

茶园杂草艾蒿挥发物对茶小绿叶蝉行为的影响*

张 辉** 李慧玲 王定锋 吴光远*** 王庆森***

(福建省农业科学院茶叶研究所, 福州 350012)

摘 要 【目的】研究艾蒿 *Artemisia argyi* 挥发物对茶小绿叶蝉 *Empoasca onukii* 的驱避或引诱作用, 以期为茶小绿叶蝉“推-拉”策略的应用提供理论依据。【方法】采用 Y 型嗅觉仪, 测定艾蒿植株挥发物对茶小绿叶蝉 3 龄若虫的行为选择, 通过固相微萃取-气质联用技术提取和分析艾蒿植株挥发物组分, 并对活性单体进行田间试验。【结果】在室内, 艾蒿嫩茎植物挥发物对茶小绿叶蝉具有极显著的驱避作用 ($P<0.01$); 提取并鉴定出艾蒿植物挥发性化合物 72 种, 其中, 单组分中 β -石竹烯、D-樟脑、大牛儿烯 D 和左旋- α -蒎烯化合物的相对含量较大, 分别占总量的 27.81%、10.94%、7.19% 和 4.23%; 浓度为 1 $\mu\text{L/mL}$ 和 0.01 $\mu\text{L/mL}$ 的挥发物单体 β -蒎烯对茶小绿叶蝉 3 龄若虫具有极显著的驱避作用 ($P<0.01$); 浓度为 1 $\mu\text{L/mL}$ 的 β -石竹烯和浓度为 100 $\mu\text{L/mL}$ 的 *cis*-香芹醇对茶小绿叶蝉 3 龄若虫具有显著的驱避作用 ($P<0.05$), 浓度为 0.01 $\mu\text{L/mL}$ 的胡椒酮对茶小绿叶蝉 3 龄若虫具有显著引诱作用 ($P<0.05$); 田间试验结果表明, β -蒎烯、 β -石竹烯和 *cis*-香芹醇具有驱避茶小绿叶蝉成虫的作用, 与对照比较, 降低了黄板上茶小绿叶蝉成虫数量。【结论】艾蒿植物挥发物中 β -蒎烯、 β -石竹烯和 *cis*-香芹醇 3 种化合物是驱避茶小绿叶蝉的重要物质, 其驱避效果与挥发物的物质浓度有关。

关键词 艾蒿; 挥发物; 茶小绿叶蝉; 驱避作用

Effects of *Artemisia argyi* volatiles on the behavior of the tea green leafhopper (*Empoasca onukii*) in tea plantations

ZHANG Hui** LI Hui-Ling WANG Ding-Feng WU Guang-Yuan*** WANG Qing-Sen***

(Tea Research Institute, Fujian Academy of Agricultural Sciences, Fuzhou, 350012, China)

Abstract 【Objectives】To study the effect of mugwort *Artemisia argyi* volatiles on *Empoasca onukii* in order to identify compounds suitable for developing a “push-pull” strategy to control this pest in tea plantations. 【Methods】Mugwort volatiles were collected and identified with SPME-GC-MS and the behavioral responses of *E. onukii* to 10 of these compounds were then tested in a Y-tube olfactometer. Behaviorally-active compounds were also tested in a tea plantation. 【Results】Third instar nymphs had a significant negative taxis response to *A. argyi* odors ($P<0.01$). Seventy-two volatile compounds were identified from *A. argyi* shoots with fresh leaves. Among these, β -caryophyllene, D-camphre, Germacrene D and 1S- α -Pinene were the most abundant, accounting for 27.81%, 10.94%, 7.19% and 4.23% of the total content, respectively. Compared to the control, β -pinene at concentrations of 1 $\mu\text{L/mL}$ and 0.01 $\mu\text{L/mL}$, β -caryophyllene at the concentration of 1 $\mu\text{L/mL}$ and *cis*-carveol at the concentration of 100 $\mu\text{L/mL}$, significantly repelled 3rd instar nymphs ($P<0.01$ or $P<0.05$), whereas piperitone, at the concentration of 1 $\mu\text{L/mL}$, significantly attracted these ($P<0.05$). Field experiments show that β -pinene, β -caryophyllene and *cis*-carvol repel adult green leafhoppers, thereby reducing the number captured on yellow board traps. 【Conclusion】Three bioactive compounds of *A. argyi* volatiles (β -pinene, β -caryophyllene and *cis*-carvol) are repellent to *E. onukii* and the degree of repellence increases with dosage.

Key words *Artemisia argyi*; volatiles; *Empoasca onukii*; repellency

*资助项目 Supported projects: 省属公益类科研院所专项 (2021R1029005); 国家茶叶产业技术体系 (CARS-19)

**第一作者 First author, E-mail: zh5428580@163.com

***共同通讯作者 Co-corresponding authors, E-mail: gywupt@163.com; qs_wang130@163.com

收稿日期 Received: 2021-09-28; 接受日期 Accepted: 2022-04-25

茶小绿叶蝉 *Empoasca onukii* 属于半翅目 Hemiptera 叶蝉科 Cicadellidae, 因虫体小, 为害隐蔽, 且发生世代多, 世代重叠现象严重, 已成为我国茶树上防治难度大的主要害虫(张汉鹄和谭济才, 2004)。成虫和若虫通过刺吸茶树嫩梢汁液, 致使受害芽叶萎缩, 芽梢生长停滞, 叶脉变红, 叶尖和叶缘红褐焦枯, 严重影响茶叶的产量和品质(朱俊庆, 1999)。目前, 对于该虫的防治主要以化学防治为主, 但化学农药的频繁使用导致农药残留、抗性及再增猖獗等问题(周铁锋等, 2015)。因此, 寻求其它有效控制该虫而不污染环境的防治方法受到各方的关注。害虫“推-拉”治理策略是一种新颖且高效的害虫综合治理手段, 能解决化学防治出现的一系列问题(陈宗懋, 2013)。害虫的“推-拉”策略由 Pyke 等(1987)提出, 利用驱避剂保护目标植物或使用引诱剂吸引目标害虫的一种害虫综合治理策略, 其特点是保护生态环境, 农药使用量少或不使用农药, 且可持续控制害虫(Cook *et al.*, 2007)。该策略已在农业害虫, 如棉铃虫 *Helicoverpa armigera* (Pyke *et al.*, 1987)、马铃薯甲虫 *Leptinotarsa decemlineata* (Martel *et al.*, 2005) 和蚜虫(Pickett and Glinwood, 2007)等的综合防治中取得显著效果。

对茶园中茶小绿叶蝉“推-拉”策略防治的研究主要集中于从茶园外界的芳香植物和绿肥植物中筛选具有引诱或驱避的挥发性化学物质及其田间应用(张正群, 2013; Zhang and Chen, 2015; Han *et al.*, 2020)。研究表明, 对茶小绿叶蝉具有诱杀作用的 α -farnesene、Z-3-hexenyl acetate 和 MeSA 等物质对茶园天敌茶尺蠖绒茧蜂 *Apanteles* sp. 和微小裂骨缨小蜂 *Schizophragma parvula* 具有诱杀作用(黄毅等, 2009; 韩善捷等, 2016), 但在茶园应用诱杀茶小绿叶蝉的引诱剂未见对天敌产生影响(Han *et al.*, 2020); 引诱或驱避的植物间作于茶园, 可能会破坏茶园原生态平衡, 导致茶园病虫害发生严重(刘瑜等, 2021)。因此, 在不破坏茶园生态平衡的条件下, 实施“推-拉”策略防治茶小绿叶蝉需从茶园资源中筛选引诱或驱避的植物, 而茶小绿叶蝉原寄

