

DOI:10.13718/j.cnki.zwyx.2025.01.003

## 东莨菪内酯与瑞香素诱导柑橘抗溃疡病的效果评价

麻子君, 吴雅倩, 金鑫, 丁伟, 李石力

西南大学 植物保护学院, 重庆 400715

**摘要:** 柑橘溃疡病是柑橘生产中最为严重的细菌性病害之一, 可对柑橘产量和品质造成巨大影响。抗性诱导剂作为绿色防治生物病害的重要工具, 其研究与应用日益受到关注。探究抗性诱导剂东莨菪内酯(SC)和瑞香素(DA)用于防治柑橘溃疡病的作用效果。结果表明, 东莨菪内酯和瑞香素对柑橘溃疡病菌没有直接作用; 经东莨菪内酯和瑞香素处理8~24 h, 柑橘抗性相关防御酶POD、PAL和CAT的活性高于对照, 具有诱导激活柑橘免疫系统, 提高柑橘抗性的作用; 田间试验中, 东莨菪内酯处理对柑橘溃疡病的防治效果为62.07%, 瑞香素处理对柑橘溃疡病的防治效果为75.86%; 东莨菪内酯和瑞香素处理后溃疡病病情指数增长减慢, 有效延缓了溃疡病蔓延, 具有一定的防治效果。

**关键词:** 柑橘溃疡病; 抗性诱导; 东莨菪内酯;

瑞香素; 植物防御酶

中图分类号: S482

文献标志码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



文章编号: 2097-1354(2025)01-0020-08

## Evaluation of Scopoletin and Daphnetin for Induction of Citrus Resistance to Canker Disease

MAZijun, WUYaqian, JIN Xin, DINGWei, LISHili

College of Plant Protection, Southwest University, Chongqing 400700, China

**Abstract:** Citrus canker disease is one of the most serious bacterial diseases in citrus production. Green control with resistance-inducer is an important means of biological control of the disease. In this study, we mainly investigated the effect of Scopoletin and Daphnetin on the control of citrus canker disease. The effects of Scopoletin and Daphnetin on the citrus canker pathogens and

收稿日期: 2024-06-06

基金项目: 重要果树溃疡病灾变机制与综合防控技术研究(2022YFD1400200)。

作者简介: 麻子君, 硕士研究生, 主要从事柑橘溃疡病的生物防治研究。

通信作者: 丁伟, 教授。

the activity of citrus defense enzymes were detected by setting clear water treatment as the control. The results showed that Scopoletin and Daphnetin had no direct inhibition effect on *Xanthomonas citri* subsp. *citri*. The enzyme activities of POD, PAL, and CAT were significantly elevated after treatment with Scopoletin and Daphnetin compared to controls at 8-24 hours post-treatment, suggesting these compounds may induce and activate the immune response in citrus plants, thereby enhancing their resistance. In the field test, the control effect of Scopoletin treatment on citrus canker disease reached 62.07% and that of Daphnetin treatment was 75.86%; Scopoletin and Daphnetin treatment slowed down the growth of the canker disease index and effectively slowed down the spread of canker disease, which has a certain preventive effect.

**Key words:** citrus canker disease; resistance induction; Scopoletin; Daphnetin; plant defense enzymes

柑橘溃疡病是柑橘种植过程中危害最大的细菌性病害之一,由柑橘黄单胞菌柑橘亚种(*Xanthomonas citri* subsp. *citri*, Xcc)引发,可对柑橘产业造成重大经济损失<sup>[1-7]</sup>。目前,柑橘溃疡病尚无根治方法,大多数柑橘种植区均以化学防治为主,且柑橘品种与该病害的发生密切相关<sup>[8]</sup>。在柑橘溃疡病的绿色防控方面,当前主要运用抗性品种栽培、生防微生物以及抗性诱导剂等技术措施<sup>[2, 9-12]</sup>。然而,用于柑橘溃疡病防治的抗性诱导剂数量种类有限,如烟酰胺腺嘌呤二核苷酸、氨基酸甲硫氨酸等处理均能提高柑橘树对溃疡病的抗性<sup>[13-14]</sup>。

