

王佳飞, 吕航君, 蔡瑾. 3种植物源活性成分对白菜软腐病的防治效果[J]. 山西农业科学, 2025, 53(4): 129–139.

WANG J F, LÜ H J, CAI J. Control efficacy of three plant-derived active compounds against soft rot of Chinese cabbage[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2025, 53(4): 129–139.

doi:10.26942/j.cnki.issn.1002-2481.2025.04.15

## 3种植物源活性成分对白菜软腐病的防治效果

王佳飞<sup>1</sup>, 吕航君<sup>1</sup>, 蔡瑾<sup>2</sup>

(1. 山西大学 中医药现代研究中心, 山西 太原 030006; 2. 山西大学 应用化学研究所, 山西 太原 030006)

**摘要:**白菜软腐病是由胡萝卜软腐果胶杆菌(*Pectobacterium carotovorum* subsp. *carotovorum*, Pcc)引起的白菜三大病害之一, 严重影响白菜的产量和品质。通过抑菌圈试验和最低抑菌浓度(MIC)试验比较3种植物源活性成分(d-柠檬烯、丁香酚和香芹酚)的抑菌活性, 进一步通过离体组织试验及盆栽试验评估其防治效果, 旨在筛选出高效的防治成分, 为植物源活性成分防治白菜软腐病提供可靠的数据支撑。抑菌试验结果表明, 香芹酚的抑菌效果显著优于丁香酚和d-柠檬烯, 香芹酚的抑菌圈直径为20.63 mm, MIC为0.125 0 mg/mL。离体组织试验表明, 在100 µg/mL质量浓度下, 香芹酚对接种白菜叶片的预防效果及治疗效果分别为72.65%、73.61%, 显著高于丁香酚(49.13%、50.36%)和d-柠檬烯(15.58%、16.10%)。盆栽试验结果和离体组织试验结果一致, 香芹酚的防治效果显著高于丁香酚和d-柠檬烯; 但是香芹酚的治疗效果为76.25%, 大于其预防效果(38.99%), 这可能与自身的挥发性有关, 建议制成微囊悬浮剂等可减少药剂挥发的剂型, 于白菜发病后迅速施药, 可以达到更好的防治效果。综上, 相较于丁香酚和d-柠檬烯, 香芹酚对Pcc表现出更强的抑菌活性, 对白菜软腐病表现出更好的预防与治疗效果。

**关键词:** 香芹酚; 丁香酚; d-柠檬烯; 白菜软腐病; 防治效果

**中图分类号:** S436.341.1<sup>+</sup>3

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1002-2481(2025)04-0129-11

## Control Efficacy of Three Plant-Derived Active Compounds against Soft Rot of Chinese Cabbage

WANG Jiafei<sup>1</sup>, LÜ Hangjun<sup>1</sup>, CAI Jin<sup>2</sup>

(1. Modern Research Center for Traditional Chinese Medicine, Shanxi University, Taiyuan 030006, China;

2. Institute of Applied Chemistry, Shanxi University, Taiyuan 030006, China)

**Abstract:** Chinese cabbage soft rot, caused by *Pectobacterium carotovorum* subsp. *carotovorum*(Pcc), is one of the three major diseases threatening Chinese cabbage in yield and quality. In order to screen out efficient control ingredients and provide reliable data supporting the control of bacterial soft rot in Chinese cabbage using plant-derived active compounds, in this study, antibacterial activities of d-limonene, eugenol, and carvacrol were compared through inhibition zone assays and minimum inhibitory concentration(MIC) assays. Furthermore, their control efficacy was evaluated through *in vitro* tissue experiments and pot experiments. The results of the antibacterial assays demonstrated that carvacrol exhibited significantly stronger antibacterial activity than eugenol and d-limonene, with an inhibition zone diameter of 20.63 mm and an MIC value of 0.125 0 mg/mL. *In vitro* tissue experiments demonstrated that carvacrol achieved preventive and therapeutic effects of 72.65% and 73.61% at the mass concentration of 100 µg/mL, which were significantly higher than those of eugenol(preventive: 49.13%; therapeutic: 50.36%) and d-limonene(preventive: 15.58%; therapeutic: 16.10%). The results of pot experiments were consistent with that *in vitro* experiment, the preventive and therapeutic effects of carvacrol were significantly higher than those of eugenol and d-limonene. However, the therapeutic effect of carvacrol(76.25%) markedly exceeded its preventive effect(38.99%), which may be attributed to carvacrol's inherent volatility. To address this, microencapsulated suspensions or similar formulations of

收稿日期: 2025-04-08

基金项目: 山西省基础研究计划自然科学研究面上项目(20210302123451)

作者简介: 王佳飞, 在读硕士, 研究方向: 中药植物资源利用, E-mail: 18220035714@163.com

通信作者: 蔡瑾, 副教授, 博士, 主要从事中药植物资源利用研究, E-mail: caijin@sxu.edu.cn

carvacrol were recommend to reduce volatilization loss and apply quickly after the onset of Chinese cabbage soft rot for achieving better control effect. In conclusion, compared to eugenol and d-limonene, carvacrol not only displayed significant antibacterial activity against Pcc but also enhanced preventive and therapeutic effect in managing Chinese cabbage soft rot.

**Keywords:** carvacrol; eugenol; d-limonene; soft rot of Chinese cabbage; control effect

白菜在我国种植范围最广、种植面积最大,具有很高的营养价值,是人们餐桌上常见的绿叶类蔬菜<sup>[1-2]</sup>。白菜软腐病是由胡萝卜软腐果胶杆菌(*Pectobacterium carotovorum* subsp. *carotovorum*, Pcc)引起的细菌性病害,是白菜种植和贮存过程中危害最严重的病害之一<sup>[3]</sup>。Pcc 侵染后,白菜会迅速出现许多水渍状的浅黄色或黄色斑点,发病区域会逐渐软化并最终腐烂<sup>[4]</sup>。该病害轻则使白菜减产 10%~20%,严重时达 50% 以上,甚至绝收<sup>[5]</sup>。

白菜软腐病主要以化学药剂防治为主<sup>[4]</sup>。但是,长时间大量使用化学药剂容易使病菌产生抗药性,造成农残超标及生态环境污染等问题<sup>[6-7]</sup>。植物源农药是指从植物中提取或利用其活性成分加工而成的天然农药,相比化学农药有着抗药性低、无残留且对环境友好的优点<sup>[8-9]</sup>。植物精油是通过蒸馏等方法从植物中提取的挥发性芳香物质,具有抑菌活性高、残留低、对环境友好等优点,是植物源农药的重要来源之一<sup>[10-11]</sup>。当前多项研究证明植物精油具有防治 Pcc 的效果。HAJIAN-MALEKI 等<sup>[12]</sup>和 ZHANG 等<sup>[13]</sup>研究发现,柑橘精油、丁香精油和牛至精油可通过破坏细胞膜,抑制 Pcc。丁香酚、d-柠檬烯和香芹酚为这 3 种植物精油的主要成分,也是我国已批准的植物源农药<sup>[14-17]</sup>。根据农业农村部《生物农药登记有效成分清单(2020 版)》,我国已有 20 余种植物源农药通过了登记,但尚未有用于防治白菜软腐病的植物源农药<sup>[18]</sup>。

本研究以香芹酚、丁香酚和 d-柠檬烯单体化合物为研究对象,为排除市售产品不同辅料的干扰因素,通过离体抑菌试验、离体组织试验及盆栽试验,系统比较 3 种植物源活性成分对 Pcc 的抑菌活性及对白菜软腐病的防治效果,旨在为后续大田试验提供参考,同时为植物源活性成分应用于白菜软腐病的防治提供可靠数据支撑。

## 1 材料和方法

### 1.1 试验材料

1.1.1 试验材料及试剂 白菜软腐病病原菌(*Pectobacterium carotovorum* subsp. *carotovorum*, Pcc)

