

研究报告

解淀粉芽孢杆菌 JDF630 脂肽抑制菌活性与成分鉴定

许子怡¹, 宋小飞¹, 赵文义², 王华玲^{1,3}, 曾健勇^{*1,4}, 李会平^{*1,3}

1 河北农业大学 林学院, 河北 保定 071000

2 河北农业大学 农学院, 河北 保定 071000

3 河北省城市森林健康技术创新中心, 河北 保定 071000

4 河北省林木种质资源与森林保护重点实验室, 河北 保定 071000

许子怡, 宋小飞, 赵文义, 王华玲, 曾健勇, 李会平. 解淀粉芽孢杆菌 JDF630 脂肽抑制菌活性与成分鉴定[J]. 微生物学通报, 2025, 52(6): 2630-2638.

XU Ziyi, SONG Xiaofei, ZHAO Wenyi, WANG Hualing, ZENG Jianyong, LI Huiping. Antifungal activity and components of lipopeptides from *Bacillus amyloliquefaciens* JDF630[J]. Microbiology China, 2025, 52(6): 2630-2638.

摘要: 【背景】脂肽类物质是芽孢杆菌属(*Bacillus*)细菌普遍存在的抑菌活性物质。解淀粉芽孢杆菌(*Bacillus amyloliquefaciens*) JDF630 是一株具有良好抑菌效果的生防菌株, 但其抑菌活性物质未知。【目的】明确解淀粉芽孢杆菌 JDF630 中脂肽类物质的抑菌活性与组成成分。【方法】采用酸沉-甲醇抽提法提取菌株 JDF630 的粗脂肽。采用改良的 Kirby-Bauer 法测定粗脂肽活性、广谱性和稳定性。采用硅胶柱层析对粗脂肽分离纯化。采用 LC-MS/MS 对抑菌效果最佳的组分进行成分鉴定。【结果】解淀粉芽孢杆菌 JDF630 粗脂肽显著抑制 6 种植物病原菌, 对极细链格孢菌(*Alternaria tenuissima*)尤为有效, 并且稳定性卓越, 耐受高温、紫外、蛋白酶及广泛 pH 范围。LC-MS/MS 鉴定显示 JDF630 脂肽主要成分为伊枯草菌素和表面活性素。【结论】本研究明确了解淀粉芽孢杆菌 JDF630 脂肽的抑菌活性和成分组成, 为解淀粉芽孢杆菌 JDF630 的应用和改造奠定了理论基础。
关键词: 解淀粉芽孢杆菌 JDF630; 脂肽; 稳定性; 生物防治

资助项目: 雄安新区建设科学技术计划(2021-13); 河北省省属高等学校基本科研业务费(KY2022051); 河北农业大学引进人才科研专项(YJ2021027)

This work was supported by the Xiong'an New Area Construction Science and Technology Plan (2021-13), the Basic Scientific Research Funds for Provincial Higher Education Institutions in Hebei Province (KY2022051), and the Special Project for Introduced Talents of Hebei Agricultural University (YJ2021027).

*Corresponding authors. E-mail: LI Huiping, huipinglipaper@163.com; ZENG Jianyong, zengstudywork@163.com

Received: 2024-09-25; Accepted: 2024-12-04; Published online: 2024-12-27

Antifungal activity and components of lipopeptides from *Bacillus amyloliquefaciens* JDF630

XU Ziyi¹, SONG Xiaofei¹, ZHAO Wenyi², WANG Hualing^{1,3}, ZENG Jianyong^{*1,4}, LI Huiping^{*1,3}

1 College of Forestry, Hebei Agricultural University, Baoding 071000, Hebei, China

2 College of Agronomy, Hebei Agricultural University, Baoding 071000, Hebei, China

3 Hebei Provincial Innovation Center of Urban Forest Health Technology, Hebei Agricultural University, Baoding 071000, Hebei, China

4 Key Laboratory of Forest Germplasm Resources and Forest Protection in Hebei Province, Baoding 071000, Hebei, China

Abstract: [Background] Lipopeptides are the antifungal substances ubiquitous in bacteria of *Bacillus*. *Bacillus amyloliquefaciens* JDF630 exhibits remarkable antifungal properties, yet the specific compounds responsible for the antifungal properties remain unidentified. **[Objective]** To determine the antifungal activity and identify the components of lipopeptides produced by *B. amyloliquefaciens* JDF630. **[Methods]** The crude lipopeptides were extracted from strain JDF630 by a combination of acid precipitation and methanol extraction. The antifungal activity, broad-spectrum capability, and stability of these lipopeptides were assessed by a modified Kirby-Bauer method. Subsequently, silica gel column chromatography was utilized for separation and purification of lipopeptides. LC-MS/MS was employed to pinpoint the most effective components. **[Results]** The crude lipopeptides from *B. amyloliquefaciens* JDF630 potently inhibited six plant pathogens, especially *Alternaria tenuissima*. Furthermore, these lipopeptides demonstrated remarkable stability across a wide range of temperatures, pH levels, ultraviolet radiation, and proteinase exposure. LC-MS/MS results confirmed that the primary components of these lipopeptides were iturin and surfactin. **[Conclusion]** This study comprehensively elucidates the antifungal properties and components of lipopeptides from *B. amyloliquefaciens* JDF630, establishing a robust theoretical basis for the potential applications and future genetic modification of this strain.

