

肉桂叶精油抑制软腐病菌 *Dickeya fangzhongdai* Onc5 致病性的研究

杜丽君¹, 李银银^{2*}, 陈雪虹², 徐韵淇², 林泽尧², 邓春琼², 林小苹¹, 李永裕^{2**}

1. 漳州城市职业学院, 福建漳州 363001; 2. 福建农林大学园艺植物天然产物研究所, 福建福州 350002

摘要: 本文研究了肉桂叶精油的抑菌性和作为群体感应抑制剂的可行性, 以期获得价格低廉且安全高效的新型绿色杀菌剂。利用气相色谱-质谱联用技术 (GC-MS), 分析肉桂叶精油的化学组成成分, 进而研究肉桂叶精油对细菌性软腐病的生防效果, 并测定肉桂叶精油对软腐病菌 *Dickeya fangzhongdai* Onc5 的抑制作用。结果表明: 肉桂叶精油含有 16 种化学组分, 其中主要为棕榈酸异丙酯 (52.15%)、桂皮醛 (23.02%) 和肉豆蔻酸异丙酯 (18.80%); 广谱性抑菌试验表明, 肉桂叶精油对野生型紫色杆菌 (*Chromobacterium violaceum* ATCC31532)、胡萝卜软腐果胶杆菌胡萝卜亚种 (*Pectobacterium carotovorum* subsp. *carotovorum*)、大肠杆菌 (*Escherichia coli* ATCC25922)、红色粘性沙雷氏菌 (*Serratia marcescens* H30)、软腐病菌 (*D. fangzhongdai* Onc5) 5 种病菌均具有显著的抑制作用; 肉桂叶精油对软腐病菌 *D. fangzhongdai* Onc5 的最低抑菌浓度 (MIC) 为 2.5%; 在不影响软腐病菌正常生长下, 精油会削弱软腐病菌鞭毛的运动能力, 控制软腐病菌的游动运动 (swimming) 和扩散运动 (swarming), 有效抑制软腐病菌; 亚抑菌浓度 (1/2MIC 和 1/4MIC) 的肉桂叶精油具有抑制软腐病菌的植物细胞壁降解酶 (Cel、Pel、Prt) 活性的能力, 使病菌侵入植物细胞的能力受限; 为了进一步验证肉桂叶精油的抑菌效果, 将经 1/2MIC 肉桂叶精油处理的软腐病菌接种到胡萝卜、大白菜、马铃薯和白萝卜上, 结果显示, 菌液的致病力显著减弱。肉桂叶精油通过抑制软腐病菌的胞外降解酶分泌活力和鞭毛运动能力, 影响软腐病菌的群体感应系统, 发挥其抑菌作用。表明肉桂叶精油在果蔬软腐病生物防治方面具有一定应用前景, 研究结果可为农产品的保鲜以及病害的绿色防控提供理论基础和技术支持。

关键词: 肉桂叶精油; 化学成分; 软腐病; 致病性; 群集运动

中图分类号: TS255.3

文献标志码: A

Inhibition of Pathogenicity by Cinnamon Leaf Essential Oil on the Soft Rot Fungus *Dickeya fangzhongdai* Onc5

DU Lijun¹, LI Yinyin^{2*}, CHEN Xuehong², XU Yunqi², LIN Zeyao², DENG Chunqiong², LIN Xiaoping¹, LI Yongyu^{2**}

1. Zhangzhou Urban Vocational College, Zhangzhou, Fujian 363001, China; 2. Institute of Natural Products of Horticultural Plants, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou, Fujian 350002, China

Abstract: With the aim of obtaining a new type of green fungicide that is low-cost, safe and highly efficient, this study investigated the antibacterial activity of Cinnamon leaf essential oil and its feasibility as a quorum sensing inhibitor (QSI), and explored its biocontrol effect on bacterial soft rot disease. In this study, the chemical composition of Cinnamon leaf essential oil was analyzed by gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS), and the effect of Cinnamon leaf essential oil on the biological control of bacterial soft rot disease was studied, and the effect of Cinnamon leaf es-

收稿日期 2025-09-01; 接受日期 2025-10-10

基金项目 漳州市自然科学基金项目 (No. ZZ2024J22); 福建省科技计划项目 (No. 2023N0006); 福建农林大学科技创新专项基金项目 (No. KFB23041)。

作者简介 杜丽君 (1987—), 女, 硕士, 副教授, 研究方向: 果树生理生化及次生物质代谢; *同等贡献作者: 李银银 (2003—), 女, 本科生, 研究方向: 农产品保鲜。 **通信作者 (Corresponding author): 李永裕 (LI Yongyu), E-mail: lilin3182@163.com。

sential oil on inhibiting the soft rot pathogen *Dickeya fangzhongdai* Onc5 quorum sensing system was determined. It was indicated that a total of 16 major constituents were identified in *Cinnamon* essential oil and the main components were isopropyl palmitate (52.15%), cinnamaldehyde (23.02%) and isopropyl myristic acid (18.80%). Broad-spectrum antibacterial tests showed that the *Cinnamon* essential oil extracted from leaves had a significant inhibitory effect on five types of bacteria, including *Chromobacterium violaceum* ATCC31532, *Pectobacterium carotovorum* subsp. *carotovorum*, *Escherichia coli* ATCC25922, *Serratia marcescens* H30, and *D. fangzhongdai* Onc5. The minimum inhibitory concentration (MIC) of *Cinnamon* essential oil against the soft rot pathogen Onc5 was determined to be 2.5%. Without affecting the normal growth of *D. fangzhongdai* Onc5, *Cinnamon* essential oil could weaken its flagellar motility and the release of PCWDEs, controlled the swimming and swarming of *D. fangzhongdai* Onc5, and effectively inhibited the soft rot pathogen. At sub-inhibitory concentrations (1/2MIC and 1/4MIC), *Cinnamon* essential oil was able to inhibit the activity of the plant cell wall degrading enzymes (Cel, Pel, Prt) of *D. fangzhongdai* Onc5, thereby limiting the ability of pathogen to invade plant cells. In order to further verify the antibacterial effect of *Cinnamon* essential oil, *D. fangzhongdai* Onc5 treated with 1/2MIC *Cinnamon* essential oil was inoculated on carrots, cabbage, potatoes and white radishes, and the results revealed that the pathogenicity of the bacterial liquid attenuated significantly. The research found that *Cinnamon* leaf essential oil exerts antibacterial effects by reducing the secretion activity of extracellular degrading enzymes and flagellar motility of *D. fangzhongdai* Onc5, thereby influencing its quorum sensing system. It has application prospects employed to control postharvest soft rot in fruits and vegetables as biological means, providing theoretical basis and technical support for the preservation of agricultural products and the green prevention and control of diseases.