(菌号 1.141)由中国普通微生物菌种保藏管理中心提供。供试培养基为牛肉膏蛋白胨培养基,配方为:蛋白胨 10.0 g,氯化钠 5.0 g,牛肉膏 3.0 g,琼脂 20 g,蒸馏水 1 000 mL,调节 pH 值为 7.2<sup>[19]</sup>。

d-柠檬烯(纯度≥98%)、丁香酚(纯度≥98%)和香芹酚(纯度≥98%)均购买于天津天力试剂有限公司。分析纯试剂二甲基亚砜(DMSO)、无水乙醇、次氯酸钠、氯化钠和氢氧化钠均购自北京鸿润宝顺科技有限公司。

成熟白菜购于山西省太原市小店区许西农贸市场;白菜幼苗(品种义和秋)购于沐阳轩之迈商贸中心。

1.1.2 试验仪器 THZ-D 台式恒温摇床(常州佳美仪器制造有限公司);SynergyHTX 多功能酶标仪(安捷伦科技有限公司);海尔立式蒸汽灭菌锅(青岛海尔电冰箱股份有限公司);BPC-250F 恒温培养箱(上海一恒科学仪器有限公司)。

### 1.2 试验方法

1.2.1 抑菌圈直径测定 根据朱能斌等<sup>[20]</sup>、马海会等<sup>[21]</sup>的方法,采用平板打孔法测定抑菌圈直径。将 d-柠檬烯、丁香酚和香芹酚分别溶于 3% DMSO 水溶液中,配制成质量浓度为 20 mg/mL 的测试液,以 3% DMSO 水溶液作为阴性对照。将 250 μL 菌悬液( $10^6$  cfu/mL)涂布在牛肉膏蛋白胨固体培养基后,使用直径为 10 mm 的无菌打孔器在培养基上打出对称的 2 个孔。向孔中分别加入 20 mg/mL 的 d-柠檬烯、丁香酚和香芹酚测试液和 3% DMSO 水溶液后,放置于 28 °C 恒温培养箱培养 24 h,测量抑菌圈直径。每组试验重复 3 次。

1.2.2 最低抑菌浓度(MIC)测定 使用 96 孔板微量稀释法测定 MIC<sup>[22]</sup>。将 d-柠檬烯、丁香酚和香芹酚分别溶于 3% DMSO 液体培养基中,配制成初始质量浓度为 2 mg/mL 的测试液。对测试液再进行二倍稀释,获得 2.000 0、1.000 0、0.500 0、0.250 0、0.125 0、0.062 5、0.031 3、0.015 6、0.007 8 mg/mL 的系列测试液,以 3% DMSO 培养液为阴性对照。将上述所得不同质量浓度测试液及阴性对照加入到 96 孔板中,随后在孔中注入 20 μL 的菌悬液

( $10^6$  cfu/mL)。将96孔板放置于28℃恒温培养箱培养24 h,以培养基浑浊程度确定最低抑菌浓度。每组试验重复3次。

**1.2.3 白菜软腐病离体组织防治试验** 将d-柠檬烯、丁香酚和香芹酚分别溶于3% DMSO无菌水溶液中,配制成质量浓度分别为400、200、100  $\mu\text{g/mL}$ 的测试液,以3% DMSO液体培养基为阴性对照。用无菌刀将白菜基部的叶柄切成5 cm×5 cm白菜片,分别用1% NaClO溶液和75%乙醇溶液浸泡1 min消毒,随后用无菌水冲洗干净并晾干<sup>[23]</sup>。

**1.2.3.1 预防效果测定** 用无菌针在白菜片中间位置划出一个长30 mm、深4 mm的伤口。向白菜片均匀喷洒梯度浓度测试液1 mL。静置24 h,待样品溶液被白菜组织吸收后,于伤口处接种Pcc菌悬液( $\text{OD}_{600}=0.6$ )20  $\mu\text{L}$ 。每组重复3次。将各样品放置于28℃恒温培养箱,于第5天统计叶片发病腐败情况,按公式(1)计算预防效果。

预防效果=(预防对照组相对腐烂面积-预防试验组相对腐烂面积)/预防对照组相对腐烂面积×100% (1)

**1.2.3.2 治疗效果测定** 用无菌针在白菜片中间位置划出一个长30 mm、深4 mm的伤口。于伤口处接种Pcc菌悬液( $\text{OD}_{600}=0.6$ )20  $\mu\text{L}$ 。24 h后,向白菜片均匀喷洒梯度浓度测试液1 mL,每组重复3次。将各样品放置于28℃恒温培养箱,于第5天统计叶片发病腐败情况,按公式(2)计算治疗效果。

治疗效果=(治疗对照组相对腐烂面积-治疗试验组相对腐烂面积)/治疗对照组相对腐烂面积×100% (2)

**1.2.3.3 d-柠檬烯、丁香酚和香芹酚防治效果比较** 根据梯度浓度测试液的试验结果,重新配制100  $\mu\text{g/mL}$ 的d-柠檬烯、丁香酚和香芹酚溶液,按1.2.3.1及1.2.3.2进行预防和治疗试验,比较d-柠檬烯、丁香酚和香芹酚的防治效果。

**1.2.4 白菜软腐病盆栽防治试验** 依据1.2.3检测结果,以3% DMSO配制d-柠檬烯、丁香酚和香芹酚测试液100  $\mu\text{g/mL}$ ,以3% DMSO溶液为阴性对照。选择生长一致的白菜幼苗为试验对象,随机分组进行以下预防试验和治疗试验。

**1.2.4.1 盆栽预防效果测定** 用捆绑的10根无菌针在白菜幼苗的叶柄处表面造成创口后(不能穿透),向白菜幼苗喷施50 mL测试液及对照液<sup>[24]</sup>。

放置24 h后,将100  $\mu\text{L}$ 的Pcc菌悬液( $\text{OD}_{600}=0.6$ )注射在伤口处。将处理后的白菜幼苗放置在温度28℃、光周期14 h/10 h的光照培养箱里培养5 d后,计算植株的病情指数,每组试验重复3次。

白菜软腐病的感染病情按以下分级标准进行统计:0级.基本无病害;1级.白菜叶片出现黄褐色病斑;2级.白菜叶片出现黄褐色病斑和1~2片叶片卷曲;3级.叶片全部出现黄褐色病斑和卷曲;4级.1~2片叶片有1/3~1/2枯萎;5级.所有叶片有1/3~1/2枯萎;6级.所有叶片枯萎;7级.所有叶片枯萎和叶柄失水发白;8级.所有叶片枯萎和叶柄溃烂;9级.整株植物死亡<sup>[25]</sup>。根据公式(3)和(4)分别计算病情指数和预防效果。

病情指数= $\Sigma$ (病情等级×此病级发病数)/(病情最高级别×调查总数)×100 (3)

预防效果=(预防对照组病情指数-预防试验组病情指数)/预防对照组病情指数×100% (4)

**1.2.4.2 盆栽治疗效果测定** 用捆绑的10根无菌针在白菜幼苗的叶柄处表面造成创口后(不能穿透),将100  $\mu\text{L}$ 的Pcc菌悬液( $\text{OD}_{600}=0.6$ )注射在伤口处<sup>[24]</sup>。24 h后向白菜幼苗喷施50 mL测试液及对照液。培养方法如1.2.4.1,并根据公式(3)和(5)分别计算病情指数和治疗效果。

治疗效果=(治疗对照组病情指数-治疗试验组病情指数)/治疗对照组病情指数×100% (5)

### 1.3 数据分析

每组试验重复3次,用SPSS 27.0软件进行数据统计,利用t检验及LSD分析数据的差异显著性( $P<0.05$ )。

## 2 结果与分析

### 2.1 d-柠檬烯、丁香酚和香芹酚的抑菌圈直径比较

由于无菌打孔器直径为10 mm,因此,对照组没有抑菌效果(图1、2)。从图1可以看出,d-柠檬烯、丁香酚和香芹酚3种植物源活性成分对白菜软腐病菌均有明显的抑菌作用。由图2可知,d-柠檬烯组和阴性对照组之间差异显著( $P<0.05$ ),其抑菌圈直径为11.51 mm。丁香酚组和阴性对照组之间差异极显著( $P<0.01$ ),其抑菌圈直径为14.84 mm。香芹酚组抑菌圈直径最大,和阴性对照组之间差异极显著( $P<0.001$ ),其抑菌圈直径为20.63 mm。