Keywords: *Bacillus amyloliquefaciens*; lipopeptide; stability; biocontrol

植物病害是制约农林业健康发展的重要因素,严重威胁着粮食安全和生态平衡,导致巨大的经济损失。化学防治是植物病害防控的主要手段,但化学农药易破坏生态平衡,引发抗药性,导致农药残留等问题^[1]。生物防治以其低毒、高效、无污染的特点,逐渐成为植物病害绿色防控技术的研发前沿方向^[2]。解淀粉芽孢杆菌(*Bacillus amyloliquefaciens*)是一种重要的生物防治细菌,其许多菌株对诸多植物病害都具有良好的防控效果^[3]。例如,解淀粉芽孢

杆菌(*Bacillus amyloliquefaciens*) Ba168 对扩展青霉(*Penicillium expansum*)导致的苹果蓝霉病具有高效防控能力^[4];解淀粉芽孢杆菌(*Bacillus amyloliquefaciens*) DHA55 对由尖孢镰刀菌(*Fusarium oxysporum*)引起的西瓜枯萎病呈现出显著的抑制效果,其抑制率高达 74.90%^[5]。

解淀粉芽孢杆菌的植物病害防治能力,与其合成的抗菌蛋白、脂肽类化合物及聚酮类化合物等有关。这些抑菌活性物质中,脂肽类化合物因其高效、稳定、低毒而备受关注。脂肽

类化合物主要包括表面活性素(surfactin)、伊枯草菌素(iturin)和丰原素(fengycin),这三类脂肽类物质均具有良好的抑菌活性^[6]。除此之外,表面活性素和伊枯草菌素均具有杀虫活性,被视为潜在的生物源杀虫剂^[7];表面活性素也因其表面活性作用,被广泛地应用于清洁剂、化妆品等领域^[8];丰原素则被证实具有抗肿瘤活性,有望开发为新的抗肿瘤药物^[9]。

解淀粉芽孢杆菌 JDF630 是分离自黄栌根际土的生防菌株,对黄栌枯萎病有良好的防治效果,但其抑菌成分尚不明确。本研究旨在探究解淀粉芽孢杆菌 JDF630 脂肽的抑菌活性、广谱性、稳定性,并鉴定其脂肽种类,为解淀粉芽孢杆菌 JDF630 的田间应用和改造奠定理论基础。

1 材料与方法

1.1 样品

供试病原菌包括极细链格孢菌(*Alternaria tenuissima*)、胶孢炭疽菌(*Colletotrichum gloeosporioides*)、茄病镰刀菌(*Fusarium solani*)、层出镰孢菌(*Fusarium proliferatum*)、大丽轮枝菌(*Verticillium dahlia*)、美洲南甲壳孢菌(*Thyronectria austroamericana*),供试拮抗菌为解淀粉芽孢杆菌 JDF630,均保存于河北农业大学林木病理实验室。

1.2 培养基、主要试剂和仪器

LB 营养琼脂、LB 肉汤和马铃薯葡萄糖琼脂(PDA)培养基,北京奥博星生物技术有限责任公司。

甲醇和二氯甲烷,国药集团化学试剂有限公司;木瓜蛋白酶、胃蛋白酶、胰蛋白酶、碱性蛋白酶,北京酷来搏科技有限公司。

冷冻离心机,力康发展有限公司;旋转蒸发仪和冷冻干燥机,深圳市京都玉崎电子有限公司;超高压液相和高分辨质谱,安捷伦科技公司;色谱柱,沃特世公司。

1.3 菌株 JDF630 粗脂肽的提取

取活化 12 h 的解淀粉芽孢杆菌 JDF630 种子液,按 0.25%接种量接种至 LB 肉汤培养基,31 °C、180 r/min 培养 24 h,8 500 r/min、4 °C 离心 15 min 收集菌液上清。采用酸沉淀分离法和有机溶剂抽提法^[10]提取上清液中的粗脂肽,具体方法:用 6 mol/L 盐酸调 pH 值至 2.0,4 °C 静置一夜后 8 000 r/min、4 °C 离心取沉淀;将沉淀加入 5 mL 甲醇,用浓度 1 mol/L 的 NaOH 水溶液将 pH 值调整至 7.0,8 500 r/min、4 °C 离心 10 min 后取上清液过 0.22 μm 微孔滤膜;将滤液于 40 °C 减压旋转蒸发至无甲醇后放在冷冻干燥机中进行冷冻干燥。粗脂肽 4 °C 保存备用。

1.4 菌株 JDF630 粗脂肽的抑菌谱

采用改良的 Kirby-Bauer 纸片扩散法^[11]测定菌株 JDF630 粗脂肽对极细链格孢菌的毒力和抑菌谱。将直径为 7 mm 的滤纸片置于 PDA 培养基中间,滴加浓度分别为 187.50、375、750、1 500、3 000 μg/mL 的粗脂肽 100 μL 进行毒力测定试验,重复 3 次。将其 EC₅₀ 值指定为试验浓度,对极细链格孢菌、胶孢炭疽菌、茄病镰刀菌、层出镰孢菌、大丽轮枝菌、*T. austroamericana* 进行抑菌试验,重复 5 次,于 28 °C 恒温培养 10 d 后测量病原菌菌落直径,按公式(1)计算抑菌率。

$$\text{抑菌率(\%)} = \frac{\text{对照组菌落直径} - \text{处理组菌落直径}}{\text{对照组菌落直径} - \text{菌饼直径}} \times 100 \quad (1)$$

