



烟蓟马成虫对不同植物挥发物的行为选择*

李彩虹^{1,2**} 张涛³ 陆宴辉^{2***}

(1. 新疆农业大学农学院, 乌鲁木齐 830091; 2. 中国农业科学院植物保护研究所, 植物病虫害生物学国家重点实验室, 北京 100193;
3. 河北农林科学院植物保护研究所, 农业农村部华北北部作物有害生物综合治理重点实验室, 保定 071000)

摘要 【目的】 评价不同植物挥发物对烟蓟马 *Thrips tabaci* 雌性成虫的行为调控作用, 解析烟蓟马成虫嗅觉识别行为, 为研发成虫引诱剂或驱避剂提供科学依据。**【方法】** 利用嗅觉行为测定装置测试烟蓟马雌性成虫对不同种类、不同浓度植物挥发物的室内选择行为, 筛选出具有高引诱或驱避活性的挥发物。

【结果】 与溶剂正己烷相比, 烟蓟马雌性成虫对浓度为 1 $\mu\text{g}/\mu\text{L}$ 的 γ -癸酸内酯、(+)- α -蒎烯、芳樟醇、2-乙酸苯乙酯、(-)- α -蒎烯没有显著的行为选择 ($P>0.05$), 而壬醛、马鞭草烯酮、香茅醛、橙花醇和桉树脑对烟蓟马表现出显著的吸引作用 ($P<0.05$), 4-乙酰吡啶、邻茴香醛、 δ -癸酸内酯、顺-3-己烯醇、香叶醇和 1-辛烯-3-醇的吸引作用极显著 ($P<0.001$); 但水杨醛、香芹酚、顺茉莉醛、丁香酚和对烯丙基苯甲醚对烟蓟马表现出显著的驱避作用 ($P<0.05$), 水杨酸甲酯、茉莉酸甲酯、百里酚和异戊醛 4 种挥发物具有极显著的驱避作用 ($P<0.001$)。同时, 随着测试浓度的增加, 大部分挥发物对烟蓟马雌性成虫的吸引或驱避作用明显增强。**【结论】** δ -癸酸内酯、香叶醇、1-辛烯-3-醇、邻茴香醛和 4-乙酰吡啶对烟蓟马雌性成虫具有强烈吸引作用, 水杨酸甲酯、茉莉酸甲酯和百里酚则具有明显驱避效应, 为开发烟蓟马行为调控剂奠定了重要基础。

关键词 烟蓟马; 植物挥发物; 嗅觉识别; 行为选择; 引诱; 驱避

Behavioral responses of adult female *Thrips tabaci* to different plant volatiles

LI Cai-Hong^{1,2**} ZHANG Tao³ LU Yan-Hui^{2***}

(1. College of Agronomy, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830091, China; 2. State Key Laboratory for Biology of Plant Diseases and Insect Pests, Institute of Plant Protection, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100193, China; 3. Key Laboratory of IPM on Crops in Northern Region of North China, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Institute of Plant Protection, Hebei Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Integrated Pest Management Center of Hebei Province, Baoding 071000, China)

Abstract 【Objectives】 To evaluate the preferences of female *Thrips tabaci* for different plant volatiles and thereby provide a basis for developing candidate attractants, or repellents, for this pest. **【Methods】** The preferences of adult female *T. tabaci* for different plant volatiles at a concentration of 1 $\mu\text{g}/\mu\text{L}$ were determined in an olfactometer, and the effects of different concentrations of these volatiles were also evaluated. **【Results】** Females displayed no significant preference for γ -decanolactone, (+)- α -pinene, linalool, 2-phenylethyl acetate or (-)- α -pinene, compared to the n-hexane solvent control at a concentration of 1 $\mu\text{g}/\mu\text{L}$ ($P>0.05$). However, they displayed clear preferences for the other 20 volatiles. Nonanal, (S)-(-)-verbenone, ($\pm$)-citronellal, nerol and 1,8-cineole were significantly attractive ($P<0.05$), whereas 4-acetylpyridine, *o*-anisaldehyde, δ -decanolactone, (Z)-3-hexenol, geraniol and 1-octen-3-ol were even more attractive ($P<0.001$). Salicylaldehyde, carvacrol, (Z)-jasmane, eugenol and allylanisole were significantly repellent to females ($P<0.05$), whereas methyl salicylate, methyl

*资助项目 Supported projects: 国家自然科学基金 (U2003212); 国家重点研发计划 (2017YFB0403905); 现代农业产业技术体系 (CARS-15-21)

**第一作者 First author, E-mail: rainbow20201130@163.com

***通讯作者 Corresponding author, E-mail: luyanhui@caas.cn

收稿日期 Received: 2021-05-06; 接受日期 Accepted: 2021-08-23

jasmonate, thymol and isovaleraldehyde were even more repellent ($P < 0.001$). The attractiveness, or repellence, of most volatiles had a significant upward trend with increasing concentration, and the intensity of behavioral responses was closely related to volatile concentration. **[Conclusion]** δ -decanolactone, geraniol, 1-octen-3-ol, *o*-anisaldehyde and 4-acetylpyridine have potential for development as attractants of *T. tabaci*, whereas methyl salicylate, methyl jasmonate and thymol are potential repellents. The results provide a basis for developing environmentally friendly methods for controlling *T. tabaci*.