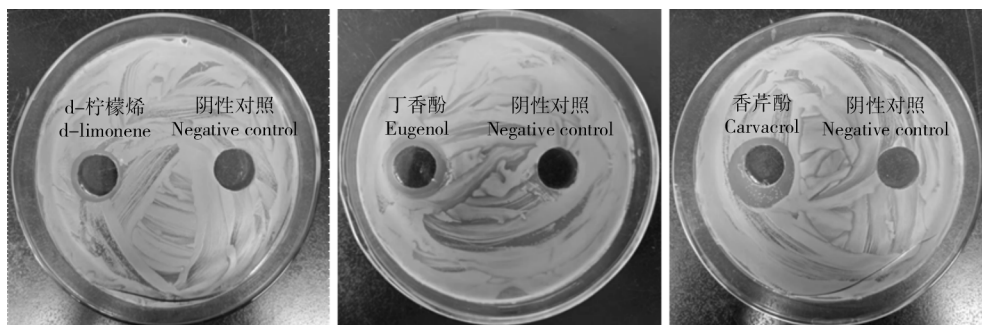
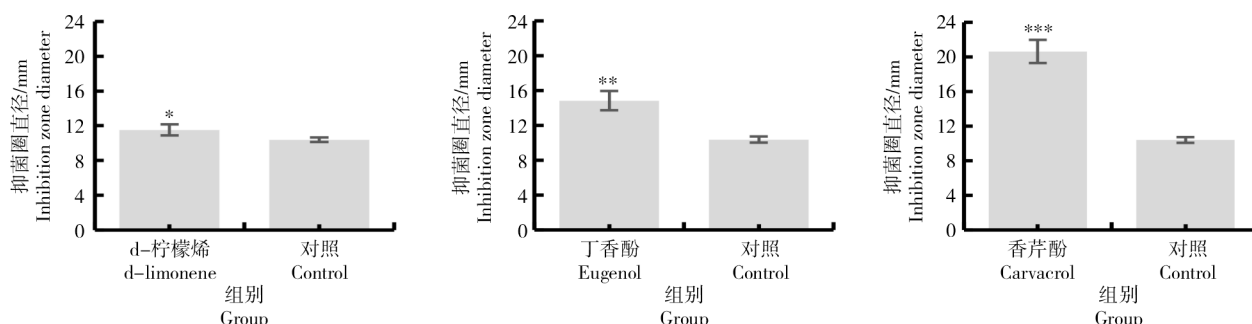


图1 d-柠檬烯、丁香酚和香芹酚对白菜软腐病菌抑菌效果

Fig.1 Antibacterial effects of d-limonene, eugenol, and carvacrol on Chinese cabbage soft rot



\*表示处理组和对照组之间差异显著( $P<0.05$ );\*\*表示处理组和对照组之间差异极显著( $P<0.01$ );\*\*\*表示处理组和对照组之间在0.001水平差异极显著

\* indicated a significant difference between the treatment group and control group( $P<0.05$ ). \*\* indicated a highly significant difference between the treatment group and control group( $P<0.01$ ). \*\*\* indicated an extremely significant difference between the treatment group and control group at 0.001 level

图2 d-柠檬烯、丁香酚和香芹酚对白菜软腐病菌抑菌圈直径比较

Fig.2 Comparison of inhibitory zone diameter of d-limonene, eugenol, and carvacrol against Chinese cabbage soft rot

## 2.2 3种植物源活性成分最低抑菌浓度(MIC)比较

d-柠檬烯、丁香酚和香芹酚对Pcc的抑制效果如表1所示,在没有加入活性成分而只加入3% DMSO的情况下,培养基呈现浑浊状态,说明培养基中有大量Pcc存活。由此可得,阴性对照3% DMSO

对白菜软腐病菌无抑制效果。香芹酚的MIC为0.1250 mg/mL,低于d-柠檬烯(MIC 2.000 0 mg/mL)和丁香酚(MIC 0.500 0 mg/mL),表明香芹酚的抑菌效果更好。

表1 d-柠檬烯、丁香酚和香芹酚对白菜软腐病菌的抑菌效果

Tab.1 Antibacterial effects of d-limonene, eugenol, and carvacrol on Chinese cabbage soft rot

| 活性成分<br>Active compounds | 质量浓度/(mg/mL) Mass concentration |         |         |         |         |         |         |         |         | 3%<br>DMSO |
|--------------------------|---------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|------------|
|                          | 2.000 0                         | 1.000 0 | 0.500 0 | 0.250 0 | 0.125 0 | 0.062 5 | 0.031 3 | 0.015 6 | 0.007 8 |            |
| d-柠檬烯 d-limonene         | —                               | +       | +++     | +++     | +++     | +++     | +++     | +++     | +++     | +++        |
| 丁香酚 Eugenol              | —                               | —       | —       | +       | +++     | +++     | +++     | +++     | +++     | +++        |
| 香芹酚 Carvacrol            | —                               | —       | —       | —       | —       | +       | +++     | +++     | +++     | +++        |

注:“—”表示培养基颜色透亮,无病原菌生长;“+”表示培养基比较浑浊,病原菌少量生长;“+++”表示培养基大量浑浊,无抑菌作用。

Note: “—” indicated that the medium was clear and transparent, without growing colonies of the pathogenic bacterium. “+” indicated that the medium was slightly turbid, with a small amount of growing colonies of the pathogenic bacterium. “+++” indicated that the medium was heavily turbid, showing no antibacterial effect.

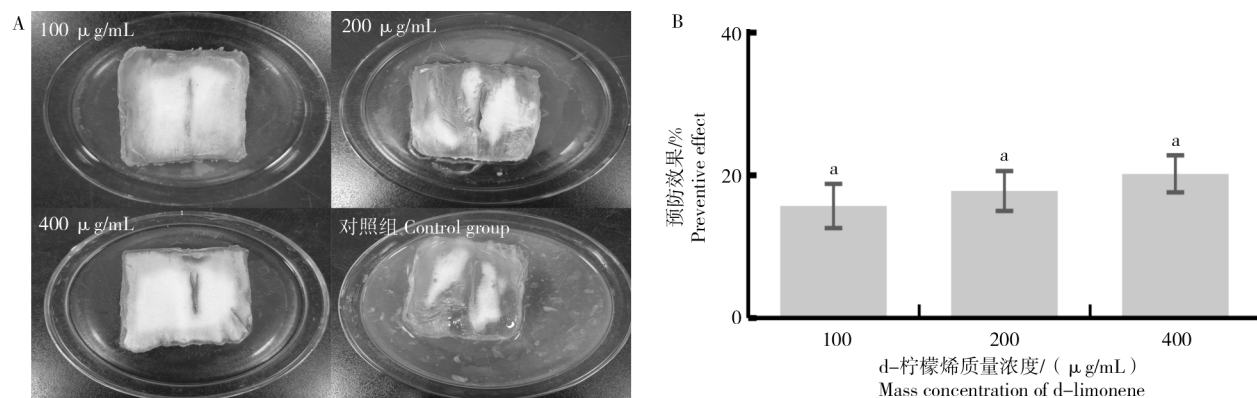
## 2.3 白菜软腐病离体组织防治试验结果分析

2.3.1 预防效果比较 从图3~5可以看出,3种植物源活性成分对接种病菌的白菜叶片均有明显的

预防效果。100、200、400  $\mu\text{g/mL}$  质量浓度处理下, d-柠檬烯组的预防效果分别为15.67%、17.77%和20.16%;丁香酚组的预防效果分别为49.79%、

52.89% 和 54.63%; 香芹酚组的预防效果分别为 71.87%、72.91% 和 73.92%。LSD 多重比较结果表明, 100、200、400  $\mu\text{g/mL}$  d-柠檬烯的预防效果间

