

紫苏提取物及其成分对烟粉虱的杀虫活性研究*

高黎明^{1,2**} 朱春晖² 唐莹莹³ 李凯龙² 张德咏^{1,2} 史晓斌^{1,2***}

(1. 湖南大学隆平农学院, 长沙 410017; 2. 湖南省农业科学院植物保护研究所, 长沙 410125; 3. 长江大学农学院, 荆州 434000)

摘要 【目的】探究紫苏 *Perilla frutescens* 提取物及其活性成分在农业害虫管理中的应用可行性, 明确其对烟粉虱 *Bemisia tabaci* 的温室防控效果。【方法】室内试验采用粉碎萃取结合旋转蒸发法制备紫苏提取物, 运用 GC-MS 技术对提取物的化学成分进行定性分析, 通过浸叶法测定紫苏提取物及其活性成分对烟粉虱的杀虫活性。【结果】紫苏提取物对烟粉虱具有显著杀虫活性, 其中 50%、75% 及 100% 浓度的紫苏提取物杀虫效果优于商品化药剂噻虫嗪, 对烟粉虱的死亡率可达 46.0%-60.0%。从 75% 紫苏提取物中鉴定出 9 种化学成分, 有效成分石竹烯不仅对烟粉虱表现出良好杀虫效果, 还可显著抑制烟粉虱体内细胞色素 P450 酶及羧酸酯酶两种关键解毒酶的活性 ($P < 0.05$)。【结论】紫苏提取物及其活性成分对烟粉虱具有优良杀虫效果, 其中单一活性成分石竹烯对烟粉虱的校正死亡率可达 51.1%-67.8%, 且可显著抑制烟粉虱体内 P450 酶和羧酸酯酶的活性。

关键词 烟粉虱 MED; 紫苏; 乙醇提取物; 杀虫活性

The toxicity of *Perilla frutescens* extract, and its constituents, to *Bemisia tabaci*

GAO Li-Ming^{1,2**} ZHU Chun-Hui² TANG Ying-Ying³ LI Kai-Long²
ZHANG De-Yong^{1,2} SHI Xiao-Bin^{1,2***}

(1. Longping Agricultural College, Hunan University, Changsha 410017, China; 2. Institute of Plant Protection, Hunan Academy of Agricultural Sciences, Changsha 410125, China; 3. School of Agriculture, Yangtze University, Jingzhou 434000, China)

Abstract [Aim] To investigate the feasibility of using *Perilla frutescens* extract, and its bioactive components, in agricultural pest management, and assess their toxicity to *Bemisia tabaci* in greenhouses. [Methods] *P. frutescens* extract was prepared using a combination of crushing and rotary evaporation. The chemical composition of the extract was qualitatively characterized via gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS). The toxicity of *P. frutescens* extract and its bioactive components against *B. tabaci* was evaluated using the leaf-dipping bioassay method. [Results] *P. frutescens* extract was clearly toxic to *B. tabaci*; indeed, the insecticidal efficacy of the extract at concentrations of 50%, 75%, and 100% exceeded that of the commercial insecticide thiamethoxam, achieving mortality rates from 46.0% to 60.0%. Nine chemical components were identified from 75% *P. frutescens* extract, among the active component caryophyllene was not only toxic to *B. tabaci*, but also significantly inhibited the activities of two key detoxification enzymes, cytochrome P450 and carboxylesterase ($P < 0.05$). [Conclusion] *P. frutescens* extract is more toxic to *B. tabaci* than thiamethoxam. One component of the extract, caryophyllene, achieved a corrected mortality rate of 51.1% to 67.8%, while also significantly inhibiting the activity of the P450 enzyme and carboxylesterase in this *B. tabaci*.

Key words *Bemisia tabaci* MED; *Perilla frutescens*; ethanol extract; insecticidal activity

*资助项目 Supported projects: 国家自然科学基金 (32272535); 国家大宗蔬菜产业技术体系 (CARS-16-E17); 麻类产业体系 (CARS-16-E-17)

**第一作者 First author, E-mail: liminggao124@163.com

***通讯作者 Corresponding author, E-mail: shixiaobin@hunaas.cn

收稿日期 Received: 2024-08-16; 接受日期 Accepted: 2026-01-11

烟粉虱 *Bemisia tabaci* 隶属于半翅目 Hemiptera 粉虱科 Aleyrodidae, 为典型的多食性害虫。该害虫具有寄主范围广、繁殖速率快及环境适应性强等特征, 是全球性农业入侵害虫之一, 可对 600 余种农作物的生长发育、产量形成及品质提升造成毁灭性的影响 (Mu *et al.*, 2022; Shi *et al.*, 2024)。烟粉虱的强入侵性主要体现在其多元化的危害机制。该害虫可通过刺吸式口器取食植物韧皮部汁液, 引发寄主植物褪绿、萎蔫乃至死亡; 同时, 其分泌的蜜露可诱发煤污病, 且能传播多种植物病毒, 进一步加剧农业经济损失 (Wang *et al.*, 2017, 2023; Zhang *et al.*, 2021)。当前, 化学杀虫剂的施用仍是烟粉虱农业防治中的主流措施, 通过降低害虫种群密度以实现作物保护目标 (Zheng *et al.*, 2017; 尚昊培等, 2023; 王文璐等, 2023)。然而, 单一化学防治策略易引发系列生态与生产问题, 如害虫抗药性进化加速、农产品农药残留超标及农田生态系统平衡破坏等 (宋程飞等, 2022; 张冰冰等, 2024)。基于生态环境保护、农业可持续发展及害虫绿色防控的多元战略需求, 绿色防控技术逐步应用于烟粉虱治理, 包括植物挥发物介导的生态调控、天然源杀虫剂应用及生物防治等措施 (Cook *et al.*, 2007, 李永腾等, 2023; 刘俊秀等, 2023)。