1.5 菌株 JDF630 抑菌活性稳定性的测定

以极细链格孢菌为指示菌。分别用 1 mol/L 的 HCl 溶液和 NaOH 溶液调节菌株 JDF630 粗脂肽溶液的 pH 值为 5.0、6.0、7.0、8.0、9.0,考察粗脂肽的酸碱稳定性,以无菌水为对照。取 1 mL 粗脂肽分别添加 100 mg/mL 木瓜蛋白酶、胃蛋白酶、胰蛋白酶和碱性蛋白酶 0.11 mL。木瓜蛋白酶孵育温度为 65 °C,其余蛋白酶孵育温度为 37 °C,孵育 2 h 后测定粗脂肽的抑菌活性,以蛋白酶液和未经处理的粗脂肽为对照^[12]。将粗脂肽置于超净工作台紫外灯下分别照射 2、

4、6、8、10 h 后进行抑菌活性测定,考察粗脂肽经紫外照射后的稳定性,以不经紫外照射处理的粗脂肽为对照。将菌株 JDF630 粗脂肽经 40、60、80、100、121 °C 分别处理 30 min 后,进行抑菌活性测定,考察粗脂肽的温度稳定性,以未经高温处理的粗脂肽为对照。重复 5 次。于 28 °C 恒温培养 7 d 后测量病原菌菌落直径,抑菌率测定方法同 1.4。

1.6 菌株 JDF630 粗脂肽处理病原菌后菌丝形态的观察

将经无菌水处理的对照组菌丝样本与粗脂肽处理组样本分别置于光学显微镜下,采用 10× 及 40× 物镜系统进行形态学观察并拍照记录。

1.7 菌株 JDF630 粗脂肽对苹果烂果病的防治效果测定

取富士苹果针刺后喷施 1.55 mg/mL 粗脂肽溶液 1 mL, 2 h 后接种链格孢菌饼, 28 °C 恒温培养, 每隔 5 d 观测发病情况, 计算抑菌率^[10]。设置无菌水为对照, 重复 3 次。

1.8 菌株 JDF630 粗脂肽柱层析分离纯化

采用 2.5 cm×30 cm 的玻璃制层析柱和 300–400 目硅胶粉制备硅胶柱。采用二氯甲烷-甲醇体系进行菌株 JDF630 粗脂肽柱层析分离纯化。洗脱液根据 220 nm 处吸亮度合并成 5 个组分。各组分分别加 1 mL 无菌水后, 用甲醇定容至 250 mL, 并 40 °C 减压浓缩后存入 4 °C 备用。取 1.55 mg/mL 脂肽溶液 100 μL 涂布于 PDA 培养基上, 进行极细链格孢菌菌丝生长抑制率的测定。重复 5 次。于 28 °C 恒温培养 7 d 后测量病原菌菌落直径, 抑菌率测定方法同 1.4。

1.9 菌株 JDF630 抑菌效果最佳脂肽组分的 LC-MS/MS 鉴定

取抑菌效果最佳的脂肽组分进行 LC-MS/MS 鉴定。上样量 5 μL, 柱温 35 °C。流动相条件, 正离子模式: A: 0.10% 甲酸水; B: 0.10% 甲酸乙腈。负离子模式: A: 水(2 mmol 乙酸铵); B: 乙腈。采集一级和二级质谱数据。MS 采集速率: 6 spectrum/s, MS2 采集速率: 12 spectrum/s。

质量扫描范围: 一级 m/z 50–1 300, 二级 m/z 20–1 300。离子源参数: 干燥气温度 320 °C, 氮气流量 8 L/min, 鞘气流速 12 L/min, 鞘气温度 350 °C。毛细管电压: 正离子模式 4 000 V, 负离子模式 3 500 V。使用 Analysis Base File Converter 软件进行原始数据格式转换。利用 MS-DIAL 4.60 软件进行峰寻找、峰对齐等数据处理。基于一级与二级图谱搜索 LipidBlast 数据库进行鉴定。设置 MS-DIAL 软件参数: MS1 准确质量容差 0.005 Da, MS2 容差 0.05 Da, 鉴定得分阈值 60%。

1.10 数据分析

采用 Microsoft Excel 2010 进行数据整理, 采用 IBM SPSS 26 进行单因素方差分析。

2 结果与分析

2.1 菌株 JDF630 粗脂肽的抑真菌活性

精确毒力测定结果表明, 用量为 100 μL 时, 菌株 JDF630 粗脂肽对极细链格孢菌的毒力方程为 $Y=1.97X-6.28$ ($R^2=0.989$), EC_{50} 为 1.55 mg/mL。抑菌谱试验结果如图 1 所示, 用 100 μL 浓度为 1.55 mg/mL 的解淀粉芽孢杆菌 JDF630 粗脂肽进行 K-B 试验, 发现其对 6 种供试植物病原真菌均具有抑制作用, 抑菌率为 22.72%–51.63%。其中, 对极细链格孢菌的抑制率最高, 达到 51.63%。

