

玫瑰天竺葵挥发油对樱桃番茄灰霉病菌的抑菌活性

刘福艳, 杨润霞, 郑杨崔吉, 赵崇钧, 范黎明, 苏发武, 叶敏

Antifungal Activity of Essential Oil Isolated from *Pelargonium roseum* against Grey Mould (*Botrytis cinerea*) of Cherry Tomato

LIU Fuyan, YANG Runxia, ZHENG Yangcuiji, ZHAO Chongjun, FAN Liming, SU Fawu, and YE Min

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2024010250>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

黄金茶挥发油提取工艺优化、成分分析及抗氧化研究

Extraction Process Optimization, Composition Analysis of Essential Oil from *Chimonanthus nitens* Oliv and Its Antioxidant Activity

食品工业科技. 2021, 42(15): 150-156 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020090307>

翠云草挥发油成分分析、抗氧化及抗菌效果

Composition Analysis, Antioxidant and Antibacterial Effect of Volatile Oil from *Selaginella uncinata*

食品工业科技. 2020, 41(17): 269-273, 291 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020.17.045>

平菇化学成分及药理活性研究进展

Research Progress of Chemical Constituents and Pharmacological Activities of *Pleurotus ostreatus*

食品工业科技. 2019, 40(13): 304-309 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2019.13.051>

大果木姜子不同部位挥发油成分及其抗氧化活性分析

Comparison of Volatile Oil Composition and Antioxidant Activity in Different Parts of *Cinnamomum migao*

食品工业科技. 2023, 44(17): 306-315 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2022110005>

大果木姜子挥发油的提取工艺优化、成分分析及抗氧化活性

Extraction Optimization, Composition Analysis of Volatile Oil from *Litsea lancilimba* Merr. and Its Antioxidant Activity

食品工业科技. 2022, 43(19): 211-219 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2021120007>

葡萄籽提取物抑菌活性及葡萄籽油化学成分对比研究

Antibacterial Activity of Grape Seed Extracts and Chemical Components Analysis of Grape Seed Oil

食品工业科技. 2020, 41(24): 251-255, 320 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020060040>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

刘福艳, 杨润霞, 郑杨崔吉, 等. 玫瑰天竺葵挥发油对樱桃番茄灰霉病菌的抑菌活性 [J]. 食品工业科技, 2025, 46(2): 143–151. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024010250

LIU Fuyan, YANG Runxia, ZHENG Yangcuiji, et al. Antifungal Activity of Essential Oil Isolated from *Pelargonium roseum* against Grey Mould (*Botrytis cinerea*) of Cherry Tomato[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(2): 143–151. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024010250

· 生物工程 ·

玫瑰天竺葵挥发油对樱桃番茄灰霉病菌的 抑菌活性

刘福艳¹, 杨润霞², 郑杨崔吉², 赵崇钧², 范黎明¹, 苏发武¹, 叶 敏^{1,*}

(1. 云南农业大学, 云南生物资源保护与利用国家重点实验室, 云南昆明 650201;

2. 微生物菌种筛选与应用国家地方联合工程研究中心, 云南昆明 650217)

摘 要: 为探究玫瑰天竺葵挥发油的化学成分及其对樱桃番茄灰霉病菌的抑菌活性, 以评价其作为合成化学杀菌剂的潜在替代品对果蔬采后保鲜的效果。采用水蒸气蒸馏法提取玫瑰天竺葵挥发油, 利用气相色谱-质谱联用 (GC-MS) 分析其化学成分, 并通过接触法和熏蒸法测定不同浓度玫瑰天竺葵挥发油及其主要单体化合物对灰葡萄孢菌菌丝生长和孢子萌发的抑制作用。研究结果表明, 玫瑰天竺葵挥发油的提取率为 0.43%; 共鉴定出 19 个单体化合物, 主要成分为香茅醇 (52.16%)、橙花醇 (21.93%)、甲酸香茅酯 (9.87%) 和异薄荷醇 (5.18%); 玫瑰天竺葵挥发油及其单体化合物对菌丝的生长和孢子的萌发均具有显著的抑制作用 ($P < 0.05$), 且熏蒸法的抑菌活性显著优于接触法, 挥发油的使用剂量与抑菌活性间具有剂效关系。在活体熏蒸试验中, 玫瑰天竺葵挥发油及其单体化合物对樱桃番茄采后的灰霉病均具有良好的控制效果, 当挥发油用量为 250.00 mg/L 时, 抑制率高达 98.45%。结果表明, 玫瑰天竺葵挥发油具有用作果蔬控病保鲜熏蒸剂的潜力, 但其作用机制尚有待进一步研究。

关键词: 玫瑰天竺葵, 挥发油, 化学成分, 灰葡萄孢菌, 抑菌活性

中图分类号: S432

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2025)02-0143-09

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2024010250

本文网刊:



Antifungal Activity of Essential Oil Isolated from *Pelargonium roseum* against Grey Mould (*Botrytis cinerea*) of Cherry Tomato

LIU Fuyan¹, YANG Runxia², ZHENG Yangcuiji², ZHAO Chongjun², FAN Liming¹, SU Fawu¹, YE Min^{1,*}

(1. State Key Laboratory for Conservation and Utilization of Bio-Resources in Yunnan, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China;

2. National and Local Joint Engineering Center for Screening and Application of Microbial Strains, Kunming 650217, China)

Abstract: To investigate the chemical composition of *Pelargonium roseum* essential oil (EO) and its antifungal activities against *Botrytis cinerea* of cherry tomato as a potential alternative to synthetic chemical fungicides for postharvest preservation of fruits and vegetables. In this study, the EO of *P. roseum* was extracted by water vapor distillation, and the chemical components were determined by gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS). The inhibitory effects of different concentrations of the EO and its compounds on the growth of mycelium and the germination of spores were determined by the poison food technique and dual culture method, respectively. Results showed that the extraction rate of *P. roseum* EO was 0.43%, and 19 compounds were identified in the EO. The major constituent was citronellol (52.16%) followed by nerol (21.93%), citronellyl formate (9.87%), and isomenthol (5.18%). And the EO and its compounds had a significant inhibitory effect ($P < 0.05$) on growth of mycelium and germination of spores against *B. cinerea*. The inhibitory

收稿日期: 2024-01-23

基金项目: 国家自然科学基金项目 (32060631)。

作者简介: 刘福艳 (1999-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 天然产物农药, E-mail: liujiaafu1@163.com。

* 通信作者: 叶敏 (1960-), 男, 博士, 研究员, 研究方向: 天然产物农药, E-mail: yeminpc@126.com。

activity of the dual culture method was much better than that of the poison food technique. There was a dosage-effect relationship between the dosage of the EO and inhibitory activity. *In vivo* vapor contact test results showed that the EO of *P. roseum* and its compounds had good inhibitory activity against the postharvest grey mould of cherry tomatoes, and the disease control rate was as high as 98.45% when the dosage of EO was 250.00 mg/L. Thus, the results obtained in this study demonstrate the potential of the EO from *P. roseum* as an eco-friendly natural fungicide using for postharvest disease control, but its mechanism of action needs to be further investigated.