生于杂草和小灌木(安徽农学院茶业系, 1980), 如能从茶园杂草中筛选出引诱或驱避该叶蝉的植物, 并鉴定出关键有效成分, 筛选出对茶小绿叶蝉具有引诱或驱避的物质作为行为调控剂, 同时可以就地取材, 在保持原生态环境下使用防治害虫的“推-拉”策略可能性。

艾蒿 *Artemisia argyi* 是茶园常见的一种杂草, 具有特殊的芳香气味。研究表明艾蒿挥发的精油对双斑萤叶甲 *Monolepta hieroglyphica* 成虫(袁海滨等, 2014)、朱砂叶螨 *Tetranychus cinnabarinus* 卵(马新耀等, 2017)、绿豆象 *Callosobruchus chinensis* 成虫(袁海滨等, 2017)、家蝇 *Musca domestica ricina* (王健等, 2005)、小菜蛾 *Plutella xylostella* 幼虫及成虫(王晶等, 2018)具有触杀、拒食、胃毒、驱避和抑制产卵等作用, 对茶园害虫茶丽纹象甲 *Mylokerinus aurolineatus* 表现出一定的驱避性(边文波等, 2012), 对茶橙瘿螨 *Acaphylla thea* 成若螨具有明显的触杀和趋避效果(李红莉等, 2019)。而有关艾蒿植物挥发物对茶小绿叶蝉的行为调控作用尚不清楚。因此, 本研究利用 Y 型嗅觉仪测定艾蒿嫩茎植株挥发物对茶小绿叶蝉的行为影响, 并采用固相微萃取-气质联用技术鉴定艾蒿挥发物组分, 通过室内生测定进一步明确其活性组分, 为明确艾蒿植物挥发物对茶小绿叶蝉的行为调控机理提供参考, 以期对害虫的“推-拉”防治策略的应用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试昆虫

供试的茶小绿叶蝉卵采自福建省农业科学院茶叶研究所 2 号山茶叶基地, 将带有茶小绿叶蝉卵的茶梢带回室内, 置于塑料桶(直径 30 cm, 高 40 cm)中, 饲养至 3 龄若虫, 经饥饿处理 1 h 后, 备用。

1.2 供试化合物

供试化合物的种类及详细信息见表 1。在鉴定艾蒿挥发物时, 将化合物单体溶解于 99.9%高

表 1 供试化合物简介
Table 1 Summary of authentic used in the experiments

标准品 Authentic standards	纯度 (%) Purity (%)	来源 Source
cis-香芹醇 cis-carveol	>97	阿法埃莎公司 Alfa Aesar
(E) -β-法尼烯 (E)-β-farnesene	>98	北京百灵威科技有限公司 J&K Scientific Ltd.
(-)-α-萜澄茄油烯 (-)-α-cubebene	>99	北京百灵威科技有限公司 J&K Scientific Ltd.
(+)-α-长叶烯 (+)-α-longipinene	>96	北京百灵威科技有限公司 J&K Scientific Ltd.
β-蒎烯 β-pinene	>94	梯希爱(上海)化成工业发展有限公司 TCI Shangha
β-罗勒烯 β-ocimene	>98	梯希爱(上海)化成工业发展有限公司 TCI Shangha
β-石竹烯 β-caryophyllene	>98	北京百灵威科技有限公司 J&K Scientific Ltd.
(s)-(+)-香芹酮 (+)-carvone	>96	北京百灵威科技有限公司 J&K Scientific Ltd.
丁香酚 Eugenol	>96	北京百灵威科技有限公司 J&K Scientific Ltd.
胡椒酮 Piperitone	>94	北京百灵威科技有限公司 J&K Scientific Ltd.

纯度二氯甲烷(上海麦克林生化科技有限公司生产)配制浓度为 1×10^{-4} μL/mL。在测定艾蒿挥发物单体对茶小绿叶蝉的趋性行为时,化合物单体以液体石蜡(国药集团化学试剂有限公司生产)为溶剂,分别配制成浓度为 100、1 和 0.01 μL/mL 的溶液。

1.3 茶小绿叶蝉 3 龄若虫对艾蒿挥发物的选择行为

将茶园中的艾蒿植株移栽于花盆(高 105 mm,直径 120 mm)中,选择 6-8 叶艾蒿植株为味源,参照钮羽群等(2014)的方法,用 Y 型嗅觉仪测定茶小绿叶蝉 3 龄若虫对艾蒿挥发物的趋性反应。Y 型嗅觉仪主臂长 12 cm,两侧臂长 12 cm,臂直径 2.5 cm,主臂与两臂夹角为 75°,两侧臂用 Teflon 管分别连接艾蒿植株和对照(洁净空气)后再连接气泵。开启气泵后,调整流量计使气流以 100 mL/min 的平稳流速通过每个味源进入 Y 型管两臂。气流先进入活性炭过滤器过滤,再通过洗瓶加湿,最后进入气味源,嗅觉仪置于暗箱内。由释放管管口将 1 头若虫放至 Y 型管基部,观察若虫的趋性反应,当若虫处于释放管 1/2 处开始计时,当虫越过侧臂 1/2 处且停留超过 1 min 时,记为若虫做出选择反应;当 20 min 后无明显选择趋向,记为无反应。共测试 20 头若虫,每头若虫仅测试 1 次。完成测试后,将 Y 型管两臂互调方向,以消除位置引起的误差。试

验设置艾蒿剂量为 5、10、15、20 和 25 g,每个剂量重复 3 次,每剂量测定完毕后,将 Y 形管、味源瓶、对照瓶和加湿瓶酒精清洗,100 °C 烘箱烘干,活性炭置于 100 °C 烘箱内活化 4 h 解吸附,清除吸附的气体,备用。

1.4 艾蒿挥发物的提取

采用固相微萃取法(olid-phase microextraction, SPME)提取艾蒿的挥发物。取 6.37 g 艾蒿植物嫩茎放入 20 mL 的进样瓶中,将老化 5 min 的萃取头(萃取头 50/30 μm DVB/CAR,美国 Supelco 公司)暴露于进样瓶未接触到艾蒿的空气中,在 40 °C 下提取 45 min 后,用手柄将纤维头推回针头内拔出,然后插入 GC-MS 进样器中,250 °C 解析 3 min,以空的进样瓶作为对照,试验重复 8 次,于 250 °C 解析 3 min,同时启动气质仪器采集数据。

1.5 挥发物组分的鉴定和定量分析

利用 Agilent 6890N-5975B 气相色谱-质谱联用仪分析艾蒿提取物成分。待选植物挥发物的气相色谱条件:DB-5MS 石英毛细管柱(60 m × 250 μm × 0.25 μm),柱温 60-325 °C。进样口温度 230 °C,载气 He,流速 1.5 mL/min。采用程序升温方式:50 °C 保存 2 min,然后 3 °C/min 升至 80 °C 保存 2 min,然后 5 °C/min 升至 180 °C 保持 1 min,然后 10 °C/min 升至 230 °C 保持