2.2 菌株 JDF630 粗脂肽的抑真菌稳定性

抑真菌(极细链格孢菌)稳定性试验结果如图 2 所示, pH 5.0–8.0 时抑菌率与对照无显著差异($P>0.05$), pH 9.0 时抑菌率显著低于对照组($P<0.05$), 说明菌株 JDF630 粗脂肽在 pH 5.0–8.0 时对极细链格孢菌的抑菌活性稳定。菌株 JDF630 粗脂肽经胰蛋白酶和木瓜蛋白酶处理后抑菌率与对照无显著差异($P>0.05$), 碱性蛋白酶和胃蛋白酶处理后抑菌率显著低于对照组($P<0.05$)。说明菌株 JDF630 粗脂肽对胰蛋白酶和木瓜蛋白酶具有较好的稳定性。紫外线照射 10 h 抑菌率与对照无显著差异($P>0.05$), 显示出良好抗紫外线能力。温度 40–80 °C 处理 30 min 时抑菌率

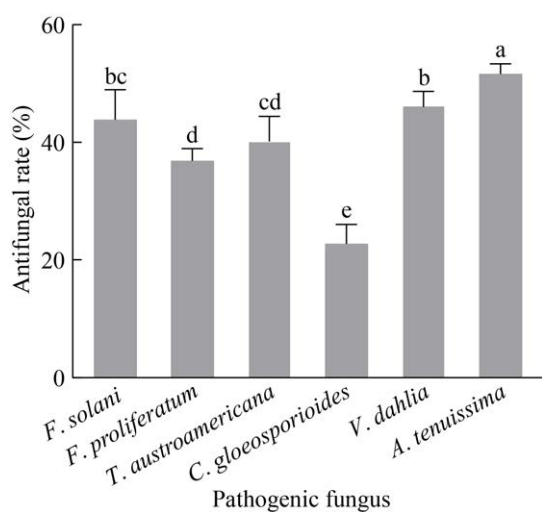


图1 解淀粉芽孢杆菌 JDF630 粗脂肽对病原真菌的抑菌活性 不同小写字母表示差异显著。下同。
Figure 1 Antifungal activity of crude lipopeptide from *Bacillus amyloliquefaciens* JDF630 against pathogenic fungi. Different lowercase letters indicate significant differences between groups ($P < 0.05$). The same below.

与对照无显著差异($P > 0.05$),但 100 °C 及 121 °C 处理后抑菌率显著低于对照组($P < 0.05$),说明菌株 JDF630 粗脂肽在 40–80 °C 时对极细链格孢菌的抑菌活性稳定。

2.3 菌株 JDF630 粗脂肽对极细链格孢菌菌丝形态的影响

电子显微镜观察到对照组极细链格孢菌菌丝(图 3A、3B)排列相对整齐,菌丝饱满、表面光滑;而菌株 JDF630 粗脂肽处理组的极细链格孢菌菌丝(图 3C、3D)粗细不均,出现膨大、断裂及不规则缠绕现象。

2.4 菌株 JDF630 粗脂肽对苹果烂果病的防治

苹果烂果病防治试验结果如图 4 所示,苹果接种极细链格孢菌第 5 天时,对照组苹果出现褐色圆形病斑(直径 1.43 cm),而菌株 JDF630 粗脂肽处理组的苹果未现明显病斑,防治效果为 100%。表明菌株 JDF630 粗脂肽对苹果烂果病

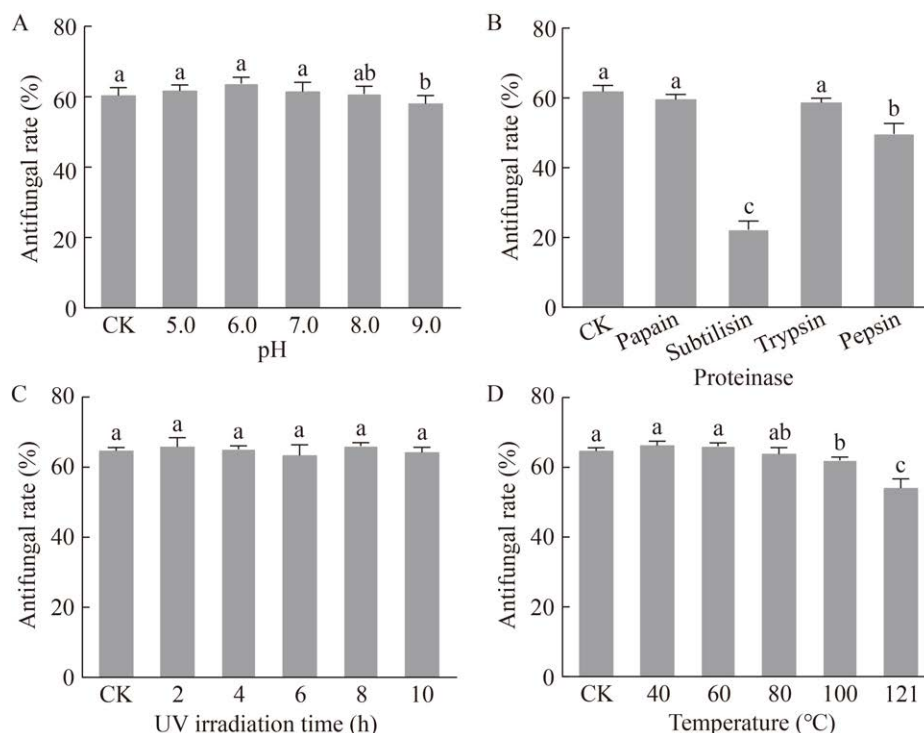


图2 解淀粉芽孢杆菌 JDF630 粗脂肽的抑真菌稳定性 A: pH; B: 蛋白酶; C: 紫外照射时长; D: 温度。
Figure 2 Antifungal stability of crude lipopeptide from *B. amyloliquefaciens* JDF630. A: pH; B: Proteinase; C: UV irradiation time; D: Temperature.