Key words: *Pelargonium roseum*; essential oil; chemical composition; *Botrytis cinerea*; antifungal activity

樱桃番茄因其较高的营养价值和柔软多汁的特点而深受消费者的喜爱。但是由于含水量高,在其采后储藏运输过程中极易受到灰葡萄孢菌的侵袭而发生霉变,造成不小的经济损失。灰葡萄孢菌(*Botrytis cinerea*)是一种植物病原真菌,其引起的灰霉病是蔬菜水果采后的主要病害^[1]。灰葡萄孢菌通过产生一系列的细胞壁降解酶、毒素和其他低分子化合物,触发宿主诱导细胞程序性死亡^[2]。灰霉病原菌没有明显的寄主特异性,可以感染 1000 多种植物^[3]。目前,控制灰霉病的主要方法依旧是使用化学杀菌剂。但是灰霉病病原菌基因突变发生迅速,病原菌抗性易在田间发展^[4]。有研究表明,灰葡萄孢菌分离株已经对苯并咪唑、二甲酰亚胺、环己酰胺和苯胺嘧啶等杀菌剂产生了一些特异性抗性^[5]。因此,开发一种能控制采后病原菌的新型无污染、低毒、低残留的化学杀菌剂替代品尤为重要。

大量研究结果表明,利用天然抗真菌化合物来保护水果采后免受病原菌的侵害是一个潜在趋势。许多植物挥发油已经被证明具有抗菌、杀虫、抗氧化和除草的活性,如小叶女贞挥发油被证明对绿霉具有抗真菌活性^[6]。茶树精油可有效防控番茄早疫病^[7]。柠檬草、棕榈油、肉桂和薄荷挥发油等能够抑制番茄灰霉病菌的生长^[8];含桉树挥发油的羧甲基纤维素涂膜可有效控制番茄灰霉病和草莓软腐病的发生^[9]。植物挥发油又被称为精油(Essential oils),是从植物材料(花、种子、叶、树皮、果皮和根等)中提取的具有芳香性和挥发性的脂溶性物质^[10-11]。在植物界中,只有 10% 的植物含有挥发油,它们被称为芳香植物^[12]。据估计,已知挥发油将近 3000 种,其中约 300 种被用于香料和香精市场^[13]。挥发油的组成成分取决于物种、收获时期、气候以及提取挥发油所用的植物部位等^[14]。

玫瑰天竺葵是天竺葵属多年生草本芳香植物,原产于南非、留尼旺岛、马达加斯加、埃及和摩洛哥等地^[15]。除了作为观赏植物被种植外,其挥发油还是使用最广泛的香料之一,是玫瑰香水和香皂不可缺少的组成部分^[16]。天竺葵挥发油具有抗菌、镇痛、消炎和杀虫等多种活性。Dianez 等^[17]发现天竺葵挥发油对番茄灰霉病菌、菌核病菌、尖孢镰刀菌、寄生疫霉、瓜果腐霉、油菜交链孢霉均具有抑制作用。El 等^[18]研究发现,玫瑰天竺葵挥发油对由灰葡萄孢菌、扩展青霉和匍枝根霉菌引起的苹果病害具有良

好的控制效果,挥发油的抗真菌作用与挥发油浓度直接相关;Kujur 等^[19]通过研究纳米微囊化天竺葵挥发油对黄曲霉生长的抑制效果,发现天竺葵挥发油通过降低黄曲霉中麦角甾醇的含量抑制黄曲霉毒素的产生。本文旨在通过离体和活体试验初步探究玫瑰天竺葵挥发油对樱桃番茄灰霉病的抑制效果,为玫瑰天竺葵挥发油在果实采后保鲜的应用中提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

玫瑰天竺葵(*Pelargonium roseum*)地上部分采自云南省昆明市和云南省楚雄;灰葡萄孢菌(*Botrytis cinerea*)为云南省植物病理重点实验室保藏菌种;无水硫酸钠 分析纯,天津市风船化学试剂科技有限公司;80% 乙蒜素 乳油,开封大地农化生物科技有限公司;50% 多菌灵 可湿性粉剂,江苏蓝丰生物化工股份有限公司;97% 香茅醇、98% 橙花醇 萨恩化学技术(上海)有限公司;95% 甲酸香茅酯 上海麦克林生化科技股份有限公司;樱桃番茄(*Lycopersicon esculentum*)采摘自微生物菌种筛选与应用国家地方联合工程研究中心试验温室。

HX2002Z 型电子天平 慈溪市天东衡器厂;BCE224I-1CCN 型电子天平 赛多利斯科学仪器(北京)有限公司;98-I-C 型电热套 天津市泰斯特仪器有限公司;JJ-CJ-1F 型洁净工作台 苏州市金净净化设备科技有限公司;LRH-250-G 型光照培养箱 韶关市宏泰医疗器械有限公司;DLSB-5L/25 型低温冷却循环泵 巩义市予华仪器有限责任公司;Agilent 7890 型气相色谱仪 安捷伦科技有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 玫瑰天竺葵挥发油的提取 使用水蒸气蒸馏装置对玫瑰天竺葵挥发油进行提取。准确称取 400 g 新鲜玫瑰天竺葵叶片花序混合物,按 1:10 的比例加入 4000 mL 纯净水,持续沸腾提取 4 h。关闭装置,静置一段时间后,取上层油状液体,加入无水硫酸钠脱水,将玫瑰天竺葵挥发油转移至棕色样品瓶中,称重,密封保存于 4 ℃ 冰箱备用。挥发油提取率计算公式如下:

$$\text{挥发油提取率}(\%) = \frac{\text{提取的挥发油质量}}{\text{原材料质量}} \times 100$$

式(1)

1.2.2 玫瑰天竺葵挥发油化学成分分析 用正己烷

将 1.2.1 得到的玫瑰天竺葵挥发油制备成 1.0 mg/mL 的溶液。使用 GC-MS 进行化学成分分析。气相色谱条件: HP-5MS 石英毛细管柱(内径 30 m×0.25 mm, 膜厚 0.25 μm); 进样口温度 230 °C, 检测器温度 260 °C。柱温: 初温 40 °C, 保温 2 min, 5 °C·min⁻¹ 升温至 250 °C, 保持 6 min, 柱流量 1.0 mL·min⁻¹。注射量为 1.0 μL; 分流比为 10:1。质谱条件: 电离模式 EI; 电离能 70 eV, 四级杆温度 150 °C; 离子源温度: 230 °C; 接口温度: 280 °C; 扫描质量范围: 50~550 m/z, 氦气(He)流量为 1.0 mL·min⁻¹; 溶剂延迟 6 min。从 NIST 08 年标准谱库中检索并分析数据。

1.2.3 离体抑菌试验

1.2.3.1 菌丝生长抑制试验 接触法: 待 PDA 培养基冷却至 45±5 °C 时, 向 PDA 培养基中加入一定量的玫瑰天竺葵挥发油和单体化合物摇匀, 使其最终浓度分别为 3.90、7.80、15.63、31.25、62.50、125.00、250.00 mg/L, 将配制好的培养基加到无菌培养皿中(直径 9 cm), 每皿 20 mL, 以未添加挥发油和单体化合物的处理作为阴性对照, 相同方法配制含有同等浓度多菌灵-PDA 培养基, 以此作为阳性对照。每个处理 3 次重复。用无菌打孔器打取直径 5 mm 的病原菌菌饼, 将其接种于培养基中央, 于 25±1 °C 培养箱中黑暗条件下培养 7 d 后通过十字交叉法测量菌丝生长直径^[20]。