5 min, 20 °C/min 升至 250 °C, 保持 4 min, 不分流进样。质谱条件: 离子源温度 230 °C, 四级杆温度 150 °C, 电离方式: 电子轰击源 (EI), 电子能量 70 eV, 扫描质量范围: 50-600 m/z。

通过对比标准品的保留时间、NIST 化学数据库质谱数据和保留指数 (Retention index, RI) 进行定性分析; 依据样品组分的峰面积对于内标峰面积的比例进行相对定量分析。

1.6 茶小绿叶蝉 3 龄若虫对艾蒿挥发物单体的选择行为

本研究选择对桃蚜 *Myzus persicae* (郭帅帅等, 2017)、雌臭虫 *Lygocoris pabulinus* (申利群等, 2004)、荔枝蒂蛀虫 *Conopomorpha sinensis* (王少山等, 2011) 等多种昆虫具有驱避或引诱作用的 β -石竹烯、(*E*)- β -法尼烯、(-)- α -萜荜澄茄油烯、(+)- α -长叶烯、 β -蒎烯、 β -罗勒烯、*cis*-香芹醇、(s)-(+)-香芹酮、丁香酚和胡椒酮 10 种艾蒿挥发物, 10 种化合物溶液配制方法详见 1.2 供试化合物。吸取 100 μ L 配置的供试化合物溶液作为味源, 100 μ L 液体石蜡作为对照, 在室内条件, 对茶小绿叶蝉 3 龄若虫进行行为测定, 测定方法同 1.3 描述。

1.7 活性单体化合物在茶园对茶小绿叶蝉成虫的驱避作用

选择在室内对茶小绿叶蝉具有驱避作用的物质, 采用液体石蜡配制成浓度为 100、1 和 0.01 μ L/mL 的活性单体, 吸取单体剂量 100 μ L 于一个橡皮头的凹槽内, 待其全部渗入橡皮头内即制成缓释诱芯。在茶园小绿叶蝉成虫期, 田间悬挂黄色诱虫板 (底部高于茶树蓬面 20 cm), 分别将各挥发物单体剂量的缓释诱芯再悬挂于黄色诱虫板的中上部, 以同体积液体石蜡制成的缓释诱芯为对照, 每个处理重复 6 次, 每处理间间隔 10 m。待诱芯悬挂后第 3 天, 观察并统计每个处理黄色诱虫板上茶小绿叶蝉数量。

1.8 数据处理与统计分析

采用 SPSS16.0 分析茶小绿叶蝉室内行为和田间试验数据, 采用 χ^2 检验比较茶小绿叶蝉室

内行为测定数据的差异显著性, 采用单因素 Duncan's 新复极差法进行田间数据的多重比较, 采用 Origin 2021 作图。

2 结果与分析

2.1 茶小绿叶蝉 3 龄若虫对艾蒿挥发物的选择行为

茶小绿叶蝉进入 Y 形管基部后, 茶小绿叶蝉的行为表现为在 Y 形管基部不爬行, 在 Y 形管直线前进到达管臂某一位置徘徊和 Y 形管中旋转或来回爬行 3 种。

茶小绿叶蝉 3 龄若虫对艾蒿植株挥发物的选择行为反应结果见图 1。不同剂量的艾蒿植株挥发物对茶小绿叶蝉 3 龄若虫具有显著的驱避效应 ($P < 0.01$), 且随着艾蒿剂量的增加 3 龄若虫的选择率降低, 艾蒿剂量为 5 g 时, 叶蝉对艾蒿气味的选择率为 33.33%, 艾蒿剂量为 25 g 时, 选择率降低为 23.68%。

2.2 艾蒿挥发物成分的鉴定

通过 GC-MS 鉴定出艾蒿挥发性化合物 72 种, 包括萜类、芳香族化合物和脂肪族化合物 (表 2)。其中, 萜烯类化合物为主要成分, 包括单萜类和半倍萜物质, 分别为 24 种和 20 种, 总含量约占挥发物释放总量的 89.92%; 芳香族化合物包括苯甲醛、4-异丙基甲苯、苯乙醇等 6 种化合物, 约占挥发物总量的 4.08%; 其余挥发物为脂肪族化合物, 约占挥发物总量的 6.70%。其中释放量最大的物质是 β -石竹烯、D-樟脑、大牛儿烯 D 和左旋- α -蒎烯, 分别占挥发物总含量的 27.81%、10.94%、7.19% 和 4.23%。

2.3 茶小绿叶蝉 3 龄若虫对艾蒿挥发物单体的选择行为

通过 Y 型嗅觉仪, 测定了艾蒿 10 种主要挥发物单体对茶小绿叶蝉 3 龄若虫的行为反应 (表 3)。与对照比较, 浓度为 1 μ L/mL ($\chi^2=6.91$, $df=1$, $P=0.0086$) 和 0.01 μ L/mL ($\chi^2=9.66$, $df=1$, $P=0.0019$) 的 β -蒎烯对茶小绿叶蝉 3 龄若虫具有极显著的驱避作用; β -石竹烯在浓度为 1 μ L/mL 对茶小

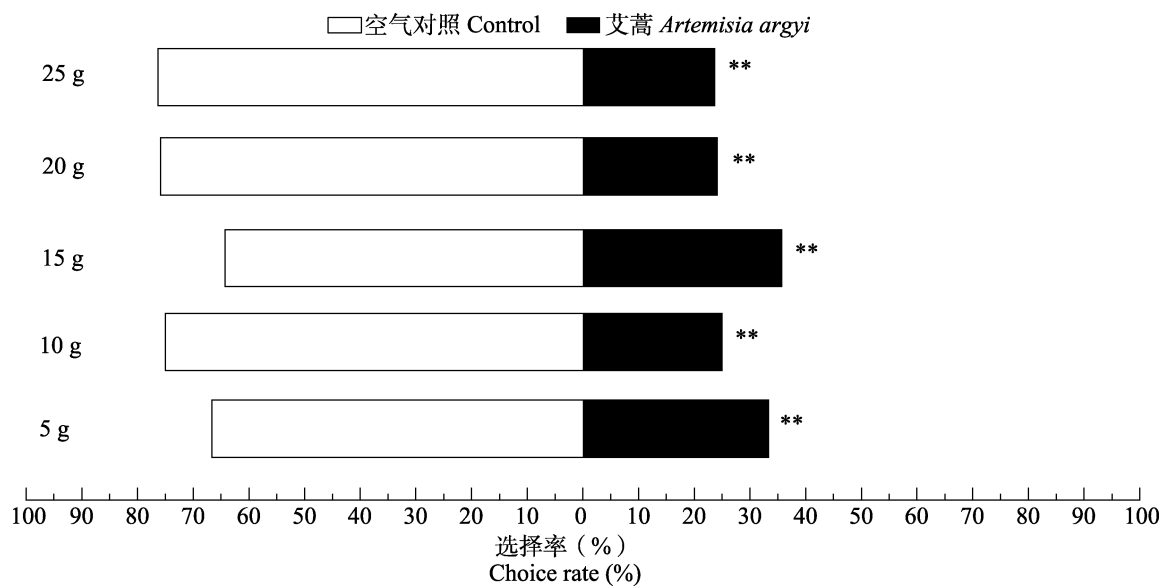


图 1 茶小绿叶蝉 3 龄若虫对不同剂量的艾蒿植物挥发物的行为反应

Fig. 1 Behavioral responses of the 3rd instar nymphs *Empoasca onukii* to *Artemisia argyi* volatiles of different doses

表示差异极显著 ($P < 0.01$, 卡方检验)。 indicates significant differences at 0.01 level by the Chi-square test.