无显著差异, 同样地, 这 3 种浓度梯度的丁香酚和香芹酚的预防效果间也无显著差异。



A 为预防组与对照组白菜叶片腐烂面积对比; B 为预防组对白菜叶片预防效果的方差分析结果。不同小写字母表示不同质量浓度在 0.05 水平上差异显著。图 4—8 同

A compared the rot areas on Chinese cabbage leaves between preventive groups and the control group. B showed the ANOVA results of the preventive effects on Chinese cabbage leaves. Different lowercase letters represented significant differences at the level of 0.05 between different mass concentration. The same as Fig.4—8

图 3 d-柠檬烯的预防效果

Fig.3 Preventive effects of d-limonene

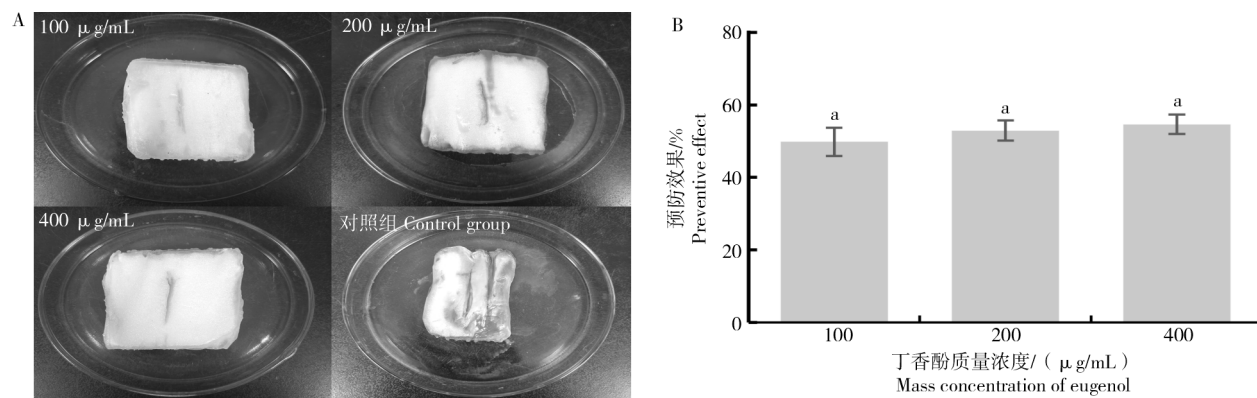


图 4 丁香酚的预防效果

Fig.4 Preventive effects of eugenol

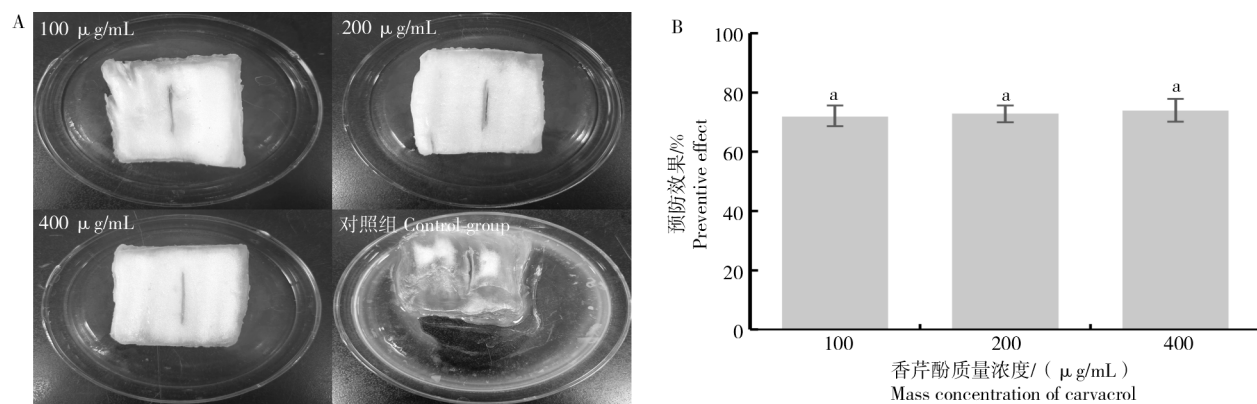
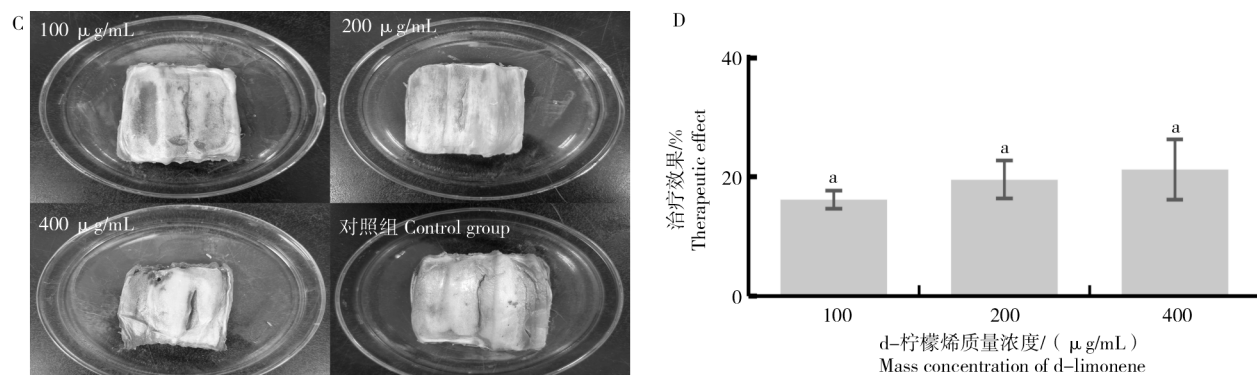


图 5 香芹酚的预防效果

Fig.5 Preventive effects of carvacrol

2.3.2 治疗效果比较 从图6—8可以看出,3种植物源活性成分对接种病菌的白菜叶片均有明显的治疗效果。100、200、400  $\mu\text{g/mL}$  质量浓度处理下,d-柠檬烯组的治疗效果分别是16.17%、19.55%和21.31%;丁香酚组的治疗效果分别为50.34%、

52.02%和51.35%;香芹酚组的治疗效果分别为72.84%、74.21%和74.56%。LSD多重比较表明,100、200、400  $\mu\text{g/mL}$  的d-柠檬烯的治疗效果间无显著差异,同样地,这3种浓度梯度的丁香酚和香芹酚的治疗效果间也无显著差异。



C为治疗组与对照组白菜叶片腐烂面积对比;D为治疗组对白菜叶片治疗效果的方差分析结果。图7、8同

C compared the rot areas on Chinese cabbage leaves between treatment groups and the control group. D showed the ANOVA results of therapeutic effects on Chinese cabbage leaves. The same as Fig. 7, 8