Keywords: *Cinnamon* leaf essential oil; chemical composition; soft rot; pathogenicity; swarming motility

DOI: 10.3969/j.issn.1000-2561.2025.12.019

农业病原微生物是导致农作物病害和部分动物疾病的重要因素, 已成为保障国家粮食安全和农产品有效供给的关键限制因素。据统计, 我国主要粮食作物和经济作物每年因病害损失的粮食产量超过 10%^[1]。由 *Dickeya* 属细菌引起的细菌性软腐病是一种世界性流行病害^[2-3], 该属病原菌具有广泛的寄主范围, 可以引起多种作物, 如水稻、马铃薯、白菜、胡萝卜、香蕉、蝴蝶兰、鸢尾、马蹄莲等发生病害。细菌性软腐病是一类危害严重的植物细菌性病害, 传播迅速, 常给农作物生产带来巨大的经济损失。目前, 市场上缺乏针对细菌性软腐病的专一性杀菌剂, 该病害的防治仍以预防为主^[3]。已有研究表明, 致病菌的致病因子[如植物细胞壁降解酶 (PCWDEs)、细胞运动性、生物膜、毒素等]的释放受细菌群体感应 (quorum sensing, QS) 系统的调控^[4-6], 因此, 细菌 QS 通路的研究为细菌病害的生物防治提供了新的理论和模式依据^[7]。不同于传统抗生素, 群体感应抑制剂 (quorum sensing inhibitor, QSI) 以细菌的 QS 系统为作用靶点^[8], QSI 仅抑制细菌致病因子对植物的伤害, 不威胁细菌的生存, 因而理论上产生传统耐药性筛选压力的风险较低; 而且 QSI 不仅能够有效降低耐药菌的传播风险, 还能持续抑制 QS 系统及相关毒力因子的表达。利

用植物次生代谢产物抑制细菌 QS 的植保新技术, 在植物细菌病害防治上展现出巨大的潜力^[9]。

肉桂精油是从樟科植物肉桂 (*Cinnamomum cassia*) 提炼出来的一种天然挥发性油状物质, 具有浓烈而长久的辛香气味。研究表明, 肉桂精油具有显著的镇静、镇痛及解热作用, 能促进外周血液循环、增强消化系统功能^[10], 并且肉桂精油通过其抗氧化和抗炎机制, 在食疗保健领域表现出潜在的癌症预防效果^[11]。特别值得注意的是, 肉桂精油具有广谱抗菌特性^[12], 其对食源性致病菌 (如金黄色葡萄球菌、大肠杆菌等) 的抑制效果尤为突出, 这使其成为天然抗菌剂开发的理想候选物质^[13]。肉桂精油作为一种天然产物, 不仅具备抑菌和抗氧化活性, 还展现出潜在的 QS 抑制能力, 其多重作用机制使其成为开发新型植物源抗菌剂的理想候选物质。以肉桂树皮、果实、花等为原料获得的肉桂精油, 虽然品质优良, 但成本高, 无法满足产业需求, 而目前尚无以肉桂叶为原料研究肉桂精油作为 QSI 的可行性研究。本研究以从肉桂叶中提取的精油为材料, 以软腐病菌 *D. fangzhongdai* Onc5 为研究菌株, 通过测定肉桂叶精油对软腐病菌 PCWDEs 活性和群集运动能力等相关关键致病因子的抑制作用, 研究肉桂叶精油对软腐病菌 QS 系统的影响, 探讨肉桂叶

精油作为 QSI 的可行性,并借助 GC-MS 技术对肉桂叶精油的成分进行分析,为后续解析精油中关键活性成分抑制细菌 QS 系统的作用机制提供依据,也为拓展肉桂精油的应用领域,为植物细菌性病害的生物防治提供全新的药物选择。

1 材料与方法

1.1 材料

肉桂叶来自福建漳州漳浦县,采用水蒸气蒸馏法提取肉桂叶精油,将新鲜枝叶用剪刀剪碎,将其装进瓶中,按照料液比 1:20 加水至 2/3 处进行蒸馏,提取 2 h 后用干净的离心管收集,收集精油后离心进行水油分离,再去除精油中的水分。精油样品用锡箔纸包好置于-20℃冰箱存放。

供试菌株:野生型紫色杆菌(*Chromobacterium violaceum* ATCC31532)、胡萝卜软腐果胶杆菌胡萝卜亚种(*Pectobacterium carotovorum* subsp. *carotovorum*)、大肠杆菌(*Escherichia coli* ATCC25922)、红色粘性沙雷氏菌(*Serratia marcescens* H30)、软腐病菌(*D. fangzhongdai* Onc5)均来自福建农林大学园艺学院。用 200 μ L 菌液接种到 19.8 mL 的 LB 液体培养基中,接种量为 1% (V/V)。在 30℃、150 r/min 摇床上培养 12 h,完成活化。活化的菌液与 60%甘油在 1.5 mL 离心管中进行 1:1 混合^[14],置于-80℃冰箱保存,备用。