表 2 艾蒿挥发物主要成分及相对含量

Table 2 Main components and the relative contents of volatiles from *Artemisia argyi*

峰号 Peak no.	保留时间 (min) Retention time (min)	保留指数 Retention index	组分 Compounds	相对于内标的量 (%) Relative content against internal standard (%)
1	12.94	901.85	薰衣草三烯 Santolina triene	1.07
2	14.26	928.04	α -侧柏烯 alpha-thujene	0.62
3	14.71	937.11	左旋- α -蒎烯 1S-alpha-pinene	4.23
4	15.60	954.74	茨烯 Camphene	3.77
5	16.19	966.39	苯甲醛 Benzaldehyde	0.06
6	16.69	976.39	桉烯 Sabinene	1.36
7	16.97	982.06	β -蒎烯 beta-pinene	3.02
8	18.76	1 020.45	2-萜烯 2-carene	1.32
9	19.30	1 032.97	4-异丙基甲苯 4-cymene	2.83
10	20.00	1 049.34	β -罗勒烯 beta-ocimene	1.29
11	21.06	1 073.89	辛醇 1-octanol	0.02
12	21.23	1 077.86	顺- β -萜品醇 cis-beta-terpineol	2.48
13	21.74	1 089.65	萜品油烯 Terpinolene	0.39
14	21.93	1 093.98	1-甲基-4-(1-甲基乙烯基)苯 1-methyl-4-(1-methylethenyl)-benzene	0.12
15	22.16	1 099.40	山梨酸乙酯 2,4-Hexadienoic acid, ethyl ester	0.05
16	22.27	1 102.28	芳樟醇 Linalool	0.71
17	22.90	1 119.51	苯乙醇 Phenylethyl alcohol	0.34
18	23.04	1 123.50	香桉醇 Sabinol	0.07

续表 2 (Table 2 continued)

峰号 Peak no.	保留时间 (min) Retention time (min)	保留指数 Retention index	组分 Compounds	相对于内标的量 (%) Relative content against internal standard (%)
19	24.41	1 160.97	D-樟脑 D-camphre	10.94
20	24.50	1 163.39	左旋薄荷酮 L-menthone	0.28
21	24.77	1 170.94	松香芹酮 Pinocarvone	0.47
22	24.84	1 172.79	异龙脑 Isoborneol	0.05
23	25.18	1 182.05	龙脑 Borneol	1.81
24	25.42	1 188.74	4-松油醇(-)-4-terpineol	1.20
25	25.76	1 198.14	水杨酸甲酯 Methyl salicylate	0.10
26	25.92	1 202.93	松油醇(-)-alpha-terpineol	2.82
27	25.98	1 204.57	桃金娘烯醇 Myrtenol	0.17
28	26.33	1 215.66	马鞭草烯醇(-)-verbenone	0.19
29	26.52	1 221.69	1,3,3-三甲基-2-氧杂双环[2.2.2]辛烷-6-酮 2-Oxabicyclo[2.2.2]octan-6-one, 1,3,3-trimethyl-	0.03
30	26.66	1 226.10	顺-香芹醇 cis-carveol	1.22
31	26.93	1 234.58	1,3,3-三甲基-2-氧杂双环[2.2.2]辛烷-6-醇 2-oxabicyclo[2.2.2]octan-6-ol, 1,3,3-trimethyl-	0.03
32	27.30	1 246.32	长叶薄荷酮 Pulegone	0.08
33	27.48	1 251.71	右旋香芹酮(+)-carvone	0.48
34	27.80	1 261.99	胡椒酮 Piperitone	0.04
35	27.90	1 264.92	3-甲基-6-(1-甲基乙基)-7-噁双环[4.1.0]-2-庚酮 7-oxabicyclo[4.1.0]heptan-2-one, 3-methyl-6-(1-methylethyl)-	0.03
36	28.07	1 270.47	柠檬醛 Geranial	0.04
37	28.44	1 282.05	乙酸熏衣草酯(.+/-)-lavandulol, acetate	0.06
38	28.52	1 284.66	紫苏醛(-)-Perillaldehyde	0.59
39	28.71	1 290.37	(1,7,7-三甲基降冰片烷-2-YL)乙酸 Acetic acid, 1,7,7-trimethyl-bicyclo[2.2.1]hept-2-yl ester	0.57
40	28.91	1 296.73	黄樟素 Safrole	0.32
41	29.19	1 306.35	L-紫苏醇(-)-perillyl alcohol	0.26
42	30.01	1 335.02	乙酸香芹酯 cis-carvyl acetate	0.23
43	30.16	1 340.29	甘香烯 Elixene	0.33
44	30.51	1 352.26	3-苯丙酸乙酯 Benzenepropanoic acid, ethyl ester	0.06
45	30.69	1 358.62	丁香酚 Eugenol	0.81
46	31.30	1 380.22	衣兰烯 Ylangene	0.08
47	31.49	1 386.75	(-)- α -萆澄茄油烯(-)-alpha.-cubebene	1.26
48	31.77	1 396.55	β -波旁烯 beta-bourbonene	2.18
49	33.07	1 445.29	β -石竹烯 β -caryophyllene	27.81
50	33.12	1 447.25	β -萆澄茄油烯 beta-cubebene	0.64

续表 2 (Table 2 continued)

峰号 Peak no.	保留时间 (min) Retention time (min)	保留指数 Retention index	组分 Compounds	相对于内标的量 (%) Relative content against internal standard (%)
51	33.20	1 450.19	异长叶烯 Isolongifolene	0.05
52	33.36	1 456.47	(E)-β-法尼烯(E)-beta-farnesene	2.71
53	33.48	1 460.78	长叶烯 Longifolene	0.05
54	33.55	1 463.53	雪松烯 Cedrene	0.10
55	33.63	1 466.67	γ-依兰油烯 γ-muurolene	0.17
56	33.82	1 473.53	α-石竹烯 alpha-caryophyllene	3.88
57	34.04	1 481.96	(+)-环苜蓿烯(+)-cyclosativene	0.04
58	34.31	1 492.35	1-Pentadecene1-十五烯	0.15
59	34.49	1 499.02	大牛儿烯 D Germacrene D	7.19
60	34.59	1 503.13	β-红没药烯 beta-bisabolene	0.48
61	34.71	1 507.93	α-芹子烯 alpha-selinene	3.11
62	35.21	1 527.76	1,2,4a,5,6,8a-六氢-4,7-二甲基-1-(1-甲基乙基) 萘 4,9-cadinadiene	0.55
63	35.27	1 530.48	d-杜松烯 delta-cadinene	0.76
64	35.41	1 535.91	菖蒲烯 Calamenene	0.10
65	35.70	1 547.59	1,2,3,4,4A,7-六氢-1,6-二甲基-4-(1-异丙基)-萘 1,4-Cadinadiene	0.12
66	35.79	1 551.36	α-杜松烯 alpha-cadinene	0.14
67	36.17	1 566.38	反式-橙花叔醇 trans-nerolidol	0.06
68	36.87	1 594.57	(-)-桉油烯醇(-)-Spathulenol	0.11
69	37.04	1 602.10	氧化石竹烯 Caryophyllene oxide	1.22
70	42.62	1 916.98	氧化香紫苏醇 Sclareol oxide	0.02
71	43.60	1 969.04	9-十六碳烯酸乙酯 Ethyl 9-hexadecenoate	0.02
72	44.00	1 989.86	棕榈酸乙酯 Hexadecanoic acid, ethyl ester	0.06