Key words *Thrips tabaci*; plant volatiles; olfactory recognition; behavior response; attract; repellent

烟蓟马 *Thrips tabaci* (Lindeman) 又称葱蓟马、棉蓟马, 隶属于缨翅目蓟马科蓟马亚科蓟马属, 广泛分布于世界各大洲及我国大部分地区 (Rueda, 2000)。烟蓟马已记载的寄主植物达 200 余种, 主要危害棉花 *Gossypium* spp.、大葱 *Allium fistulosum* 等农作物 (Belder *et al.*, 2002; 谢永辉等, 2011), 成虫和若虫直接锉吸植物组织造成危害, 同时能传播多种植物病毒 (Kritzman *et al.*, 2001; Ullman *et al.*, 2002; Satoshi and Takeshi, 2008)。目前, 防治烟蓟马主要依赖化学农药, 然而烟蓟马以产雌孤雌生殖为主, 世代历期短, 化学防治难度大 (谢永辉等, 2011), 同时大量使用农药加剧了烟蓟马抗药性的产生 (Lebedev *et al.*, 2013)。因此, 迫切需要烟蓟马非农药防控技术产品的研发与应用。

植食性昆虫通常利用不同种类及比例的植物挥发物识别寄主植物 (Bruce *et al.*, 2005)。特别是花期植物释放的芳香化合物对很多种类昆虫有吸引作用, 对它们定位选择寄主植物发挥促进作用 (Pan *et al.*, 2013)。蓟马对释放大量芳香物质的花期植物具有选择偏好性 (Koschier *et al.*, 2000), 同时开花植物的花朵特征也影响蓟马的选择行为 (Silva *et al.*, 2018)。在新西兰花蓟马 *Thrips obscuratus*、西花蓟马 *Frankliniella occidentalis* 等蓟马类重大害虫的防治中, 基于植物挥发物的行为调控措施的创新应用得到了普遍关注 (Cook *et al.*, 2007; 蔡晓明等, 2018)。研究表明, 一些植物挥发物组分显著影响着蓟马类害虫的选择行为, 如芳香族和萜烯类化合物常对蓟马有明显的吸引作用 (El-sayed *et al.*, 2009, 2014), 橙花醇、 β -香茅醇、苯甲酸、茴香酸、 β -法尼烯和芳樟醇氧化物等也能引诱蓟马 (Allen *et al.*, 2015; Teulon *et al.*, 2014), 西花蓟马对植物挥发物中不常见的异烟酸甲酯、异烟酸乙

酯、4-乙酰吡啶等有强烈的选择偏好性 (Davidson *et al.*, 2008; Koschier, 2008), 其中异烟酸甲酯也对棕榈蓟马 *Thrips palmi*、烟蓟马等其他种类蓟马具有引诱作用 (Teulon *et al.*, 2017)。在田间, 加入异烟酸甲酯的诱捕器中, 烟蓟马的诱捕量明显增加 (Davidson *et al.*, 2009)。但丁香酚等部分植物挥发物组分则显著驱避蓟马 (Riefler and Koschier, 2009)。有研究表明, 对西花蓟马具有驱避作用的挥发物组分包括水杨醛 (Koschier, 2008; Koschier *et al.*, 2010), 水杨酸甲酯 (Chermenskaya *et al.*, 2001), 香芹酚、百里酚 (Sedy and Koschier, 2010; Allsopp *et al.*, 2014), 对烯丙基苯甲醚、顺茉莉醛、茉莉酸甲酯 (Egger and Koschier, 2014; Egger *et al.*, 2014), 异戊醛 (张骏等, 2015) 等。相比之下, 烟蓟马对不同植物挥发物组分的嗅觉反应与行为选择尚缺乏系统研究。

本研究利用嗅觉行为测定装置, 测定烟蓟马雌性成虫对 25 种植物挥发物组分的选择行为, 以期筛选具有明显引诱或趋避活性的挥发物组分。这将为进一步解析烟蓟马行为选择与嗅觉识别机制、并研发其成虫行为调控剂奠定必要基础。

1 材料与方法

1.1 供试昆虫

供试烟蓟马为实验种群, 在中国农业科学院植物保护研究所廊坊科研中试基地人工气候箱 (温度 $(26 \pm 1)^\circ\text{C}$ 、相对湿度 $60\% \pm 5\% \text{RH}$ 、光照周期 14L : 10D) 中进行继代饲养。以大葱活体植株为寄主食物, 用于本试验的种群已在室内连续饲养了 10-15 代。烟蓟马以孤雌生殖为主, 雌性个体在田间占绝大多数, 因此选择羽化 2-5 d 的健康雌成虫作为测试对象。

1.2 供试植物

棉花（品种为中棉 49）、大葱（品种为鸡腿大葱 901）均在中国农业科学院植物保护研究所廊坊科研中试基地的温室内种植。挑选健壮的棉花和大葱苗期植株，用直径 0.9 cm 的打孔器分别制成棉花、大葱叶碟，用于后续试验。

1.3 供试挥发物

本试验选用的挥发物共 27 种，其中异烟酸甲酯和异烟酸乙酯已被证实对烟蓟马雌性成虫具有强烈引诱作用（Teulon *et al.*, 2007），因此作为阳性对照，而其余 25 种为待测挥发物。茉莉酸甲酯购于北京百灵威科技有限公司，其余 26 种挥发物和溶剂正己烷（>99%）均购于上海阿拉丁科技有限公司（表 1）。

1.4 试验方法

1.4.1 行为测定装置及使用方法 嗅觉行为测定装置参考前人试验设计（Ma *et al.*, 2020）并稍加改进。装置由石英玻璃（连云港市东吉石英制品有限公司）制成，为一根长 20 cm、内径 1 cm