熏蒸法: 使用滤纸片法^[18] 探究玫瑰天竺葵挥发油及其单体化合物的抗真菌活性。于直径 9 cm 的无菌培养皿中加入 20 mL PDA 培养基, 用无菌打孔器打取直径 5 mm 的病原菌菌饼, 将其接种于培养基中央。将培养皿倒置, 另一侧盖内放置无菌滤纸片(直径 3.30 cm), 用微量进样器取一定体积的玫瑰天竺葵挥发油和单体化合物注射到无菌滤纸片上, 使每皿最终浓度分别为 3.90、7.80、15.63、31.25、62.50、125.00、250.00 mg/L(浓度以培养皿的顶空体积计算), 用封口膜密封, 进行对扣熏蒸试验, 以未添加挥发油和单体化合物的处理作为阴性对照, 添加同等浓度的 80% 乙蒜素乳油的处理作为阳性对照, 每个处理三次重复。25±1 °C 培养箱中黑暗条件下培养 7 d 后通过十字交叉法测量菌丝生长直径。菌丝生长抑制率计算公式如下:

$$\text{菌丝生长抑制率(\%)} = \frac{\text{对照组菌丝平均直径} - \text{处理组菌丝平均直径}}{\text{对照组菌丝平均直径}} \times 100$$

式(2)

毒力回归方程计算: 将式(2)中得到的菌丝生长抑制率转化为概率值(Y), 并对挥发油及其单体化合物的浓度(X)进行对数转化。然后, 将得到的 X 和 Y 分别输入 GraphPad Prism 9.0. 中进非线性回归生成剂量反应曲线的方程/模型。当 Y=5 时, X 的对数

值即为 EC₅₀ 值。

1.2.3.2 孢子萌发抑制试验 接触法: 待病原菌培养一周后, 在病原菌平板中加入 5 mL 无菌蒸馏水, 使用无菌涂布器刮洗病原菌分生孢子, 然后使用无菌擦镜纸将菌丝滤除, 得到病原菌分生孢子悬浮液。使用血球计数板计数评估分生孢子悬浮液浓度, 用无菌蒸馏水将分生孢子悬浮液浓度调至 1.0×10⁶ CFU/mL。吸取 5 mL 马铃薯肉汤培养基(PDB)加入到 10 mL 无菌离心管中, 然后将一定量的天竺葵挥发油和单体化合物加入到 PDB 培养基中, 使其终浓度分别为 3.90、7.80、15.63、31.25、62.50、125.00、250.00 mg/L, 以不含挥发油和单体化合物的处理为对照组, 将 200 μL 分生孢子悬浮液(1.0×10⁶ CFU/mL)添加到离心管中, 每个处理 3 次重复, 25±1 °C 培养箱中黑暗条件下培养 48 h。48 h 后通过光学显微镜观察 100 个分生孢子的萌发情况, 孢子完全没有萌发的最低浓度定义为最低抑菌浓度(MIC)。从孢子未萌发的离心管中吸取 100 μL 溶液, 并将其重新接种到仅含有 PDB 培养基的无菌离心管中, 将离心管置于同等条件下继续培养 48 h, 病原菌孢子完全没有萌发的最低浓度为最低杀菌浓度(MFC)^[20]。

熏蒸法: 于直径 9 cm 的无菌培养皿中加入 20 mL PDA 培养基, 吸取 10 μL 分生孢子悬浮液(1.0×10⁶ CFU/mL), 接种于 PDA 平板中央, 待干燥后将培养皿倒置, 另一侧盖内放置无菌滤纸片(直径 3.30 cm), 用微量进样器取一定体积的天竺葵挥发油和单体化合物注射到无菌滤纸片上, 使每皿最终浓度分别为 3.90、7.80、15.63、31.25、62.50、125.00、250.00 mg/L, 用封口膜密封, 进行对扣熏蒸试验, 未添加挥发油和单体化合物的培养皿作为对照组, 每个处理三次重复。25±1 °C 培养箱中黑暗条件下培养 48 h 后观察病原菌孢子萌发情况, 记录完全抑制孢子萌发的 MIC, 于无菌操作台中取出滤纸片, 吹净培养皿中的挥发油, 同等培养条件下再次密封培养 48 h, 观察记录没有孢子萌发的 MFC。

1.2.4 活体抑菌试验 按照文献 [20] 的方法进行改进。对新采摘的外观完整、大小均匀的成熟樱桃番茄果实用自来水冲洗, 晾干后用 75% 乙醇浸泡消毒 1 min, 取出果实将表面酒精用无菌脱脂棉纱布擦净。用无菌注射器针头在果实表面刺一个孔, 吸取 10 μL 病原菌分生孢子悬浮液(1.0×10⁶ CFU/mL)注射到伤口处。在 650 mL 密闭容器底部平铺 3 层无菌脱脂棉纱布, 加入 15 mL 无菌水保湿, 将接种后的果实放置于密闭容器内, 将无菌滤纸圆片(直径 3.30 cm)置于塑料三角支撑架(高 4 cm, 直径 4 cm)上, 将一定量的天竺葵挥发油和单体化合物添加到无菌滤纸片上, 使其终浓度分别为 3.90、7.80、15.63、31.25、62.50、125.00、250.00 mg/L(浓度以密闭容器的顶空体积计算), 以未添加挥发油和单体化合物的处理作为阴性对照, 添加了同等浓度的 80% 乙蒜素

乳油的处理作为阳性对照,容器密封后储存于 25±1 ℃ 培养箱中,每个处理 10 个果实,三次重复测定。待对照组病原菌完全覆盖果实表面后,使用游标卡尺通过十字交叉法测量果实病斑面积。病斑面积及抑制率计算公式如下:

$$\text{病斑面积} = \pi \times a \times b \quad \text{式 (3)}$$

$$\text{抑制率}(\%) = \frac{\text{对照组平均病斑面积} - \text{处理组平均病斑面积}}{\text{对照组平均病斑面积}} \times 100 \quad \text{式 (4)}$$

式中: a 表示果实腐烂处的垂直直径, mm; b 表示果实腐烂处的水平直径, mm。

1.3 数据处理

使用 Excel 2016 进行数据处理, IBM SPSS Statistics 23 进行差异显著性分析, GraphPad Prism 9.0 进行统计分析与作图。

2 结果与分析

2.1 玫瑰天竺葵挥发油提取及化学成分分析

通过水蒸气蒸馏法对玫瑰天竺葵的叶片及花序进行提取,得到的挥发油呈现蓝绿色且带有玫瑰香气,其得率为 0.43%,这与李珊珊等^[21]研究结果有较大差异,可能是受到材料类型、季节变化、栽培环境、收获时间、地理变化以及挥发油的提取和储存方法等的影响^[22]。

经过水蒸气蒸馏法提取得到的玫瑰天竺葵挥发油按照 1.2.2 中提及的 GC-MS 方法进行检测,得到的总离子流图如图 1 所示,将其与 NIST 08 标准谱库进行比对,得到挥发油中的各化学成分如表 1 所示。从玫瑰天竺葵挥发油中共鉴定出 19 种化合物,均为萜类化合物。其中香茅醇(52.16%)、橙花醇

(21.93%)和甲酸香茅酯(9.87%)含量较高,此外还有 6,9-愈创木二烯、异薄荷酮、芳樟醇和左旋玫瑰醚(含量均高于 1%)。这与 Azhdarzadeh 等^[23]的研究结果有所不同,他们分析发现伊朗南部的玫瑰天竺葵挥发油主要成分为香茅醇(44.63%)、甲酸香茅酯(14.22%)、异薄荷酮(6.34%)、香叶醇(5.30%)和石竹烯(3.55%)。且在以往的研究中,橙花醇并非玫瑰天竺葵挥发油的主要成分^[24]。