绿叶蝉 3 龄若虫也具有显著的驱避作用 ($\chi^2=4.69$, $df=1$, $P=0.043$); cis-香芹醇在浓度为 100 $\mu\text{L/mL}$ 时对茶小绿叶蝉 3 龄若虫具有显著驱避作用 ($\chi^2=4.81$, $df=1$, $P=0.028$); 胡椒酮在浓度为 0.01 $\mu\text{L/mL}$ 浓度时对茶小绿叶蝉 3 龄若虫具有显著引诱作用 ($\chi^2=4.97$, $df=1$, $P=0.026$)。

2.4 活性单体在茶园对茶小绿叶蝉成虫的驱避作用

田间试验结果表明(图 2),与对照相比,β-蒎烯、β-石竹烯和 cis-香芹醇 3 种物质在田间均可以降低黄板上茶小绿叶蝉成虫的数量,其中,β-蒎烯在 100、1 和 0.01 $\mu\text{L/mL}$ 3 个浓度时,显

著降低了黄板上茶小绿叶蝉成虫的数量 ($F=8.18$, $df=3$, $P=0.0006$); β-石竹烯,与对照相比,显著降低了黄板上茶小绿叶蝉成虫的数量 ($F=9.84$, $df=3$, $P=0.0001$),黄板上茶小绿叶蝉数量随处理浓度的增加而增加; cis-香芹醇在 100 $\mu\text{L/mL}$ 和 1 $\mu\text{L/mL}$ 2 个浓度时,与对照相比,显著降低了黄板上茶小绿叶蝉成虫的数量 ($F=7.23$, $df=3$, $P=0.0012$),黄板上茶小绿叶蝉的数量随处理浓度的增加而减少。β-石竹烯黄板上的茶小绿叶蝉数量在 3 个物质整体较少,是对茶小绿叶蝉成虫驱避作用最强的物质,其中,β-石竹烯在 0.01 $\mu\text{L/mL}$ 浓度时,对茶小绿叶蝉的驱避作用最强,与对照相比,叶蝉数量下降了 48.23%。

表 3 茶小绿叶蝉 3 龄若虫对 10 种艾蒿挥发物成分的行为反应
Table 3 Behavioral responses of the 3rd instar nymphs *Empoasca onukii* to 10 compounds in volatile from *Artemisia argyi*

组分 Components	味源 (μL/mL) Dosage (μL/mL)	味源叶蝉数量 (头) Number of leafhopper to choose odors (ind.)	对照叶蝉数量 (头) Number of leafhoppers to choose control (ind.)	显著性 Significant
cis-香芹醇 cis-carveol	100	19	35	*
	1	18	25	
	0.01	28	30	
β-罗勒烯 β-ocimene	100	20	24	
	1	21	24	
	0.01	18	23	
(E)-β-法尼烯(E)-β-farnesene	100	29	20	
	1	24	18	
	0.01	29	24	
(-)-α-萜澄茄油烯 (-)-α-Cubebene	100	15	16	
	1	18	13	
	0.01	19	11	
(+) -α-长叶烯 (+) -α-longipinene	100	10	17	
	1	10	12	
	0.01	13	13	
丁香酚 Eugenol	100	12	16	
	1	10	14	
	0.01	18	12	
β-蒎烯 β-pinene	100	16	20	
	1	13	30	
	0.01	10	29	
β-石竹烯 β-caryophyllene	100	16	22	
	1	17	31	
	0.01	16	21	
胡椒酮 Piperitone	100	10	16	
	1	13	17	
	0.01	24	10	
右旋香芹酮(+) -carvone	100	11	19	*
	1	11	15	
	0.01	18	16	

*表示差异显著 ($P<0.05$, 卡方检验), **表示差异极显著 ($P<0.01$, 卡方检验)。
* and ** indicates significant differences at 0.05 and 0.01 levels by the Chi-square test, respectively.

3 结论与讨论

自然界中,非寄主植物的气味可能会影响昆虫的定向和分布行为 (Egigu *et al.*, 2011; Zhang *et al.*, 2014)。本研究室内试验表明艾蒿植物挥发物对茶小绿叶蝉若虫具有驱避作用 (图 1),相关研究表明,艾蒿植物挥发物对茶丽纹象甲成

虫 *Myllocerinus aurolineatus* 和茶橙瘿螨 *Acaphylla thea* 成若螨均具有驱避作用 (边文波等, 2012; 李红莉等, 2019),表明艾蒿是一种对茶园多种害虫具有驱避作用的植物。因此,艾蒿植物可以作为在茶园害虫“push-pull”栖境管理策略中的“push”因子加以应用。
趋避植物能够释放干扰害虫行为或趋避害

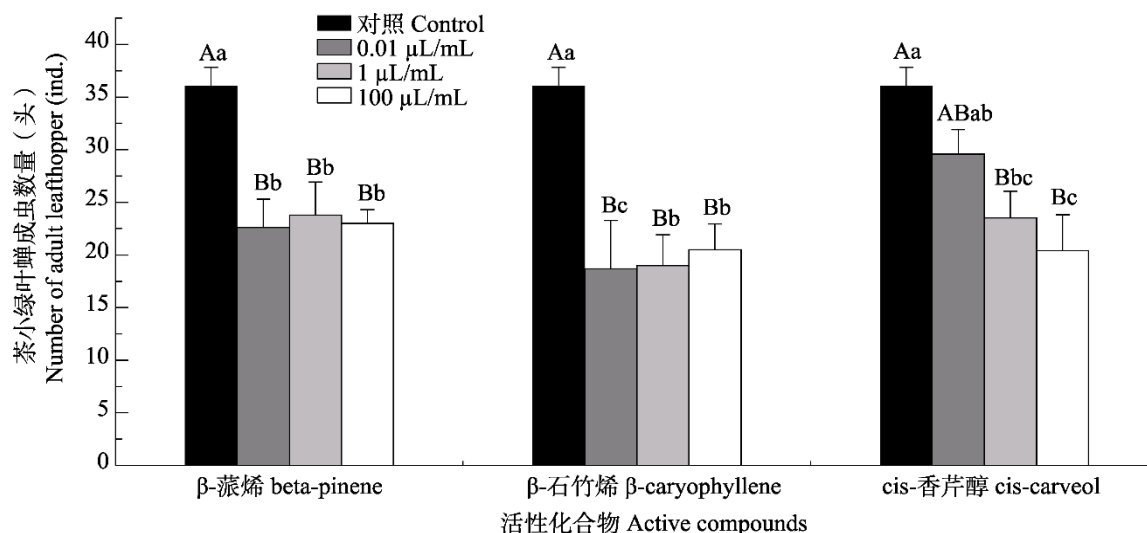


图 2 3 种活性化合物在茶园对茶小绿叶蝉成虫的作用

Fig. 2 Effects of three active compounds on adult tea leafhoppers in tea plantation