1.2 方法

1.2.1 GC-MS 检测肉桂叶精油成分 参考 JOSHI 等^[5]的方法,采用气相色谱-质谱联用仪(GC-MS)对肉桂叶精油成分进行定性与定量分析。色谱-质谱系统为 PerkinElmer Clarus® 680 气相色谱仪联用 SQ8T 质量选择检测器(PerkinElmer, Waltham, MA, USA);质谱采用电子电离模式运行,利用 Turbomass Ver. 6.1.0 (PerkinElmer) 软件处理数据。样品以分流模式(20:1)进样,进样量为 1 μ L,进样口温度为 250℃;色谱柱为 DB-5MS 毛细管柱(30 m $\times$ 25 mm $\times$ 0.25 μ m);载气为氦气,流速为 1 mL/min。程序升温梯度优化为:50℃保持 2 min,随后以 50℃/min 的速率升至 160℃,维持 2 min,最后以 50℃/min 的速率升至 250℃,并保持 2 min。传输线温度为 250℃,离子源温度为 230℃,电子能量为 70 eV。

1.2.2 肉桂叶精油的广谱抑菌活性测定 用移液枪吸取 200 μ L (体积分数为 1%)活化 12 h 的 10^8 CFU/mL 不同种类菌悬液,接种到 LB 培养基

中,摇匀后将培养基倒入 90 mm 的无菌培养皿,待培养基凝固后,使用 6 mm 打孔器进行打孔,每个孔中用移液枪分别打入 40 μ L 肉桂叶精油,以添加等量无菌水为对照(CK),置于 30℃恒温培养箱孵育 12 h 后,测量抑菌圈直径以评估其抑菌效果。

1.2.3 肉桂叶精油对 *D. fangzhongdai* Onc5 的抑制效果测定 采用倍半稀释法确定肉桂叶精油对菌株 *D. fangzhongdai* Onc5 的最低抑菌浓度(MIC),在摇床(150 r/min, 30℃)持续培养 12 h,通过查看培养液的浑浊程度,并利用酶标仪测定 OD₆₀₀ 值,判定最小抑菌浓度。

D. fangzhongdai Onc5 生长曲线测定:将肉桂叶精油溶液配置为 MIC(2.5‰)、1/2MIC(1.25‰)和 1/4MIC(0.625‰)浓度梯度,分别取 2 mL(10%体积分数)各浓度精油溶液加入 19.8 mL LB 液体培养基中,然后向培养基中接入 200 μ L(1%体积分数)经活化 12 h、浓度为 10^8 CFU/mL 的 *D. fangzhongdai* Onc5 菌悬液,对照组则以等体积无菌水替代精油溶液。密封样品并标记后,置于恒温摇床(150 r/min, 30℃)中培养,分别在培养 3、6、9、12、24、36 h 时利用酶标仪采集 OD₆₀₀ 值。

1.2.4 肉桂叶精油抑制 *D. fangzhongdai* Onc5 细菌群集运动能力测定 为研究肉桂叶精油对 *D. fangzhongdai* Onc5 群集运动的抑制作用,分别把 2 mL 不同浓度(2MIC、MIC、1/2MIC、1/4MIC)肉桂叶精油加入到集群运动培养基的平板中央 6 mm 滤纸上进行培养。通过测量菌液迁移距离来评估病原菌的群集运动能力。

1.2.5 肉桂叶精油抑制 *D. fangzhongdai* Onc5 植物细胞壁降解酶活性测定 用 6 mm 无菌打孔器在果胶酶(Pel)、纤维素酶(Cel)、蛋白酶(Prt)固体培养基中打出 3 个等距分布的圆孔,每个孔中加入 40 μ L *D. fangzhongdai* Onc5 菌液,封口后在 30℃恒温箱中培养 14 h。后续操作按培养基的类型进行处理,Pel 培养基:在表面均匀覆盖 5 mL 4 mol/L HCl 溶液(完全浸没孔洞),浸泡 5 min 后倒出液体;纤维素酶(Cel)培养基:先覆盖 5 mL 1 mol/L 刚果红溶液进行 15 min 染色,倒掉染液后,再用 5 mL 1 mol/L NaCl 溶液进行 5 min 脱色处理;蛋白酶(Prt)培养基:不作任何处理。用游标卡尺测量透明圈直径,并拍照记录。

1.2.6 肉桂叶精油抑制 *D. fangzhongdai* Onc5 致病性检测 选取新鲜的胡萝卜、马铃薯、萝卜及小白菜的叶柄,用清水洗净后,用 70%乙醇进行 30 s 消毒处理,用双蒸水冲洗,然后用无菌纸擦

干表面水分,经紫外线照射灭菌 30 min 后,切成大小相近的厚片状放入无菌培养皿。使用 10 μ L 移液枪头在切片中央打孔,并尽可能去除孔内残留水分。每孔接种 1 μ L 活化 12 h、浓度为 10^8 CFU/mL 的 *D. fangzhongdai* Onc5 菌液,再添加 10 μ L 浓度为 1/2MIC 的肉桂叶精油稀释液。阳性对照加等量的菌液和 LB 液体培养基,阴性对照加等量无菌水。将所有样品置于 30 $^{\circ}$ C 恒温培养箱中培养 12 h,观察并记录植物组织的腐烂情况。