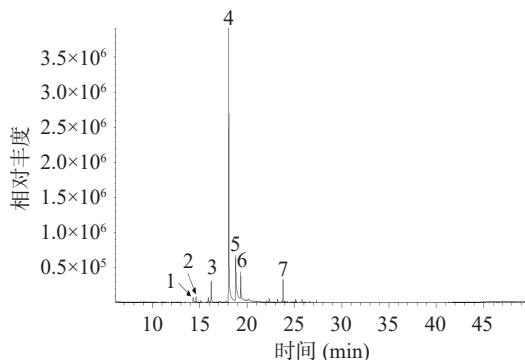


图 1 玫瑰天竺葵挥发油总离子流图

Fig.1 Total ion chromatogram of *P. roseum* EO

注:图中 1~7 分别为芳樟醇、左旋玫瑰醚、异薄荷酮、香茅醇、橙花醇、甲酸香茅酯、6,9-愈创木二烯。

2.2 离体抑菌试验

2.2.1 菌丝生长抑制 相关研究表明,玫瑰天竺葵挥发油对多种植物病原真菌具有良好的生防效果^[18]。通过对玫瑰天竺葵挥发油成分的分析,根据挥发油中单体化合物的占比和易获得性选择了香茅醇、橙花醇和甲酸香茅酯进行灰葡萄孢菌的离体抑菌实验。根据接触法和熏蒸法测定了不同浓度的玫瑰天竺葵挥发油及其单体化合物对灰葡萄孢菌菌丝生长的影响,表 2 列出了在 25±1 ℃ 黑暗条件下培养 7 d 后灰

表 1 玫瑰天竺葵挥发油的化学成分

Table 1 Chemical components of *P. roseum* EO

序号	化合物名称	英文名称	保留时间 (min)	保留指数	百分含量 (%)	主要碎片离子(m/z)
1	α -蒎烯	α -Pinene	9.079	939	0.165	93(99.9); 91(46.8); 92(41.4); 39(38.5); 77(36.6); 41(31.8); 79(29.8); 27(28.6); 53(13.9); 29(12.5)
2	芳樟醇	Linalool	14.286	1082	1.443	71(99.9); 93(61.0); 41(57.1); 43(48.6); 69(48.6); 55(45.5); 80(26.5); 121(17.6); 39(16.3); 67(16.3)
3	左旋玫瑰醚	cis-Rose oxide	14.589	1095	1.191	139(99.9); 69(65.7); 83(26.5); 55(23.2); 41(20.2); 85(12.3); 67(12.0); 154(11.0); 39(10.2); 84(10.0)
4	玫瑰醚	Rose oxide	15.094	1114	0.399	69(99.9); 139(93.0); 41(84.0); 55(63.0); 29(46.0); 39(44.0); 27(42.0); 83(40.0); 67(28.0); 85(24.0)
5	异薄荷酮	Isomenthone	16.202	1157	5.181	112(99.9); 69(91.4); 41(88.5); 55(57.9); 70(41.9); 56(38.7); 139(37.5); 43(36.0); 97(31.2); 27(29.2)
6	α -松油醇	α -Terpineol	17.032	1191	0.345	59(99.9); 93(90.9); 121(55.5); 136(43.8); 67(41.7); 81(40.8); 43(35.7); 68(35.2); 79(33.7); 91(30.9)
7	香茅醇	Citronellol	18.060	1229	52.158	69(99.9); 41(94.2); 67(58.7); 81(51.5); 82(49.8); 55(48.0); 95(44.8); 31(28.3); 68(27.6); 71(27.1)
8	橙花醇	Nerol	18.806	1255	21.93	69(99.9); 41(93.4); 93(34.8); 68(24.5); 39(20.1); 67(15.8); 27(13.8); 29(12.9); 53(12.8); 84(11.8)
9	甲酸香茅酯	Citronelly formate	19.332	1273	9.865	41(99.9); 69(97.7); 55(60.2); 81(38.5); 95(38.1); 67(36.2); 82(36.2); 68(35.7); 123(24.5); 56(22.8)
10	大根香叶烯	Germacrene D	22.094	1367	0.206	161(99.9); 105(77.5); 91(68.5); 41(61.9); 119(60.4); 79(41.5); 81(41.4); 93(35.9); 77(34.6); 27(31.5)

续表 1

序号	化合物名称	英文名称	保留时间 (min)	保留指数	百分含量 (%)	主要碎片离子(m/z)
11	β -波旁烯	(-)- β Bourbonene	22.344	1388	0.552	81(99.9); 80(73.7); 123(57.4); 161(24.9); 79(20.9); 41(17.5); 105(10.5); 91(9.5); 77(8.4); 55(7.8)
12	石竹烯	Caryophyllene	23.244	1421	0.536	41(99.9); 69(97.6); 93(93.7); 133(64.6); 79(61.4); 91(55.1); 55(43.2); 81(38.9); 107(38.9); 105(37.2)
13	6,9-愈创木二烯	Guaia-6,9-diene	23.815	1454	3.539	105(99.9); 119(60.9); 161(43.6); 91(37.6); 133(26.0); 107(24.9); 204(23.3); 147(20.8); 41(19.8); 93(19.5)
14	律草烯	Humulene	24.107	1459	0.240	93(99.9); 41(33.9); 80(32.3); 121(28.8); 55(18.7); 43(16.8); 92(15.5); 69(14.5); 107(14.5); 79(14.2)
15	香橙烯	Aromandendrene	24.293	1463	0.214	41(99.9); 91(67.8); 79(50.7); 105(50.2); 93(45.5); 39(43.4); 77(36.5); 107(36.5); 67(35.8); 55(35.4)
16	(+)-喇叭烯	(+)-Ledene	25.133	1492	0.689	107(99.9); 41(96.6); 105(93.8); 93(87.2); 91(77.5); 161(72.7); 135(58.5); 119(57.2); 79(56.5); 81(56.4)
17	δ -杜松烯	Naphthalene	25.796	1511	0.659	161(99.9); 134(57.8); 119(50.1); 204(47.4); 105(46.9); 81(25.5); 159(24.8); 91(24.5); 41(22.8); 93(20.7)
18	结晶玫瑰	Rosacetol	26.606	1534	0.33	107(99.9); 149(37.3); 43(30.7); 77(14.2); 79(13.0); 105(8.0); 102(7.5); 108(7.1); 51(6.3); 172(5.9)
19	呋喃哌啶酮	Europelargone A	27.320	1550	0.358	43(99.9); 163(59.5); 234(51.3); 123(47.0); 149(43.1); 191(42.6); 109(39.0); 91(27.8); 121(23.9); 81(22.8)