近年来,众多研究表明抗性诱导剂可以诱导植物的抗病性,减少植物病害进一步发展蔓延<sup>[15-16]</sup>。天然香豆素类化合物是一类存在于芸香科、菊科、豆科等植物中的次生代谢产物,常以游离态或糖苷化形态存在,香豆素的生物合成在植物响应逆境胁迫中发挥着重要作用<sup>[17-18]</sup>。研究表明,香豆素类化合物具有抗菌和诱导植物抗性的作用<sup>[19]</sup>。有学者发现,东莨菪内酯和瑞香素是能够诱导植物产生抗性的化合物<sup>[20-22]</sup>。香豆素类化合物中的东莨菪内酯和瑞香素,在植物体内具有抗氧化作用,可以激活烟草、大豆、棉花、番茄等植物的抗性,帮助其抵御病害<sup>[23-25]</sup>。本研究从诱导植物抗性的角度出发,探究东莨菪内酯和瑞香素对柑橘抗性的影响,评估二者对柑橘溃疡病的防治效果,为防治柑橘溃疡病挖掘新的抗性诱导剂。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试样品

柑橘叶片样本来自重庆西南大学植物保护学院天然产物农药研究室温室种植的脐橙。脐橙是易感病品种,与田间试验品种一致。

### 1.2 供试菌株

供试病原菌为柑橘黄单胞菌柑橘亚种(*Xanthomonas citri* subsp. *citri*, Xcc),柑橘溃疡病菌由上海交通大学农业与生物学院陈功友老师实验室提供。

### 1.3 供试试剂与仪器

东莨菪内酯(Scopoletin, SC, 98%)购于北京索莱宝生物科技有限公司;瑞香素(Daphnetin, DA, 98%)购于上海源叶生物科技有限公司;过氧化氢酶(CAT)试剂盒、过氧化物酶(POD)试剂盒、苯丙氨酸解氨酶(PAL)试剂盒均购于北京索莱宝生物科技有限公司。UV1000型单光束紫外-可见分光光度计购于上海天美科学仪器有限公司;1500型全波长酶标仪购于美国 Thermo 公司。

LB培养基(胰蛋白胨 10 g/L、酵母膏 5 g/L、NaCl 10 g/L); NA培养基(蛋白胨 5 g/L, 酵母膏 1 g/L, 牛肉膏 3 g/L, 葡萄糖 10 g/L, 琼脂 15 g/L), 实验所用培养基配制完成后, 于 121 °C 条件下高压灭菌 20 min。

#### 1.4 实验设计与处理

##### 1.4.1 东莨菪内酯和瑞香素对柑橘溃疡病菌的影响

在 LB 液体培养基上活化培养已保存的柑橘溃疡病菌, 置于 28 °C、180 r/min 旋转震荡器中, 培养至 OD<sub>600</sub> 为 0.8~1.0, 待后续实验使用。取 100 mL 的 NA 培养基待冷至 45 °C (可用手拿起即可), 加入东莨菪内酯或瑞香素轻轻摇动, 混合均匀, 每个培养皿约加入 10 mL 带抗性诱导剂的培养基, 待培养基完全冷却凝固。每个平板滴加 3 个呈三角形分布的病原菌菌点, 然后在 28 °C 条件下培养 24~48 h, 观察平板上病原菌的生长情况。

##### 1.4.2 东莨菪内酯和瑞香素对柑橘防御酶的影响

将东莨菪内酯和瑞香素分别喷施在离体干净健康的脐橙叶片上, 分别于 4、8、12、24 和 48 h 共 5 个时间点进行随机采样, 液氮冷冻后保存于 -80 °C 冰箱。叶片采集的时间参照王曼<sup>[26]</sup>的方法。

处理 1: 东莨菪内酯(16 μmol/L); 处理 2: 瑞香素(16 μmol/L); 处理 3: 清水对照处理。

通过对植物抗性相关防御酶的活性检测, 如苯丙氨酸解氨酶、过氧化物酶、过氧化氢酶等, 验证东莨菪内酯和瑞香素对柑橘植株抗病性的影响<sup>[26-32]</sup>。

取待测样品置于液氮冷浴的研钵中研磨至粉末, 然后取 0.1 g 于无酶管中, 缓慢加入 1 mL 对应提取液处理样品, 冰浴匀浆, 4 °C 离心 10 min, 取上清液即为粗酶液, 置于冰上待测。按照酶活试剂盒说明书测定 CAT、PAL 和 POD 活性。