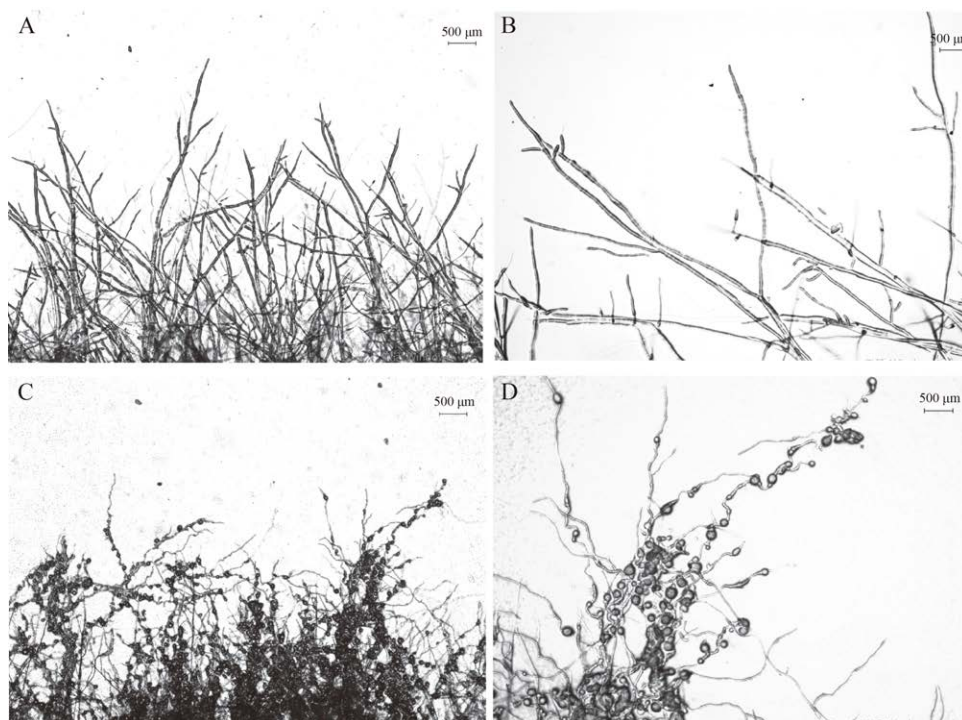


图3 解淀粉芽孢杆菌 JDF630 粗脂肽类物质对极细链格孢菌菌丝形态的影响 A: 40×对照组菌丝; B: 100×对照组菌丝; C: 40×经脂肽处理后的菌丝; D: 100×经脂肽处理后的菌丝。

Figure 3 Effects of crude lipopeptides from *B. amyloliquefaciens* JDF630 on mycelial morphology of *A. tenuissima*. A: 40× control mycelium; B: 100× control mycelium; C: 40× mycelium treated with crudelipopeptide; D: 100× mycelium treated with crudelipopeptide.

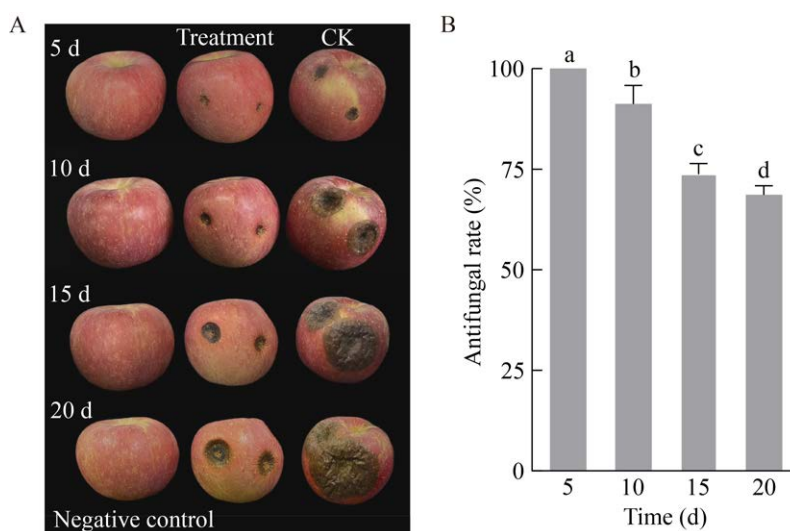


图4 解淀粉芽孢杆菌 JDF630 粗脂肽对苹果烂果病的防治效果 A: 防治苹果烂果病的实体图; B: 防治苹果烂果病的量化数据。

Figure 4 The control effect of crude lipopeptide from *B. amyloliquefaciens* JDF630 on apple fruit rot disease. A: Prevention and control of apple rot disease entity figure; B: Quantitative data for the prevention and control of apple rot disease.