1.3 数据处理

所有试验设置 3 个及以上的生物学重复;使用 Microsoft Excel 2019 软件进行试验数据的初步整理和分析;运用 IBM SPSS Statistics 22.0 软件进行方差分析(ANOVA),采用 Duncan 方法开展多重比较和显著性差异分析;数据均以平均值 $\pm$ 标准偏差表示。

2 结果与分析

2.1 肉桂叶精油主要成分

通过 GC-MS 技术对从肉桂叶提取的精油进行气相色谱-质谱联机分析,通过峰面积归一化方法与质谱数据库建立关联进行定性定量分析,并结合文献资料进行确认。结果表明,提取的肉桂叶精油中共鉴定出 16 种化学成分(表 1),占总量的 96.57%,其中主要成分为棕榈酸异丙酯(52.15%)、桂皮醛(23.02%)和肉豆蔻酸异丙酯(18.80%),占总量的 93.97%,其他成分含量较低。

2.2 肉桂叶精油的广谱抑菌活性

肉桂叶精油的广谱抑菌活性研究结果表明,肉桂叶精油对 5 种细菌的抑菌圈显著高于 CK,说明肉桂叶精油具有良好的抑菌效果,其中对大肠杆菌的抑菌效果最好(表 2)。

2.3 肉桂叶精油对 *D. fangzhongdai* Onc5 最小抑菌浓度

采用浓度梯度为 MIC、1/2MIC、1/4MIC 肉桂叶精油稀释液对 *D. fangzhongdai* Onc5 进行抑菌效果测定。结果显示(图 1),肉桂叶精油对 *D. fangzhongdai* Onc5 的最小抑菌浓度(MIC)为 2.5%。肉桂叶精油亚抑菌浓度(1/2MIC、1/4MIC)下 *D. fangzhongdai* Onc5 生长曲线的测定结果表明,在细菌生长对数期(3~9 h)各处理的细菌生长趋势相同,在稳定期(12~36 h)各处理混合培养液中的细菌数量基本一致,且处于同一数量级,说明肉桂叶精油亚抑菌浓度对 *D. fangzhongdai*

表 1 肉桂叶精油主要成分
Tab. 1 Main components of *Cinnamon* leaf essential oil

化合物名称 Compound name	化学式 Molecular formula	出峰时间 Retention time/min	相对含量 Relative content/%
棕榈酸异丙酯 isopropyl palmitate	C ₁₉ H ₃₈ O ₂	29.500	52.15
桂皮醛 cinnamic aldehyde	C ₉ H ₈ O	17.715	23.02
肉豆蔻酸异丙酯 isopropyl myristate	C ₁₇ H ₃₄ O ₂	27.470	18.80
正二十七烷 heptacosane	C ₂₇ H ₅₆	33.090	1.56
肉桂醛 cinnamaldehyde	C ₉ H ₈ O	18.332	0.40
硬脂酸异丙酯 isopropyl stearate	C ₂₁ H ₄₂ O ₂	31.239	0.13
苯甲醛 benzaldehyde	C ₇ H ₆ O	8.527	0.12
octadecane, 3-ethyl-5-(2-ethylbutyl)	C ₂₆ H ₅₄	33.782	0.11
octadecane, 3-ethyl-5-(3-3)	C ₂₆ H ₅₄	31.881	0.06
十五烷酸 pentadecanoic acid	C ₁₅ H ₃₀ O ₂	29.492	0.04
苯代丙腈 benzenepropanenitrile	C ₉ H ₉ N	16.260	0.04
2-甲基-3-戊酮 2-methyl-3-pentanone	C ₆ H ₁₂ O	38.250	0.03
2-己酮 2-hexanone	C ₆ H ₁₂ O	39.250	0.03
3-hydroperoxyhexane	C ₆ H ₁₄ O ₂	4.121	0.03
月桂酸异丙酯 isopropyl dodecanoate	C ₁₅ H ₃₀ O ₂	25.082	0.03
octadecane, 3-ethyl-5-(2-ethylbutyl)-	C ₂₆ H ₅₄	30.901	0.02

表 2 肉桂叶精油对 5 种细菌的活性抑制
Tab. 2 Inhibition of the activity of *Cinnamon* leaf essential oil against five types of bacteria

病原菌 Pathogenic bacteria	抑菌圈 Bacteriostatic ring/mm	
	肉桂叶精油 Essential oil from <i>Cinnamon</i> leaf	CK
野生型紫色杆菌 (<i>C. violaceum</i> ATCC31532)	22.02 $\pm$ 0.17 ^a	6.00 $\pm$ 0.00 ^b
胡萝卜软腐果胶杆菌胡萝卜亚种 (<i>P. carotovorum</i> subsp. <i>carotovorum</i>)	22.58 $\pm$ 1.04 ^a	6.00 $\pm$ 0.00 ^b
大肠杆菌 (<i>E. coli</i> ATCC25922)	23.54 $\pm$ 2.16 ^a	6.00 $\pm$ 0.00 ^b
红色粘性沙雷氏菌 (<i>S. marcescens</i> H30)	18.63 $\pm$ 0.46 ^a	6.00 $\pm$ 0.00 ^b
软腐病菌 (<i>D. fangzhongdai</i> Onc5)	20.18 $\pm$ 0.48 ^a	6.00 $\pm$ 0.00 ^b

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

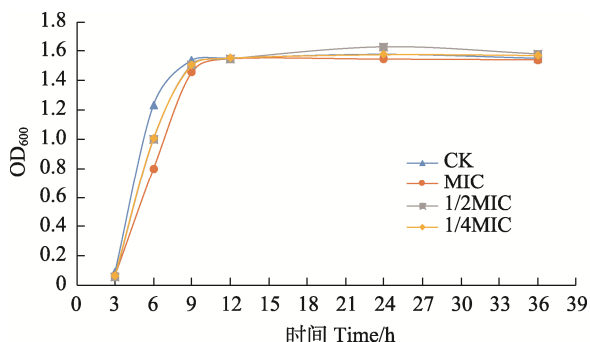


图 1 不同浓度肉桂叶精油对 *D. fangzhongdai* Onc5 生长的影响

Fig. 1 Effects of the different concentrations of Cinnamon leaf essential oil on the growth of *D. fangzhongdai* Onc5