注: 主要碎片离子栏中的X(Y): X: 碎片离子的m/z; Y: 碎片离子的相对丰度。

表 2 玫瑰天竺葵挥发油及其单体化合物对灰葡萄孢菌菌丝生长的毒力测定

Table 2 EC ₅₀ values of the <i>P. roseum</i> EO and its individual compounds against the mycelial growth of <i>B. cinerea</i>						
处理	处理方法	毒力回归方程	R ²	EC ₅₀ (mg/L)	95%置信区间 (mg/L)	
阳性对照	接触法	Y=2.783X-0.7410	0.6935	14.21	2.842~21.93	
	熏蒸法	Y=2.118X+2.946	0.6679	6.93	4.152~10.01	
玫瑰天竺葵挥发油	接触法	Y=0.596X+2.928	0.9710	1350	818.50~2782	
	熏蒸法	Y=3.569X+0.862	0.8474	26.96	16.68~42.39	
香茅醇	接触法	Y=2.144X-1.918	0.6421	134.3	100.7~135.6	
	熏蒸法	Y=1.586X+2.958	0.9010	18.16	8.773~23.19	
橙花醇	接触法	Y=2.442X-0.9334	0.8321	4037	-	
	熏蒸法	Y=4.059X+0.5893	0.8209	35.3	25.74~48.3	
甲酸香茅酯	接触法	Y=0.2466	1	-	-	
	熏蒸法	Y=3.611X+0.4788	0.7645	60.84	40.88~138.4	

注: 表中“-”表示未测得此数据。

葡萄孢菌菌丝的生长情况以及处理的 EC₅₀ 值和毒力回归曲线。结果表明, 接触法和熏蒸法对灰葡萄孢菌菌丝均表现出一定的抑制效果, 且呈剂量依赖关系。但是可以明显地看到, 在相同浓度处理下, 熏蒸法对灰葡萄孢菌菌丝的生长抑制效果远高于接触法(图 2, 图 3)。这一现象可以解释为: 一些化合物可以通过去除真菌的细胞膜来增强其渗透性^[25]。此外, 挥发油的疏水性质导致挥发油在琼脂介质和水中的溶解性都很弱。因此与直接接触相比, 气态的挥发油更容易被真菌菌丝吸收^[18]。由图 2 可知, 在熏蒸法中玫瑰天竺葵挥发油的抑菌效果稍弱于香茅醇, 说明香茅醇具有较强的抗真菌活性, 可作为灰葡萄孢菌菌丝的生长抑制剂; 此外, 玫瑰天竺葵挥发油的抑菌活性显著强于橙花醇和甲酸香茅酯, 说明挥发油的抗真菌活性不仅归因于其主要成分, 挥发油中的次要化合物

以及化合物之间的协同作用也可能会增强其抗真菌活性^[26]。在 Elouadi 等^[18]的研究中发现, 当玫瑰天竺葵挥发油浓度为 2 μ L/mL 时, 其对灰葡萄孢菌具有杀菌作用, 植物的种植及采收条件、受试菌株的差异, 特别是精油主要成分含量的变化, 可能是它们抗菌活性不同的原因。

2.2.2 孢子萌发抑制 将灰葡萄孢菌孢子在 25±1 $^{\circ}$ C 培养箱中黑暗条件下培养 48 h 后测定孢子的萌发率。如表 3 所示, 在接触法所设定的浓度范围内, 未发现能够对灰葡萄孢菌孢子萌发起完全抑制作用的药剂, 所以未测得其 MIC 值和 MFC 值。不同于在熏蒸法对灰葡萄孢菌菌丝生长抑制的结果, 在熏蒸法抑制灰葡萄孢菌孢子萌发的实验中, 并未测得甲酸香茅酯对灰葡萄孢菌孢子萌发具有抑制作用。玫瑰天竺葵挥发油、香茅醇和橙花醇对灰葡萄孢菌孢子的萌发均具有较强的抑制作用, 且玫瑰天竺葵挥发油的抑制效果强于单体化合物, 其中香茅醇和橙花醇的 MIC 值和 MFC 值均相同, 分别为 15.63 mg/L 和 62.50 mg/L。熏蒸法比接触法更有效的原因可以解释为接触法中液相的亲脂分子结合形成胶束, 从而抑制挥发油对病原菌孢子的附着, 而熏蒸法中挥发油以气相分子发挥作用, 气相的挥发油可以自由附着于病原菌孢子^[26]。与之相似, Bouzenna 等^[27]发现含有大量香茅醇的天竺葵挥发油对立枯丝核菌具有高活性, 因此单萜醇被认为增加了真菌质膜的通透性, 抑制了线粒体膜的呼吸过程^[28]。Li 等^[29]发现当橙花醇浓度为 0.25 mL/L 时, 与对照组相比, 橙花醇几乎完全抑制了甘薯长喙壳菌孢子的生长。Wang 等^[30]发现橙花醇对黑曲霉的抗真菌活性呈现剂量依赖关系, 且气相的橙花醇对黑曲霉菌丝生长的抑制效果强于接触处理, 浓度为 1.25 μ L/mL 时其可完全抑制黑曲霉孢

