

假臭草花精油的化学组成及对柑橘木虱的驱避和致死活性*

王奇志^{1**} 刘育梅² 李书明¹ 赵颖¹ 王伟¹

(1. 华侨大学园艺系, 厦门 361021; 2. 厦门华侨亚热带植物引种园, 厦门 361002)

摘要 【目的】为了让入侵植物假臭草 *Praxelis clematidea* (Griseb) R. M. King & H. Rob. 变废为宝, 首次探讨了假臭草花精油对柑橘木虱 *Diaphorina citri* Kuwayama 的驱避和致死活性, 以用于生物防治。【方法】采用水蒸气蒸馏法提取了假臭草不同部位的精油, 并通过气相色谱-质谱联用仪 (GC-MS) 分析花精油的化学成分, 并检测了其柑橘木虱的生物活性。【结果】假臭草花精油得率 (0.31 ± 0.03) % 高于茎叶精油的得率 (0.23 ± 0.02) %; GC-MS 检测显示, 假臭草花精油至少含有 25 种化合物, 其中 β -蒎烯 (43.85%) 和 β -石竹烯 (30.34%) 是其主要成分; 花精油浓度为 40 和 50 $\mu\text{L} \cdot \text{mL}^{-1}$ 处理 30 min 时, 对柑橘木虱的驱避反应率均可达到 100%。不同浓度的花精油对柑橘木虱具有明显的致死活性。当浓度为 50 $\mu\text{L} \cdot \text{mL}^{-1}$ 的时候, 浸液法处理九里香 *Murraya exotica* L. 嫩梢 18 h 时, 柑橘木虱校正死亡率分别达到 (56.25 ± 4.79) %, LC_{50} 值为 44.83 $\mu\text{L} \cdot \text{mL}^{-1}$, 而熏蒸法 48 h 时的柑橘木虱校正死亡率仅为 (66.33 ± 5.00) %, LC_{50} 为 24.80 $\mu\text{L} \cdot \text{mL}^{-1}$ 。假臭草花精油对柑橘木虱的驱避和致死活性可能与其主要成分的作用有关。【结论】研究结果证明假臭草花精油对柑橘木虱具有良好的驱避和致死活性, 具有开发成为柑橘木虱驱避剂及杀虫剂的良好潜能。

关键词 假臭草, 精油, 柑橘木虱, 化学成分, 驱避活性, 致死活性

Chemical composition of essential oil of the invasive plant *Praxelis clematidea* and its repellence and lethality to *Diaphorina citri*

WANG Qi-Zhi^{1**} LIU Yu-Mei² LI Shu-Ming¹ ZHAO Ying¹ WANG Wei¹

(1. Department of Horticulture, Huaqiao University, Xiamen 361021, China;

2. Xiamen Overseas Chinese Subtropical Plant Introduction Garden, Xiamen 361002, China)

Abstract [Objectives] To investigate potential ways to utilize the invasive plant species *Praxelis clematidea* (Griseb.) R. M. King & H. Rob. The repellence and lethality of floral essential oils of this plant to the Asian citrus psyllid pest *Diaphorina citri* Kuwayama were determined, and the potential for using these essential oils to control insect pests is discussed. [Methods] Essential oil yield was determined for different plant parts using the steam distillation method. Floral essential oils were examined using gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS), and their repellence and lethality to *D. citri* were determined. [Results] Essential oil yield from *P. clematidea* flowers (0.31 ± 0.03) % was higher than from leaves and stems (0.23 ± 0.02) %. About twenty-five essential oil constituents were identified, the major constituents being β -Cubebene (43.85%) and β -Caryophyllene (30.34%). Oil concentrations of 40 $\mu\text{L} \cdot \text{mL}^{-1}$ and 50 $\mu\text{L} \cdot \text{mL}^{-1}$ had 100% repellence rate after 30 min. Different concentrations of floral essential oils from *P. clematidea* varied markedly in lethality to *D. citri*. Using the immersion method with LC_{50} values of 44.83 $\mu\text{L} \cdot \text{mL}^{-1}$, concentrations of 50 $\mu\text{L} \cdot \text{mL}^{-1}$ had a corrected mortality of (56.25 ± 4.79)% after 18 h. In contrast, the fumigation method with LC_{50} values of 24.80 $\mu\text{L} \cdot \text{mL}^{-1}$ had a corrected mortality rate of (66.33 ± 5.00) after 48 h. The main components of the *P. clematidea* essential oil can effectively repel and kill *D. citri*. [Conclusion] Floral essential

*资助项目 Supported projects: 国家自然科学基金青年基金项目 (31500162); 福建省农业重点自然科学基金项目 (2014N0026); 泉州市校 (院) 地协同创新专项 (重点) 项目 (2014Z101); 厦门市企业合作项目 (2015-3502-04-001831)

**通讯作者 Corresponding author, E-mail: wqz@hqu.edu.cn

收稿日期 Received: 2017-07-15, 接受日期 Accepted: 2017-10-19

oils of *P. clematidea* have significant repellent and lethal effects on *D. citri* and therefore have potential as repellents and insecticides.