的中空玻璃管，玻璃管两侧开口，正中间带有一个内径为 0.3 cm 的小孔。试验时，从嗅觉行为测定装置两侧开口处，分别把 1 个叶碟放入玻璃管中距各端开口的 1 cm 处，然后用 300 目纱网固定两侧开口。从中间小孔处放入 5 头烟蓟马成虫，20 min 后观测成虫移动情况。烟蓟马越过装置四分之一处（距中间小孔 5 cm）即记作有反应，没有越过的记为无反应。每次测试前，用乙醇清洗玻璃管并烘干。整个试验过程，保持室内温度（26±1）℃、相对湿度 60%±5% RH，用遮光布遮盖嗅觉行为测定装置，让烟蓟马在黑暗条件下进行选择，避免光照不均匀对试虫行为产生影响。

1.4.2 行为测定装置的可靠性评价 在行为测试之前，先评价嗅觉行为测定装置的可靠性。首先，在嗅觉行为测定装置两侧分别放置棉花叶碟 vs 棉花叶碟、大葱叶碟 vs 大葱叶碟、滤纸叶碟 vs 滤纸叶碟，滤纸叶碟大小和制作方式同两种植物叶碟，测定烟蓟马雌性成虫对两侧的行为趋性。然后，将 1 g 棉叶或葱叶放在研钵中研磨 30 s 后加入 1 mL 水混匀，取 10 μL 混合物上清液滴

表 1 待测挥发物列表
Table 1 List of tested compounds

挥发物 Compounds	CAS 号 CAS number	纯度（%） Purity (%)	挥发物 Compounds	CAS 号 CAS number	纯度（%） Purity (%)
邻茴香醛 <i>o</i> -anisaldehyde	135-02-4	98	异烟酸甲酯 Methyl isonicotinate	2459-09-8	98
(+) α -蒎烯 (+)- α -Pinene	7785-70-8	99	异烟酸乙酯 Ethyl isonicotinate	1570-45-2	98
(-) α -蒎烯 (-)- α -Pinene	7785-26-4	98	4-乙酰吡啶 4-Acetylpyridine	1122-54-9	98
桉树脑 1,8-cineole	470-82-6	99	γ -癸酸内酯 γ -Decanolactone	706-14-9	98
($\pm$)-香茅醛 ($\pm$)-Citronellal	106-23-0	96	δ -癸酸内酯 δ -Decanolactone	705-86-2	98
香叶醇 Geraniol	106-24-1	98	水杨醛 Salicylaldehyde	90-02-8	98
芳樟醇 Linalool	78-70-6	98	水杨酸甲酯 Methyl salicylate	119-36-8	99
橙花醇 Nerol	106-25-2	97	异戊醛 Isovaleraldehyde	590-86-3	98
2-乙酸苯乙酯 2-Phenylethyl acetate	103-45-7	98	香芹酚 Carvacrol	499-75-2	99
壬醛 Nonanal	124-19-6	96	百里酚 Thymol	89-83-8	98
马鞭草烯酮 (<i>S</i>)-(-)-verbenone	1196-01-6	95	丁香酚 Eugenol	97-53-0	99
顺-3-己烯醇 (<i>Z</i>)-3-hexenol	928-96-1	98	对烯丙基苯甲醚 Allylanisole	140-67-0	98
1-辛烯-3-醇 1-Octen-3-ol	3391-86-4	98	顺茉莉醛 (<i>Z</i>)-jasnone	122-40-7	97
茉莉酸甲酯 Methyl jasmonate	39924-52-2	95			

加在滤纸叶碟上,以滴加等量清水的滤纸叶碟为对照,测定棉汁叶碟 vs 滤纸叶碟、葱汁叶碟 vs 滤纸叶碟对雌性成虫的引诱作用。

1.4.3 不同种类挥发物对烟蓟马的行为影响评价 将 27 种待测挥发物用溶剂正己烷配制成 $1\ \mu\text{g}/\mu\text{L}$ 的溶液,滴加 $10\ \mu\text{L}$ 至棉花叶碟,放置在嗅觉装置一侧,另一侧放置加入 $10\ \mu\text{L}$ 正己烷的棉花叶碟作为对照。依次测试不同种类挥发物对烟蓟马雌性成虫的行为调控作用,每个挥发物处理共测试 60 头雌性成虫。

1.4.4 不同剂量挥发物对烟蓟马的行为影响评价 将 1.4.3 中具有极显著引诱或者趋避活性的挥发物,分别用正己烷配制成 0.001、0.01、0.1、0.2、1、 $10\ \mu\text{g}/\mu\text{L}$ 的溶液。采用 1.2.3 方法,一侧放置加入 $10\ \mu\text{L}$ 各浓度挥发物的棉花叶碟作为处理,另一侧放置加入 $10\ \mu\text{L}$ 正己烷的棉花叶碟作为对照,分别测定不同浓度的各种挥发物对雌性成虫的引诱或驱避作用。

1.5 数据分析

以引诱率和驱避率作为评价指标,比较烟蓟马对不同挥发物处理的行为反应。引诱率 = $t/(t+c) \times 100\%$,驱避率 = $c/(t+c) \times 100\%$ 。其中, t 为选择处理端的个体数, c 为选择对照端的个体数。

行为选择试验用 χ^2 检验烟蓟马在嗅觉行为测定装置两个方向间是否呈假设 H_0 为 50/50 的理论分布,计算 χ^2 的值和相应的显著性水平 P 值($P < 0.05$ 为差异显著, $P < 0.001$ 为差异极显著)。试验中,无反应的烟蓟马个体不计入统计分析内。利用 R 软件 (3.6.3) 进行实验数据的统计分析。

