3版.北京:中国农业出版社,2000.
- [38] 马茜.硫酸钡吸光比浊法测定大蒜中大蒜素含量[J].光谱实验室,2007(3):345-347.
- [39] 蔡顺香.紫外分光光度法快速测定蔬菜中的硝酸盐含量[J].福建农业学报,2005,20(2):125-127.
- [40] 中华全国供销合作总社.大蒜:GH/T 1194—2022[S].北京:中华全国供销合作总社,2022.
- [41] 蔡明,刘吉利,杨亚亚,等.施氮量对间作马铃薯植株氮素累积及产量的影响[J].干旱地区农业研究,2020,38(2):142-149.
- [42] 邵财,孙海,关一鸣,等.白鲜不同生育时期营养元素积累规律及分配特征[J].东北林业大学学报,2025,53(1):35-42.
- [43] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局.农产品安全质量无公害蔬菜安全要求:GB 18406.1—2001[S].北京:中国标准出版社,2001.
- [44] 国家药典委员会.中华人民共和国药典:一部[M].北京:中国医药科技出版社,2020.
- [45] 张亚娟,闫芳,李翊华,等.不同施氮水平对“民乐紫皮”大蒜光合特性与叶绿素含量及品质的影响[J].北方园艺,2016(7):31-34.
- [46] 许真,王芯媛,张申申,等.氮肥和硫酸对大蒜生长、品质成分及 GGT 基因表达的影响[J].核农学报,2025,39(5):1081-1089.
- [47] 王茂莹,漆增连,代兴龙,等.不同缓/控释尿素对小麦生长及氮素利用的影响[J].植物营养与肥料学报,2021,27(4):643-653.
- [48] 贺平,陈玮峰,蔡健,等.普通尿素与控释尿素配比一次性施肥对稻麦产量及氮素利用率的影响[J].江苏农业学报,2025,41(2):276-285.