具有良好的预防效果。但防治效果随时间推移而显著降低,接种极细链格孢菌 10、15、20 d 后防治效果依次为 90.00%、70.00%、63.00%。

2.5 菌株 JDF630 脂肽组分的抑真菌效果

硅胶柱层析共分离获得 5 个菌株 JDF630 的粗脂肽组分,将其减压浓缩处理后,其浓度达到 1.55 mg/mL,用这 5 个经减压浓缩后的抑菌脂肽组分溶液进行抑菌(极细链格孢菌)试验,结果如图 5 所示,除组分 1 外的 4 个组分均可显著抑制极细链格孢菌菌丝生长($P<0.05$)。其中,组分 5 对极细链格孢菌的抑制率为 68.15%,显著高于其余组分($P<0.05$),并且最接近粗脂肽的抑菌率 72.28%。

2.6 菌株 JDF630 抑真菌脂肽组分物质组成

为简化菌株 JDF630 粗脂肽成分分析背景,对抑菌活性最高的组分 5 进行 LC-MS/MS 分析。结果表明,保留时间为 17.87 min 时出现了 m/z 值为 1 008.87 的单峰(图 6A),符合表面活性素(surfactin)的图谱特征^[13]。在保留时间为 16.12 min 时,出现了 m/z 值为 1 057.87 的单峰(图 6B),符合伊枯草菌素(iturin)的图谱特征^[14]。由此可知,解淀粉芽孢杆菌 JDF630 可分泌表面活性素和伊枯草菌素这 2 种脂肽。

3 讨论

芽孢杆菌产生的脂肽类物质具有良好的抑菌效果和广泛的抑菌活性^[7]。本研究采用酸沉-甲醇抽提法提取了解淀粉芽孢杆菌 JDF630 的粗脂肽,而后对提取的脂肽进行了抑菌活性的测定。研究结果表明,解淀粉芽孢杆菌 JDF630 对极细链格孢菌、胶孢炭疽菌、腐皮镰刀菌、层出镰孢菌、大丽轮枝菌和美洲南甲壳孢菌这 6 种供试病原真菌均具有良好的抑制作用,对苹果烂果病也具有良好的预防效果,并且具有良好的温度稳定性(80 °C 以下)、紫外线稳定性、pH 稳定性及对蛋白酶的稳定性。因此可知,解淀粉芽孢杆

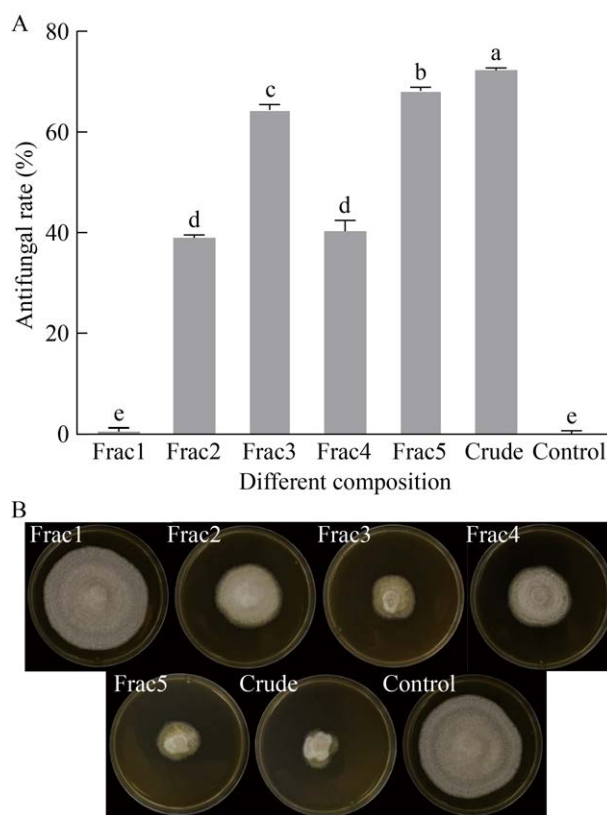


图 5 解淀粉芽孢杆菌 JDF630 各脂肽组分的抑真菌效果 A: 各组分抑菌率; B: 各组分处理后菌落形态。Frac1–5: 脂肽组分 1–5; 粗品: 粗脂肽; 对照: 无菌水对照。

Figure 5 Antifungal effect of various lipopeptide fractions from *B. amyloliquefaciens* JDF630. A: Antifungal rate of each component; B: Fungal colony morphology after treatment of each component. Frac1–5: lipopeptide component 1–5; Crude: Crude lipopeptide; Control: sterile water control.