2 结果与分析

2.1 嗅觉行为测定装置效果评价

如图 1 所示,嗅觉测试装置的玻璃管两侧放置相同的叶碟时,烟蓟马雌性成虫对两侧的选择无显著差异(棉花叶碟 vs 棉花叶碟: $\chi^2 = 0.30$, $df=1$, $P=0.585$; 大葱叶碟 vs 大葱叶碟: $\chi^2 = 2.49$, $df=1$, $P=0.115$; 滤纸叶碟 vs 滤纸叶碟: $\chi^2 = 0.64$, $df=1$, $P=0.424$)。然而,一侧为寄主植物叶碟或加有寄主植物汁液的滤纸,另一侧仅为滤纸时,多数烟蓟马成虫显著趋向于有寄主植物气味的一侧(棉叶叶碟 vs 滤纸叶碟: $\chi^2 = 11.89$, $df=1$, $P < 0.001$; 葱叶叶碟 vs 滤纸叶碟: $\chi^2 = 22.43$, $df=1$, $P < 0.001$; 棉汁叶碟 vs 滤纸叶碟: $\chi^2 = 23.31$, $df=1$, $P < 0.001$; 葱汁叶碟 vs 滤纸叶碟: $\chi^2 = 30.45$, $df=1$, $P < 0.001$)。这表明,本试验中直管嗅觉行为测定装置适用于烟蓟马成虫行为选择评价。

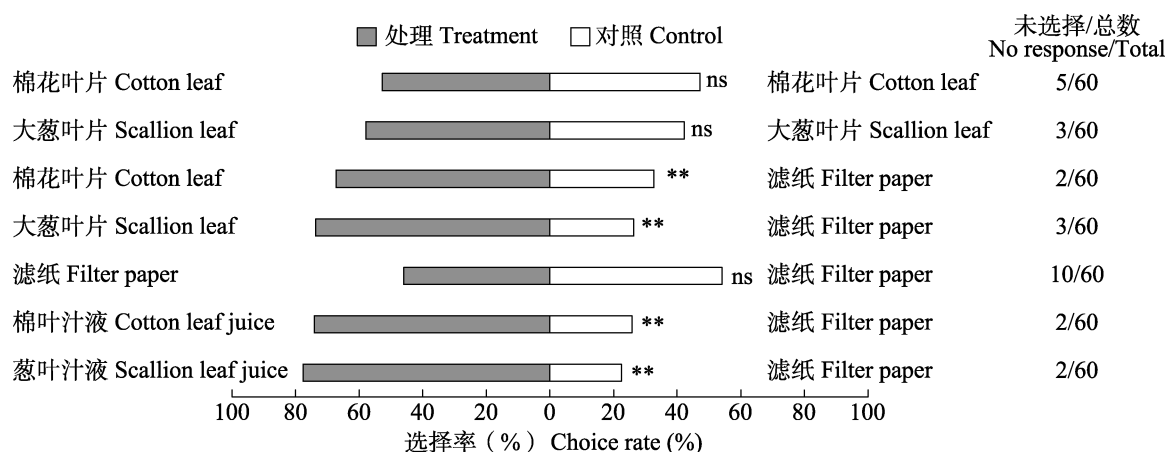


图 1 烟蓟马雌性成虫对不同植物气味的行为选择

Fig. 1 Selection behaviors of *Thrips tabaci* females to different plant odors

**表示差异极显著 ($P < 0.001$); *表示差异显著 ($P < 0.05$); ns 表示差异不显著。下同。

** and * indicates significant difference at 0.001 and 0.05 levels, respectively; ns indicates no significant difference. The same as below.

2.2 烟蓟马对不同种类挥发物的行为选择测定

利用嗅觉行为测定装置,测试了烟蓟马雌性成虫对浓度为 $1\ \mu\text{g}/\mu\text{L}$ 的 27 种挥发物的行为选择 (图 2)。与对照溶剂正己烷相比,烟蓟马成虫对 γ -癸酸内酯 ($\chi^2 = 2.97$, $df=1$, $P=0.085$)、(+)- α -蒎烯 ($\chi^2 = 2.78$, $df=1$, $P = 0.096$)、芳樟醇 ($\chi^2 = 2.49$, $df = 1$, $P = 0.115$)、2-乙酸苯乙酯 ($\chi^2 = 2.20$, $df = 1$, $P = 0.138$) 和 (-)- α -蒎烯 ($\chi^2 = 1.78$, $df = 1$, $P = 0.182$) 5 种挥发物无显著的选择作用。作为阳性对照,异烟酸甲酯 ($\chi^2 = 11.12$, $df=1$, $P < 0.001$) 和异烟酸乙酯 ($\chi^2 = 12.76$, $df = 1$, $P < 0.001$) 对烟蓟马成虫均具有极显著的吸引作用。其余 20 种供试挥发物对烟蓟马成虫的行为选择有显著影响。与对照溶剂正己烷相比,壬醛 ($\chi^2 = 9.63$,