柱上标有不同大写字母表示经 Duncan's 新复极差法比较差异极显著 ($P < 0.01$), 标有不同小字母

表示经 Duncan's 新复极差法比较差异显著 ($P < 0.05$)。

Histograms with different uppercase letters indicate extremely significant differences at 0.01 level by Duncan's new multiple range test, and with different lowercase letters indicate significant differences at 0.05 level by Duncan's new multiple range test.

虫的挥发性化合物 (Zhang and Schlyter, 2004)。为明确艾蒿植物对茶小绿叶蝉驱避作用的关键性挥发性化合物, 通过固相微萃取-气质联用技术提取鉴定出艾蒿挥发物 72 种, 萜烯类化合物为主要成分, 总含量约占挥发物释放总量的 89.92%, 主要成分 β -石竹烯、D-樟脑、大牛儿烯 D 和左旋- α -蒎烯, 与水蒸气蒸馏法 (董岩等, 2005; 孟慧和许勇, 2009) 和有机溶液常压渗漉法 (严泽群和张秀兰, 2008) 提取艾蒿精油主要成分具相似, 但因由于产地、时间和提取方法的不同, 获得艾蒿植物挥发物 (香精油) 的主要成分也不完全一致。

艾蒿植物挥发物中萜烯类化合物含量最高, 萜烯类化合物是最广泛和最重要的一类植物中的次生代谢产物, 可以产生毒性, 对昆虫具有拒食和驱避作用 (Arimura *et al.*, 2005), 本研究选择的 10 种萜烯类挥发物中有 3 种对茶小绿叶蝉具有驱避作用, 分别是 β -石竹烯、 β -蒎烯和 cis-香芹醇, 这 3 种物质对昆虫驱避作用已有报道, β -蒎烯在 20 $\mu\text{L/mL}$ 浓度下对赤拟谷盗 *Tribolium castaneum* 成虫具有显著驱避作用 (Wang *et al.*, 2009), 并且阻止昆虫体内的神经传递 (Pajaro-

Castro *et al.*, 2017), β -蒎烯在 0.31 nL/cm^2 和 0.06 nL/cm^2 浓度下 2 h 时, 对烟草甲 *Lasioderma serricorne* 驱避效果比避蚊胺高 (Zhang *et al.*, 2014), β -蒎烯在 100 $\mu\text{L/mL}$ 浓度下对 B 型烟粉虱 *Bemisia tabaci* 具有显著驱避作用 (Li *et al.*, 2022); cis-香芹醇对冈比亚疟蚊成虫 *Anopheles gambiae* 的驱避中浓度为 $1.1 \times 10^{-4} \text{ g/mL}$ (Omolo *et al.*, 2004); β -石竹烯对红火蚁工蚁 *Solenopsis invicta* 的驱避作用, 在一定浓度内伴随浓度的增加呈上升趋势, 在 2 mL/cm^2 时, 驱避率为 99% (Lekhnath and Jen, 2013); β -石竹烯在 7 mg/mL 以上浓度时对黄胸散白蚁 *Reticulitermes flaviceps* 白蚁有很强的驱避作用 (徐伟丽等, 2017)。因此, 从剂量反应来看, β -石竹烯、 β -蒎烯和 cis-香芹醇对昆虫的影响在特定浓度下才能起到作用。本研究中, 室内条件下, β -蒎烯, β -石竹烯和 cis-香芹醇也是在一定浓度下对茶小绿叶蝉若虫具有驱避作用, β -蒎烯驱避浓度为 1 $\mu\text{L/mL}$ 和 0.01 $\mu\text{L/mL}$, β -石竹烯和 cis-香芹醇的驱避浓度分别为 1 $\mu\text{L/mL}$ 和 100 $\mu\text{L/mL}$ 。田间试验中, β -石竹烯、 β -蒎烯和 cis-香芹醇对茶小绿叶蝉成虫驱避作用对浓度依赖更明显, 其中, β -石竹烯对茶

小绿叶蝉成虫的驱避作用随处理浓度的增加而呈下降趋势；而 *cis*-香芹醇对茶小绿叶蝉成虫的驱避作用随处理浓度的增加而呈上升趋势，茶小绿叶蝉成虫和若虫对物质驱避浓度的不同，可能与昆虫发育期不同有关。一种驱避物质同种浓度相同时间下，对叶蝉成虫趋避作用更强 (Chakira *et al.*, 2017)，而若虫时期感受器种类和数量一般较成虫少 (Chapman, 1982)，所以成虫和若虫对挥发物的感受范围不同；此外，释放时间也决定驱避的效果，在一定时间内，驱避性物质对叶蝉的驱避作用伴随时间的增加而增强 (Cai *et al.*, 2019)。这也是 β -石竹烯和 β -蒎烯对茶小绿叶蝉行为影响的研究中，本研究结果与 Zhang 等 (2014) 研究结果相符，与钮羽群等 (2014) 研究结果不同的原因。总之，艾蒿挥发物中 β -石竹烯、 β -蒎烯和 *cis*-香芹醇可在茶小绿叶蝉防治过程中作为驱避物质开发应用。但是在复杂的自然环境中，各种挥发物都不是单独存在的，非寄主植物驱避和干扰昆虫定位，不是依靠单个物质，而是通过不同化合物按一定比例混合，构成对昆虫的驱避活性 (Odalo *et al.*, 2005; Nerio *et al.*, 2010)。因此，活性物质对茶小绿叶蝉的最强驱避作用的比例还待进一步研究。

综上，艾蒿植物挥发物对茶小绿叶蝉具有显著的驱避作用，其中， β -蒎烯、 β -石竹烯和 *cis*-香芹醇 3 种化合物是艾蒿植株挥发物驱避茶小绿叶蝉的重要物质，其驱避效果与挥发物质浓度有关。

参考文献 (References)