Key words *Praxelis clematidea*, essential oils, *Diaphorina citri*, chemical components, repellent activity, lethal activity

目前化学农药是防治柑橘木虱 *Diaphorina citri* Kuwayama (同翅目 Homoptera、木虱科 Psyllidae) 的主要方法, 不仅容易对生态环境产生污染, 影响其它有益生物生存 (Chen *et al.*, 2017), 并且柑橘木虱对农药的抗性也不断提高, 有新烟碱、有机磷酸酯和拟除虫菊酯类杀虫剂的敏感性降低的报道 (Vázquez-García *et al.*, 2009; Tiwari *et al.*, 2012; Naeem *et al.*, 2016)。因此防治柑橘木虱的环保无毒的生物源农药是研究的焦点 (Santos *et al.*, 2015)。近年来植物精油在防治柑橘木虱方面取得了一定的进展, 研究发现韭菜 *Allium tuberosum* Rottl、野葱 *A. canadense* Rottl 和芫荽 *Coriandrum sativum* L. 等精油对柑橘木虱具有明显的驱避活性 (Mann *et al.*, 2011, 2012)。番石榴 *Psidium guajava* L. 精油能影响柑橘木虱成虫的非刺探性及唾液分泌量, 并且取食部位由韧皮部变为木质部 (朱红梅等, 2010)。

假臭草是 20 世纪 80 年代从香港发现之后, 快速扩散到福建、广东、广西、云南和海南等地的恶性杂草, 且有由南向北扩散到华中和华北地区的风险 (邱宠华等, 2011)。该杂草不仅对土壤肥力吸收力强, 而且影响物种多样性, 同时制约农业经济的发展。假臭草乙醇提取物能够降低柑橘苗新梢上柑橘木虱的产卵量 (岑伊静, 2002), 其地上部位精油对柑橘木虱成虫具有驱避活性 (岑伊静等, 2005), 但是花精油对柑橘木虱的驱避和毒杀活性还未见报道。本研究采用水蒸气蒸馏法提取假臭草不同部位的精油, 并且检测了花精油化学成分。利用 Y 形嗅觉仪法、熏蒸和浸液法研究了假臭草花精油对柑橘木虱的驱避和致死活性, 初步探讨精油成分与生物活性之间的关系, 为开发柑橘木虱植物源农药提供理论依据, 也为假臭草的防治提供新的策略。

1 材料与方法

1.1 材料

假臭草 *Praxelis clematidea* (Griseb) R. M. King & H. Rob. 于 2016 年 7-8 月采自厦门市集美区, 采集时将花与茎叶分开, 阴干后用粉碎机粉碎, 置入塑封于 4℃ 保存备用。柑橘木虱 *Diaphorina citri* Kuwayama 于 2017 年 4 月在厦门市集美区华侨大学校园中捕捉, 转入养虫笼中用盆栽的九里香 *Murraya exotica* L. 饲养, 饲养条件为: 温度 25-28℃; 光照时间 L:D=14:10。

1.2 精油的提取

采用水蒸气蒸馏法 (国家药典委员会, 2000) 提取精油。取假臭草花和茎叶的粉末 100 g, 按料液比 1:20, 温度为 100℃, 提取 4 h 获得精油, 用无水硫酸钠干燥后置于 4℃ 保存备用, 计算精油 5 次重复试验的平均值得率。精油得率计算见公式 1。

精油得率 = 精油质量 / 植物粉末质量 × 100%
(公式 1)

1.3 不同浓度精油药剂的配制

先用无菌蒸馏水与吐温-80 按体积比配制 0.5% (V:V) 吐温-80 水溶液, 取一定体积的假臭草花精油与 1 mL 0.5% 吐温-80 水溶液混合, 将精油乳化成为不同浓度的乳液 (10、20、30、40、50 $\mu\text{L} \cdot \text{mL}^{-1}$)。

1.4 驱避活性的测定

Y 形嗅觉仪参照文献 (Honda *et al.*, 1998) 自行设计, Y 形管两臂均长 6 cm, 基管长为 6 cm, 直径 1 cm。不同浓度假臭草花精油乳液 20 μL 为味源, 0.5% 吐温-80 水溶液为对照, 加在滤纸片上置于两侧臂前端。随机取羽化后活动能力强的成虫 20 只 (不区分雌雄), 放入嗅觉仪直臂

中, 观察其行为选择反应, 当试虫越过某臂, 且停留时间超过 30 s, 则视为对两臂作出反应选择, 测试过程中, 停留在直臂的成虫视为未发生选择, 进入处理臂中的成虫视为选择性反应, 进入对照臂中的成虫视为驱避性反应。分别在 6、12、18、24、30 min 时记录反应选择虫数, 按公式 2 计算驱避反应率 (王健等, 2005)。

$$\text{驱避反应率}(\%) = (T - C) / (T + C) \times 100 \quad (\text{公式 2})$$

公式中 T : 对照组的试虫数; C : 实验组的试虫数。

1.5 致死活性的测定

1.5.1 熏蒸毒杀活性 采用三角瓶密闭熏蒸法 (江志利等, 2002), 随机取羽化后活动能力强的成虫 20 只 (不区分雌雄), 接入 250 mL 三角瓶中, 再加入适量的新鲜九里香 (新梢)。将 1 cm × 9 cm 的滤纸条悬挂于瓶中, 滴加 25 μL 不同浓度的假臭草花精油乳液, 0.5%吐温 - 80 水溶液为对照。将三角瓶置于恒温环境里 (温度: (25 ± 2) $^{\circ}\text{C}$, 光照 $L:D=14:10$), 于 6、12、24、36、48 h 观察试虫死亡情况, 试验重复 3 次, 按公式 3 计算每个浓度的平均死亡率, 采用公式 4 对死亡率进行校正。

$$\text{死亡率}(\%) = \text{死亡虫数} / \text{总虫数} \times 100 \quad (\text{公式 3})$$

$$\text{校正死亡率}(\%) = \frac{\text{处理死亡率} - \text{对照死亡率}}{1 - \text{对照死亡率}} \times 100\% \quad (\text{公式 4})$$