$df = 1$, $P = 0.002$)、马鞭草烯酮 ($\chi^2 = 8.89$, $df = 1$, $P = 0.003$)、香茅醛 ($\chi^2 = 8.89$, $df = 1$, $P = 0.003$)、橙花醇 ($\chi^2 = 8.31$, $df = 1$, $P = 0.004$) 和桉树脑 ($\chi^2 = 6.46$, $df = 1$, $P = 0.011$) 5 种挥发物对烟蓟马表现为显著的吸引作用,4-乙酰吡啶 ($\chi^2 = 26.75$, $df = 1$, $P < 0.001$)、邻茴香醛 ($\chi^2 = 24.17$, $df = 1$, $P < 0.001$)、 δ -癸酸内酯 ($\chi^2 = 14.39$, $df = 1$, $P < 0.001$)、顺-3-己烯醇 ($\chi^2 = 13.57$, $df = 1$, $P < 0.001$)、香叶醇 ($\chi^2 = 13.44$, $df = 1$, $P < 0.001$) 和 1-辛烯-3-醇 ($\chi^2 = 12.76$, $df=1$, $P < 0.001$) 6 种挥发物对烟蓟马具有极显著的吸引作用。而水杨醛 ($\chi^2 = 9.63$, $df = 1$, $P = 0.002$)、香芹酚 ($\chi^2 = 9.63$, $df = 1$, $P = 0.002$)、顺茉莉醛 ($\chi^2 = 7.61$, $df = 1$, $P = 0.006$)、丁香酚 ($\chi^2 = 7.61$, $df = 1$, $P = 0.006$) 和对烯丙基苯甲醚 ($\chi^2 = 7.61$, $df = 1$, $P = 0.006$)

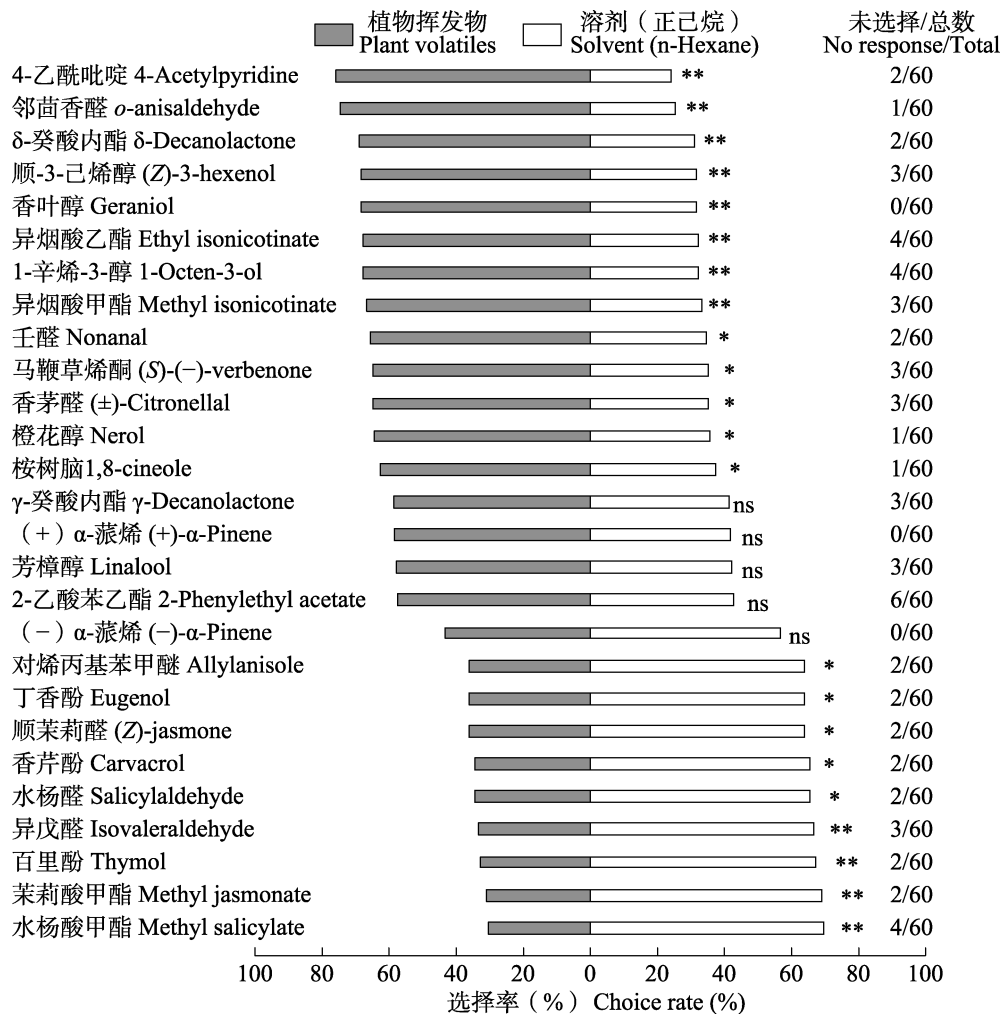


图 2 烟蓟马雌性成虫对不同种类挥发物的行为选择

Fig. 2 Selection behaviors of female *Thrips tabaci* to different plant volatiles

5 种挥发物对烟蓟马具有显著的驱避作用, 水杨酸甲酯 ($\chi^2 = 15.43$, $df = 1$, $P < 0.001$)、茉莉酸甲酯 ($\chi^2 = 14.39$, $df = 1$, $P < 0.001$)、百里酚 ($\chi^2 = 11.89$, $df = 1$, $P < 0.001$) 和异戊醛 ($\chi^2 = 11.12$, $df = 1$, $P < 0.001$) 表现为极显著的驱避作用。