图6 d-柠檬烯的治疗效果

Fig.6 Therapeutic effects of d-limonene

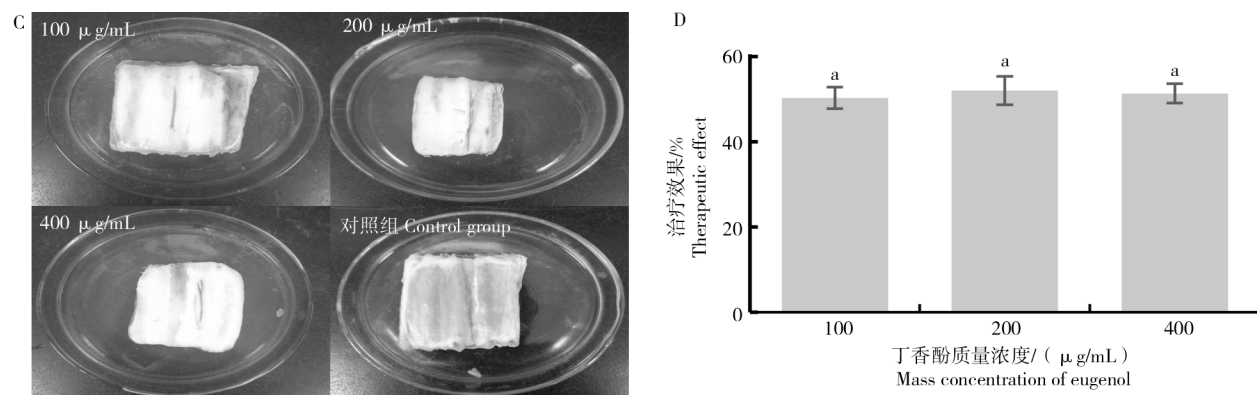


图7 丁香酚的治疗效果

Fig.7 Therapeutic effects of eugenol

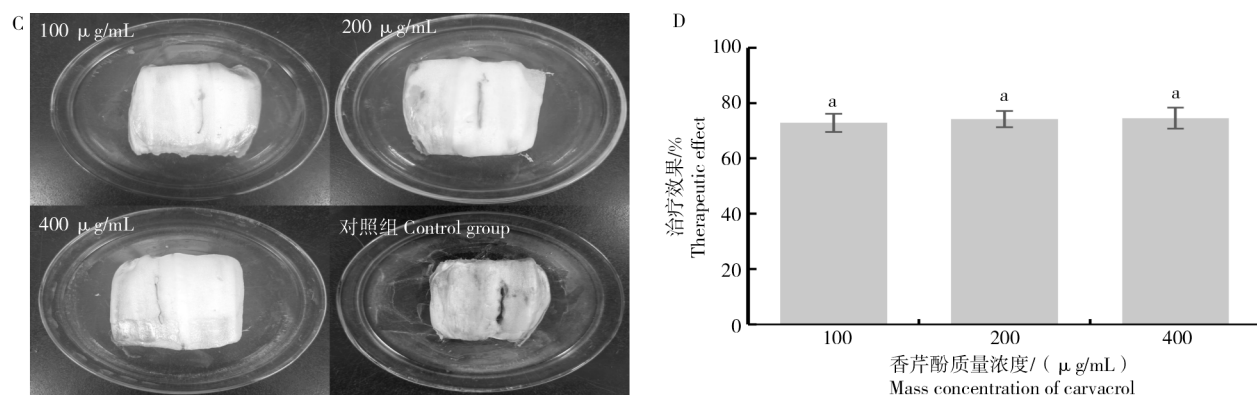
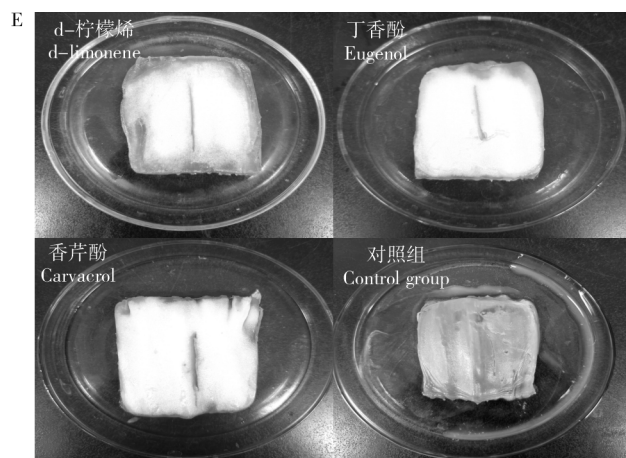


图8 香芹酚的治疗效果

Fig.8 Therapeutic effects of carvacrol

2.3.3 d-柠檬烯、丁香酚和香芹酚的防治效果比较 从图9、10可以看出,香芹酚对Pcc的预防效果和治疗效果(分别为72.65%、73.61%)均显著高

于丁香酚(预防效果49.13%,治疗效果50.36%)和d-柠檬烯(预防效果15.58%,治疗效果16.10%)( $P<0.05$ )。



E为100  $\mu\text{g/mL}$ 下预防组与对照组白菜叶片腐烂面积对比;F为预防组对白菜叶片预防效果的方差分析结果。不同小写字母表示组别间在0.05水平上差异显著。图10—12同

E compared the rot areas on Chinese cabbage leaves between preventive groups(100  $\mu\text{g/mL}$ ) and the control group. F presented the ANOVA results of preventive effects on Chinese cabbage leaves. Different lowercase letters represented significant differences at the level of 0.05. The same as Fig.10—12

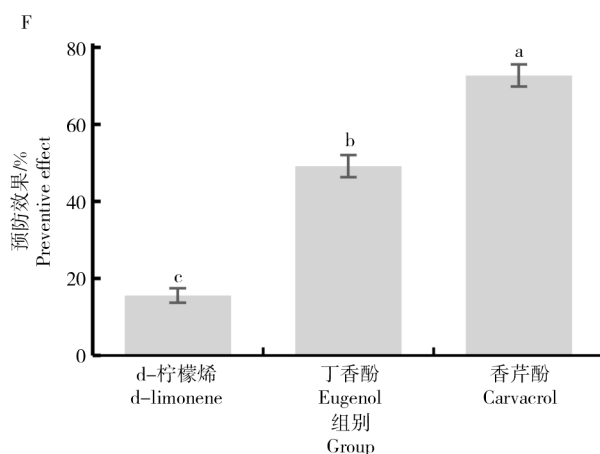
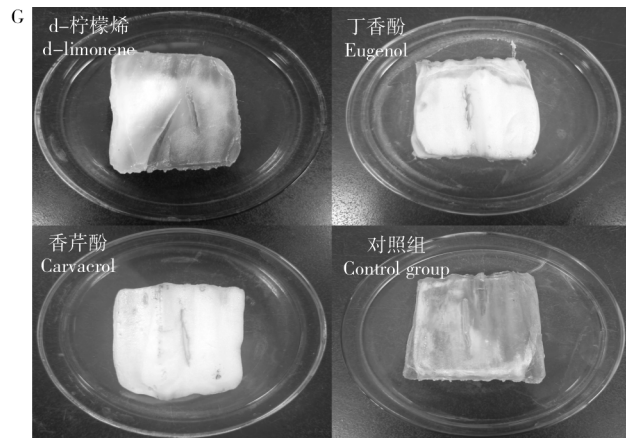


图9 d-柠檬烯、丁香酚和香芹酚预防效果比较

Fig.9 Comparison of preventive effects of d-limonene, eugenol, and carvacrol



G为100  $\mu\text{g/mL}$ 下治疗组与对照组白菜叶片腐烂面积对比;H为治疗组对白菜叶片治疗效果的方差分析结果

G compared the rot areas on Chinese cabbage leaves between treatment groups(100  $\mu\text{g/mL}$ ) and the control group. H presented the ANOVA results of therapeutic effects on Chinese cabbage leaves