- Arimura G, Kost C, Boland W, 2005. Herbivore-induced, indirect plant defences. *Biochimica et Biophysica Acta*, 1734(2): 91–111.
- Bian WB, Wang GC, Gong YF, Sun XL, Li YX, 2012. Repellent and anti-feedant activity of 19 plant essential oils against *Mylokerinus aurolineatus*. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 49(2): 496–502. [边文波, 王国昌, 龚一飞, 孙晓玲, 李元喜, 2012. 十九种植物精油对茶丽纹象甲成虫的驱避和拒食活性. 应用昆虫学报, 49(2): 496–502.]
- Cai XM, Luo Z, Meng ZN, Liu Y, Cu B, Ban L, Li ZQ, Xin ZJ, Chen ZM, 2019. Primary screening and application of repellent plant volatiles to control tea leafhopper, *Empoasca onukii* Matsuda. *Pest Management Science*, 76(4): 1304–1312.
- Chakira H, Long M, Liu S, Zhao J, He Y, Wagan TA, Hua H, 2017. Repellency of essential oils against *Nephotettix cincticeps*: Laboratory and glasshouse assays. *Journal of Applied Entomology*, 141(9): 708–720.
- Chapman RF, 1982. Chemoreception: The significance of receptor number. *Advance Insect Physiology*, 16: 247–356.
- Chen ZM, 2013. Chemical Ecology of Tea Pests. Shanghai: Shanghai Scientific & Technical Publishers. 283–294. [陈宗懋, 2013. 茶树害虫化学生态学. 上海: 上海科技出版社. 283–294.]
- Cook SM, Khan ZR, Pickett JA, 2007. The use of push-pull strategies in integrated pest management. *Annual Review of Entomology*, 52: 375–400.
- Department of Tea Industry in Anhui Agricultural College, 1980. Diseases and Pests of Tea Trees. Hefei: Anhui Science and Technology Press. 49–55. [安徽农学院茶业系, 1980. 茶树病虫害. 合肥: 安徽科学技术出版社. 49–55.]
- Dong Y, Wang XF, Wei XG, 2005. Analysis of the essential oil from *Artemisia argyi* cultivated in Shandong by GC-MS. *Chinses Traditional Patent Medicine*, 27(3): 326–328. [董岩, 王新芳, 魏兴国, 2005. 山东艾蒿挥发油化学成分的 GC-MS 研究. 中成药, 27(3): 326–328.]
- Egigu MC, Ibrahim MA, Yahya A, Holopainen JK, 2011. *Cordeauxia edulis* and *Rhododendron tomentosum* extracts disturb orientation and feeding behavior of *Hylobius abietis* and *Phyllodecta laticollis*. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 138(2): 162–174.
- Guo SS, Yuan GH, Chai XL, Guo XR, Teng XH, Li WZ, 2017. Interactive effect of (E)- β -farnesene and (-)- β -caryophyllene on chemical communication between *Myzus persicae* and *Coccinella septempunctata*. *Henan Agricultural University*, 51(1): 42–47. [郭帅帅, 原国辉, 柴晓乐, 郭线茹, 滕小慧, 李为争, 2017. (E)- β -法尼烯和(-)- β -石竹烯在桃蚜—七星瓢虫化学通讯中的相互作用. 河南农业大学学报, 51(1): 42–47.]
- Han SJ, Pan C, Han BY, 2016. Changes in volatiles of tea shoots damaged by tea green leafhoppers and their attraction to *Schizophragma parvula* Ogloblin. *Chinese Journal of Biological Control*, 32(2): 142–148. [韩善捷, 潘钺, 韩宝瑜, 2016. 假眼小绿叶蝉为害致茶梢挥发物变化及其引诱微小裂骨婴小蜂效应. 中国生物防治学报, 32(2): 142–148.]
- Han SJ, Wang MX, Wang YS, Wang YG, Lin C, Han BY, 2020. Exploiting push-pull strategy to combat the tea green leafhopper based on volatiles of *Lavandula angustifolia* and *Flemingia macrophylla*. *Journal of Integrative Agriculture*, 19(1): 193–203.
- Huang Y, Han BY, Tang Q, Xu H, Wang YG, 2009. EAG and behavioural responses of *Apanteles* sp. (Hymenoptera: Braconidae) parasitizing tea geometrids by volatiles from tea

- shoots. *Acta Entomologica Sinica*, 52(11): 1191–1198. [黄毅, 韩宝瑜, 唐茜, 徐欢, 汪云刚, 2009. 茶尺蠖茧蜂对茶梢挥发物的 EAG 和行为反应. *昆虫学报*, 52(11): 1191–1198.]
- Lekhnath K, Jen SC, 2013. Toxicity and repellency of compounds from clove (*Syzygium aromaticum*) to red imported fire ants *Solenopsis invicta* (Hymenoptera: Formicidae). *Journal of Economic Entomology*, 106(1): 131–135.
- Liu Y, Shu ZF, Shao JN, He WZ, 2021. Research progress on control effect and mechanism of intercropping on diseases and pests in tea garden. *Journal of Tea Communication*, 48(1): 7–14. [刘瑜, 疏再发, 邵静娜, 何卫中, 2021. 茶园间作对病虫害防控效应与作用机制研究进展. *茶叶通讯*, 48(1): 7–14.]
- Li HL, Cui HC, Huang HT, Mao YX, Zheng XX, Yu JZ, 2019. Contact and repellent activity of 11 kinds of plant essential oils against *Acaphylla theae*. *Plant Protection*, 45(5): 247–251. [李红莉, 崔宏春, 黄海涛, 毛宇骁, 郑旭霞, 余继忠, 2019. 11 种植物精油对茶橙瘿螨的触杀和驱避作用研究. *植物保护*, 45(5): 247–251.]
- Li S, Li H, Zhou Q, Zhang F, Desneux N, Wang S, Shi L, 2022. Essential oils from two aromatic plants repel the tobacco whitefly *Bemisia tabaci*. *Journal of Pest Science*, 95(2): 971–982.
- Martel JW, Alford AR, Dickens JC, 2005. Synthetic host volatiles increase efficacy of trap cropping for management of colorado potato beetle, *Leptinotarsa decemlineata* (Say). *Agricultural and Forest Entomology*, 7(1): 79–86.
- Ma XY, Liu YH, Cheng ZH, Li R, Li SC, 2017. Bioactivity effects of *Artemisia argyi* essential oil on survival and protective enzyme activities of *Tetranychus cinnabarinus* (Acari: Tetranychidae). *Chinese Journal of Biological Control*, 33(2): 289–296. [马新耀, 刘耀华, 程作慧, 李锐, 李生才, 2017. 艾蒿精油对朱砂叶螨的生物活性及几种保护酶活性的影响. *中国生物防治学*, 33(2): 289–296.]
- Meng H, Xu Y, 2009. Analysis of the essential oil from fresh leaves of *Artemisia argyi* cultivated in Shanghai by GC-MS. *Journal of Pharmaceutical Practice*, 27(5): 362–364. [孟慧, 许勇, 2009. 沪产艾蒿鲜叶挥发油成分的 GC-MS 分析. *药实践杂志*, 27(5): 362–364.]
- Nerio LS, Olivero-Verbel J, Stashenko E, 2010. Repellent activity of essential oils: A review. *Bioresource Technology*, 101(1): 372–378.
- Niu YQ, Pan C, Wang MX, Zhou NN, Zhang XT, Cui L, Chen XX, Han BY, 2014. Identification of volatile compounds from rosemary that significantly affect the tea green leafhopper behavior. *Acta Ecologica Sinica*, 34(19): 5477–5483. [钮羽群, 潘钺, 王梦馨, 周宁宁, 张新亭, 崔林, 陈学新, 韩宝瑜, 2014. 显著调控假眼小绿叶蝉行为的迷迭香挥发物鉴定. *生态学报*, 34(19): 547–548.]
- Odalo JO, Omolo MO, Malebo H, Angira J, Njeru PM, Ndiege IO, Hassanali A, 2005. Repellency of essential oils of some plants from the Kenyan coast against *Anopheles gambiae*. *Acta Tropica*, 95(3): 210–218.
- Omolo MO, Okinyo D, Ndiege I, Olwande W, Hassanali A, 2004. Repellency of essential oils of some kenyan plants against *Anopheles gambiae*. *Phytochemistry*, 65(20): 2797–2802.
- Pajaro-Castro N, Caballero-Gallardo K, Olivero-Verbel J, 2017. Neurotoxic effects of Linalool and β -Pinene on *Tribolium castaneum* Herbst. *Molecules*, 22(12): 2052
- Pickett JA, Glinwood R, 2007. Chemical Ecology// van Emden HF, Harrington R (eds.). *Aphids as Crop Pests*, Wallington: CABI. 235–254.
- Pyke B, Rice M, Sabine B, Zalucki MP, 1987. The push-pull strategy behavioural control of *Heliothis*. *Australian Cotton Grower*, 9(1): 7–9.
- Shen LQ, Mo HB, Yin DL, Wang XG, 2004. Application of some monocyclic monoterpenoids in pesticides. *Chinses Journal of Pesticides*, 43(4): 153–156. [申利群, 莫洪波, 尹笃林, 王晓光, 2004. 几种单环单萜化合物在农药中的应用. *农药*, 43(4): 153–156.]
- Wang J, Li Y, Lei CL, 2005. The repellency and fumigant activity of *Artemisia vulgars* essential oil to *Musca domestica vicina*. *Chinese Bulletin of Entomology*, 42(1): 51–53. [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.]
- Wang JL, Li Y, Lei CL, 2009. Evaluation of monoterpenes for the control of *Tribolium castaneum* (Herbst) and *Sitophilus zeamais* Motschulsky. *Natural Product Research*, 23(12): 1080–1088.
- Wang J, Zhang Y, Zhou CX, Wang YH, Deng Y, Yuan HB, 2018. Insecticidal activity of different components from *Artemisia lavandulaefolia* essential oil against *Plutella xylostella*. *Journal of Jilin Agricultural University*, 40(6): 675–680. [王晶, 张莹, 周春相, 王艺卉, 邓颖, 袁海滨, 2018. 野艾蒿精油化学分离各组分对小菜蛾的杀虫活性. *吉林农业大学学报*, 40(6): 675–680.]
- Wang SS, Liang GW, Zeng L, Huang SS, 2011. Toxicity and behavioral effect of the main components of the plant volatile oil on *Conopomorpha sinensi*. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 27(31): 269–273. [王少山, 梁广文, 曾玲, 黄寿山, 2011. 4 种化合物对荔枝蒂蛀虫的调控作用. *中国农学通报*, 27(31): 269–273.]
- Xu WL, Lan L, Liu ZL, Yuan ZL, 2017. Biological activity of β -caryophyllene on *Reticulitermes flaviceps* (Isoptera: Rhinotermitidae). *China Plant Protection*, 37(9): 12–15. [徐伟丽, 罗兰, 刘兆良, 袁忠林, 2017. β -石竹烯对黄胸散白蚁生物活性的研究. *中国植保导刊*, 37(9): 12–15.]