1.5.2 浸液致死活性 采用浸液法 (Shelton, 1993) 进行测定。将九里香 (新梢) 浸入不同浓度假臭草花精油 10 s, 于空气中晾干后随机接入 20 只羽化后活动能力强的成虫 (不区分雌雄) 到培养皿中, 用纱网盖好培养皿并置于室内 (温度: (25 ± 2) $^{\circ}\text{C}$, 光照时间 $L:D=14:10$) 进行培养。设置 0.5%吐温 - 80 水溶液作为对照, 于 6、12、18、24 h 观察柑橘木虱死亡情况, 试验重复 3 次, 计算每个浓度的平均死亡率 (公式 3) 和校正死亡率 (公式 4)。

1.6 假臭草花精油 GC/MS 分析

精密量取 15 μL 假臭草花精油, 用正己烷以

体积比 1:100 稀释并摇匀, 然后用有机滤膜 (0.22 μm) 过滤。石英毛细管柱 Rtx-5MS (30 m × 0.25 mm × 0.25 μm), 利用计算机标准质谱图库 (NIST) 对组分进行定性, 用面积归一化法表示各成分的相对含量。GC-MS 具体参数参考文献 (汤丽昌等, 2011), 并稍作调整。

程序升温: 柱起始温度 60 $^{\circ}\text{C}$, 保留 2 min, 以 4 $^{\circ}\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$ 升至 120 $^{\circ}\text{C}$, 然后以 2 $^{\circ}\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$ 升至 180 $^{\circ}\text{C}$ 。最后以 10 $^{\circ}\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$ 升至 230 $^{\circ}\text{C}$, 进样口温度 220 $^{\circ}\text{C}$ 。载气为 He, 流速 1 mL $\cdot \text{min}^{-1}$, 分流比为 50:1, 进样量 1 μL , 溶剂延迟 3 min。

质谱条件: 质谱的电离方式为 EI, 电离电压为 70 eV, 离子源温度 230 $^{\circ}\text{C}$, 扫描范围为 30-450 amu。

1.7 数据分析

采用 SPSS 22.0 软件进行数据的统计与分析, Origin 8.0 软件作图。驱避反应率和死亡率均为 3 次重复试验的平均值 ± 标准偏差。采用 Duncan's 进行方差分析 ($P < 0.05$), 利用浓度对数-机率值法 (Finney, 1971), 校正死亡率转换成机率值作为 y , 浓度转换成以 10 为底的对数作为 x , 计算熏蒸毒杀和浸液致死的毒力回归方程和致死中浓度 (LC_{50}), 致死活性采用线性回归显著性分析 (Moore, 1978)。

2 结果与分析

2.1 花精油得率及化学成分

假臭草不同提取部位的精油得率见图 1, 花精油得率 (0.31 ± 0.03) % 高于茎叶精油得率 (0.23 ± 0.02) %。假臭草花精油 GC-MS 分析总离子流图谱见图 2, 主要化合物及相对含量见表 1。假臭草花精油化学成分主要为萜类化合物, 共鉴定出 25 种化合物, 其中 β -萜澄茄油烯 (43.85%)、 β -石竹烯 (30.34%)、大根香叶烯 B (5.35%) 和 α -石竹烯 (3.29%) 这 4 种成分含量较高, 占总含量的 82.83%。

2.2 驱避活性

随着浓度和处理时间的增加, 高浓度 (30、

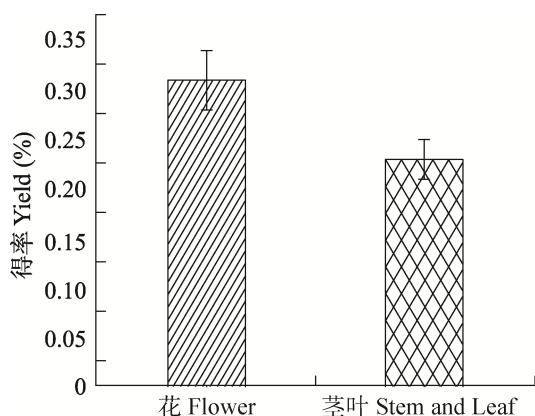


图1 假臭草不同组织部位精油得率

Fig. 1 The yield of essential oils in different tissue parts of *Praxelis clematidea*

40、50 $\mu\text{L}\cdot\text{mL}^{-1}$) 的假臭草花精油对柑橘木虱的驱避反应率有一定的提高,低浓度(10 和 20 $\mu\text{L}\cdot\text{mL}^{-1}$) 的假臭草花精油对柑橘木虱的驱避反应率则有下降的趋势,可能是随着处理时间的延长,精油挥发量较多,因此驱避反应率有所下降。不同浓度在不同时间点驱避反应率差异均不显著($P>0.05$),高浓度(40 和 50 $\mu\text{L}\cdot\text{mL}^{-1}$) 精油驱避反应率在 30 min 时达到 100.00%,驱避活性较好(表 2)。