菌 JDF630 粗脂肽具有应用于林木病害防治和延长果蔬货架期的潜力。

前人研究报道,解淀粉芽孢杆菌含有的脂肽种类包括表面活性素、伊枯草菌素、丰原素等^[7]。经硅胶柱层析分离纯化通过 LC-MS/MS 分析,本研究鉴定出解淀粉芽孢杆菌 JDF630 中含有伊枯草菌素和表面活性素 2 种抗菌肽,而未检测到丰原素。这与部分已报道的解淀粉芽孢杆菌菌株不同,如解淀粉芽孢杆菌(*Bacillus amyloliquefaciens*) HMB33604^[15]和解淀粉芽孢

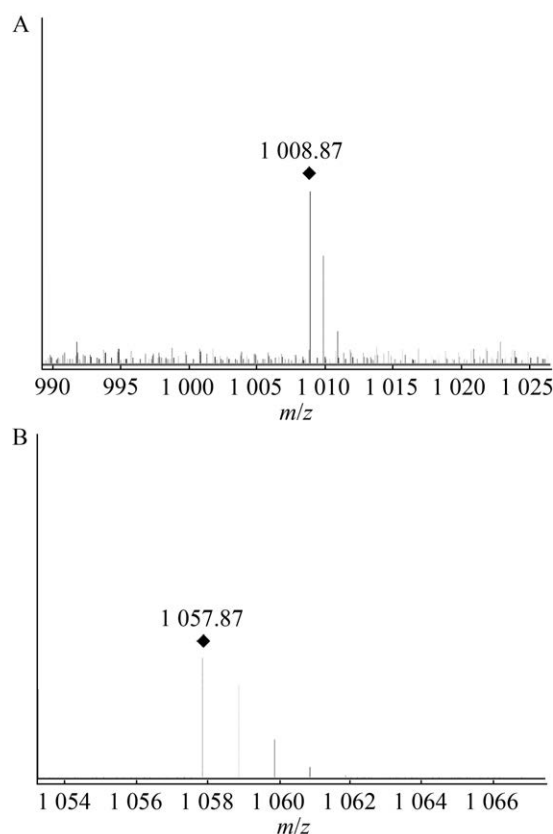


图 6 解淀粉芽孢杆菌 JDF630 脂肽成分质谱图
A: 表面活性素; B: 伊枯草菌素。

Figure 6 Mass spectrum of lipopeptide fraction of *B. amyloliquefaciens* JDF630. A: Surfactin; B: Iturin.

杆菌(*Bacillus amyloliquefaciens*) CMT-9^[16]可产生 iturin、surfactin 和 fengycin 这 3 种脂肽; 解淀粉芽孢杆菌(*Bacillus amyloliquefaciens*) Cas02 可产生 iturin A 这 1 种脂肽^[17]。

本研究明确了解淀粉芽孢杆菌 JDF630 脂肽的林木病害防治潜力。值得进一步探索其作用机制, 优化生产工艺, 提高产量和纯度, 为农林业绿色可持续发展提供支持。同时, 还需密切关注其在实际应用中的安全性和长期效果, 确保其在病害防治中的有效性和可靠性。

4 结论

解淀粉芽孢杆菌 JDF630 脂肽主要成分为伊枯草菌素和表面活性素。解淀粉芽孢杆菌

JDF630 脂肽抑菌活性良好、稳定性高, 对极细链格孢菌等引发的林木病害具有优良的防治潜力。

作者贡献声明

许子怡: 实验开展、数据分析和初稿撰写; 宋小飞: 脂肽粗提取与抑菌活性稳定性测定实验; 赵文义: 粗脂肽柱层析分离纯化实验; 王华玲: 试验指导和数据分析; 曾健勇和李会平: 课题提出、试验指导、论文修改、经费支持。

作者利益冲突公开声明

作者声明绝无任何可能会影响本文所报告工作的已知经济利益或个人关系。

REFERENCES

- [1] 杨普云, 李萍, 任彬元, 李春广. 我国农作物病虫害化学防控技术的环境成本分析[J]. 中国植保导刊, 2019, 39(6): 27-30, 43.
YANG PY, LI P, REN BY, LI CG. Analysis on environmental costs of crop pest chemical management technologies in China[J]. China Plant Protection, 2019, 39(6): 27-30, 43 (in Chinese).
- [2] 田卉, 封传红, 张辉, 廖桂堂, 徐翔, 万宣伍, 杨淞杰, 胡韬, 尹勇. 实施“两个替代”战略推进农业绿色发展的思考与建议[J]. 中国植保导刊, 2021, 41(3): 82-85.
TIAN H, FENG CH, ZHANG H, LIAO GT, XU X, WAN XW, YANG SJ, HU T, YIN Y. Thoughts and suggestions on implementing the “two substitutions” strategy to promote the green development of agriculture[J]. China Plant Protection, 2021, 41(3): 82-85 (in Chinese).
- [3] 赵月盈. 解淀粉芽孢杆菌抗病机制研究进展[J]. 亚热带农业研究, 2021, 17(3): 205-210.
ZHAO YY. Research progress on the disease inhibition mechanism of *Bacillus amyloliquefaciens*[J]. Subtropical Agriculture Research, 2021, 17(3): 205-210 (in Chinese).
- [4] LU MH, CHEN YH, LI LJ, MA YH, TONG ZF, GUO DS, SUN PP, AN DR. Analysis and evaluation of the flagellin activity of *Bacillus amyloliquefaciens* Ba168 antimicrobial proteins against *Penicillium expansum*[J]. Molecules, 2022, 27(13): 4259.
- [5] AL-MUTAR DMK, ALZAWAR NSA, NOMAN M, AZIZULLAH, LI DY, SONG FM. Suppression of *Fusarium* wilt in watermelon by *Bacillus amyloliquefaciens* DHA55 through extracellular production of antifungal lipopeptides[J]. Journal of Fungi, 2023, 9(3): 336.
- [6] CAROLIN C F, KUMAR PS, NGUEAGNI PT. A review on new aspects of lipopeptide biosurfactant: Types, production, properties and its application in the