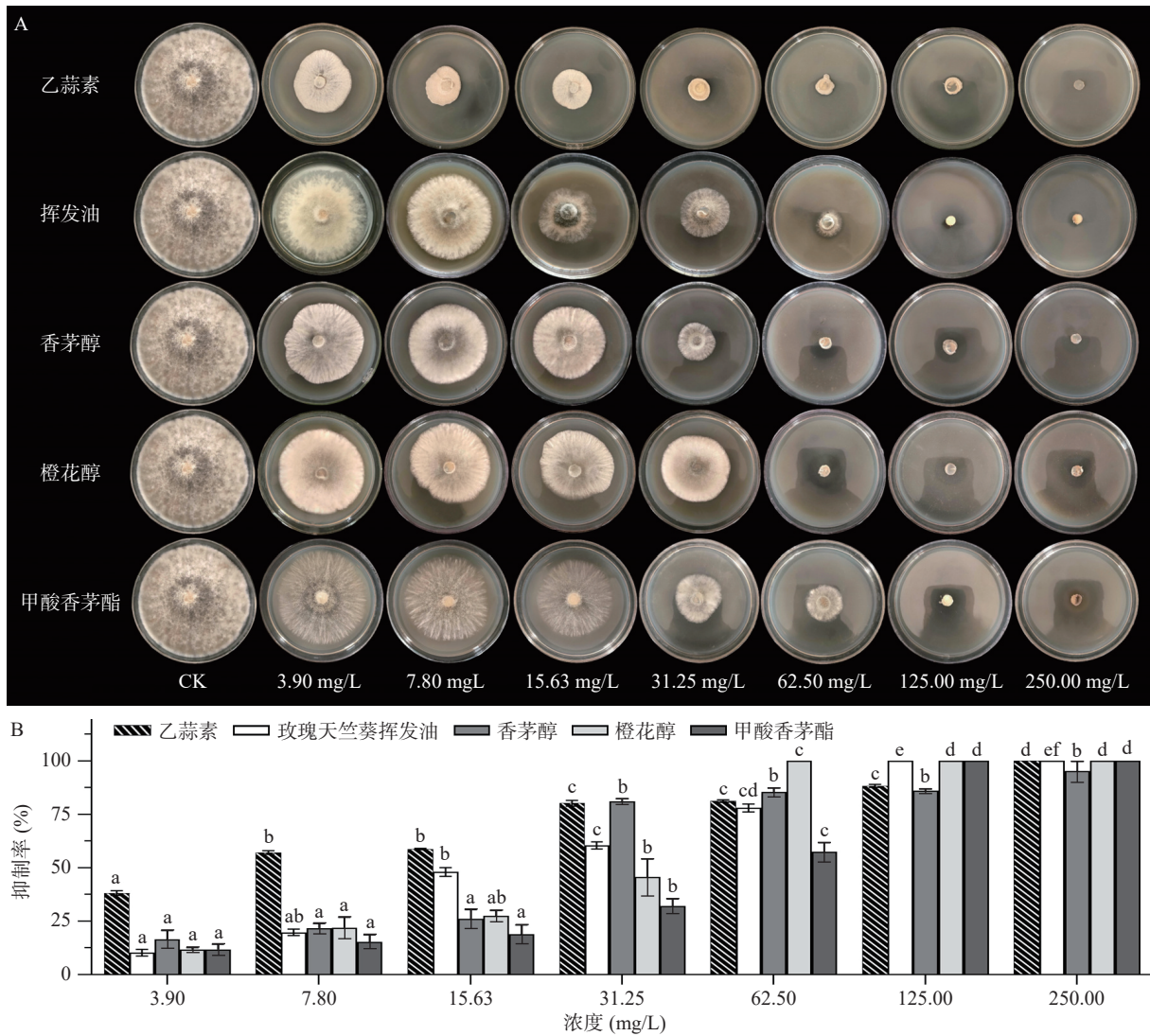


图 2 玫瑰天竺葵挥发油及其单体化合物熏蒸法对灰葡萄孢菌菌丝生长的影响

Fig.2 Effects of the *P. roseum* EO and its individual compounds against mycelia growth of *B. cinerea* by fumigation

注: A 为玫瑰天竺葵挥发油及其单体化合物对灰葡萄孢菌菌丝生长影响的实物图; B 为玫瑰天竺葵挥发油及其单体化合物对灰葡萄孢菌菌丝生长的抑制率对比图; 图 B 中 a, b, c, d 等小写字母代表各组浓度抑制率数据间的差异显著性, 具有相同标记字母的为差异不显著, 具有不同标记字母的为差异显著 ($P<0.05$), 图 3~图 4 同。

表 3 玫瑰天竺葵挥发油及其单体化合物对灰霉病菌孢子萌发的 MIC 和 MFC
Table 3 Minimal inhibitory concentrations (MIC) and minimal fungicidal concentrations (MFC) of the *P. roseum* EO and its individual compounds against spore germination of *B. cinerea*

化合物	接触法		熏蒸法	
	MIC(mg/L)	MFC(mg/L)	MIC(mg/L)	MFC(mg/L)
玫瑰天竺葵挥发油	NF	NF	3.90	31.25
香茅醇	NF	NF	31.25	62.50
橙花醇	NF	NF	31.25	62.50
甲酸香茅酯	NF	NF	NF	NF

注: NF为在设定浓度范围内未发现抑制效果。

子的萌发。Felicia 等^[22] 发现挥发油对病原菌的抑制机制主要是由于其独特的疏水性, 其可以通过影响病原菌细胞代谢来影响病原菌菌丝增殖和孢子萌发。

2.3 活体抑菌试验

挥发油一大特性是其在气相中具有抑菌活性,

这一特性使其适合作为储存新鲜产品的潜在熏蒸剂^[31]。使用挥发油作为熏蒸剂可以克服浸渍过程中的污染问题, 降低影响产品感官接受性的风险^[24]。由图 4 可知, 经玫瑰天竺葵挥发油熏蒸处理过的樱桃番茄果实, 其灰霉病的严重程度及发病率随着处理浓

表 4 玫瑰天竺葵挥发油及其单体化合物灰葡萄孢菌活体的毒力测定
Table 4 EC_{50} values of the *P. roseum* EO and its individual compounds against *B. cinerea* on cherry tomatoes

处理	毒力回归方程	R^2	EC_{50} (mg/L)	95%置信区间 (mg/L)
乙蒜素 (阳性对照)	$Y=1.296X+3.621$	0.9562	29.82	16.30~70.83
玫瑰天竺葵挥发油	$Y=1.276X+3.911$	0.9783	7.79	5.46~18.19
香茅醇	$Y=1.223X-2.0551$	0.9491	47.96	35.34~67.31
橙花醇	$Y=1.452X+2.988$	0.9739	23.06	19.62~26.94
甲酸香茅酯	$Y=1.323X+3.039$	0.9626	31.23	25.72~37.86

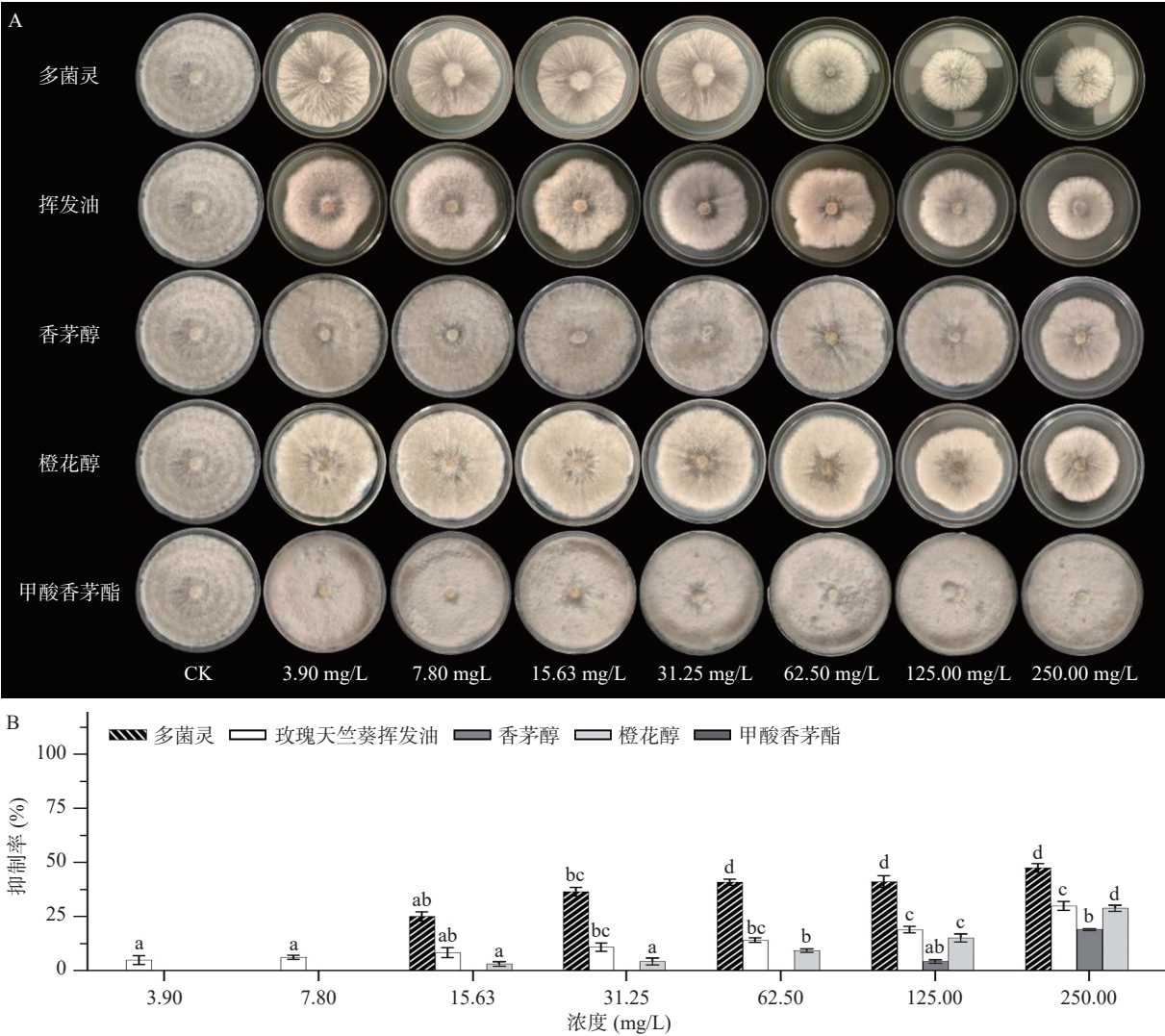
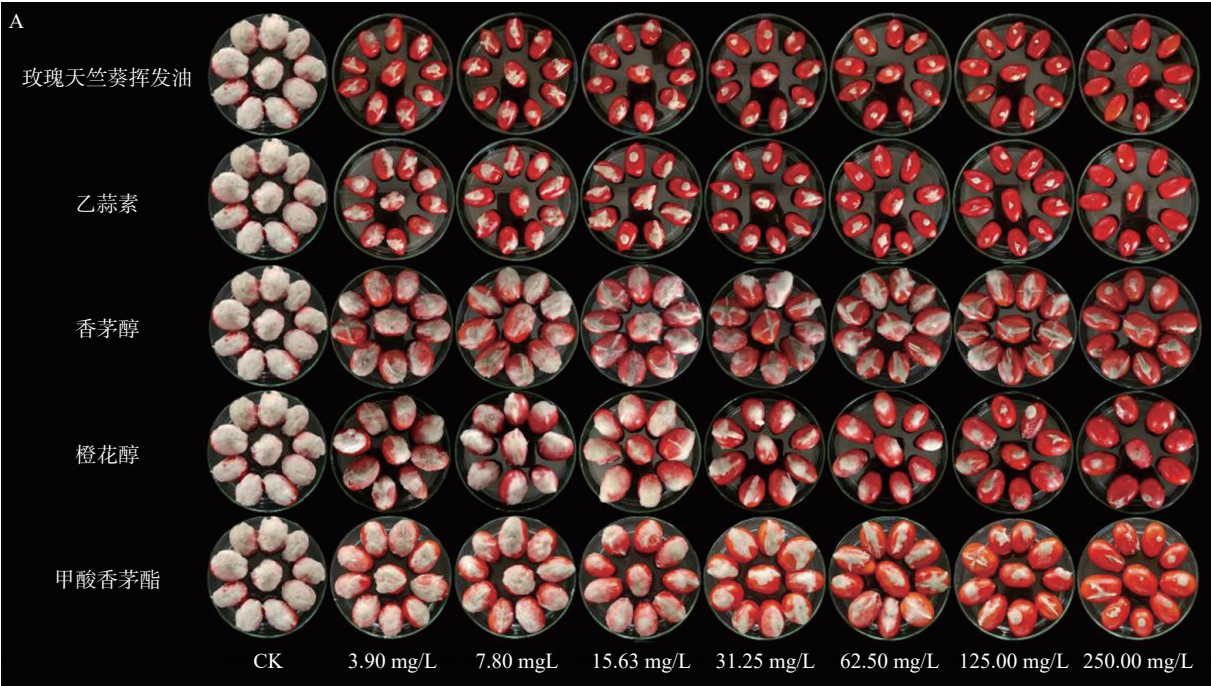