##### 1.4.3 东莨菪内酯和瑞香素对柑橘溃疡病的影响

试验在重庆市奉节县康乐镇柑橘种植园区开展(31°07'N, 109°23'E, 海拔 300~400 m)。试验共设 5 个处理, 每个处理设置 3 个小区, 每个小区有 4 株柑橘树, 处理小区采用随机区组排列法。各小区的品种、树龄、树势、管理水平等均基本一致。

处理 1: 喷施浓度为 16 μmol/L 的东莨菪内酯; 处理 2: 喷施浓度为 16 μmol/L 的瑞香素; 处理 3: 喷施清水作为对照处理。

对柑橘植株进行整株喷施处理, 每 15 d 喷施一次, 共喷施 2 次。此外, 根据柑橘溃疡病的实际发生情况酌情用药。

病害调查: 参照 GB/T 17980.103—2004 调查溃疡病发生情况。在每株果树的东、西、南、北 4 个方位各调查 2 个枝梢的全部叶片以及 5 个果实, 记录枝梢、叶片和果实上溃疡病的发病情况, 包括调查的总果数、各级病果数等, 以便计算病情指数。

叶(果)病斑分级标准如下:

0 级: 每个叶片(果)上均无病斑; 1 级: 每个叶片(果)上有 1~5 个病斑; 3 级: 每个叶片(果)上有 6~10 个病斑; 5 级: 每个叶片(果)上有 11~15 个病斑; 7 级: 每个叶片(果)上有 16~20 个病斑; 9 级: 每个叶片(果)上有 21 个以上。

发病率(%) = 病叶(果)数 / 调查的总叶(果)数 × 100%

病情指数 = [Σ(各级病叶(果)数 × 相对级数值)] / [调查总叶(果)数 × 9] × 100

防治效果(%)=(对照组病情指数-处理组病情指数)/对照组病情指数×100%

### 1.5 数据分析

使用 Excel 2016 整理汇总数据,使用 IBM SPSS Statistics 24 进行方差分析以及显著性检验( $p < 0.05$ ),使用 GraphPad Prism9 绘图。

## 2 结果与分析

### 2.1 东莨菪内酯和瑞香素对病原菌的影响

平板试验检测东莨菪内酯和瑞香素对柑橘溃疡病菌生长的影响,结果如图 1 所示。由图 1 可知,病原菌 Xcc 可以在含有抗性诱导剂东莨菪内酯和瑞香素的平板上正常生长,表明抗性诱导剂 SC 和 DA 对柑橘溃疡病菌不存在直接的抑制作用,需进一步研究二者对柑橘植株的作用及其对柑橘溃疡病防治效果。