- bioremediation process[J]. Journal of Hazardous Materials, 2021, 407: 124827.
- [7] 罗晓娇, 孙静, 陆颖健. 解淀粉芽孢杆菌中脂肽的生物合成、抑菌机理及应用的研究进展[J]. 食品工业科技, 2022, 43(19): 462-470.
- LUO XJ, SUN J, LU YJ. Research progress in the biosynthesis, antimicrobial mechanism, and application of lipopeptides in *Bacillus amyloliquefaciens*[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(19): 462-470 (in Chinese).
- [8] 王晓琼, 毕秀芳, 谢晓凤, 邢亚阁, 李明元. 伊枯草菌素 A 对草莓腐败菌的抑制效果研究[J]. 天然产物研究与开发, 2020, 32(11): 1889-1895.
- WANG XQ, BI XF, XIE XF, XING YG, LI MY. Antibacterial effect of iturin A on strawberry spoilage mold[J]. Natural Product Research and Development, 2020, 32(11): 1889-1895 (in Chinese).
- [9] LIU Q, FAN WJ, ZHAO YJ, DENG ZX, FENG Y. Probing and engineering the fatty acyl substrate selectivity of starter condensation domains of nonribosomal peptide synthetases in lipopeptide biosynthesis[J]. Biotechnology Journal, 2020, 15(2): 1900175.
- [10] 荣哲, 吕凯旋, 王思佳, 金朝霞. 苏云金芽孢杆菌抗菌脂肽初步鉴定及抑菌活性测定[J]. 微生物学杂志, 2023, 43(1): 57-65.
- RONG Z, LYU KX, WANG SJ, JIN ZX. Preliminary identification and antibacterial activity of antibacterial lipopeptide from *Bacillus thuringiensis*[J]. Journal of Microbiology, 2023, 43(1): 57-65 (in Chinese).
- [11] CHAKRABORTY M, MAHMUD NU, GUPTA DR, TAREQ FS, SHIN HJ, ISLAM T. Inhibitory effects of linear lipopeptides from a marine *Bacillus subtilis* on the wheat blast fungus *Magnaporthe oryzae tritici*[J]. Frontiers in Microbiology, 2020, 11: 665.
- [12] 黄华毅, 黄咏槐, 黄焕华, 梁英梅, 田呈明. 枯草芽孢杆菌 STO-12 脂肽类物质抑菌活性及其特性分析[J]. 林业与环境科学, 2018, 34(4): 8-14.
- HUANG HY, HUANG YH, HUANG HH, LIANG YM, TIAN CM. Antifungal activities and characterization of lipopeptides produced by *Bacillus subtilis* STO-12[J]. Forestry and Environmental Science, 2018, 34(4): 8-14 (in Chinese).
- [13] CHEN L, SHI H, HENG JY, WANG DX, BIAN K. Antimicrobial, plant growth-promoting and genomic properties of the peanut endophyte *Bacillus velezensis* LDO2[J]. Microbiological Research, 2019, 218: 41-48.
- [14] PANDYA U, SARAF M. Isolation and identification of allelochemicals produced by *B. sonorensis* for suppression of charcoal rot of *Arachis hypogaea* L[J]. Journal of Basic Microbiology, 2015, 55(5): 635-644.
- [15] 李扬凡, 邵美琪, 刘畅, 郭庆港, 王培培, 陈秀叶, 苏振贺, 马平. 解淀粉芽孢杆菌 HMB33604 的抑菌物质及对马铃薯黑痣病的防治效果[J]. 中国农业科学, 2021, 54(12): 2559-2569.
- LI YF, SHAO MQ, LIU C, GUO QG, WANG PP, CHEN XY, SU ZH, MA P. Identification of the antifungal active compounds from *Bacillus amyloliquefaciens* strain HMB33604 and its control efficacy against potato black scurf[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2021, 54(12): 2559-2569 (in Chinese).
- [16] 花梅芳, 李东迅, 邓旗, 孙力军, 钟赛意, 廖建萌. 基于 LC-MS/MS 和比较基因组学技术解析海洋源解淀粉芽孢杆菌 CMT-9 产抗菌脂肽的分子机理[J]. 食品与发酵工业, 2023, 49(3): 9-15.
- HUA MF, LI DX, DENG Q, SUN LJ, ZHONG SY, LIAO JM. Molecular mechanism of antimicrobial lipopeptide produced by marine *Bacillus amyloliquefaciens* CMT-9 analyzed by LC-MS/MS and comparative genomics[J]. Food and Fermentation Industries, 2023, 49(3): 9-15 (in Chinese).
- [17] CHU DP, ILYAS N, PENG LJ, WANG XQ, WANG DK, XU ZC, GAO Q, TAN XL, ZHANG CS, LI YQ, YUAN Y. Genomic insights on fighting bacterial wilt by a novel *Bacillus amyloliquefaciens* strain Cas02[J]. Microbial Biotechnology, 2022, 15(4): 1152-1167.