图 3 玫瑰天竺葵挥发油及其单体化合物接触法对灰葡萄孢菌菌丝生长的影响

Fig.3 Effects of the *P. roseum* EO and its individual compounds against mycelia growth of *B. cinerea* by contact method



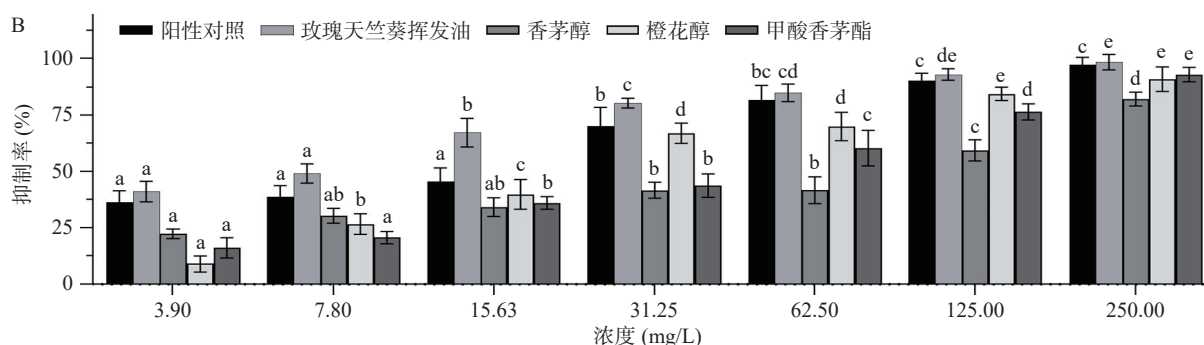


图4 玫瑰天竺葵挥发油及其单体化合物对灰葡萄孢菌的活体抑菌活性

Fig.4 *In vivo* antifungal activities of the *P. roseum* EO and its individual compounds against *B. cinerea* on cherry tomatoes

度的增加显著降低($P<0.05$),且挥发油对灰霉病的抑制效果显著强于单体化合物。玫瑰天竺葵挥发油的 EC_{50} 值为 7.79 mg/L(表 4),当浓度为 250.00 mg/L 时,其抑制率为 98.45%(图 4)。经挥发油处理 7 d 后,樱桃番茄果实颜色鲜亮,硬度未发生改变,且带有轻微的玫瑰香气。

3 结论

现代食品工业对天然、安全的杀菌剂作为防腐剂的需求日益增加。从植物中开发用于果蔬采后疾病控制的生物杀菌剂是一项具有挑战性的工作。本研究从玫瑰天竺葵挥发油中检测到大量香茅醇(59.99%)、橙花醇(18.20%)和甲酸香茅酯(5.91%)。结果表明,玫瑰天竺葵挥发油及其单体化合物香茅醇和橙花醇对樱桃番茄灰霉病菌具有很强的抗真菌活性,可用于防治樱桃番茄采后灰霉病,从而为合成化学杀菌剂的使用提供了可行的替代方案。且熏蒸处理的抗真菌活性明显强于接触处理。体内实验表明,经玫瑰天竺葵挥发油处理后的樱桃番茄果实发病率显著降低,当挥发油浓度为 15.63 mg/L 时,抑制率便可达 67.18%。综上所述,玫瑰天竺葵挥发油作为一种天然物质,可以直接抑制灰葡萄孢菌菌丝生长和孢子萌发,减少樱桃番茄灰霉病的发生。这表明玫瑰天竺葵挥发油具有作为一种天然杀菌剂的潜力。但是玫瑰天竺葵挥发油的抑菌作用机理还有待进一步研究,且对于挥发油及其单体化合物挥发较快的问题还有待解决。

© The Author(s) 2025. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

参考文献

- [1] YANG D T, SHI H J, ZHANG K, et al. The antifungal potential of the chelating agent EDTA against postharvest plant pathogen *Botrytis cinerea*[J]. *International Journal of Food Microbiology*, 2023, 388: 110089.
- [2] WILLIAMSON B, TUDZYNSKI B, TUDZYNSKI P, et al. *Botrytis cinerea*: The cause of grey mould disease[J]. *Molecular Plant Pathology*, 2007, 8(5): 561–580.
- [3] ELAD Y, PERTOT I, COTES P A M, et al. Plant hosts of

Botrytis spp[J]. *Botrytis—the Fungus, the Pathogen and its Management in Agricultural Systems*, 2016: 413–486.