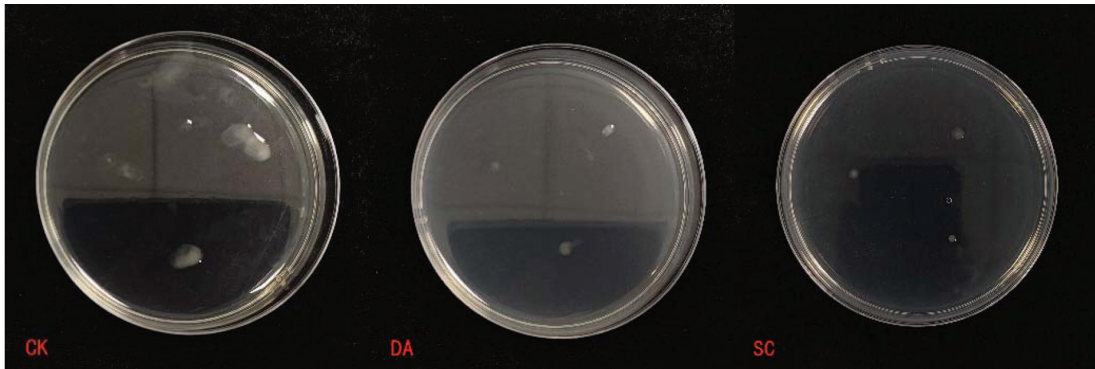
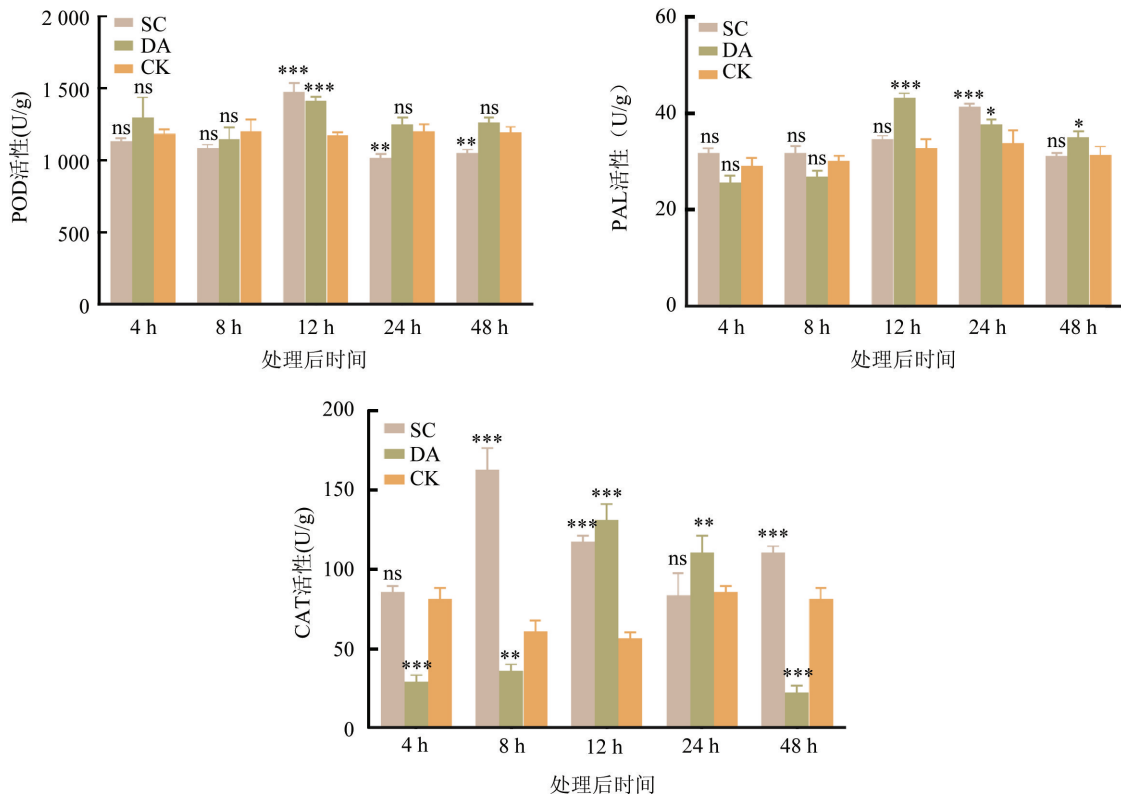


图 1 抗性诱导剂东莨菪内酯(SC)和瑞香素(DA)对病原菌 Xcc 的生长影响

### 2.2 东莨菪内酯和瑞香素诱导激活植物防御系统

采集经抗性诱导剂东莨菪内酯和瑞香素处理后的样品,通过试剂盒检测植物防御酶活性,结果如图 2 所示。由图 2 可知,柑橘叶片过氧化物酶活性在东莨菪内酯、瑞香素处理后的 48 h 内均呈现先上升后下降的趋势,在 12 h 活性最高,分别为 1 473.33 U/g 和 1 410 U/g,显著高于对照组的 1 173.33 U/g。柑橘叶片苯丙氨酸解氨酶(PAL)活性在东莨菪内酯、瑞香素处理后的 48 h 内均呈现先上升后下降的趋势,东莨菪内酯处理后在 24 h 活性达到最高,酶活性为 41.31 U/g;瑞香素处理后在 12 h 酶活性最高,酶活性达到 43.10 U/g,显著高于对照处理的酶活性。柑橘叶片过氧化氢酶活性在东莨菪内酯处理后 8 h 达到最高水平,为 162.72 U/g,处理 12 h 酶活性为 117.52 U/g,8 h 和 12 h 活性均显著高于对照处理,表明 SC 处理对柑橘 CAT 活性影响持久。瑞香素处理后,CAT 在处理 12 h 活性达到最高水平,为 131.08 U/g,处理后 24 h 活性为 110.74 U/g,均显著高于对照处理的酶活性;DA 处理在 12~24 h 内 CAT 维持较高的活性。柑橘防御酶的活性变化表明,抗性诱导剂东莨菪内酯(SC)和瑞香素(DA)处理诱导激活柑橘免疫系统,提高了柑橘的抗性。