植物源成分具备环境相容性佳、生物活性多样、害虫抗药性不易产生及安全性较高等优势, 是化学杀虫剂的重要替代产品之一 (杨欣蕊等, 2022)。在长期协同进化进程中, 植物可合成并积累多种次生代谢产物, 通过调控植食性昆虫的取食行为、生长发育进程及繁殖能力等, 实现对自身的防御 (谢辉等, 2012; 陈澄宇等, 2015)。因此, 从植物中分离提取此类活性物质, 可直接或经加工制备为新型农药, 应用于农业害虫的综合管理。1968 年 Butterworth 等从印楝中分离获得印楝素, 证实该活性成分对害虫具有胃毒、触杀及拒食等多种作用 (李典鹏等, 2003); 从南蛇藤属植物苦皮藤中提取的苦皮藤素 IV 对昆虫具有麻醉活性, 苦皮藤素 V 则表现出胃毒作用, 二者均具备商品化开发潜力 (胡兆农等, 2000; 卢莉娜, 2015)。植食性昆虫在遭遇此类外源物

质胁迫时, 会诱导体内解毒酶系及相应解毒机制激活, 通过代谢转化以适应外源物质带来的生理变化 (阮成龙等, 2012, 刘蓬等, 2016)。其中, 细胞色素 P450 酶系 (Cytochrome P450s, P450s)、羧酸酯酶 (Carboxylesterases, CarE) 及谷胱甘肽 *S*-转移酶 (Glutathione *S*-transferase, GSTs) 是昆虫体内核心的解毒酶系 (李路莎等, 2018)。这些酶系通过协同作用, 显著提升昆虫对植物次生物质的代谢效率, 使昆虫能够适应并突破寄主植物的防御屏障 (李路莎等, 2018)。

紫苏 *Perilla frutescens* 隶属于唇形科 Lamiaceae 紫苏属 *Perilla*, 为一年生直立草本植物, 主要分布于亚洲地区, 如中国、韩国及日本等 (贤振华等, 2009; You *et al.*, 2023)。该植物富含黄酮类、酚类及三萜类等活性成分, 兼具丰富的药用价值与营养价值, 已被证实具有抗氧化、抗炎、抗菌及抗肿瘤等多种生物活性 (You *et al.*, 2014, Gigi *et al.*, 2023)。此外, 紫苏及其提取物在农业病虫害治理领域的应用研究逐步开展。例如, 紫苏与辣椒合理间作可有效防控辣椒疫病, 显著降低辣椒病情指数与发病率, 同时增强植株生长势, 提升产量并改善品质 (陈映彤等, 2022); 在 40 mg/mL 浓度下, 紫苏提取物对茶炭疽病菌菌丝生长的抑制率达 75% 以上, 48 h 抑制率可达 100%, 对病菌孢子萌发的抑制率为 84.3%, 且提取物浓度越高, 病菌菌丝生长及孢子萌发形态的畸变程度越显著 (孙钦玉等, 2017)。室内试验结果表明, 浓度为 9 g/100 mL 的紫苏乙醇粗提取物对烟蚜 *Myzus persicae* 具有良好的拒食、忌避及毒杀活性, 其中拒食活性维持在 64.6%-79.3%, 忌避率达 58.4% 以上, 死亡率可达 83.8% 以上 (袁莲莲等, 2016)。

在农业病虫害治理中, 紫苏及其提取物具备环境友好、安全性高的优势, 其应用潜力亟待深入挖掘。本研究旨在为紫苏及其活性化合物在烟粉虱成虫绿色防控中的高效应用提供理论支撑与技术参考, 具体通过浸叶法测定紫苏提取物对烟粉虱的杀虫活性, 借助气相色谱-质谱联用技术对提取物的化学组分进行鉴定分析, 并进一步

探究提取物主要有效成分石竹烯对烟粉虱的杀虫效果及体内解毒酶活性的影响, 以期对烟粉虱的绿色防控及天然植物源活性成分的开发应用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试昆虫

供试烟粉虱饲养在湖南省农业科学院植物保护研究所的昆虫室中, 长期饲养在作物番茄上的试验种群, 经鉴定为烟粉虱 MED 隐种。在昆虫室内饲养 8 代以上, 选用生长良好、形体相近的成虫进行生物活性的测定。昆虫室的温度 (26 ± 2) °C, 相对湿度 $60\% \pm 5\%$, 光周期 14 L : 10 D。

1.2 供试紫苏及提取方法

将紫苏叶片(湖南马来冲紫苏基地)干样粉碎后过 40 目筛, 各称取 10 g 样品按照 1 : 20 的料液比加入 200 mL 的乙醇溶液(0%、25%、50%、75%和 100%)进行浸提。样品的乙醇提取物使用旋转蒸发仪(50 °C, 40 r/min)浓缩至膏状, 收集置于恒温干燥箱(50 °C)中干燥至恒重, 密封保存在 4 °C 冰箱中备用。根据下列公式并计算出紫苏提取物的提取率,