2.3 致死活性

2.3.1 熏蒸毒杀活性 图 3 中假臭草花精油对柑橘木虱具有明显的熏蒸毒杀效果,随着时间的延长,假臭草精油对柑橘木虱的毒杀效果不断增强,熏蒸活性与精油浓度和处理时间有关,在低浓度 10 $\mu\text{L}\cdot\text{mL}^{-1}$ 时,校正死亡率均小于 50%。其中浓度为 50 $\mu\text{L}\cdot\text{mL}^{-1}$ 的熏蒸效果较好,进行 6、

12、24、36、48 h 后柑橘木虱的校正死亡率依次为(6.67 $\pm$ 7.64) %、(13.33 $\pm$ 5.00) %、(31.67 $\pm$ 8.66) %、(50.00 $\pm$ 12.58) %和(66.33 $\pm$ 5.00) %。而 40 $\mu\text{L}\cdot\text{mL}^{-1}$ 的精油在相应时间里处理柑橘木虱后的校正死亡率依次为(8.75 $\pm$ 7.64) %、(15.83 $\pm$ 5.00) %、(29.17 $\pm$ 6.46) %、(56.67 $\pm$ 5.77) %和(61.67 $\pm$ 4.08) %。

表 3 中线性回归方程中相关系数(r) 值均大于 0.878 34($\alpha=5\%$, $df=3$ 的相关系数临界值),表明 x 和 y 存在显著的线性相关性,且 P 值大于 0.05,卡方值均小于 7.81($df=3$, $P=0.05$ 的卡方临界值),表明预测值和实际值无显著差异。因此表 3 所拟合的毒力回归方程能够反应实际应用中不同时间段假臭草花精油对柑橘木虱的熏蒸毒杀效果,48 h 的 LC_{50} 值是 24.80 $\mu\text{L}\cdot\text{mL}^{-1}$ 。

2.3.2 浸液致死活性 图 4 中假臭草花精油对柑橘木虱具有明显的浸液致死效果,并且随浓度的升高和时间的延长,致死活性增强,在 18 h 时,30、40、50 $\mu\text{L}\cdot\text{mL}^{-1}$ 处理下,柑橘木虱的校正死亡率分别为(38.33 $\pm$ 2.89) %、(45.00 $\pm$ 10.80) %和(56.25 $\pm$ 4.79) %,在 24 h 时,校正死亡率分别为(63.33 $\pm$ 5.00) %、(67.08 $\pm$ 2.50) %和(72.08 $\pm$ 4.79) %。

表 4 中线性回归方程中相关系数(r) 值大于 0.958 74($\alpha=1\%$, $df=3$ 的相关性系数临界值),表明 x 和 y 之间存在十分显著的线性相关性,且 P 值均大于 0.05,卡方值均小于 7.81($df=3$, $P=0.05$ 的卡方分布临界值),表明卡方检验符合原假设,实际值与预测值之间无显著差异,上述

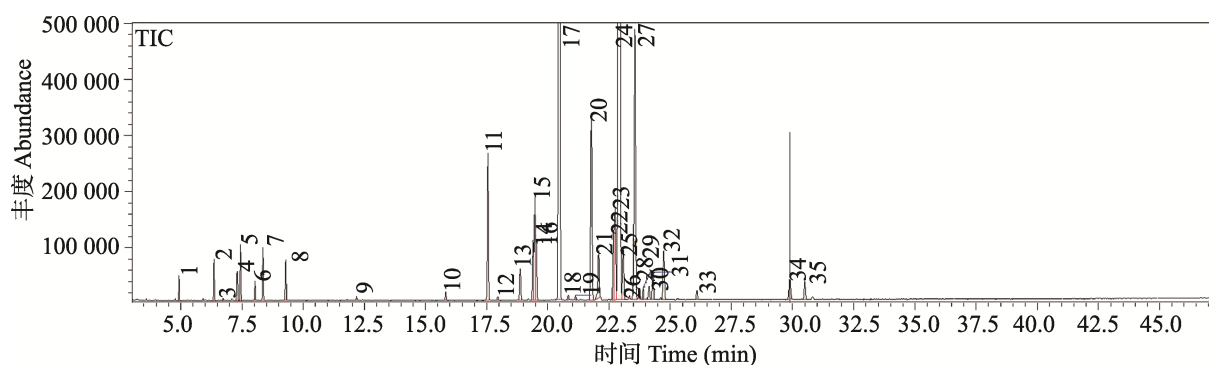


图2 假臭草花精油的气相色谱-质谱总离子流图谱

Fig. 2 Total ionic flows of GC-MS of *Praxelis clematidea* floral essential oil

表 1 假臭草花精油主要化合物及相对含量
Table 1 Composition and relative content of floral essential oil of *Praxelis clematidea*