注：\*、\*\*、\*\*\*表示组间数据比较差异具有统计学意义。

图2 东莨菪内酯和瑞香素对柑橘防御酶活性 POD、PAL 和 CAT 活性的影响

### 2.3 东莨菪内酯和瑞香素对柑橘溃疡病的防治效果

田间试验表明施用抗性诱导剂东莨菪内酯和瑞香素会对柑橘溃疡病发生的影响。田间试验地块柑橘溃疡病发生的平均病情指数达到 0.50, 喷施后 15 d 调查病害发生情况。抗性诱导剂东莨菪内酯和瑞香素处理后柑橘溃疡病的病情指数如图 3 所示。抗性诱导剂喷施处理后, 柑橘溃疡病发展蔓延趋势被遏制, 尤其是东莨菪内酯。第一次东莨菪内酯处理后, 柑橘溃疡病病情指数为 0.62, 瑞香素处理后的柑橘溃疡病病情指数为 0.309, 相较于未处理组的 1.42, 柑橘溃疡病发生情况明显减轻。第二次处理后柑橘溃疡病发生延缓, 其中东莨菪内酯处理的病情指数为 0.679, 相比于第一次试验处理后, 病情指数仅增加 0.062, 瑞香素处理病情指数为 0.432, 相比于第一次试验处理后, 病情指数仅增加 0.123, 对照处理病情指数增加 0.37。最终, 东莨菪内酯处理的防治效果为 62.07%, 瑞香素处理防治效果为 75.86% (表 1)。这是由于抗性诱导剂东莨菪内酯和瑞香素处理激活了柑橘的免疫系统, 柑橘抗性得到提升, 阻止了柑橘溃疡病的进一步蔓延。结果表明, 柑橘植株在经过抗性诱导剂东莨菪内酯和瑞香素处理后, 柑橘溃疡病的蔓延程度明显减轻。

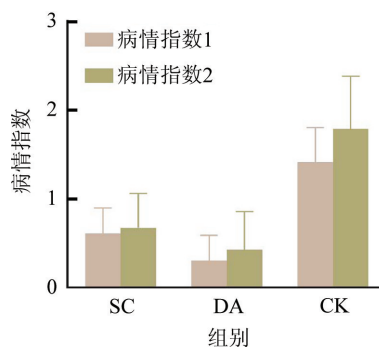


图3 东莨菪内酯和瑞香素处理后柑橘溃疡病的病情指数

表 1 东莨菪内酯和瑞香素对柑橘溃疡病的防治效果

处理	病情指数 1	防治效果 %	病情指数 2	防治效果 %
SC	0.620±0.283	56.33	0.679±0.385	62.07
DA	0.309±0.283	78.26	0.432±0.428	75.86
CK	1.42±0.385	—	1.79±0.595	—