Onc5 的生长无影响。

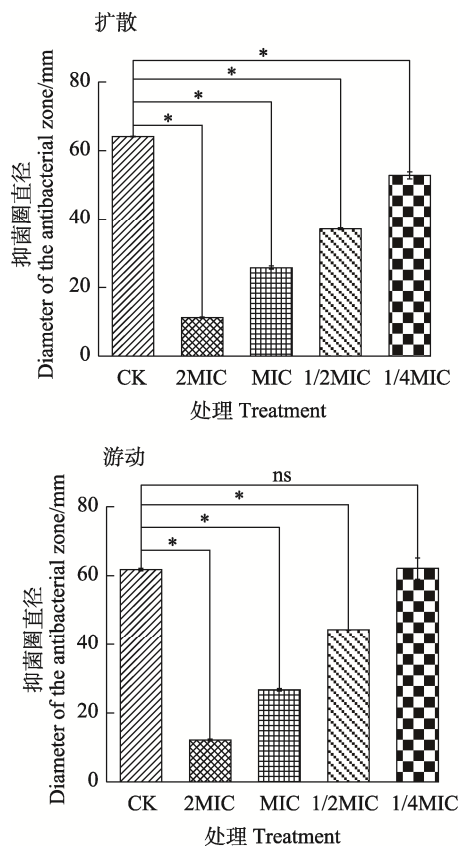
2.4 肉桂叶精油对 *D. fangzhongdai* Onc5 群集运动的影响

通过测定不同浓度 (2MIC、MIC、1/2MIC、1/4MIC) 肉桂叶精油对 *D. fangzhongdai* Onc5 的游动 (swimming) 和扩散 (swarming) 2 种运动方式的影响, 结果如图 2 所示, 肉桂叶精油处理抑制了 *D. fangzhongdai* Onc5 的迁移, 1/2MIC 肉桂叶精油处理的细菌游动和扩散运动的迁移距离分别是 CK 的 71.71% 和 57.82%; 肉桂叶精油浓度越高, 细菌游动和扩散运动的迁移距离越小, 细菌迁移距离与肉桂叶精油浓度之间呈负相关关系。表明肉桂叶精油对 *D. fangzhongdai* Onc5 的群集运动有明显抑制作用, 能减弱细菌的致病力。

2.5 肉桂叶精油对 *D. fangzhongdai* Onc5 植物细胞壁降解酶活性的抑制作用

PCWDEs 是 *D. fangzhongdai* Onc5 菌株的核

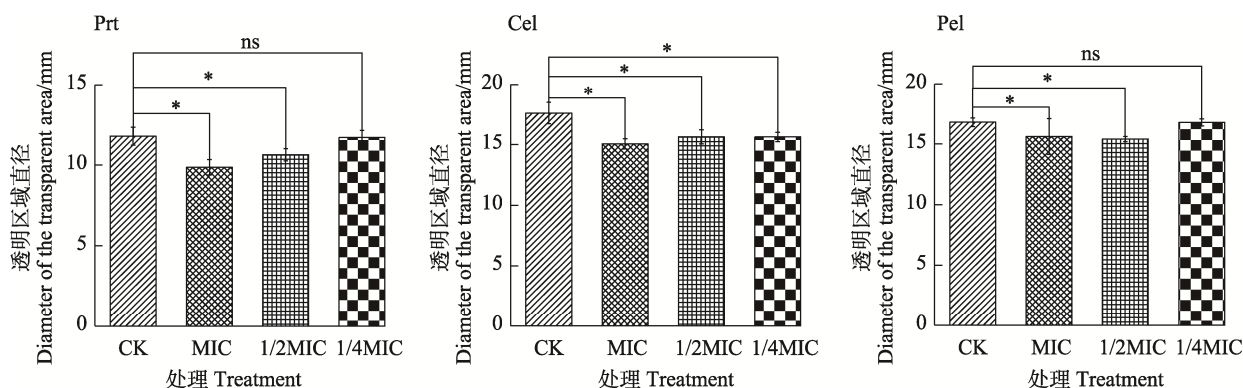
心致病因子, 通过催化分解细胞壁多糖、蛋白质等组分, 破坏植物组织结构完整性, 从而引发软腐病害^[6]。平板半定量检测结果如图 3 所示, 肉桂叶精油处理显著抑制 *D. fangzhongdai* Onc5 的



ns 表示无显著差异, * 表示差异显著 ($P < 0.05$)。
ns indicates no significant difference, and * indicates significant difference ($P < 0.05$).

图 2 肉桂叶精油对 *D. fangzhongdai* Onc5 群集运动的影响

Fig. 2 Effects of Cinnamon leaf essential oil on the swarm movement of *D. fangzhongdai* Onc5



ns 表示无显著差异, * 表示差异显著 ($P < 0.05$)。

ns indicates no significant difference, and * indicates significant difference ($P < 0.05$).