提取率 = 提取物重量(g) / 样品重量(g) $\times 100\%$ 。

1.3 供试药剂和仪器

乙醇(上海麦克林试剂有限公司)、石竹烯(上海麦克林试剂有限公司)、正己烷(上海麦克林试剂有限公司)、噻虫嗪(青岛恒丰作物科学有限公司)、旋转蒸发仪(上海亚荣生化仪器有限公司)、恒温干燥箱(杭州亿捷科技有限公司)、真空循环水泵(上海越众仪器设备有限公司)等。

1.4 紫苏提取物的鉴定及分析

将紫苏提取物配制成 10 mg/L 的正己烷(色谱级)溶液, 利用气相-质谱联用系统(Gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS)对

试样进行分析, 色谱和质谱分析条件设置如下, 色谱条件: 进样口温度 240 °C, 载气为氦气, 流速 1 mL/min; 程序升温: 初始柱温 50 °C(保持 1 min); 然后以 5 °C/min 升温至 240 °C(保持 2 min); 以 30 °C/min 升温至 300 °C(保持 5 min)。质谱条件: EI 离子源, 电子能量 70 eV, 温度 300 °C; 四级杆温度 150 °C; 质量扫描范围: 50-650 m/z, 扫描速度为 0.5 次/秒。紫苏提取物的质谱图数据, 采用峰面积归一法处理和 NIST 数据库匹配分析。

1.5 紫苏提取物及其成分对烟粉虱的杀虫活性测定

采用浸叶法测定紫苏提取物及其成分对烟粉虱的生物活性。称取一定量的紫苏提取物用水进行溶解, 配置 1 g/L 的不同乙醇提取物溶液, 商业化的噻虫嗪溶液作为阳性对照。将石竹烯在水(含有 0.5% 吐温 80)中稀释至 0.125%、0.25% 和 0.5% (v/v), 0.5% 的吐温 80 水溶液作为对照组。将番茄植株的新鲜叶片浸入每种溶液中 10 s 后取出, 用滤纸吸去多余液体, 叶片晾干后放入装有 1.5% 琼脂(约 1 cm)的塑料杯中。然后将 50 头烟粉虱引入杯中, 用纱布封住杯口。烟粉虱在处理过的番茄叶片上取食 48 h, 在 0、12、24、36 和 48 h 观察其死亡情况。烟粉虱的足或触角不再活动时, 判定其已死亡。根据下列公式并计算烟粉虱的死亡率:

死亡率 = 烟粉虱死亡数(头) / 烟粉虱总数(头) $\times 100\%$ 。

1.6 石竹烯对烟粉虱体内酶活性的影响测定

使用昆虫细胞色素 P450 (CYP450)、谷胱甘肽 S-转移酶 (GSTs) 和羧酸酯酶 (CarE) 活性检测试剂盒(上海研启生物科技有限公司)评估烟粉虱在石竹烯处理 48 h 后的 3 种酶活性。在 1.5 节中, 收集石竹烯处理 48 h 后存活的烟粉虱(30 头)备用, 使用研磨装置将烟粉虱充分匀浆, 按照制造商的说明书测定相应的酶活性。

1.7 数据分析

利用 Excel 2023 和 SPSS 22.0 对测定数据进

行统计和分析,所有数据以平均值±标准误差表示。经单因素方差分析(One-way ANOVA)后,采用 Tukey's 多重比较检验不同紫苏乙醇提取物间的差异,以及石竹烯对烟粉虱解毒酶活性的差异。通过 Duncan 氏新复极差法检验紫苏提取物、石竹烯对烟粉虱杀虫活性的差异。当 $P<0.05$ 时,认为差异有统计学意义。所有的图形使用 GraphPad Prism 9.0 版本绘制。

2 结果与分析

2.1 紫苏提取物对烟粉虱的杀虫活性

随着乙醇体积分数的增加,紫苏提取物得率先增大后减小。在体积分数为 0%、25%、50%、75%和 100%的乙醇溶液中,得率分别为 24.5%、28.2%、23.3%、21.3%和 8.5% ($F_{4,10}=25.703$, $P<0.001$)。在乙醇体积分数为 25%时,紫苏提取物的得率达到最大(图 1)。随着时间的推移,不同紫苏提取物对烟粉虱的死亡率不断增加。与噻虫嗪相比,50%、75%和 100%的紫苏提取物

处理烟粉虱 48 h 后,烟粉虱的死亡率分别为 46.0%、54.7%和 60.0%,均高于噻虫嗪(41.3%) ($F_{6,14}=11.879$, $P<0.001$) (表 1)。

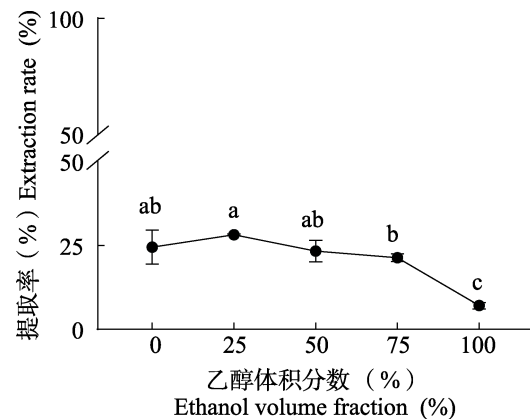


图 1 不同乙醇体积分数紫苏提取物的提取率

Fig. 1 Extraction rate of *Perilla frutescens* extracts with different ethanol volume fractions

图中数据均为平均值±标准误,标有不同字母表显著差异 ($P<0.05$, Tukey 氏多重比较检验)。下图同。

Data in the figure are mean±SE, and different letters above the broken line mean significant difference ($P<0.05$, Tukey's multiple range test). The same below.