### 3 讨论

香豆素类化合物东莨菪内酯和瑞香素源自于植物,在医药领域具有重要的应用价值,由于具有良好的杀虫、抗菌杀菌、杀螨等生物活性,因而在植物病虫害防控中也具有重要作用<sup>[18, 33-36]</sup>。东莨菪内酯具有杀螨作用,在亚致死剂量下能使朱砂叶螨种群的发育和繁殖速率降低,且不易产生抗药性<sup>[37]</sup>。当植物受到病原菌或外来物质刺激时,会合成更多的东莨菪碱内酯,从而提高植物的抗性<sup>[38]</sup>。有研究表明,0.5 mg/mL 的东莨菪内酯能够抑制烟草灰霉病菌的孢子萌发和菌丝生长<sup>[39]</sup>。另有研究表明,抗性诱导剂处理可以诱导激活植物免疫系统,提高植物抗性相关防御酶活性。POD、PPO、PAL、CAT 是植物体内主要的植物抗性防御酶,其活性与植物的抗性变化密切相关。杨亮等<sup>[40]</sup>研究发现,瑞香素能显著提高烟草体内 PPO、PAL 和 POD 的活性,从而有效防控烟草青枯病的发生。外源施用水杨酸、黄腐酸等可以显著提升烟草体内的 POD、PAL 等多种防御酶活性<sup>[41-42]</sup>。茉莉酸甲酯(MeJA)、乙酰水杨酸(ASA)和 β-氨基丁酸(BABA)等抗性诱导剂可以提高植物抗性相关防御酶活性,提高植物抗病性;叶面喷施 0.3 mmol/L 茉莉酸甲酯,诱导 3 次可显著降低宁杞 7 号叶斑病的自然发病率和病情指数<sup>[43]</sup>。本研究发现,东莨菪内酯和瑞香素对柑橘溃疡病菌没有杀菌或抑菌作用,但经东莨菪内酯和瑞香素处理 12 h 和 24 h 后,POD、PAL 和 CAT 的活性提高。本研究表明,抗性诱导剂东莨菪内酯(SC)和瑞香素(DA)的田间应用能增强植物抗性相关防御酶活性,降低柑橘溃疡病的蔓延速度,但不能治疗已经发生柑橘溃疡病的叶片。究其原因,可能是抗性诱导剂东莨菪内酯(SC)和瑞香素(DA)主要作用于植物免疫系统,诱导增强植物抗性,柑橘溃疡病发生时叶片免疫系统被破坏,抗性诱导剂无法发挥抗性诱导作用。有学者研究表明,抗性诱导剂的主要作用诱导激活植物抗性,延缓病害的发展,降低发病程度。杨枫<sup>[44]</sup>发现外源施用多胺处理有效延缓了冰糖橙叶片的发病时间,降低了病害程度。茉莉酸和水杨酸之间的拮抗作用在植物对病原菌侵染的免疫调控中起着关键作用,病原菌可能促进了宿主脱落酸的生物合成,促进茉莉酸积累,反过来抑制了水杨酸介导的植物防御,导致病害发生<sup>[45]</sup>。目前,在柑橘溃疡病的防治中少有利用抗性诱导剂进行防治的研究。本研究表明,抗性诱导剂东莨菪内酯(SC)和瑞香素(DA)可以有效降低柑橘溃疡病发生程度。后续将深入研究抗性诱导剂在防控柑橘溃疡病的应用及作用机制,以期找到安全高效的防治柑橘溃疡病的技术措施。

#### 参考文献:

- [1] GOTTWALD T R. Citrus Canker and Citrus Huanglongbing, Two Exotic Bacterial Diseases Threatening the Citrus Industries of the Western Hemisphere [J]. *Outlooks on Pest Management*, 2007, 18(6): 274-279.
- [2] SHAHBAZ E, ALI M, SHAFIQ M, et al. Citrus Canker Pathogen, Its Mechanism of Infection, Eradication, and Impacts [J]. *Plants*, 2022, 12(1): 123.
- [3] NAQVI S A H, WANG J, MALIK M T, et al. Citrus Canker—Distribution, Taxonomy, Epidemiology, Disease Cycle, Pathogen Biology, Detection, and Management: A Critical Review and Future Research Agenda [J]. *Agronomy*, 2022, 12(5): 1075.
- [4] DAS A K. Citrus Canker -A Review [J]. *Journal of Applied Horticulture*, 2003, 5(1): 52-60.