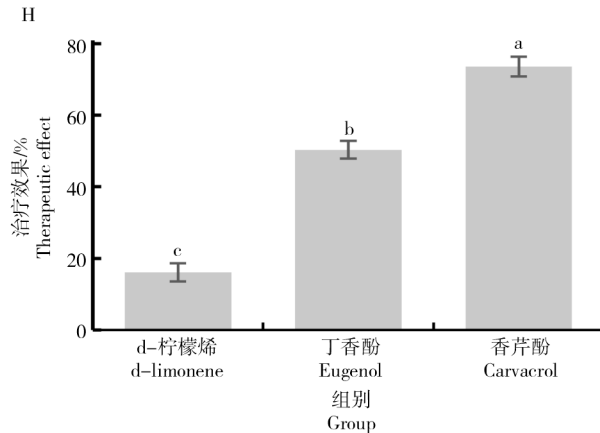


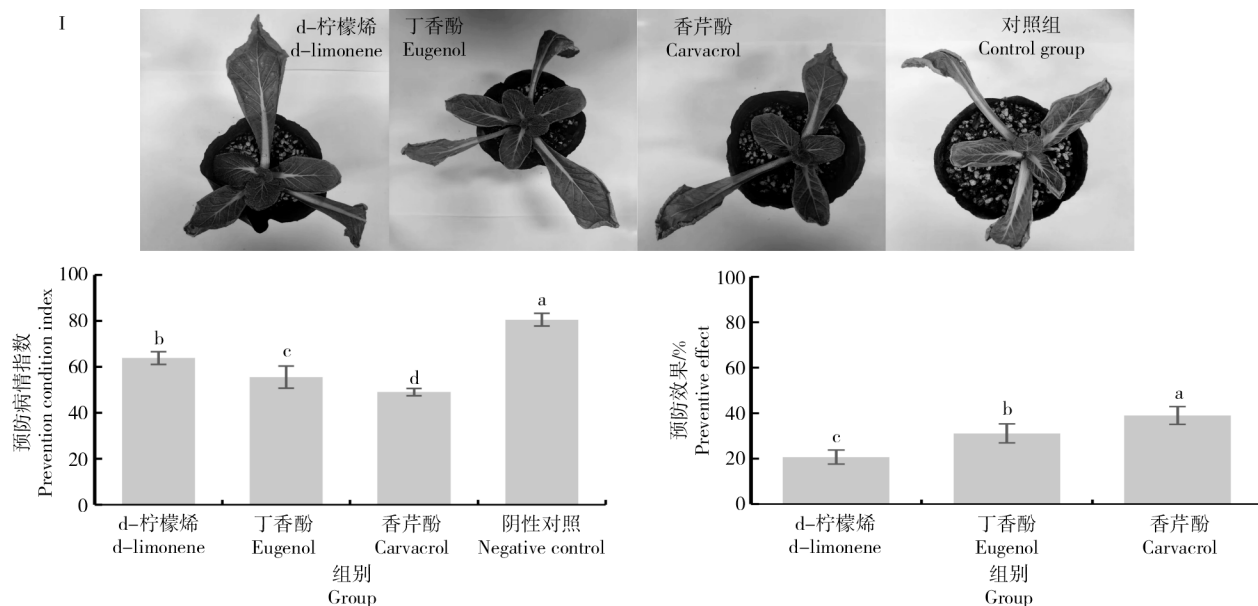
图10 d-柠檬烯、丁香酚和香芹酚治疗效果比较

Fig.10 Comparison of therapeutic effects of d-limonene, eugenol, and carvacrol

## 2.4 白菜软腐病盆栽防治试验结果分析

2.4.1 盆栽预防效果比较 从图11可以看出,3种植物源活性成分对白菜幼苗均有明显的预防效果。d-柠檬烯组、丁香酚组、香芹酚组和对照组对白菜幼苗的预防病情指数分别是63.89、55.56、49.07和80.56。经LSD多重比较后,3种植物源活

性成分与对照组相比病情指数均显著降低( $P<0.05$ )。d-柠檬烯组、丁香酚组和香芹酚组的预防效果分别是20.67%、31.10%和38.99%。经LSD多重比较后,香芹酚的预防效果显著优于d-柠檬烯和丁香酚( $P<0.05$ )。



I为预防组与对照组白菜幼苗感染程度对比

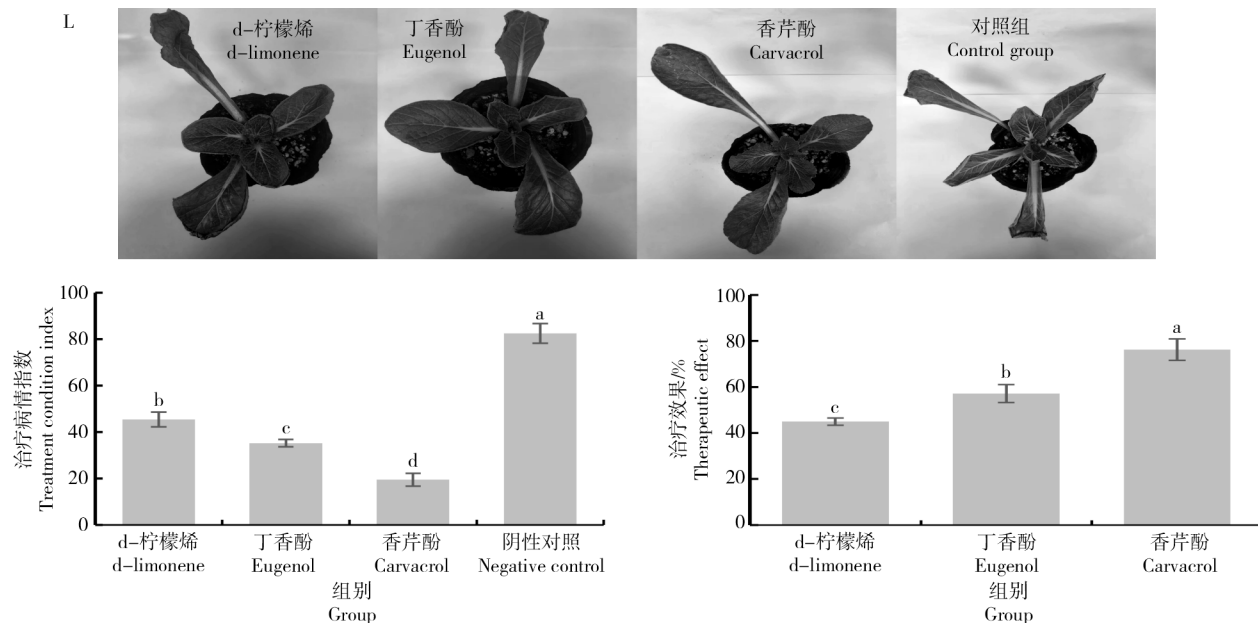
I compared the infection severity on Chinese cabbage seedlings between preventive groups and the control group

图 11 d-柠檬烯、丁香酚和香芹酚盆栽预防效果比较

Fig.11 Comparison of potted preventive effects of d-limonene, eugenol, and carvacrol

2.4.2 盆栽治疗效果比较 从图 12 可以看出,3 种植物源活性成分对白菜幼苗均有明显的治疗效果。d-柠檬烯组、丁香酚组、香芹酚组和对照组对白菜幼苗的治疗病情指数分别是 45.37、35.19、19.44 和 82.41。经 LSD 多重比较后,3 种植物源活性成分与

对照组相比病情指数均显著降低( $P < 0.05$ )。d-柠檬烯组、丁香酚组和香芹酚组的治疗效果分别是 44.97%、57.18% 和 76.25%。经 LSD 多重比较后,香芹酚的治疗效果显著优于 d-柠檬烯和丁香酚( $P < 0.05$ )。



L为治疗组与对照组白菜幼苗感染程度对比

L compared the infection severity on Chinese cabbage seedlings between treatment groups and the control group

图 12 d-柠檬烯、丁香酚和香芹酚盆栽治疗效果比较

Fig.12 Comparison of potted treatment effects of d-limonene, eugenol, and carvacrol

### 3 结论与讨论

抑菌圈法是通过测量待测药物在琼脂平板中扩散后所形成的透明圈来评价抑菌效果的方法<sup>[26]</sup>。抑菌圈法有操作简便、直观评估等优点,被广泛应用于抗菌药物筛选等领域<sup>[27]</sup>。本研究通过抑菌圈试验比较了3种植物源活性成分对Pcc的抑菌效果。独立样本 $t$ 检验结果显示,香芹酚的抑菌效果显著优于丁香酚和d-柠檬烯。MIC试验是通过梯度稀释法来确定抑制微生物(细菌、真菌等)生长的最低抑菌浓度<sup>[28]</sup>。MIC试验有灵敏度高、重现性好等优点,可被用于比较不同药物对同一病原菌的抑菌效果<sup>[26]</sup>。通过MIC试验测定了3种植物源活性成分对Pcc的MIC值,结果显示,香芹酚的MIC为0.125 0 mg/mL,远低于丁香酚(0.500 0 mg/mL)和d-柠檬烯(2.000 0 mg/mL)的MIC。抑菌圈试验和MIC试验均表明,香芹酚相较于丁香酚和d-柠檬烯具有更好的抑菌活性。香芹酚的抑菌效果显著优于丁香酚和d-柠檬烯,其原因可能是在于其独特的化学结构。香芹酚具有酚羟基,欧凯玉等<sup>[29]</sup>研究表明,酚羟基具有多靶点的作用机制。d-柠檬烯缺乏关键的酚羟基,这可能是其对白菜软腐病菌的抑菌效果低于香芹酚的原因。另外,香芹酚的邻甲基-异丙基骨架相比于丁香酚的甲氧基-烯丙基骨架具有更强的亲脂性,使香芹酚更易穿透细胞膜的磷脂双层,从而破坏细胞膜结构的完整性<sup>[30]</sup>。