表 1 紫苏提取物对烟粉虱的杀虫活性

Table 1 The insecticidal activity of *Perilla frutescens* extract against *Bemisia tabaci*

供试药剂 Test agent		死亡率 (%) Mortality rate (%)				
		1 h	12 h	24 h	36 h	48 h
水 Water		3.3±2.5 a	8.0±5.9 b	10.0±3.3 c	10.0±3.3 c	10.7±3.4 c
噻虫嗪 Thiamethoxam		7.3±3.4 a	7.3±3.4 b	14.0±4.9 c	32.7±4.1 ab	41.3±3.4 b
紫苏乙醇提取物 <i>P. frutescens</i> ethanol extract	0%	14.7±5.3 a	19.3±5.3 ab	18.7±9.0 bc	18.7±9.0 bc	21.3±10.0 c
	25%	12.6±3.4 a	13.3±3.8 ab	14.0±2.8 c	18.7±0.9 bc	24.7±3.4 c
	50%	11.3±2.5 a	29.3±4.1 ab	32.0±4.3 ab	40.7±3.4 a	46.0±7.5 ab
	75%	13.3±4.1 a	36.7±14.3 a	38.0±13.0 a	45.3±11.5 a	54.7±13.2 ab
	100%	14.0±4.3 a	36.0±8.6 a	42.7±10.0 a	46.0±11.4 a	60.0±5.9 a

表中数值为平均值±标准误,同一列数据后不同字母表示差异显著 ($P<0.05$, Duncan 氏新复极差法检验)。表 3 同。
Data in the table are presented as mean±SE, and followed by the different letters within a column indicate significant difference ($P<0.05$, Duncan's multiple range test). The same for Table 3.

2.2 紫苏提取物成分的鉴定及分析

本研究基于紫苏提取物的得率和杀虫效果,选定 75%的紫苏提取物进行成分鉴定,得到了 9 种成分(表 2)。其中,紫苏提取物的主要成分

为环烃和烯烃类物质,其次为萜类物质。本研究中将相对含量大于 10%物质作为主要成分。紫苏提取物中的主要成分为 8-亚甲基双环[5.1.0]辛烷(52.9%)、(3Z,6E)-3,7,11-三甲基十二-1,3,6,10-四烯(15.4%)和石竹烯(12.4%)。

表 2 紫苏提取物的化合物成分和相对含量
Table 2 Chemical components and relative contents of *Perilla frutescens* extract

序号 No.	化合物 Component	CAS 号 CAS no.	相对含量 (%) Relative content (%)	保留时间 (min) Relative time (min)
1	8-亚甲基双环[5.1.0]辛烷 8-Methylidenebicyclo[5.1.0]octane	54211-15-3	52.9	16.8
2	(3Z,6E)-3,7,11-三甲基十二-1,3,6,10-四烯 (3Z,6E)-3,7,11-trimethyldodeca-1,3,6,10-tetraene	26560-14-5	15.4	22.8
3	石竹烯 Caryophyllene	87-44-5	12.4	20.9
4	D-柠檬烯 D-Limonene	5989-27-5	5.4	9.5
5	(Z)-2,6,10-三甲基-1,5,9-十一碳三烯 (Z)-2,6,10-Trimethyl-1,5,9-undecatriene	62951-96-6	3.8	45.8
6	亚麻酸甲酯 Methyl linolenate	301-00-8	3.4	37.5
7	十六酸乙酯 Ethyl hexadecanoate	628-97-7	2.8	34.1
8	正二十烷 Icosane	112-95-8	2.2	46.4
9	二正癸基砜 Didecylsulfon	111530-37-1	1.8	44.6

2.3 石竹烯对烟粉虱的杀虫活性

石竹烯对烟粉虱的杀虫活性结果如表 3 所示。随着时间的推移,石竹烯浓度的增加,烟粉虱死亡率也在增加。与无石竹烯的对照组相比,用 0.125%、0.25%和 0.5% (v/v) 的石竹烯处理 48 h 后,烟粉虱的死亡率分别为 51.1%、64.4%和 67.8% ($F_{3,8}=48.523$, $P<0.001$)。

2.4 石竹烯对烟粉虱解毒酶活性的影响

石竹烯对烟粉虱 3 种解毒酶活性的影响如图 2 所示。与无石竹烯的对照组相比,0.125%、0.25%和 0.5% (v/v) 的石竹烯处理烟粉虱 48 h 后,对烟粉虱的 P450 酶 ($F_{3,28}=5.808$, $P=0.003$) 和羧酸酯酶 ($F_{3,28}=5.560$, $P=0.004$) 的活性均有显著抑制作用 (图 2: A, C),但对谷胱甘肽 S-