[4] GAO P, QIN J X, LI D L, et al. Inhibitory effect and possible mechanism of a *Pseudomonas* strain QBA5 against gray mold on tomato leaves and fruits caused by *Botrytis cinerea*[J]. *PLoS One*, 2018, 13(1): e0190932.

[5] MYRESIOTIS C K, KARAOGLANIDIS G S, TZAVELLA-KLONARI K. Resistance of *Botrytis cinerea* isolates from vegetable crops to anilinopyrimidine, phenylpyrrole, hydroxanilide, benzimidazole, and dicarboximide fungicides[J]. *Plant Disease*, 2007, 91(4): 407–413.

[6] GLAMOČLIJA J, SOKOVIĆ M, TEŠEVIĆ V, et al. Chemical characterization of *Lippia alba* essential oil: an alternative to control green molds[J]. *Brazilian Journal of Microbiology*, 2011, 42: 1537–1546.

[7] HENDGES C, JOSÉ R S, ZAMBAN V C, et al. Antifungal activity and control of the early blight in tomato through tea tree essential oil[J]. *Crop Protection*, 2021, 148: 105728.

[8] LORENZETTI E R, MONTEIRO F P, SOUZA P E, et al. Bioatividade de óleos essenciais no controle de *Botrytis cinerea* isolado de morangueiro[J]. *Revista Brasileira de Plantas Medicinaiis*, 2011, 13: 619–627.

[9] DA SILVA P P M, DE OLIVEIRA J, DOS MARES BIAZOTTO A, et al. Essential oils from *Eucalyptus staigeriana* F. Muell. ex Bailey and *Eucalyptus urograndis* W. Hill ex Maiden associated to carboxymethylcellulose coating for the control of *Botrytis cinerea* Pers. Fr. and *Rhizopus stolonifer* (Ehrenb.; Fr.) Vuill. in strawberries[J]. *Industrial Crops and Products*, 2020, 156: 112884.

[10] DEANS S G, RITCHIE G. Antibacterial properties of plant essential oils[J]. *International Journal of Food Microbiology*, 1987, 5(2): 165–180.

[11] HYLDGAARD M, MYGIND T, MEYER R L. Essential oils in food preservation: mode of action, synergies, and interactions with food matrix components[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2012, 3: 12.

[12] SVOBODA K P, GREENAWAY R I. Investigation of volatile oil glands of *Satureja hortensis* L. (summer savory) and phytochemical comparison of different varieties[J]. *International Journal of Aromatherapy*, 2003, 13(4): 196–202.

[13] BURT S. Essential oils: their antibacterial properties and potential applications in foods—A review[J]. *International Journal of Food Microbiology*, 2004, 94(3): 223–253.

[14] BUTNARIU M, SARAC I. Essential oils from plants[J]. *Journal of Biotechnology and Biomedical Science*, 2018, 1(4): 35–43.

- [15] 滕云, 杨丽. 微波无溶剂萃取法提取野菊花精油工艺及成分分析[J]. 食品工业科技, 2021, 42(18): 226–234. [TENG Yun, YANG Li. Extracting process of essential oil from chrysanthemum indicum by solvent-free microwave extraction and its components analysis[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(18): 226–234.]
- [16] VERMA R S, PADALIA R C, CHAUHAN A. Rose-scented geranium (*Pelargonium* sp.) oils[J]. Essential Oils in Food Preservation, Flavor and Safety, 2016: 697–704.
- [17] DIÁNEZ F, SANTOS M, PARRA C, et al. Screening of antifungal activity of 12 essential oils against eight pathogenic fungi of vegetables and mushroom[J]. *Letters in Applied Microbiology*, 2018, 67(4): 400–410.
- [18] ELOUADI Y, BENDAIF H, ASSAGGAF H, et al. Efficacy of *Pelargonium graveolens* essential oils against some postharvest fungal diseases of apple[J]. *Advancements in Life Sciences*, 2022, 9(2): 195–201.
- [19] KUJUR A, KUMAR A, YADAV A, et al. Antifungal and aflatoxin B-1 inhibitory efficacy of nanoencapsulated *Pelargonium graveolens* L. essential oil and its mode of action[J]. *LWT-Food Science & Technology*, 2020(130): 130.
- [20] ZHAO Y, YANG Y H, YE M, et al. Chemical composition and antifungal activity of essential oil from *Origanum vulgare* against *Botrytis cinerea*[J]. *Food Chemistry*, 2021, 365: 130506.
- [21] 李珊珊, 郑开斌, 黄惠明, 等. 玫瑰天竺葵与波旁天竺葵植物学性状及挥发油成分分析比较[J]. 中药材, 2018, 41(2): 358–364. [LI Shanshan, ZHENG Kaibin, HUANG Huiming, et al. Comparison of botanical traits and essential oils composition analysis between *Pelargonium roseum* R. Br and *Pelargonium asperum* Bourbon[J]. *Chinese Materia Medica*, 2018, 41(2): 358–364.]
- [22] FELICIA W X L, ROVINA K, VONNIE J M, et al. Consolidating plant-based essential oils onto polysaccharides-based coatings: effect on mechanisms and reducing postharvest losses of fruits[J]. *Applied Food Research*, 2022: 100226.
- [23] AZHDARZADEH F, HOJJATI M, TAHMUZI D S. Chemical composition and antimicrobial activity of *Pelargonium roseum* essential oil from southwest of Iran[J]. *Journal of Food and Bioprocess Engineering*, 2018, 1(1): 33–38.
- [24] CARMEN G, HANCU G. Antimicrobial and antifungal activity of *Pelargonium roseum* essential oils[J]. *Advanced Pharmaceutical Bulletin*, 2014, 4(Suppl 2): 511.
- [25] EDRIS A E, FARRAG E S. Antifungal activity of peppermint and sweet basil essential oils and their major aroma constituents on some plant pathogenic fungi from the vapor phase[J]. *Food/Nahrung*, 2003, 47(2): 117–121.
- [26] LAIRD K, PHILLIPS C. Vapour phase: a potential future use for essential oils as antimicrobials?[J]. *Letters in Applied Microbiology*, 2012, 54(3): 169–174.
- [27] BOUZENNA H, KRICHEN L. *Pelargonium graveolens* L'Her. and *Artemisia arborescens* L. essential oils: chemical composition, antifungal activity against *Rhizoctonia solani* and insecticidal activity against *Rhyssopertha dominica*[J]. *Natural Product Research*, 2013, 27(9): 841–846.
- [28] STEVIĆ T, BERIĆ T, ŠAVIKIN K, et al. Antifungal activity of selected essential oils against fungi isolated from medicinal plant[J]. *Industrial Crops and Products*, 2014, 55: 116–122.
- [29] LI X Z, LIU M, HUANG T K, et al. Antifungal effect of nerol via transcriptome analysis and cell growth repression in sweet potato spoilage fungi *Ceratocystis fimbriata*[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2021, 171: 111343.
- [30] WANG Y Z, ZENG X B, ZHOU Z K, et al. Inhibitory effect of nerol against *Aspergillus niger* on grapes through a membrane lesion mechanism[J]. *Food Control*, 2015, 55: 54–61.
- [31] TZORTZAKIS N G. Impact of cinnamon oil-enrichment on microbial spoilage of fresh produce[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2009, 10(1): 97–102.