图 3 不同浓度肉桂叶精油对 *D. fangzhongdai* Onc5 细胞壁降解酶活性的影响

Fig. 3 Effects of the different concentrations of Cinnamon leaf essential oil on the activity of cell wall degrading enzymes in *D. fangzhongdai* Onc5

果胶酶 (Pel)、纤维素酶 (Cel) 和蛋白酶 (Prt) 活性, 1/2MIC 肉桂叶精油处理下 Pel、Cel 和 Prt 活性分别是 CK 的 91.72%、88.83% 和 90.20%, 不同浓度肉桂叶精油对 Pel、Cel 和 Prt 活性的抑制效果为: Cel>Pel>Prt。

2.6 肉桂叶精油抑制 *D. fangzhongdai* Onc5 致病性的检测

由图 4 可见, 相较于阳性对照, 软腐病菌 *D. fangzhongdai* Onc5 经 1/2MIC 肉桂叶精油预处理后, 病菌对小白菜、马铃薯、白萝卜和胡萝卜的侵染性明显减弱, 几种材料的腐烂程度明显减轻, 表明肉桂叶精油对 *D. fangzhongdai* Onc5 的致病性有明显的抑制作用, 能有效防止蔬菜的腐烂和组织损伤。

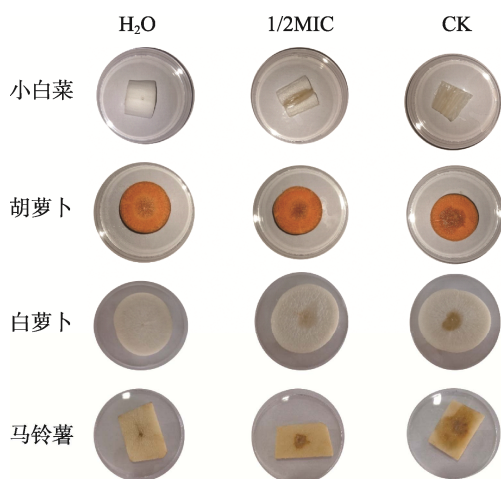


图 4 1/2MIC 浓度肉桂叶精油对 *D. fangzhongdai* Onc5 致病力的影响

Fig. 4 Effect of 1/2MIC concentration Cinnamon leaf essential oil on the pathogenicity of *D. fangzhongdai* Onc5

3 讨论

在植物和土壤中的软腐病原菌, 通过植物伤口和孔口进入宿主体内定殖和生长, 形成生物膜, 但不产生致病症状; 当外界环境适宜, 高温、高湿和缺氧条件下, 合成和分泌植物细胞壁降解酶 (PCWDEs)、胞外多糖、毒素等致病因子破坏宿主细胞^[15-16]。软腐病菌 *D. fangzhongdai* Onc5 引发植物产生软腐病的致病机理还需进一步阐明^[17], 但其核心机制主要是通过分泌 Pel、Cel、Prt 等 PCWDEs, 这些酶协同作用分解细胞壁组分, 导致植物组织结构完整性被破坏, 细胞内容物外泄, 最终使植物发生腐烂^[6]。

肉桂作为兼具药用价值与芳香特性的植物, 本研究结果表明, 肉桂叶精油含有 16 种化学组分, 主要成分为棕榈酸异丙酯、桂皮醛和肉豆蔻酸异丙酯。本研究所用精油提取部位为肉桂叶, 与传统提取自树皮的肉桂精油相比, 肉桂叶精油中棕榈酸异丙酯和肉豆蔻酸异丙酯共占 70.95%, 而肉桂叶中的桂皮醛含量 (23.02%) 低于肉桂树皮精油中的含量^[18-20]。广谱性抑菌试验表明, 叶片中提取的肉桂精油对野生型紫色杆菌、胡萝卜软腐果胶杆菌胡萝卜亚种、大肠杆菌、红色粘性沙雷氏菌、软腐病菌 5 种病原菌均具有显著抑制作用。已有研究表明, 桂皮醛具有抗菌消炎作用^[21], 可能是发挥抗炎效果的关键物质, 而棕榈酸异丙酯具有稳定作用^[22], 肉豆蔻酸异丙酯具有增加渗透作用^[23], 二者起到稳定和促进的作用, 这可能是保持肉桂叶精油抑菌活性的关键。

精油抗菌机制通常不是单一的, 而是包含多种作用方式^[24]。肉桂精油可通过破坏病菌结构和功能的完整性, 造成不可逆损伤, 从而产生抑菌效果^[25], 或者通过影响细胞膜通透性, 导致电解质渗漏, 破坏膜脂质双分子层结构和功能, 影响细胞代谢^[26], 从而对病菌造成不可逆伤害。也有研究认为, 肉桂精油通过抑制胞内酶活性引起细胞遗传物质损伤、代谢紊乱等一系列变化^[27]。本研究表明, 肉桂叶精油在不杀死软腐病菌的亚抑菌浓度下, 可以显著减少病原菌对宿主小白菜、马铃薯、白萝卜和胡萝卜的感染, 从而降低软腐病的发生。肉桂叶精油能显著抑制软腐病菌的游动和扩散运动等群集运动, 减少植物细胞壁降解酶 (Cel、Pel、Prt) 的活性, 说明肉桂叶精油对软腐病菌的群体感应系统具有减弱作用, 通过削弱软腐病菌的鞭毛运动能力和 PCWDEs 释放, 抑制软腐病菌。有研究表明, 千层金精油通过干扰致病菌群体感应系统 (QS) 发挥抑菌作用, 其有效成分甲基丁香酚通过竞争性结合受体蛋白 CviR (与信号分子 C6-HSL 结合位点重叠), 抑制下游致病因子激活, 并破坏 CviR/CviI 对 *cviI* 基因的正反馈调控, 从而阻断病原菌信号交流并抑制其致病作用^[9, 28], 显著减少软腐病菌对蝴蝶兰、马铃薯、小白菜、胡萝卜和辣椒的感染^[28], 并且千层金精油以非灭杀方式发挥作用, 避免了传统抗生素对病原菌的选择压力, 因此不易诱导耐药性产生。CHANG 等^[29]筛选到肉桂醛、水杨酸和