2.3 烟蓟马对不同浓度挥发物的行为选择测定

在 2.2 中对烟蓟马雌性成虫具有高引诱活性的 6 种挥发物中, 随着测试浓度的增加, 大部分挥发物对烟蓟马的吸引作用逐步增强。烟蓟马对浓度为 0.001、0.01、0.02 $\mu\text{g}/\mu\text{L}$ 的阳性对照异烟酸甲酯无显著的行为反应 ($P > 0.05$), 浓度为 0.1 $\mu\text{g}/\mu\text{L}$ 的异烟酸甲酯对烟蓟马成虫具有显著的吸引作用 ($P < 0.05$), 1、10 $\mu\text{g}/\mu\text{L}$ 的异烟酸甲酯表现为极显著的吸引作用 ($P < 0.001$)。烟蓟马对 0.001、0.01 $\mu\text{g}/\mu\text{L}$ 的异烟酸乙酯、1-辛烯-3-醇、香叶醇、顺-3-己烯醇和 4-乙酰吡啶没有显著的行为选择 ($P > 0.05$), 0.02、0.1 $\mu\text{g}/\mu\text{L}$

的异烟酸乙酯、1-辛烯-3-醇和香叶醇对烟蓟马具有显著的吸引作用 ($P < 0.05$), 而 1、10 $\mu\text{g}/\mu\text{L}$ 的异烟酸乙酯、1-辛烯-3-醇和香叶醇表现为极显著的吸引作用 ($P < 0.001$)。0.02 $\mu\text{g}/\mu\text{L}$ 的顺-3-己烯醇和 4-乙酰吡啶显著吸引烟蓟马成虫 ($P < 0.05$), 而 0.1、1、10 $\mu\text{g}/\mu\text{L}$ 的顺-3-己烯醇和 4-乙酰吡啶具有极显著的吸引作用 ($P < 0.001$)。0.001 $\mu\text{g}/\mu\text{L}$ 的邻茴香醛显著驱避烟蓟马成虫 ($P < 0.05$), 但 0.01、0.02 $\mu\text{g}/\mu\text{L}$ 的邻茴香醛具有显著的吸引作用 ($P < 0.05$), 0.1、1 $\mu\text{g}/\mu\text{L}$ 的邻茴香醛表现为极显著的吸引作用 ($P < 0.001$), 而烟蓟马对 10 $\mu\text{g}/\mu\text{L}$ 的邻茴香醛无显著的选择作用 ($P > 0.05$)。烟蓟马对 0.001 $\mu\text{g}/\mu\text{L}$ 的 δ -癸酸内酯无显著的行为反应 ($P > 0.05$), 0.01、0.02 $\mu\text{g}/\mu\text{L}$ 的 δ -癸酸内酯有显著的吸引作用 ($P < 0.05$), 0.1、1、10 $\mu\text{g}/\mu\text{L}$ 的 δ -癸酸内酯表现为极显著的吸引作用 ($P < 0.001$) (图 3)。

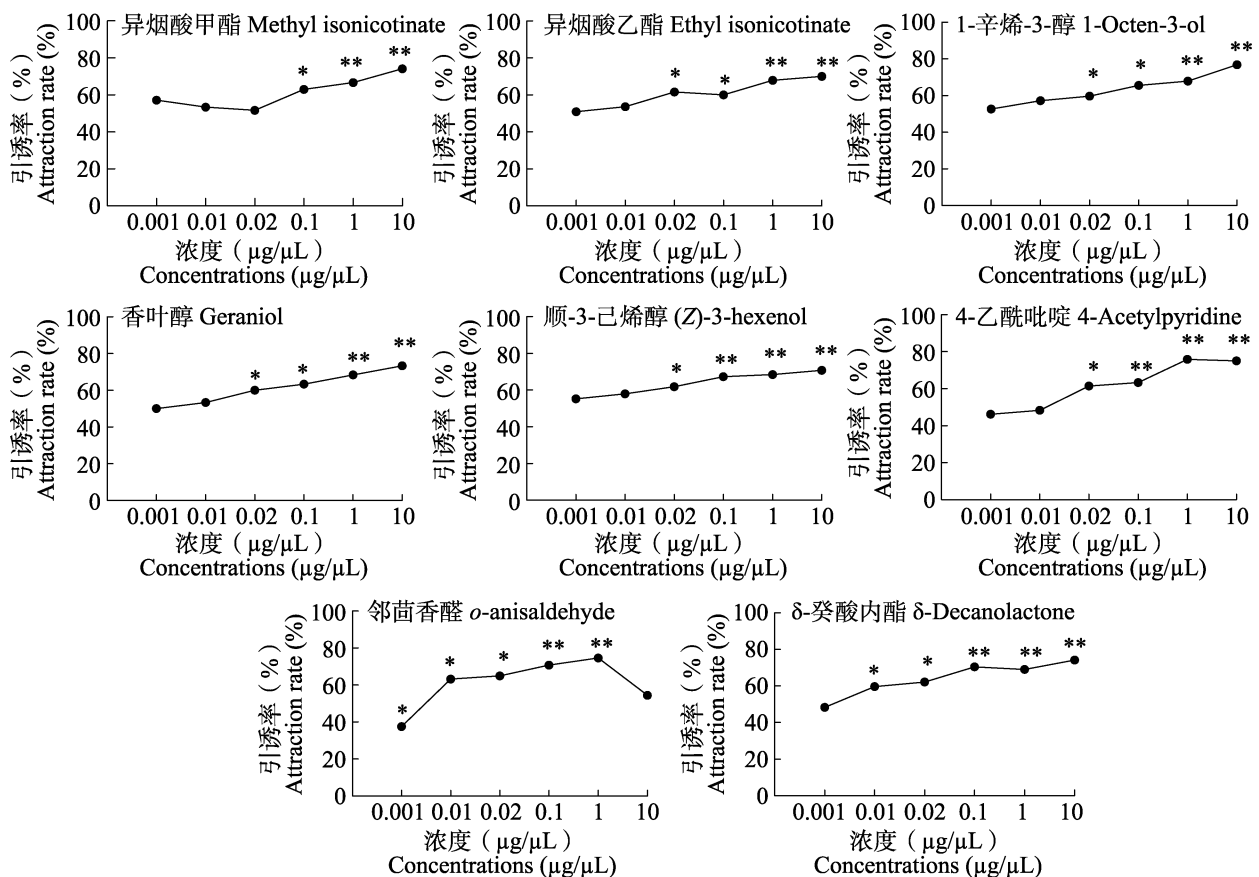


图 3 不同浓度植物挥发物对烟蓟马的吸引作用

Fig. 3 The attraction of female *Thrips tabaci* to plant volatiles of different concentrations