转移酶 (图 2: B) 的影响不显著 ($F_{3,28}=2.260$, $P=0.103$),并且石竹烯浓度的增加对烟粉虱 3 种酶活性的变化差异较小。

3 结论与讨论

本研究以紫苏干叶为材料制备提取物,发现不同组分的提取率存在差异,推测其可能与紫苏干叶的组成成分相关。已有研究证实,70%体积分数乙醇可使桑叶提取物得率达到最大值(付佳等, 2023)。此外,采用无水乙醇提取紫苏不同器官时,提取率呈现明显的器官特异性,其中根的提取率最低 (2.5%),花的提取率最高 (5.2%) (贤振华等, 2009)。杀虫活性测定结果表明,不同乙醇体积分数的紫苏提取物对烟粉虱的杀虫活性存在显著差异。其中,体积分数为 50%、

表 3 石竹烯对烟粉虱的杀虫活性
Table 3 The insecticidal activity of caryophyllene against *Bemisia tabaci*

试剂 Reagent	死亡率 (%) Mortality rate (%)				
	1 h	12 h	24 h	36 h	48 h
水 (对照) Water (CK)	0.0±0.0 b	2.2±1.6 c	3.3±0.0 b	7.8±4.2 c	8.9±3.1 c
石竹烯 Caryophyllene	0.125%	15.6±4.2 a	22.2±4.2 b	45.6±6.9 a	51.1±3.1 b
	0.250%	20.0±2.7 a	38.9±6.9 a	54.4±4.2 a	60.0±7.2 ab
	0.500%	17.8±1.6 a	34.4±4.2 a	52.2±4.2 a	67.8±5.7 a

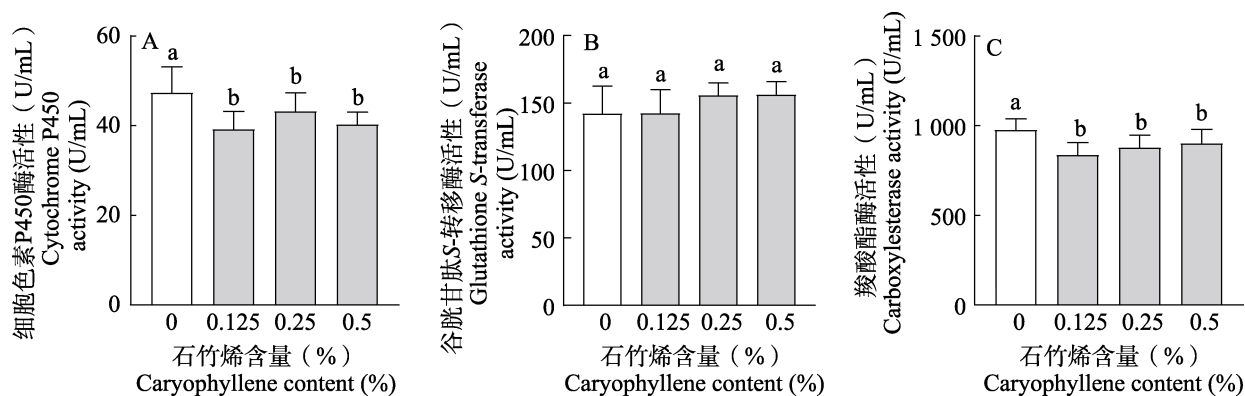


图2 石竹烯对烟粉虱 P450 酶 (A)、谷胱甘肽 S-转移酶 (B) 和羧酸酯酶 (C) 活性的影响

Fig. 2 The effect of caryophyllene on the activity of cytochrome P450 enzyme (A), glutathione S-transferase (B), and carboxylesterase (C) in *Bemisia tabaci*

75%及 100%的乙醇紫苏提取物对烟粉虱的杀虫活性均优于商品化药剂噻虫嗪。随着处理时间的延长,各提取物的杀虫效果均呈现不同程度的提升。上述结果表明,紫苏提取物可作为防控烟粉虱的有效绿色制剂,具备替代或减用化学合成杀虫剂的应用潜力。

在绿色防控及天然植物源活性成分中,萜烯类化合物对烟粉虱具有行为干扰与传毒抑制的调控作用 (Liang *et al.*, 2025)。在行为层面,部分萜烯可通过调控烟粉虱嗅觉识别系统,影响其寄主定位行为 (Shi *et al.*, 2024)。而其对烟粉虱传毒能力的调控具有双向性:病毒可借助萜烯信号介导提升传毒效率;而筛选特定萜烯或调控其释放节律,能打破病毒-寄主植物-烟粉虱互作平衡,阻断病毒“获毒-传毒”循环 (Liang *et al.*, 2025)。基于紫苏干叶提取率及对烟粉虱杀虫活性的综合考量,本研究选定 75%体积分数的乙醇紫苏提取物开展成分分析与鉴定。GC-MS 测定结果显示,该提取物的主要成分包括 8-亚甲基双环[5.1.0]辛烷 (52.9%)、(3Z,6E)-3,7,11-三甲基十二-1,3,6,10-四烯 (15.4%) 和石竹烯 (12.4%)。