编号 Number	化合物 Compound	保留时间 Retain time (min)	相对含量 Relative content (%)
1	α -崖柏烯 α -Thujene	4.932	0.23
2	β -月桂烯 β -Myrcene	6.365	0.46
3	5-苄基-4,5,6,7-四氢-5-氮杂吡咯 5-benzyl-1,4,6,7-tetrahydropyrrolo[3,2-c]pyridine	6.736	0.02
4	1,5,8-对-薄荷三烯 1,5,8-p-menthatriene	7.309	0.33
5	d-柠檬烯 (4R)-limonene	7.443	0.61
6	β -罗勒烯 (Z)- β -Ocimene	8.039	0.21
7	γ -松油烯 γ -Terpinene	8.360	0.61
8	δ -4-萜烯 δ -4-Carene	9.292	0.46
9	Unknow	12.186	0.03
10	左旋乙酸冰片酯 L-Bornyl acetate	15.824	0.10
11	δ -榄香烯 δ -Elemene	17.549	2.14
12	Unknow	17.958	0.04
13	a-葑烯 a-Cubebene	18.872	0.43
14	双环倍半水芹烯 Epi-Bicyclosesquiphellandrene	19.397	0.99
15	β -榄香烯 β -Elemene	19.469	1.88
16	Unknow	19.527	0.72
17	β -石竹烯 β -Caryophyllene	20.469	30.34
18	Unknow	20.840	0.06
19	Unknow	21.126	0.05
20	a-石竹烯 a-Caryophyllene	21.777	3.29
21	Unknow	22.074	0.87
22	a-蛇床烯 a-Selinene	22.685	1.21
23	δ -杜松烯 δ -Cadinene	22.748	1.70
24	β -葑烯 β -Cubebene	22.911	43.85
25	Unknow	23.082	0.98
26	Unknow	23.335	0.04
27	大根香叶烯 B Germacrene B	23.553	5.35
28	α -摩勒烯 α -Muurolene	23.743	0.16
29	Unknow	23.893	0.16
30	α -法尼烯 a-Farnesene	24.136	0.24
31	γ -Cadinene γ -杜松烯	24.297	0.50
32	δ -杜松烯 δ -Cadinene	24.728	1.02
33	黏蒿三烯 Artemisia triene	26.094	0.13
34	Unknow	29.883	0.47
35	α -杜松醇 α -Cadinol	30.497	0.32

表 2 假臭草花精油对柑橘木虱驱避活性
Table 2 Repellency of *Praxelis clematidea* floral essential oil against *Diaphorina citri*

浓度 Concentration (μL·mL ⁻¹)	驱避反应率 Repellency (%)				
	6 min	12 min	18 min	24 min	30 min
10	65.15±30.27a	76.28±23.10a	83.08±15.61a	71.85±24.48a	64.29±18.56a
20	70.00±8.66a	60.10±8.88a	69.54±14.83a	80.95±21.82a	78.57±25.75a
30	100.00±0.00a	80.56±17.35a	83.33±14.43a	89.85±8.84a	95.56±7.70a
40	86.67±23.09a	100.00±0.00a	93.33±11.55a	95.24±8.25a	100.00±0.00a
50	77.78±38.49a	90.48±16.49a	94.44±9.62a	95.83±7.22a	100.00±0.00a

表格中同行数据后标有不同小写字母表示在 0.05 水平差异显著性 (Duncan's 多重比较法检验, $P < 0.05$)
Data followed by different letters in the same column indicate significantly different according to Duncan's multiple range test ($P < 0.05$).

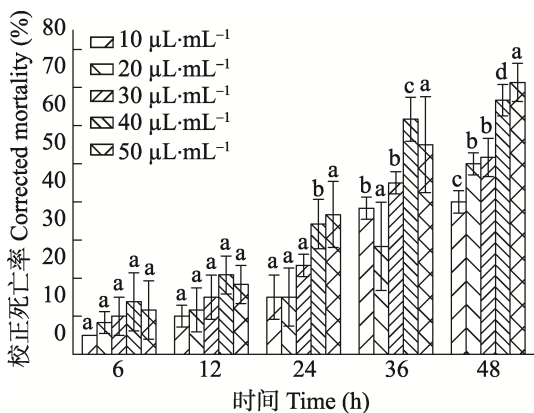


图 3 假臭草花精油对柑橘木虱的熏蒸毒杀活性
Fig. 3 Fumigation toxic activity of *Praxelis clematidea* floral essential oil against *Diaphorina citri*
柱上标有不同字母表示精油在同一浓度, 不同时间点的活性差异显著性
(Duncan's 多重比较法检验, $P < 0.05$)。下图同。
Histograms with the diferent letters indicate significantly different in the same concentration and different time according to Duncan's multiple range test ($P < 0.05$). The same below.

统计结果表明, 拟合得到的毒力回归方程能够反应不同时间段假臭草花精油对柑橘木虱的真实致死效果, 18 h 的 LC_{50} 值为 $44.83 \mu\text{L} \cdot \text{mL}^{-1}$ 。

表 3 假臭草花精油对柑橘木虱成虫熏蒸处理的毒力回归方程
Table 3 Toxicity regression equation of *Praxelis clematidea* floral essential oil against adult of *Diaphorina citri*

时间 Time (h)	毒力回归方程 Toxicity regression equation	致死中浓度 $LC_{50} (\mu\text{L} \cdot \text{mL}^{-1})$	95%置信区间 95% Confidence interval ($\mu\text{L} \cdot \text{mL}^{-1}$)	相关系数 Coefficient (r)	自由度 Degree of freedom(df)	卡方 (P 值) χ^2 test
48	$y=1.137x-1.585$	24.80	19.15-31.45	0.946*	3	2.918 (0.404)

* 表示 x 和 y 有显著线性关系。
There is a significant linear relationship between x and y with*.