在 2.2 中水杨酸甲酯、茉莉酸甲酯、百里酚和异戊醛 4 种高驱避作用挥发物,随着测试浓度的增加,对烟蓟马雌性成虫的驱避作用逐步增强。水杨酸甲酯和百里酚的浓度为 0.001、0.01 $\mu\text{g}/\mu\text{L}$ 时,对烟蓟马无显著的行为影响 ($P > 0.05$), 0.02、0.1 $\mu\text{g}/\mu\text{L}$ 的水杨酸甲酯和百里酚表现为显著的驱避作用 ($P < 0.05$), 1、10 $\mu\text{g}/\mu\text{L}$

水杨酸甲酯和百里酚具有极显著的驱避效果 ($P < 0.001$)。浓度为 0.001、0.01、0.02 $\mu\text{g}/\mu\text{L}$ 的茉莉酸甲酯和异戊醛对烟蓟马成虫无显著的行为影响 ($P > 0.05$), 0.1 $\mu\text{g}/\mu\text{L}$ 茉莉酸甲酯和异戊醛具有显著的驱避作用 ($P < 0.05$), 1、10 $\mu\text{g}/\mu\text{L}$ 的茉莉酸甲酯和异戊醛具有极显著的驱避作用 ($P < 0.001$) (图 4)。

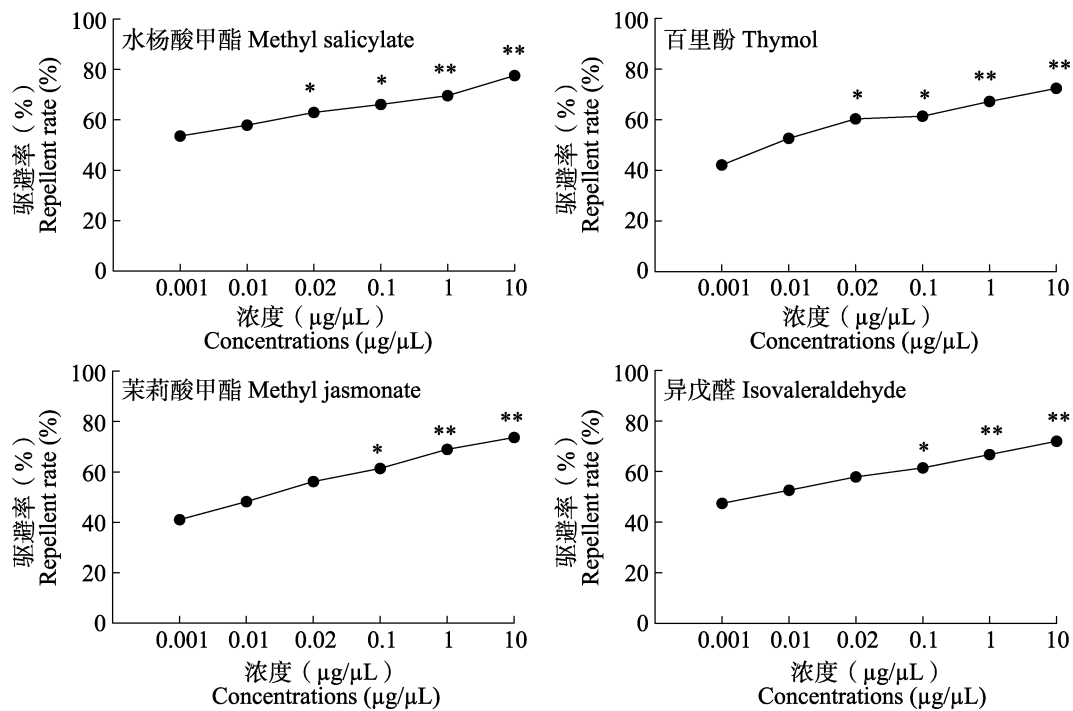


图 4 不同浓度植物挥发物对烟蓟马的驱避行为

Fig. 4 The repellent of female *Thrips tabaci* to plant volatiles of different concentrations

3 结论与讨论

大部分研究通过 Y 形嗅觉仪和四臂嗅觉仪测定昆虫行为反应 (Davidson *et al.*, 2008; 曹宇等, 2020), 也有少数试验使用直管嗅觉行为测定装置测试广聚萤叶甲 *Ophraella communa* 等的行为选择试验 (Ma *et al.*, 2020)。在本试验中, 由于烟蓟马体型微小, 使用 Y 形嗅觉仪和四臂嗅觉仪测试烟蓟马行为选择存在气流流速难以控制、无效选择居多的问题, 因此选择了直管嗅觉行为测定装置, 并多次测定了试验装置的有效性。试验结果表明, 烟蓟马雌虫对相同寄主植物的叶碟选择差异不显著, 但与非寄主植物叶碟相比显著趋好于寄主植物叶碟, 证实烟蓟马通过植