- [5] FU H Y, ZHAO M M, XU J, et al. Citron C-05 Inhibits both the Penetration and Colonization of *Xanthomonas citri* subsp. *citri* to Achieve Resistance to Citrus Canker Disease [J]. Horticulture Research, 2020, 7(1): 58.
- [6] WEI C D, DING T, CHANG C Q, et al. Global Regulator PhoPIs Necessary for Motility, Biofilm Formation, Exoenzyme Production and Virulence of *Xanthomonas citri* subsp. *citri* on Citrus Plants [J]. Genes, 2019, 10(5): 340.
- [7] ALI S, HAMEED A, MUHAE-UD-DIN G, et al. Citrus Canker: A Persistent Threat to the Worldwide Citrus Industry—An Analysis [J]. Agronomy, 2023, 13(4): 1112.
- [8] GOCHEZ A M, BEHLAU F, SINGH R, et al. Panorama of Citrus Canker in the United States [J]. Tropical Plant Pathology, 2020, 45(3): 192-199.
- [9] QIAN J L, ZHANG T, TANG S, et al. Biocontrol of Citrus Canker with Endophyte *Bacillus amyloliquefaciens* QC-Y [J]. Plant Protection Science, 2020, 57(1): 1-13.
- [10] RABBEE M F, ALI M S, BAEK K H. Endophyte *Bacillus velezensis* Isolated from *Citrus* spp. Controls Streptomycin-Resistant *Xanthomonas Citri* subsp. *citri* that Causes Citrus Bacterial Canker [J]. Agronomy, 2019, 9(8): 470.
- [11] RABBEE M F, ISLAM N, BAEK K H. Biocontrol of Citrus Bacterial Canker Caused by *Xanthomonas Citri* subsp. *citri* by *Bacillus velezensis* [J]. Saudi Journal of Biological Sciences, 2022, 29(4): 2363-2371.
- [12] GOTTWALD T R, GRAHAM J H, SCHUBERT T S. Citrus Canker: The Pathogen and Its Impact [J]. Plant Health Progress, 2002, 3(1): 15.
- [13] ALFEREZ F M, GERBERICH K M, LI J L, et al. Exogenous Nicotinamide Adenine Dinucleotide Induces Resistance to Citrus Canker in Citrus [J]. Frontiers in Plant Science, 2018, 9: 1472.
- [14] HASABI V, ASKARI H, ALAVI S M, et al. Effect of Amino Acid Application on Induced Resistance Against Citrus Canker Disease in Lime Plants [J]. Journal of Plant Protection Research, 2014, 54(2): 144-149.
- [15] LI C, HE Q L, ZHANG F, et al. Melatonin Enhances Cotton Immunity to *Verticillium* Wilt via Manipulating Lignin and Gossypol Biosynthesis [J]. The Plant Journal, 2019, 100(4): 784-800.
- [16] BEYER S F, BEESLEY A, ROHMANN P F W, et al. The Arabidopsis Non-Host Defence-Associated Coumarin Scopoletin Protects Soybean from Asian Soybean Rust [J]. The Plant Journal, 2019, 99(3): 397-413.
- [17] 王群娣, 赵晨露, 王旭婷, 等. 天然柑橘香豆素的分布、提取分析及生物活性研究进展 [J]. 食品与发酵工业, 2024, 50(8): 343-355.
- [18] 刘瑾林, 周红, 郭富友, 等. 香豆素类化合物的农药活性及东莨菪内酯杀螨作用机理研究进展 [J]. 农药学报, 2019, 21(5): 692-708.
- [19] 杨亮. 羟基香豆素类化合物对青枯雷尔氏菌致病特性的调控作用研究 [D]. 重庆: 西南大学, 2020.
- [20] 韩松庭. 瑞香素诱导烟草对青枯病的抗性及其作用机理研究 [D]. 重庆: 西南大学, 2021.
- [21] 崔伟伟. 东莨菪内酯诱导烟草对青枯病的抗性及其作用机理研究 [D]. 重庆: 西南大学, 2014.
- [22] 李吉秀, 朱晓伟, 王叶, 等. 0.53%瑞香素乳油诱导烟草抗青枯病的效果 [J]. 植物医学, 2023, 2(5): 33-40.
- [23] DÖLL S, KUHLMANN M, RUTTEN T, et al. Accumulation of the Coumarin Scopolin under Abiotic Stress Conditions Is Mediated by the Arabidopsis Thaliana THO/TREX Complex [J]. The Plant Journal, 2018, 93(3): 431-444.
- [24] 韩松庭, 漆夏燕, 王开宇, 等. 植物诱抗剂与拮抗菌剂联用对烟草生长及青枯病的影响 [J]. 植物医生, 2019(6): 52-57.
- [25] ROBE K, IZQUIERDO E, VIGNOLS F, et al. The Coumarins: Secondary Metabolites Playing a Primary Role in Plant Nutrition and Health [J]. Trends in Plant Science, 2021, 26(3): 248-259.
- [26] 王曼. 两个苹果品种叶片接种褐斑菌后抗病相关酶活性变化研究 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2013.
- [27] 李睿光. 油菜浸提液对5种作物生长及防御酶活性的影响 [D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2020.