3 讨论

3.1 不同部位精油得率差异

由于花和茎是植物的不同器官, 生理作用各不相同, 因此本研究假臭草精油含量随着采集部位的不同而变化, 其中花精油得率高于茎叶精油得率, 但是花和茎叶精油的主要的化学成分所占比例相似, 主要由 β -石竹烯 (花精油 30.34%, 茎叶精油 33.03% (数据未发表) 和 β -萜澄茄油烯 (花精油 43.85%, 茎叶精油 37.85% (数据未发表)) 组成, 目前我们实验数据也证明茎叶精油对柑橘木虱也具有活性 (数据未发表), 因此假臭草全草可以作为柑橘木虱植物源农药的来源。

3.2 致死活性的差异分析

不同浓度的假臭草花精油对柑橘木虱都具有明显的驱避和致死活性, 并且与其浓度和处理时间呈线性相关, 驱避作用和致死效果的持效期长, 利于开发高效和无公害的植物源杀虫剂。并且浸液法最高的致死率 (72.08 ± 4.79) % 高于熏

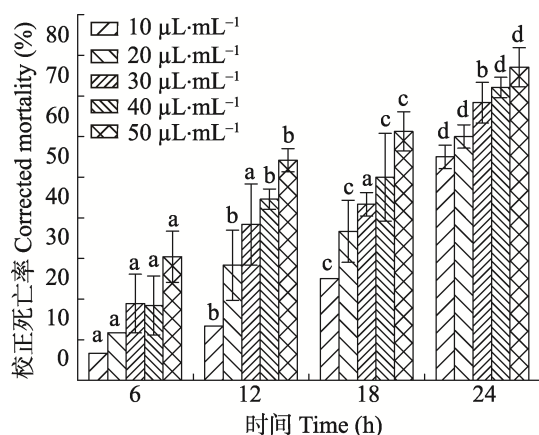


图4 假臭草花精油对柑橘木虱浸液致死活性
Fig. 4 Lethal activity of imersion method of *Praxelis clematidea* floral essential oil against *Diaphorina citri*

蒸法 (66.33 ± 5.00) %致死率, 这可能在浸液法中驱避作用会引起试虫拒食死亡, 也可能浸液法使假臭草花精油的有效成分更加迅速地穿透试虫体壁, 阻碍了试虫的正常生理生化代谢, 作用于相应靶标有关, 但具体作用机理需要进一步研究。

3.3 精油成分与活性关系

经 GC-MS 分析得出假臭草花精油中的化学成分与前人报道有较大差异 (陈峥, 2009), 这可能是采用的不同提取方法、植物生长在不同的地域、生境及采集季节等差异性造成的。但是主要的成分较一致, 是具有较强香气和生物活性的萜类物质组成, 其中含量高的 β -石竹烯就属于倍半萜中的双环半萜型化合物。这些物质是植物自身防御体系与生物的相互适应进化的结果。有研究报道 β -石竹烯对菜青虫 *Pieris rapae* L. 具有拒食和触杀效果 (刘雨晴, 2010) 和对烟草甲

Lasioderma serricorne (F.) (吴彦等, 2016) 具有毒杀活性。 β -石竹烯通过抑制棉蚜虫 *Aphis gossypii* 的乙酰胆碱酯酶、多酚氧化酶、羧酸酯酶和谷胱甘肽-S-转移酶表现出强烈的驱避及毒杀活性 (刘雨晴等, 2010)。此外, β -石竹烯也是艾叶 *Artemisia argyi* Levl. et Van. 挥发油中驱虫的有效成分 (刘美凤和周惠, 2012)。假臭草精油对柑橘木虱的驱避和致死活性可能与其主要成分 β -石竹烯等单一组分的活性有关系, 但也有可能是多种成分协同作用的结果。因此假臭草花精油的活性成分还需要进一步的开展分离、纯化、鉴定和合成等方面的研究, 利于后期工业化生产。

3.4 假臭草精油的开发前景

植物精油可以释放化学信号引诱有益昆虫, 也可以通过毒杀、触杀、驱避和拒食等方法防治害虫 (周琼和梁广文, 2003; 徐正浩等, 2004)。现已有番石榴粗提物开发而成的柑橘木虱驱避剂 (郑基煊等, 2014) 和以印楝素为配方的柑橘木虱杀虫剂 (Weathersbee III and Mckenzie, 2005) 的报道。本研究表明假臭草花精油对柑橘木虱具有良好的驱避活性和致死活性。其不仅资源丰富, 而且影响了入侵地的植物群落结构 (游泳等, 2012), 有进一步入侵和扩张的趋势 (邱宠华等, 2011)。因此, 以假臭草作为植物源农药的生物资源, 进行柑橘木虱驱虫剂和杀虫剂的研究, 可以变废为宝, 解决防治假臭草和柑橘木虱的难题。并且利用非嗜食植物假臭草的次生物-精油不仅有效的防控柑橘木虱, 还减少对环境的污染和不产生抗药性, 同时也会有效降低黄

表4 假臭草花精油对柑橘木虱成虫浸液法处理的毒力回归方程
Table 4 Toxicity regression equation of imersion method of *Praxelis clematidea* floral essential oil against adult of *Diaphorina citri*

时间 Time (h)	毒力回归方程 Toxicity regression equation	致死中浓度 LC ₅₀ ($\mu\text{L}\cdot\text{mL}^{-1}$)	95%置信区间 95% Confidence interval ($\mu\text{L}\cdot\text{mL}^{-1}$)	相关系数 Coefficient (r)	自由度 Degree of freedom(df)	卡方 (P 值) χ^2 test
18	$y=1.350x-2.230$	44.83	36.07-64.31	0.984**	3	1.071 (0.784)

** 表示 x 和 y 有极显著的线性关系

There is a very significant linear relationship between x and y with**.