- Yan ZQ, Zhang XL, 2008. Studies on chemical components of essential oils from folium *Artemisiae aryi*. *Journal of Xinyang Normal University (Natural Science Edition)*, 21(2): 206–209. [严泽群, 张秀兰, 2008. 艾蒿挥发油化学成分的研究. 信阳师范学院学报(自然科学版), 21(2): 206–209.]
- Yuan HB, Liu Y, Ding YX, Wang J, Li SJ, 2014. Effects of essential oil from *Artemisia lavanulaefolia* DC. on fumigation activity and several enzymes activities of *Monolepta hieroglyphica* (Motschulsky) adult. *Journal of Jilin Agricultural University*, 36(1): 30–35. [袁海滨, 刘莹, 丁玉骁, 王晶, 李玉双, 2014. 野艾蒿精油对双斑萤叶甲成虫的熏蒸活性及体内酶活力的影响. 吉林农业大学学报, 36(1): 30–35.]
- Yuan HB, Li YS, Zhang XY, Ge SQ, Liu JH, Ren XC, 2017. Fumigant activity and repellent effect of three kinds of essential oil against *Callosobruchus chinensis* (Linnaeus) adult. *Journal of Jilin Agricultural University*, 39(1): 28–31. [袁海滨, 李玉双, 赵欣阳, 葛思妍, 刘景皓, 任孝慈, 2017. 3种植物精油对绿豆象成虫的熏蒸及驱避活性. 吉林农业大学学报, 39(1): 28–31.]
- Zhang HG, Tan JC, 2004. Tea Pests and Non-pollution Management in China. Hefei: Anhui Science and Technology Publishing House. 244–250. [张汉鹄, 谭济才, 2004. 中国茶树害虫及其无公害治理. 合肥: 安徽科学技术出版社. 244–250.]
- Zhang QH, Schlyter F, 2004. Olfactory recognition and behavioural avoidance of angiosperm nonhost volatiles by conifer-inhabiting bark beetles. *Agricultural and Forest Entomology*, 6(1): 1–19.
- Zhang WJ, You CX, Yang K, Cheng R, Wang Y, Wu YM, Geng ZF, Chen HP, Jiang HY, Su Y, Lei N, Ma P, Du SS, Deng ZW, 2014. Bioactivity of essential oil of *Artemisia argyi* Lévl. et van. and its main compounds against *Lasioderma serricorne*. *Journal of Oleo Science*, 63(8): 829–837.
- Zhang ZQ, 2013. Behavioral manipulating functions of non-host plant volatiles to main tea pests. Doctoral dissertation. Hangzhou: Tea Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences. [张正群, 2013. 非生境植物挥发物对茶树害虫的行为调控功能. 博士学位论文. 杭州: 中国农业科学院茶叶研究所.]
- Zhang ZQ, Sun XL, Luo ZX, Bian L, Chen ZM, 2014. Dual action of *Catsia tora* in tea plantations: Repellent volatiles and augmented natural enemy population provide control of tea green leafhopper. *Phytoparasitica*, 42(5): 595–560.
- Zhang QZ, Chen ZM, 2015. Non-host plant essential oil volatiles with potential for a ‘push-pull’ strategy to control the tea green leafhopper *Empoasca vitis*. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 156(1): 77–87.
- Zhou TF, Yang Q, Mao YX, 2015. Research advances of drug resistance of tea plant pests and its resistance mechanism. *Anhui Agricultural Sciences*, 43(36): 199–200. [周铁锋, 杨青, 毛宇晓, 2015. 茶树害虫抗药性及抗性机制研究进展. 安徽农业科学, 43(36): 199–200.]
- Zhu JQ, 1999. Tea Pests. Beijing: Chinese Agricultural Science Press. 96–104. [朱俊庆, 1999. 茶树害虫. 北京: 中国农业科技出版社. 96–104.]