- [28] LANNA-FILHO R, SOUZA R M, ALVES E. Induced Resistance in Tomato Plants Promoted by Two Endophytic Bacilli Against Bacterial Speck [J]. *TropicalPlantPathology*, 2017, 42(2): 96-108.
- [29] DE PAULA S, HOLZ S, SOUZA D H G, et al. Potential of Resistance Inducers for Soybean Rust Management [J]. *Canadian Journal of Plant Pathology*, 2021, 43(sup2): S298-S307.
- [30] QIUD W, DONGY J, ZHANGY, et al. Plant Immunity Inducer Development and Application [J]. *Molecular Plant-Microbe Interactions*, 2017, 30(5): 355-360.
- [31] CZERWONIEC P. New Plant Resistance Inducers Based on Polyamines [J]. *Open Chemistry*, 2022, 20(1): 1591-1600.
- [32] RAJENDRAN L, AKILA R, KARTHIKEYAN G, et al. Defense Related Enzyme Induction in Coconut by Endophytic Bacteria (EPC 5) [J]. *Acta Phytopathologica et EntomologicaHungarica*, 2015, 50(1): 29-43.
- [33] ZHOU J, WANG L, WEI L, et al. Synthesis and Antitumor Activity of Scopoletin Derivatives[J]. *Letters in Drug Design & Discovery*, 9(4): 397-401.
- [34] HE B T, LIU Z H, LI B Z, et al. Advances in Biosynthesis of Scopoletin [J]. *Microbial Cell Factories*, 2022, 21(1): 152.
- [35] 杨亮, 姚晓远, 丁伟. 香豆素类化合物的抑菌活性研究 [J]. *天然产物研究与开发*, 2018, 30(2): 332-338.
- [36] 侯秋莉, 杨振国, 丁伟, 等. 东莨菪内酯的生物活性研究进展 [J]. *天然产物研究与开发*, 2013, 25(10): 1461-1467.
- [37] 杨振国, 张永强, 丁伟, 等. 东莨菪内酯与双脱甲氧基姜黄素对朱砂叶螨毒力的温度效应 [J]. *昆虫学报*, 2012, 55(4): 420-425.
- [38] BENOIT GNONLONFIN G J, SANNNI A, BRIMER L. Review Scopoletin- A Coumarin Phytoalexin with Medicinal Properties [J]. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 2012, 31(1): 47-56.
- [39] EL OIRDI M, TRAPANI A, BOUARAB K. The Nature of Tobacco Resistance Against *Botrytis cinerea* Depends on the Infection Structures of the Pathogen [J]. *Environmental Microbiology*, 2010, 12(1): 239-253.
- [40] 杨亮, 韩松庭, 李吉秀, 等. 瑞香素对烟草青枯病的防治效果及其作用机理[J]. *植物保护学报*, 2024, 51(3): 709-718.
- [41] 赵世元. 黄腐酸诱导烟草抗青枯病的活性及初步机理研究 [D]. 重庆: 西南大学, 2020.
- [42] 程小龙. 外源水杨酸诱导烟草抗青枯病的作用及机理研究 [D]. 重庆: 西南大学, 2014.
- [43] 张煦, 李捷, 冯丽丹, 等. 3 种抗病诱导剂对宁夏枸杞生长、抗病性及相关酶活性的影响 [J]. *云南农业大学学报(自然科学)*, 2022, 37(3): 413-421.
- [44] 杨枫. 多胺在提高柑橘溃疡病抗性中的作用及其机理研究 [D]. 武汉: 华中农业大学, 2014.
- [45] LONG Q, XIE Y, HE Y R, et al. Abscisic Acid Promotes Jasmonic Acid Accumulation and Plays a Key Role in Citrus Canker Development [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2019, 10: 1634.

责任编辑 孙文静