丹宁酸 3 种 QS 淬灭剂, 这些化合物通过抑制 QS 信号分子酰基高丝氨酸内酯 (AHL) 的生成发挥关键作用。JOSHI 等^[2, 5]研究发现, 香芹酚和丁香酚可与信号分子 AHL 相互作用, 抑制软腐病菌 QS 相关基因表达和生物膜形成, 并降低细胞壁降解酶 (PCWDEs) 分泌量。本研究结果表明, 肉桂叶精油具有开发成为绿色高效抑菌剂的潜力, 然而其抑制软腐病菌 QS 系统的分子作用机制仍需深入探索。

4 结论

本研究以肉桂叶为原料提取精油, 其主要成分为棕榈酸异丙酯 (52.15%)、桂皮醛 (23.02%) 和肉豆蔻酸异丙酯 (18.80%), 具有良好的抑菌活性, 在不影响病菌生长的亚抑菌浓度下, 肉桂叶精油可通过抑制病原菌群集运动和 PCWDEs 分泌而发挥抑菌作用, 其原料来源广、提取工艺简便、环境友好、作用浓度低, 且安全性高, 不仅具备直接抑菌活性, 还展现出潜在的 QS 抑制能力, 具有开发为安全高效的新型绿色杀菌剂的潜力。

参考文献

- [1] 张炼辉. 微生物群体感应系统的研究进展[J]. 华南农业大学学报, 2019, 40(5): 50-58.
ZHANG L H. Research progress of microbial quorum sensing systems[J]. Journal of South China Agricultural University, 2019, 40(5): 50-58. (in Chinese)
- [2] JOSHI J R, BURDMAN S, LIPSKY A, YARIV S, YEDIDIA I. Plant phenolic acids affect the virulence of *Pectobacterium aroidearum* and *P. carotovorum* ssp. *brasilense* via quorum sensing regulation[J]. Molecular Plant Pathology, 2016, 17: 487-500.
- [3] 晋知文, 谢学文, 马墨, 柴阿丽, 石延霞, 李宝聚. 蔬菜细菌性软腐病防治药剂活体组织筛选技术[J]. 植物保护学报, 2017, 44(2): 269-275.
JIN Z W, XIE X W, MA M, CHAI A L, SHI Y X, LI B J. Investigation on screening fungicide technique *in vivo* for controlling bacterial soft rot of vegetables[J]. Journal of Plant Protection, 2017, 44(2): 269-275. (in Chinese)
- [4] GARGE S S, NERURKAR A S. Attenuation of quorum sensing regulated virulence of *Pectobacterium carotovorum* subsp. *carotovorum* through an AHL lactonase produced by *Lysinibacillus* sp. Gs50[J]. PLoS One, 2016, 11: e0167344.
- [5] JOSHI J R, KHAZANOV N, SENDEROWITZ H, BURDMAN S, LIPSKY A, YEEDIDI I. Plant phenolic volatiles inhibit quorum sensing in *pectobacteria* and reduce their virulence by potential binding to ExpI and ExpR proteins[J]. Scientific Reports, 2016, 6: 38126.
- [6] CHANE A, BARBEY C, ROBERT M, MERIEAU A, KONTO-GHIOGHI Y, BEURY-CIROU A, FEUILLOLEY M, PATEK M, GOBERT V, LATOUR X. Biocontrol of soft-rot: confocal microscopy highlights virulent pectobacterial communication and its jamming by rhodococcal quorum-quenching[J]. Molecular Plant-Microbe Interactions, 2019, 32(7): 802-812.
- [7] WHITELEY M, DIGGLE S P, GREENBERG E P. Progress in and promise of bacterial quorum sensing research[J]. Nature, 2017, 551: 313.
- [8] SINGH V K, ALMPANI M, WHEELER K M, RAHME L G. Interconnections of *Pseudomonas aeruginosa* quorum-sensing systems in intestinal permeability and inflammation[J]. mBio, 2023, 14(2): e03524-22.
- [9] WANG W T, HUANG X Q, YANG H X, NIU X Q, LI D X, YANG C, LI L, ZOU L T, QIU Z W, WU S H, LI Y Y. Antibacterial activity and anti-quorum sensing mediated phenotype in response to essential oil from *Melaleuca bracteata* leaves[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2019, 20(22): 5696.
- [10] MA Q M, DAVIDSON P M, CRITZER R F, ZHONG Q X. Antimicrobial activities of lauric arginate and cinnamon oil combination against foodborne pathogens: improvement by ethylenediaminetetraacetate and possible mechanisms[J]. LWT-Food Science and Technology, 2016, 7(2): 9-18.
- [11] JAYAPRAKASHA G K, RAO L J M. Chemistry, biogenesis, and biological activities of cinnamomum zeylanicum[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2011, 51: 547-562.
- [12] RAO P V, GAN S H. Cinnamon: a multifaceted medicinal plant[J]. Evidence-based Complementary and Alternative Medicine, 2014, 4: 642942.
- [13] 黄梓炜, 吴雪辉, 周悦, 蓝小河, 张兵. 肉桂精油可食性复合膜的抑菌性能研究[J]. 中国调味品, 2022, 47(12): 22-25.
HUANG Z W, WU X H, ZHOU Y, LAN X H, ZHANG B. Study on the antibacterial properties of edible composite film of cinnamon essential oil[J]. China Condiment, 2022, 47(12): 22-25. (in Chinese)
- [14] 周瑞琪. 复配互叶白千层精油抑菌性研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2024.
ZHOU R Q. Study on bacteriostatic activity of complex-essential oil of *Melaleuca alternifolia*[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2024. (in Chinese)
- [15] CHENG Y Y, LIU X L, AN S W, CHANG C Q, ZOU Y Q, HUANG L H, ZHONG J, LIU Q G, JIANG Z D, ZHOU J N, ZHANG L H. A nonribosomal peptide synthase containing a