离体组织筛选法是将植物部分组织、器官等作为试验材料,以评价化合物杀菌活性的试验方法<sup>[28]</sup>。采收后的白菜可视为已经离体的植物器官,因此,本研究尝试以白菜叶片作为试验材料模拟整颗白菜进行离体组织防效试验,以此分析储藏期间喷施3种植物源活性成分对白菜的防治效果,其结果既可为白菜在储存期施用抑菌剂提供建议,又可为盆栽试验提供浓度数据参考。通过离体试验比较3种浓度活性成分对于白菜软腐病的防治效果,结果表明,100  $\mu$ g/mL与400  $\mu$ g/mL的防治效果相当。在100  $\mu$ g/mL质量浓度下,d-柠檬烯、丁香酚和香芹酚的预防效果和治疗效果分别为15.58%和16.10%、49.13%和50.36%、72.65%和73.61%。通过LSD多重比较,得出100  $\mu$ g/mL施药浓度下香芹酚的防治效果均显著优于丁香酚

和d-柠檬烯的防治效果。d-柠檬烯相较于香芹酚和丁香酚有着更强的挥发性<sup>[30]</sup>。在离体组织筛选试验中,可能由于d-柠檬烯的挥发,导致其防治效果显著低于香芹酚和丁香酚的防治效果。香芹酚的防治效果显著强于丁香酚,可能由于香芹酚相较于丁香酚有着更好的亲脂性,能够更有效附着在具有蜡质层(主要成分为烷烃类非极性成分)的白菜叶片表皮,从而发挥出更好的防治效果<sup>[31]</sup>。ZHOU等<sup>[32]</sup>以白菜叶片作为离体组织试验的研究对象,发现125  $\mu$ g/mL硫酸铜的治疗效果仅为26.14%。本研究中,100  $\mu$ g/mL香芹酚的治疗效果远高于硫酸铜,说明香芹酚在较低的浓度即可达到较好的治疗效果。由于离体组织筛选试验中,香芹酚在100  $\mu$ g/mL质量浓度下就可达到显著的防治效果。因此,实际应用中,可将香芹酚作为植物源农药应用于白菜采后储藏期间的软腐病防治。

治疗效果与预防效果的差别可能与香芹酚的挥发特性有关。相较于治疗试验中香芹酚直接作用于已被接种Pcc的白菜叶片上,预防试验则是在白菜叶片上喷洒香芹酚24 h后再接种Pcc。香芹酚存在一定的挥发性,预防试验中的香芹酚可能在未接种Pcc前就挥发散失了一部分,导致与Pcc有效接触的药量减少<sup>[33]</sup>。另外,盆栽试验中选择的施药方式为喷洒施药,虽然可以增加香芹酚与叶面的接触面积,使得香芹酚分布均匀。但与此同时,香芹酚也会更容易挥发逸散,从而导致叶片上的药量减少。因此,使用香芹酚作为植物源农药杀菌时,建议制备成微囊悬浮剂等可减少药剂挥发的剂型,于病菌侵染发病后迅速施药,从而达到更好的防治效果<sup>[34]</sup>。

本研究结果表明,香芹酚相比丁香酚和d-柠檬烯对Pcc的抑菌效果更好,香芹酚对白菜软腐病的防治效果更优。研究结果可为后续大田试验提供浓度参考,也为香芹酚剂型选择提供科学依据。

#### 参考文献:

- [1] 胡子逸,黄红荣,陈新平,等. 大白菜不同层次营养价值和健康风险评价[J]. 食品科学,2022,43(3):114-120.  
HU Z Y, HUANG H R, CHEN X P, et al. Nutritional value and health risk assessment of different layers of Chinese cabbage[J]. Food Science, 2022, 43(3): 114-120.

- [2] 王敏,宋雨萌,刘文杰,等. 7种药剂对白菜黑斑病菌的毒力及增效配方筛选[J]. 现代农药, 2023, 22(1): 64-67.  
WANG M, SONG Y M, LIU W J, et al. Toxicity determination and synergistic mixtures screening of seven fungicides on *Alternaria brassicae*[J]. Modern Agrochemicals, 2023, 22(1): 64-67.
- [3] LI X Q, REN X X, IBRAHIM E, et al. Response of Chinese cabbage (*Brassica rapa* subsp. *pekinensis*) to bacterial soft rot infection by change of soil microbial community in root zone[J]. Frontiers in Microbiology, 2024, 15: 1401896.
- [4] 代艳娜,刘青海,潘虎,等. 大白菜软腐病登记农药及防治效果分析[J]. 农业与技术, 2020, 40(9): 15-19.  
DAI Y N, LIU Q H, PAN H, et al. Analysis on registered pesticides and control effect of soft rot of Chinese cabbage[J]. Agriculture and Technology, 2020, 40(9): 15-19.
- [5] 张世昌,张宇璐,谭晓东,等. 拮抗链霉菌 26B 的筛选及其在不同含水量土壤中对白菜软腐病的防病效果[J]. 中国生物防治学报, 2023, 39(1): 157-166.  
ZHANG S C, ZHANG Y L, TAN X D, et al. Screening of antagonistic *Streptomyces* 26B and its efficacy on the control of soft rot disease of Chinese cabbage in soil with different water content [J]. Chinese Journal of Biological Control, 2023, 39(1): 157-166.
- [6] TU Q B, SHI H C, LI P, et al. Antibacterial activity of ferulic acid ester against *Ralstonia solanacearum* and its synergy with essential oils[J]. Sustainability, 2022, 14(24): 16348.
- [7] 杜晓静,梁浩,钱玺丞. 博落回生物碱和茶皂素对 4 种蔬菜病原菌的室内联合毒力[J]. 山西农业科学, 2024, 52(3): 109-115.  
DU X J, LIANG H, QIAN X C. Combined toxicity of *Macleaya* alkaloids and tea saponin against four vegetable pathogens[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2024, 52(3): 109-115.
- [8] 李娇,陈云坤,魏倩倩,等. 多种植物提取物对黄瓜靶斑病菌的抑制作用[J]. 山西农业科学, 2021, 49(6): 711-714.  
LI J, CHEN Y K, WEI Q Q, et al. Inhibitory effect of various plant extracts on *Corynespora cassiicola*[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2021, 49(6): 711-714.
- [9] 孟峰峰,杨祥飞,吴晴阳,等. 基于中药复配剂的烤烟化学农药减量增效研究[J]. 河南农业科学, 2023, 52(2): 103-112.  
MENG L F, YANG X F, WU Q Y, et al. Research on the amount reduction and efficiency increase of chemical pesticide in flue-cured tobacco based on Chinese herbal compound[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2023, 52(2): 103-112.
- [10] 郭一博,李嘉艺,杨炳南,等. 二十一种植物精油对草地贪夜蛾的产卵驱避和拒食活性评价[J]. 昆虫学报, 2024, 67(12): 1617-1623.  
GUO Y B, LI J Y, YANG B N, et al. Evaluation of oviposition deterrent and antifeedant activities of 21 plant essential oils against *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae) [J]. Acta Entomologica Sinica, 2024, 67(12): 1617-1623.
- [11] 王宁,蔺元秀,吴志涛,等. 4 种芳香气味的植物对有翅桃蚜的驱避效果分析[J]. 山西农业科学, 2024, 52(1): 124-130.  
WANG N, LIN Y X, WU Z T, et al. Repellent effect of four aromatic plants on *Myzus persicae* with wings[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2024, 52(1): 124-130.
- [12] HAJIAN-MALEKI H, BAGHAEE-RAVARIS, MOGHADAM M. Herbal essential oils exert a preservative effect against the potato soft rot disease[J]. Scientia Horticulturae, 2021, 285: 110192.
- [13] ZHANG J F, TIAN Y Q, WANG J L, et al. Inhibitory effect and possible mechanism of oregano and clove essential oils against *Pectobacterium carotovorum* subsp. *carotovorum* as onion soft rot in storage[J]. Postharvest Biology and Technology, 2023, 196: 112164.
- [14] 王莹,刘晨曦,王新炎,等. 牛至精油的提取工艺优化及成分分析[J]. 农学报, 2024, 14(8): 56-62.  
WANG Y, LIU C X, WANG X Y, et al. Extraction process optimization and component analysis of oregano essential oil [J]. Journal of Agriculture, 2024, 14(8): 56-62.
- [15] 于芯宜,徐家延,陈方圆,等. 5 种植物精油抗菌性能研究及特征成分分析[J]. 保鲜与加工, 2022, 22(10): 1-9.  
YU X Y, XU J Y, CHEN F Y, et al. Investigation on antibacterial properties and characteristic components of five kinds of plant essential oils[J]. Storage and Process, 2022, 22(10): 1-9.
- [16] 张丰芸,叶文芳,王晓畅,等. 柑橘类植物精油指纹图谱分析[J]. 广东化工, 2024, 51(4): 139-142.  
ZHANG F Y, YE W F, WANG X C, et al. Fingerprint analysis of essential oils from *Citrus* plants[J]. Guangdong Chemical Industry, 2024, 51(4): 139-142.
- [17] 田慧鑫,于婵,杨帆,等. 河南省牛至及其近缘种甘牛至 SRAP 遗传多样性分析与指纹图谱构建[J]. 河南农业科学, 2025, 54(1): 55-65.  
TIAN H X, YU C, YANG F, et al. Genetic diversity analysis and fingerprint construction of Henan *Origanum vulgare* and its related species *Origanum majorana* by SRAP markers[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2025, 54(1): 55-65.
- [18] 安福涛,刘欣宇,孙富余. 6 种植物源农药在黄瓜白粉病防治中的应用效果[J]. 中国植保导刊, 2023, 43(5): 63-65.  
AN F T, LIU X Y, SUN F Y. Application effect of six botanical pesticides on cucumber powdery mildew control[J]. China Plant Protection, 2023, 43(5): 63-65.
- [19] 赵杰,田琼金,聂蔓茹,等. 红芸豆根腐病拮抗内生细菌的筛选和鉴定[J]. 山西农业科学, 2023, 51(10): 1226-1232.  
ZHAO J, TIAN Q J, NIE M R, et al. Screening and identification of antagonistic endophytic bacteria against pathogen of red kidney bean root rot[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2023, 51(10): 1226-1232.
- [20] 朱能斌,陈毅凌,岳华梅,等. 40 种中草药及其复方对弗氏柠檬酸杆菌的体外抑菌作用[J]. 武汉轻工大学学报, 2024, 43(5): 18-24.  
ZHU N B, CHEN Y L, YUE H M, et al. *In vitro* bacteriostatic studies on *Citrobacter freundii* by 40 Chinese herbal medicines and their combinations[J]. Journal of Wuhan Polytechnic University, 2024, 43(5): 18-24.
- [21] 马海会,邢嘉倩,吴永娜,等. 连翘绿茶不同加工阶段提取物的抑菌及抗氧化活性分析[J]. 山西农业科学, 2023, 51(11): 1339-1346.  
MA H H, XING J Q, WU Y N, et al. Analysis of antibacterial