龙病(柑橘木虱是传播柑橘黄龙病的重要自然虫媒 (Hall *et al.*, 2013) 发生的机率, 作为柑橘有效的保护剂。但是精油在实际应用中受到诸多因素的影响和限制, 例如活性的植物源化合物不稳定和作用药效慢, 难以取得理想的田间防治效果。因此关于假臭草精油规模化应用于柑橘木虱的防治, 还需要对精油杀虫配方进一步的研究。

致谢: 特别感谢福建农林大学植保学院魏太云教授课题组的傅致君研究生提供了柑橘木虱的虫源及饲养经验。感谢美国伊利诺伊州立大学植物生物系 Stephen R. Downie 教授对本文英文摘要提供的修改意见。

参考文献 (References)

- Cen YJ, 2002. Control effect of the non-host plants against the main pests of citrus. Doctoral dissertation. Guangzhou: South China Agricultural University. [岑伊静, 2002. 非嗜食植物次生物质对柑桔主要害虫的控制作用. 博士学位论文. 广州: 华南农业大学.]
- Cen YJ, Ye JM, Xu CB, Feng AW, 2005. The taxis of *Diaphorina citri* to the volatile oils extracted from non-host plants. *Journal of South China Agricultural University*, 26(3): 41–44. [岑伊静, 叶峻铭, 徐长宝, 冯安伟, 2005. 柑橘木虱对几种非嗜食植物挥发油的趋性反应测定. 华南农业大学学报, 26(3): 41–44.]
- Chen XD, Gill TA, Pelz-Stelinski KS, Stelinski LL, 2017. Risk assessment of various insecticides used for management of Asian citrus psyllid, *Diaphorina citri* in Florida citrus, against honey bee, *Apis mellifera*. *Ecotoxicology*, 26(3): 351–359.
- Chen Z, 2009. Bioactivity of extracts from thirty compositae plants against diamondback moth (*Plutella xylostella*) and identification of the secondary metabolites. Doctoral dissertation. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University. [陈峥, 2009. 30 种菊科植物提取物对小菜蛾的生物活性及次生物质成分鉴定. 博士学位论文. 福州: 福建农林大学.]
- Finney DJ, 1971. Probit analysis. *Journal of the Royal Statistical Society*, 21(3): 56–57.
- Jiang ZL, Chen AL, Bai W, Lin J, Zhang X, 2002. Fumigating and contact activity of 6 kinds of essential oils on *Musca domestica* L. *Chinese Journal of Pesticide Science*, 4(1): 85–88. [江志利, 陈安良, 白伟, 林琰, 张兴, 2002. 六种植物精油对家蝇的熏蒸及触杀毒力测定. 农药学报, 4(1): 85–88.]
- Hall DG, Richardson ML, Ammar ED, Halbert SE, 2013. Asian citrus psyllid, *Diaphorina citri*, vector of citrus huanglongbing disease. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 146(2): 207–223.
- Honda K, Omura H, Hayashi N, 1998. Identification of floral volatiles from *Ligustrum japonicum* that stimulate flower visiting by cabbage butterfly, *Pieris rapae*. *Journal of Chemical Ecology*, 24(12): 2167–2180.
- Liu YQ, 2010. Isolation and identification of active components from *Vitex negundo* Linn. and the biological effectiveness against *Aphis gossypii* Glover and *Pieris rapae* Linn. Doctoral dissertation. Tai'an: Shandong Agricultural University. [刘雨晴, 2010. 黄荆杀虫活性成分的分离与鉴定及其对棉蚜和菜青虫的生物效应. 博士学位论文. 泰安: 山东农业大学.]
- Liu YQ, Xue M, Zhang QC, Zhou FY, Wei JQ, 2010. Toxicity of β -caryophyllene from *Vitex negundo* (Lamiales: Verbenaceae) to *Aphis gossypii* Glover (Homoptera: Aphididae) and its action mechanism. *Acta Entomologica Sinica*, 53(4): 396–404. [刘雨晴, 薛明, 张庆臣, 周方圆, 尉吉乾, 2010. 黄荆中 β -石竹烯对棉蚜的毒力和作用机理. 昆虫学报, 53(4): 396–404.]
- Liu MF, Zhou H, 2012. Composition of chemical constituents between essential oil and smog from *Artemisia argyi*. *Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition)*, 40(1): 30–34. [刘美凤, 周惠, 2012. 艾叶挥发油与燃烧烟雾的化学成分比较. 华南理工大学学报(自然科学版), 40(1): 30–34.]
- Mann RS, Rouseff RL, Smoot JM, Castle WS, Stelinski LL, 2011. Sulfur volatiles from *Allium* spp. affect Asian citrus psyllid, *Diaphorina citri* Kuwayama (Hemiptera: Psyllidae), response to citrus volatiles. *Bulletin of Entomological Research*, 101(1): 89.
- Mann RS, Tiwari S, Smoot JM, Rouseff RL, Stelinski LL, 2012. Repellency and toxicity of plant-based essential oils and their constituents against *Diaphorina citri* Kuwayama (Hemiptera: Psyllidae). *Journal of Applied Entomology*, 136(1/2): 87–96.
- Moore DS, 1978. Chi-square tests/Hogg RV(ed.). *Studies in Statistics*. Vol. 19. The Mathematical Association Of America. 6–7.
- Naeem A, Freed S, Feng LJ, Akmal M, Mehmood M, 2016. Monitoring of insecticide resistance in *Diaphorina citri*, Kuwayama (Hemiptera: Psyllidae) from citrus groves of Punjab, Pakistan. *Crop Protection*, 86: 62–68.
- National Pharmacopoeia Committee, 2000. Pharmacopoeia of the People's Republic of China. Chemical Industry Press. 1–720. [国家药典委员会, 2000. 中华人民共和国药典. 化学工业出版社. 1–720.]
- Qiu CH, Wang QZ, Yu Y, 2011. Predicted potential distribution of *Praxelis clematidea* in China. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 17(6): 774–781. [邱宠华, 王奇志, 余