- stand-alone condensation domain is essential for phytotoxin zeamine biosynthesis[J]. *Molecular Plant-Microbe Interactions*, 2013, 26: 1294-1301.
- [16] ZHOU J N, ZHANG H B, LV M F, CHEN Y F, LIAO L S, CHENG Y Y, LIU S Y, CHEN S H, HE F, CUI Z N, JIANG Z D, CHANG C Q, ZHANG L H. SlyA regulates phytotoxin production and virulence in *Dickeya zeae* EC1[J]. *Molecular Plant Pathology*, 2016, 17: 1398-1408.
- [17] CHEN Y, ZHOU J, LV M, LIANG Z, PARSEK M R, ZHANG L H. Systematic analysis of c-di-GMP signaling mechanisms and biological functions in *Dickeya zeae* EC1[J]. *mBio*, 2020, 11: e02993-20.
- [18] 黄玉华, 张猛猛, 辛璇, 白卫东, 汪薇, 任文彬, 赵文红, 杨尚桦. 肉桂精油提取及其生物活性与作用机制研究进展[J]. *食品工业科技*, 2025, 46(17): 468-479.
- HUANG Y H, ZHANG M M, XIN X, BAI W D, WANG W, REN W B, ZHAO W H, YANG S H. Research progress on extraction of cinnamon essential oil and the mechanisms of biological activities[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2025, 46(17): 468-479. (in Chinese)
- [19] 申思蕊, 何磊鸣, 贾晨静, 黄朝阳, 王芹芹, 张富龙, 崔凯娣, 周琳. 百里香和肉桂精油及其主要成分百里香酚和肉桂醛对花生果腐病的防治效果[J]. *中国生物防治学报*, 2025, 41(2): 446-457.
- SHEN S R, HE L M, JIA C J, HUANG Z Y, WANG Q Q, ZHANG F L, CUI K D, ZHOU L. Efficacy of *Thymus mongolicus* and *Cinnamomum cassia* essential oil and their major components thymol and cinnamaldehyde on peanut pod rot[J]. *Chinese Journal of Biological Control*, 2025, 41(2): 446-457. (in Chinese)
- [20] 张箬晦, 钱信怡, 黄广智, 李石兰, 邓家刚, 侯小涛. 不同生长环境和生长年限肉桂的出油率、挥发油成分及抑菌活性研究[J]. *中草药*, 2019, 50(12): 2990-2996.
- ZHANG Z H, QIAN X Y, HUANG G Z, LI S L, DENG J G, HOU X T. Oil yield, components and antimicrobial activity of volatile oils of cinnamomi cortex from different growth environments and growth years[J]. *Chinese Traditional and Herbal Drugs*, 2019, 50(12): 2990-2996. (in Chinese)
- [21] 张利青, 张占刚, 付岩, 徐颖. 桂皮醛药理作用的研究进展[J]. *中国中药杂志*, 2015, 40(23): 4568-4572.
- ZHANG L Q, ZHANG Z G, FU Y, XU Y. Research progress of trans-cinnamaldehyde pharmacological effects[J]. *China Journal of Chinese Materia Medica*, 2015, 40(23): 4568-4572. (in Chinese)
- [22] FARIAS B V, BROWN D, HEARN A, NUNN N, SHENDEROVA O, KHAN S A. Nanodiamond-stabilized pickering emulsions: microstructure and rheology[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2020, 580: 180-191.
- [23] ZHAO C, QUAN P, LIU C, LI Q Y, FANG L. Effect of isopropyl myristate on the viscoelasticity and drug release of a drug-in-adhesive transdermal patch containing blonanserine[J]. *Acta Pharmaceutica Sinica B*, 2016, 6(6): 623-628.
- [24] LIU T T, YANG T S. Antimicrobial impact of the components of essential oil of *Litsea cubeba* from Taiwan and antimicrobial activity of the oil in food systems[J]. *International Journal of Food Microbiology*, 2012, 156(1): 68-75.
- [25] KHORSHIDIAN N, YOUSEFI M, KHANNIRI E, MORTAZAVIAN A M. Potential application of essential oils as antimicrobial preservatives in cheese[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2018, 45: 62-72.
- [26] ZHAO Z C, YU M X, WEI Y Y, XU F, JIANG S, CHEN Y, DING P, SHAO X F. Cinnamon essential oil causes cell membrane rupture and oxidative damage of *Rhizopus stolonifer* to control soft rot of peaches[J]. *Food Control*, 2025, 170: 111039.
- [27] 戴朝阳, 李福艳, 胡丽云, 朱思阳. 丁香, 肉桂精油对三种常见致病菌的抑菌机理研究[J]. *生物化工*, 2024, 10(2): 34-38, 46.
- DAI C Y, LI F Y, HU L Y, ZHU S Y. Study on bacteriostatic mechanism of clove and cinnamon essential oils against three common pathogenic bacteria[J]. *Biological Chemical Engineering*, 2024, 10(2): 34-38, 46. (in Chinese)
- [28] WANG W T, LIN X J, YANG H X, HUANG X Q, PAN L, WU S H, YANG C, ZHANG L Y, LI Y Y. Anti-quorum sensing evaluation of methyleugenol, the principal bioactive component, from the *Melaleuca bracteata* leaf oil[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2022, 13: 970520.
- [29] CHANG C Y, KRISHNAN T, WANG H, CHEN Y, YIN W F, CHONG Y M, TAN L Y, CHONG T M, CHAN K G. Non-antibiotic quorum sensing inhibitors acting against N-acyl homoserine lactone synthase as druggable target[J]. *Scientific Reports*, 2014, 4: 7245.