- and antioxidant activities of *Forsythia suspensa* green tea extracts at different processing stages[J]. 山西农业科学, 2023, 51(11):1339-1346.
- [22] NADEEM A, SHAHZAD H, AHMED B, et al. Phytochemical profiling of antimicrobial and potential antioxidant plant: *Nepeta cataria*[J]. Frontiers in Plant Science, 2022, 13:969316.
- [23] ZHAN X, WANG R, ZHANG M M, et al. Trichoderma-derived emodin competes with ExpR and ExpI of *Pectobacterium carotovorum* subsp. *carotovorum* to biocontrol bacterial soft rot[J]. Pest Management Science, 2024, 80(3):1039-1052.
- [24] LI H Y, LUO Y, ZHANG X S, et al. Trichokonins from *Trichoderma pseudokoningii* SMF2 induce resistance against Gram-negative *Pectobacterium carotovorum* subsp. *carotovorum* in Chinese cabbage[J]. FEMS Microbiology Letters, 2014, 354(1):75-82.
- [25] REN J P, PETZOLDT R, DICKSON M H. Genetics and population improvement of resistance to bacterial soft rot in Chinese cabbage[J]. Euphytica, 2001, 117(3):197-207.
- [26] BALOUIRI M, SADIKI M, IBNSOUDA S K. Methods for *in vitro* evaluating antimicrobial activity: a review[J]. Journal of Pharmaceutical Analysis, 2016, 6(2):71-79.
- [27] 秦虎强, 赵志博, 高小宁, 等. 猕猴桃细菌性溃疡病菌对17种杀菌剂的敏感性及其不同药剂田间防效[J]. 西北农业学报, 2015, 24(9):145-151.
- QIN H Q, ZHAO Z B, GAO X N, et al. Bactericidal activities of seventeen bactericides and their field applications against *Pseudomonas syringae* pv. *actinidiae*[J]. Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica, 2015, 24(9):145-151.
- [28] 李兴海, 李北兴. 农药学实验技术与指导[M]. 3版. 北京: 化学工业出版社, 2023:186-215.
- LI X H, LI B X. Experimental technology and guidance of pesticide science[M]. 3rd ed. Beijing: Chemical Industry Press, 2023:186-215.
- [29] 欧凯玉, 逢建龙, 张一敏, 等. 天然酚类化合物的抑菌作用及在肉与肉制品中的应用研究进展[J]. 食品科学, 2023, 44(9):358-366.
- OU K Y, PANG J L, ZHANG Y M, et al. A review of the antimicrobial activity of natural phenolic compounds and their applications in meat and meat products[J]. Food Science, 2023, 44(9):358-366.
- [30] 邢其毅, 裴伟伟, 徐瑞秋, 等. 基础有机化学-下册[M]. 4版. 北京: 北京大学出版社, 2017:1-27.
- XING Q Y, PEI W W, XU R Q, et al. Basic organic chemistry[M]. 4th ed. Beijing: Peking University Press, 2017:1-27.
- [31] 陆伟杰, 郑伟尉, 吴砚农, 等. 十字花科植物蜡质形成特性及分子机制研究进展[J]. 浙江农林大学学报, 2021, 38(1):205-213.
- LU W J, ZHENG W W, WU Y N, et al. Research review on features and molecular mechanism of wax formation in Brassicaceae[J]. Journal of Zhejiang A & F University, 2021, 38(1):205-213.
- [32] ZHOU Q, TIAN J L, WANG X T, et al. Revitalizing copper's efficacy: using carvacrol to overcome copper tolerance in *Pectobacterium carotovorum* subsp. *carotovorum* for enhanced prevention of soft rot disease during crop storage[J]. Scientia Horticulturae, 2024, 338:113559.
- [33] 王双辉, 罗林, 罗丽娟, 等. 香芹酚和丁香酚对杨梅致病菌的抑菌作用[J]. 湖南农业科学, 2017(3):63-65.
- WANG S H, LUO L, LUO L J, et al. Inhibition effects of carvacrol and eugenol on bayberry pathogens[J]. Hunan Agricultural Sciences, 2017(3):63-65.
- [34] 席涵, 刘秀, 刘东源, 等. 农药剂型研发及发展趋势[J]. 广东化工, 2023, 50(14):57-61.
- XI H, LIU X, LIU D Y, et al. The exploration and development trend of pesticide formulations[J]. Guangdong Chemical Industry, 2023, 50(14):57-61.