- 岩, 2011. 外来入侵假臭草在中国分布区的预测. 应用与环境生物学报, 17(6): 774–781.]
- Santos MS, Zanardi OZ, Pauli KS, Forim MR, Yamamoto PT, Vendramim JD, 2015. Toxicity of an azadirachtin-based biopesticide on *Diaphorina citri* Kuwayama (Hemiptera: Liviidae) and its ectoparasitoid *Tamarixia radiata* (Waterston) (Hymenoptera: Eulophidae). *Crop Protection*, 74: 116–123.
- Shelton AM, Robertson JL, Tang JD, Perez CJ, Eigenbrode SD, Preisler HK, 1993. Resistance of diamondback moth (Lepidoptera: Plutellidae) to *Bacillus thuringiensis* subspecies in the field. *Journal of Economic Entomology*, 86(3): 697–705.
- Tiwari S, Stelinski LL, Rogers ME, 2012. Biochemical basis of organophosphate and carbamate resistance in Asian citrus psyllid. *Journal of Economic Entomology*, 105(2): 540–548.
- Tang LC, Wang L, Yang XH, Deng SM, 2011. Analysis of the volatile component of the invasive Plant-*Eupatorium catatum* Veldkamp. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 39(10): 5805–5806, 5809. [汤丽昌, 王宁, 杨先会, 邓世明, 2011. 外来入侵植物假臭草挥发性成分分析. 安徽农业科学, 39(10): 5805–5806.]
- Wang J, Li Ya, Lei CL, 2005. The repellency and fumigant activity of *Artemisia vulgaris* essential oil to *Musca domestica* vicina. *Chinese Bulletin of Entomology*, 42(1): 52. [王健, 李雅, 雷朝亮, 2005. 艾蒿精油对家蝇的忌避及熏蒸活性. 昆虫知识, 42(1): 51–53.]
- Vázquez-García M, Velázquez-Monreal J, Medina-Urrutia VM, Cruz-Vargas CDJ, Sandoval-Salazar M, Virgen-Calleros G, Torres-Moán JP, 2009. Insecticide resistance in adult *Diaphorina citri* Kuwayama from Lime orchards in central West Mexico. *Southwestern Entomologist*, 38(4): 579–596.
- Weathersbee III AA, McKenzie CL, 2005. Effect of a neem biopesticide on repellency, mortality, oviposition, and development of *Diaphorina citri* (Homoptera: Psyllidae). *Florida Entomologist*, 88(4): 401–407.
- Wu Y, You CX, Tian ZF, Guo SS, Liu SH, Huang DY, Deng BL, Li ZH, Bai JF, Du SS, 2016. Chemical composition and insecticidal activities of *Vitex negundo* L. var. *cannabifolia* (Sieb. et Zucc.) Hand. -Mazz. essential oil against the cigarette beetle. *Plant Protection*, 42(5): 97–102. [吴彦, 尤春雪, 田兆福, 郭姗姗, 刘绍华, 黄东业, 刘宾玲, 李志华, 白家峰, 杜树山, 2016. 牡荆叶挥发油对烟草甲的杀虫活性. 植物保护, 42(5): 97–102.]
- Xu ZH, Cui SR, He Y, Li D, Zhao M, Zhang X, Yu LQ, Hang Z, 2004. Plant secondary metabolites and their effects on insect management. *Plant Protection*, 30(4): 8–11. [徐正浩, 崔绍荣, 何勇, 李迪, 赵明, 张旭, 余柳青, 2004. 植物次生代谢物质和害虫防治. 植物保护, 30(4): 8–11.]
- You Y, Hu JF, Chen F, Wang J, Wang CF, Fu JW, 2012. Effects of *Eupatorium Catatum* on weeds community and biodiversity of Fujian south-east coastal region. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 27(8): 841–846. [游泳, 胡进锋, 陈峰, 王俊, 王长方, 傅建炜, 2012. 福建东南沿海假臭草对杂草群落及其生物多样性的影响. 福建农业学报, 27(8): 841–846.]
- Zheng JH, Mao RQ, Zhang YH, 2013. A repellent agent for *Diaphorina citri*. China, patent of invention, CN201310655972. 2014-3-19. [郑基焕, 毛润乾, 张宇宏, 2013. 一种柑橘木虱的忌避剂. 中国, 发明专利. CN201310655972. 2014-3-19.]
- Zhou Q, Liang GW, 2003. Behavior manipulation of plant volatiles against herbivorous insect and its mechanism. *Journal of Xiangtan Normal University (Natural Science Edition)*, 25(4): 55–60. [周琼, 梁广文, 2003. 植物挥发性次生物质对昆虫的行为调控及其机制. 湘潭师范学院学报(自然科学版), 25(4): 55–60.]
- Zhu HM, Zeng XN, Zaka SM, Cen YJ, 2010. Influence of the essential oil of guava leaves on the feeding behavior of the Asian citrus psyllid. *Journal of Environmental Entomology*, 34(4): 483–487. [朱红梅, 曾鑫年, Syed M. Zaka, 岑伊静, 2010. 番石榴精油对柑橘木虱刺吸取食行为的影响. 环境昆虫学报, 32(4): 483–487.]