石竹烯作为一类广泛存在于自然界的萜类化合物,是植物源杀虫剂的重要候选组分。已有研究证实,石竹烯可诱导斜纹夜蛾 *Spodoptera litura* 幼虫产生遗传毒性与细胞毒性损伤,进而抑制其生长发育并影响存活 (Evani *et al.*, 2022)。此外,石竹烯对豌豆修尾蚜 *Megoura japonica* 成虫及小菜蛾 *Plutella xylostella* 幼虫均表现出优异

的接触毒性,半数致死剂量 (LD_{50}) 分别为 0.072 和 0.320 μg (Ma *et al.*, 2020)。目前,石竹烯的化学结构已明确,可通过生物合成技术在大肠杆菌中实现规模化培养与生产,具备良好的应用开发潜力 (Bouwmeester *et al.*, 1999; Gyrdymova and Rubtsova, 2022)。本研究发现,经 0.125%、0.25%及 0.5% (v/v) 浓度石竹烯处理后,烟粉虱的死亡率达 50.1%-67.8%,证实石竹烯对烟粉虱具有显著杀虫活性。同时,石竹烯处理可显著抑制烟粉虱细胞色素 P450 酶与羧酸酯酶活性,但对 GSTs 活性无显著影响;且不同处理浓度下烟粉虱的酶活性未呈现显著差异,这可能与烟粉虱体内解毒酶的含量水平相关。

综上所述,本研究通过对紫苏干叶进行活性成分提取与筛选,明确了目标提取物对烟粉虱具有显著杀虫活性;进一步结合成分鉴定与分析结果,证实了石竹烯是紫苏提取物中发挥烟粉虱杀虫效应的关键活性组分之一。此外,本研究发现石竹烯可调控烟粉虱解毒酶系活性,该结果为深入解析石竹烯对烟粉虱的杀虫作用机制提供了重要线索,也为后续基于石竹烯的烟粉虱绿色防控制剂研发奠定了理论基础。

参考文献 (References)

- Bouwmeester HJ, Wallaart TE, Janssen MH, Loo VB, Jansen BJ, Posthumus MA, Schmidt CO, De Kraker JW, König WA, Franssen MC, 1999. Amorpho-4,11-diene synthase catalyses the first probable step in artemisinin biosynthesis. *Phytochemistry*, 52(5): 843–854.

- Chen CY, Kang ZJ, Shi XY, Gao XW, 2015. Metabolic adaptation mechanisms of insects to plant secondary metabolites and their implications for insecticide resistance of insects. *Acta Entomologica Sinica*, 58(10): 1126–1139. [陈澄宇, 康志娇, 史雪岩, 高希武, 2015. 昆虫对植物次生物质的代谢适应机制及其对昆虫抗药性的意义. *昆虫学报*, 58(10): 1126–1139.]
- Chen YT, Zhang J, Li K, Wu FZ, Hu ZP, Mao TY, Yu XH, Jiang XM, 2022. Effect of *Perilla frutescens* intercropping density on controlling pepper blight (*Phytophthora capsici*) and plant growth. *China Vegetables*, 2022(4): 77–83. [陈映彤, 张婧, 李坤, 吴凤芝, 胡兆平, 毛同艳, 于锡宏, 蒋欣梅, 2022. 紫苏间作密度对辣椒疫病防控及生长的影响. *中国蔬菜*, 2022(4): 77–83.]
- Cook SM, Khan ZR, Pickett JA, 2007. The use of push-pull strategies in integrated pest management. *Annual Review of Entomology*, 52: 375–400.
- Evani M, Sumit S, Diksha, Sanheedee K, Satwinder SK, 2022. The genotoxic, cytotoxic and growth regulatory effects of plant secondary metabolite β -caryophyllene on polyphagous pest *Spodoptera litura* (Fabricius) (Lepidoptera: Noctuidae). *Toxicon*, 219: 106930.
- Fu J, Wu YJ, Liu ZM, Wang HY, 2023. Chemical constituents analysis and process optimization of ethanol extract from mulberry leaves. *Chemistry and Industry of Forest Products*, 43(1): 120–126. [付佳, 吴禹践, 刘志明, 王海英, 2023. 桑叶乙醇提取物化学成分分析及提取工艺优化. *林产化学与工业*, 43(1): 120–126.]
- Gigi A, Silvia R, Mihaela Magdalena F, Oana C, Ingrid Andrada V, Ana Maria A, Cornelia M, Aurel N, Valeriu H, Ana Maria H, Monica H, 2023. Applications of *Perilla frutescens* extracts in clinical practice. *Antioxidants*, 12(3): 727.
- Gyrdymova YV, Rubtsova SA, 2022. Caryophyllene and caryophyllene oxide: A variety of chemical transformations and biological activities. *Chemical Papers*, 76(1): 1–39.
- Hu ZN, Wu WJ, Gao YC, Liu AX, 2000. Narcosis action electrophysiology of celangulin IV from *Celastrus angulatus*. *Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition)*, 28(2): 35–38. [胡兆农, 吴文君, 高永闯, 刘安西, 2000. 苦皮藤素IV杀虫机理电生理研究初报. *西北农业大学学报*, 28(2): 35–38.]
- Li DP, Zhang HR, Chen HS, Zhao SQ, Liu Y, 2003. Research and utilization of plant pesticides. *Guihaia*, 23(4): 373–378. [李典鹏, 张厚瑞, 陈海珊, 赵肃清, 刘演, 2003. 植物源农药的研究利用. *广西植物*, 23(4): 373–378.]
- Li LS, Yuan YF, Wu L, Chen M, 2018. Effects of host plants on the feeding behavior and detoxification enzyme activities in *Hyphantria cunea* (Lepidoptera: Arctiidae) larvae. *Acta Entomologica Sinica*, 61(2): 232–239. [李路莎, 袁郁斐, 武磊, 陈敏, 2018. 不同寄主植物对美国白蛾幼虫取食行为及解毒酶活性的影响. *昆虫学报*, 61(2): 232–239.]
- Li YT, Wu HH, Li X, Gao XL, Li ZX, Lan CY, Zhang WH, 2023. Effectiveness of a 1:1 layout of blue and yellow sticky traps in controlling *Bemisia tabaci* and thrips in greenhouse cucumber. *China Plant Protection*, 43(9): 65–68. [李永腾, 吴汉花, 李晓, 高旭利, 李朝霞, 兰成云, 张卫华, 2023. 黄、蓝粘虫板 1:1 布局对温室黄瓜烟粉虱和蓟马的诱防效果. *中国植保导刊*, 43(9): 65–68.]
- Liang P, Zeng Y, Ning J, Wu XJ, Wang WL, Ren J, Wu QJ, Yang X, Wang SL, Guo ZJ, Su Q, Zhou XG, Turlings TCJ, Xie W, Zhang YJ, 2025. A plant virus manipulates both its host plant and the insect that facilitates its transmission. *Science Advances*, 11(9): eadk2435.
- Liu JX, Zhu ZY, Tian LX, Wang J, Wang S, Zhang F, Di N, 2023. Evaluation of the combined application of *Orius sauteri* and *Metarhizium anisopliae* on controlling *Frankliniella occidentalis* and *Bemisia tabaci*. *Plant Protection*, 49(6): 310–316, 322. [刘俊秀, 朱正阳, 田丽霞, 王杰, 王甦, 张帆, 邸宁, 2023. 东亚小花蝽携带绿僵菌防控西花蓟马和烟粉虱的效果评价. *植物保护*, 49(6): 310–316, 322.]
- Liu P, Ma H, Zhu QS, Chen BC, Gao J, Lin XQ, 2016. Research progress of insect adaptability to their host plants. *Biological Disaster Science*, 39(4): 250–254. [刘蓬, 马惠, 朱其松, 陈博聪, 高洁, 林香青, 2016. 昆虫对寄主植物适应性研究进展. *生物灾害科学*, 39(4): 250–254.]
- Lu LN, 2015. Identification and validation of the target protein of insecticidal dihydroagarofuran sesquiterpene polyesters compounds. Doctor dissertation. Yangling: Northwest A&F University. [卢莉娜, 2015. 博士学位论文. 二氢沉香呋喃多元酯类杀虫活性化合物作用靶标的鉴定和验证. 杨凌: 西北农林科技大学.]
- Ma SJ, Jia R, Guo ML, Qin KT, Zhang LH, 2020. Insecticidal activity of essential oil from *Cephalotaxus sinensis* and its main components against various agricultural pests. *Industrial Crops and Products*, 150: 112403.
- Mu Y, Shi XB, Zhang Z, Zhang ZH, Wang TQ, Wang YQ, Wei Y, Zhou XG, Xiang M, Liu Y, Zhang DY, 2022. Validamycin reduces the transmission of *Tomato chlorotic virus* by *Bemisia tabaci*. *Journal of Pest Science*, 95(3): 1261–1272.
- Ruan CL, Mi Z, Zhu Y, 2012. Research progress on mechanism of insect resistance to insecticides. *Acta Sericologica Sinica*, 38(2): 322–328. [阮成龙, 米智, 朱勇, 2012. 昆虫抗药性机制研究进展. *蚕业科学*, 38(2): 322–328.]
- Shang HP, Dou WJ, Yang SW, Wang F, Li MJ, Chen GH, Zhang XM, 2023. Toxicity and field control effects of four commonly used insecticides on adult *Bemisia tabaci* MED (Hemiptera: Aleyrodidae) in different agricultural landscapes. *Chinese*

- Journal of Ecology*, 42(7): 1713–1720. [尚昊培, 窦文珺, 羊绍武, 王飞, 李明江, 陈国华, 张晓明, 2023. 四种常用杀虫剂对不同农田景观烟粉虱 MED 隐种成虫种群毒力测定与田间防效. *生态学杂志*, 42(7): 1713–1720.]
- Shi XB, Zhang Z, Li F, Evan LP, Huang LP, Zhang DY, Zhang ZH, Zhang SB, Zhou XG, Zhang AS, Liu H, Wu YH, Cheng XF, He ZF, Liu Y, 2024. Vector-mediated viral exchange between crops and weedy plants. *Journal of Pest Science*, 97(1): 155–171.
- Song CF, Feng XM, Wang ZY, Yan XZ, Hao C, 2022. Bioactivities of the essential oils derived from four species of non-host plants against diamondback moth *Plutella xylostella*. *Journal of Plant Protection*, 49(2): 671–682. [宋程飞, 冯雪梦, 王志宇, 闫喜中, 郝赤, 2022. 四种非寄主植物精油对小菜蛾的生物活性. *植物保护学报*, 49(2): 671–682.]
- Sun QY, Zhang JX, Yang Y, Lin XM, Wang H, Xia XJ, Zhao Q, 2017. Inhibition of *Perilla frutescens* and *Mentha haplocalyx* extracts against *Gloeosporium theae sinesis*. *China Plant Protection*, 37(5): 18–22. [孙钦玉, 张家侠, 杨云, 林栩敏, 王辉, 夏先江, 赵强, 2017. 紫苏和薄荷提取物对茶炭疽病病菌 (*Gloeosporium theae sinesis*) 的抑制作用. *中国植保导刊*, 37(5): 18–22.]
- Wang Q, Luo C, Wang R, 2023. Insecticide resistance and its management in two invasive cryptic species of *Bemisia tabaci* in China. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(7): 6048.
- Wang WL, Liang P, Ning J, Wu MY, Wang SL, Xie W, 2023. Field efficacy evaluation of different insecticides on *Bemisia tabaci* in three greenhouse vegetables. *China Vegetables*, 2023(9): 105–109. [王文璐, 梁鹏, 宁杰, 吴明月, 王少丽, 谢文, 2023. 不同杀虫剂对 3 种设施蔬菜烟粉虱的田间防效评价. *中国蔬菜*, 2023(9): 105–109.]
- Wang XW, Li P, Liu SS, 2017. Whitefly interactions with plants. *Current Opinion in Insect Science*, 19: 70–75.
- Xian ZH, Sun J, Zou XW, 2009. Antifeeding activity of the crude extracts from *Perilla frutescens* to adults of *Phyllotreta striolata*. *Guangdong Agricultural Sciences*, 36(8): 126–128. [贤振华, 孙晋, 邹啸文, 2009. 紫苏提取物对黄曲条跳甲成虫的拒食活性研究. *广东农业科学*, 36(8): 126–128.]
- Xie H, Wang Y, Liu YQ, Chen LP, 2012. The influence of plant constitutive defense system on phytophagous insects. *Plant Protection*, 38(1): 1–5. [谢辉, 王燕, 刘银泉, 陈利萍, 2012. 植物组成型防御对植食性昆虫的影响. *植物保护*, 38(1): 1–5.]
- Yang XR, Liao YF, Zhao PF, Qin YM, Ouyang XH, 2022. Study progress in plant-source pesticides and their development and utilization. *South China Agriculture*, 16(11): 33–36. [杨欣蕊, 廖艳凤, 赵鹏飞, 覃勇梅, 欧阳霞辉, 2022. 植物源农药及其开发利用研究进展. *南方农业*, 16(11): 33–36.]
- You CX, Yang K, Wu Y, Zhang WJ, Wang Y, Geng ZF, Chen HP, Jiang HY, Du SS, Deng ZW, Liu ZL, 2014. Chemical composition and insecticidal activities of the essential oil of *Perilla frutescens* (L.) Britt. aerial parts against two stored product insects. *European Food Research and Technology*, 239(3): 481–490.
- You CX, Liu J, Li X, Zhang WJ, Yu XX, He Q, Liu N, Pan YY, Dai KD, Jiang C, 2023. Cocktail effect and synergistic mechanism of two components of *Perilla frutescens* essential oil, perillaldehyde and carvone, against *Tribolium castaneum*. *Industrial Crops & Products*, 195: 116284.
- Yuan LL, Wang YF, Jin ZW, Zhang J, Li W, Dong SF, Zhao CX, Huang MD, Yao ZH, Wang FL, Yang JG, 2016. Biological control effects of ethanol extracts of *Perilla frutescens* on *Myzus persicae*. *Chinese Tobacco Science*, 37(2): 11–15. [袁莲莲, 王耀锋, 靳志伟, 张静, 李伟, 董石飞, 赵存孝, 黄明迪, 姚忠虎, 王凤龙, 杨金广, 2016. 紫苏乙醇粗提取物对烟蚜的生物控制作用. *中国烟草科学*, 37(2): 11–15.]
- Zhang BB, Ye YY, Hong L, Yin YL, Wang GQ, Jin SF, Luo SC, 2024. Screening for the resistant varieties of *Asparagus officinalis* against *Bemisia tabaci* and the mechanism of resistance. *Plant Protection*, 50(1): 183–194. [张冰冰, 叶艳英, 洪霖, 尹玉玲, 王国庆, 金水凤, 罗绍春, 2024. 芦笋对烟粉虱的抗性品种筛选及抗性机制研究. *植物保护*, 50(1): 183–194.]
- Zhang QH, Yang FB, Tong H, Hu Y, Zhang XY, Tian T, Zhang YJ, Su Q, 2021. Plant flavonoids enhance the tolerance to thiamethoxam and flupyradifurone in whitefly *Bemisia tabaci* (Hemiptera: Aleyrodidae). *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 171: 104744.
- Zheng HX, Xie W, Wang SL, Wu QJ, Zhou XM, Zhang YJ, 2017. Dynamic monitoring (B versus Q) and further resistance status of Q-type *Bemisia tabaci* in China. *Crop Protection*, 94: 115–122.