物气味进行定位选择, 且所用的直管嗅觉行为测定装置适用于烟蓟马行为选择测试。

蓟马类害虫对不同种类植物挥发物组分的偏好性不同。如普通大蓟马 *Megalurothrips sjostadti* 对芳樟醇、邻茴香醛等表现出明显的选择性 (唐良德等, 2015), 而花蓟马 *F. intonsa* 更偏好水杨醛、邻茴香醛、芳樟醇等植物挥发物, 黄蓟马 *Thrips flavus* 和黄胸蓟马 *T. hawaiiensis* 则明显偏爱香叶醇 (Kirk, 1985)。西花蓟马对邻茴香醛 (Koschier, 2008), 桉树脑 (Chermenskaya *et al.*, 2001), 丁香酚、(+)-香茅醛、香叶醇、橙花醇 (Koschier *et al.*, 2000), 马鞭草烯酮 (Abdullah *et al.*, 2014, 2015), 壬醛 (Avellaneda *et al.*, 2019), 顺-3-己烯醇、1-

辛烯-3-醇(张骏等, 2015)等挥发物有明显的偏好性。在本试验中, 烟蓟马雌性成虫显著趋向棉花和大葱叶片气味, 证实植物挥发物对烟蓟马定位选择作用有重要意义。

本研究通过嗅觉行为测定装置测试烟蓟马雌性成虫对不同植物挥发物的行为选择, 发现在浓度为 $1\ \mu\text{g}/\mu\text{L}$ 时, 壬醛、马鞭草烯酮、香茅醛、橙花醇和桉树脑 5 种挥发物对烟蓟马雌性成虫有显著的引诱效果, 从中筛选出 4-乙酰吡啶、邻茴香醛、 δ -癸酸内酯、顺-3-己烯醇、香叶醇和 1-辛烯-3-醇 6 种对烟蓟马雌性成虫具有高引诱效果的挥发物, 测定烟蓟马雌性成虫对高引诱的剂量响应。其中, 1-辛烯-3-醇是大部分豆科植物的挥发性气体(Hall *et al.*, 1984), 香叶醇天然存在于天竺葵 *Pelargonium hortorum* 中, 也是葱属植物大蒜 *Allium sativum* 等的植物中的常见挥发物(孙立宏和孙立明, 2009), 顺-3-己烯醇是棉花等常见植物的绿叶挥发物(Dudareva *et al.*, 2006)。这些植物都是烟蓟马的主要寄主, 说明烟蓟马是通过这些植物挥发性物质进行寄主植物定位的。研究结果证实了烟蓟马成虫通过嗅觉定位植物挥发物危害寄主植物的功能。为开发烟蓟马植物源引诱剂及其基于“Pull-Push”策略的烟蓟马防控技术的开展提供理论依据。此外, 试验发现烟蓟马雌性成虫对不同浓度挥发物的行为反应具有差异, 先前也有研究表明西花蓟马雌性成虫对较高浓度的芳樟醇表现出极显著的选择性, 当浓度较低时西花蓟马对芳樟醇的偏好性降低(Koschier *et al.*, 2000)。根据植物挥发物调控昆虫行为的研究, 目前已研发出昆虫引诱剂、昆虫驱避剂、以及害虫“推-拉”治理策略(Push-pull strategies)。其中对蓟马的行为调控研究主要集中在引诱挥发物和驱避挥发物等方面。如马鞭草 *Verbena officinalis* 挥发物主要组分芳樟醇氧化物吡喃和顺式氧化芳樟醇吡喃对西花蓟马具有引诱作用(Matsuura *et al.*, 2006); 忍冬花 *Lonicera japonica* 挥发性物质顺式茉莉酮明显引诱新西兰花蓟马, 对烟蓟马的引诱效果则较差(El-sayed *et al.*, 2009)。在田间, 水杨

酸甲酯和茉莉酮对捕食性和寄生性天敌的引诱作用, 能间接减少害虫数量(James and Price, 2004)。在农业生产中, 基于异烟酸甲酯的商品化诱剂 Lurem-TR 已被应用于防控蓟马(Broughton *et al.*, 2015)。本试验选取在田间诱捕试验中, 对烟蓟马雌性成虫具有强烈引诱活性的异烟酸乙酯和异烟酸甲酯作为阳性对照(Teulon *et al.*, 2007), 评价其他植物挥发物对烟蓟马的活性效果。

不同的挥发物对昆虫的行为影响, 除了引诱作用外, 也具有驱避作用(严善春等, 2003)。如在田间调查发现, 罗勒 *Ocimum basilicum* 和荆芥 *Schizonepeta tenuifolia* 上烟蓟马的种群数量较低; 室内行为反应研究发现, 烟蓟马对罗勒和荆芥挥发物表现出明显的驱避, 但是在花期, 其挥发物对烟蓟马的驱避效果降低(Ren *et al.*, 2020)。在本试验中通过嗅觉行为测定装置测试烟蓟马雌性成虫对不同植物挥发物的行为选择, 在浓度为 $1\ \mu\text{g}/\mu\text{L}$ 时, 水杨醛、香芹酚、顺茉莉醛、丁香酚和对烯丙基苯甲醚 5 种挥发物对烟蓟马雌性成虫有显著的驱避效果, 从中筛选出水杨酸甲酯、茉莉酸甲酯、百里酚和异戊醛 4 种对烟蓟马雌性成虫具有高驱避效果的挥发物, 测定烟蓟马雌性成虫对高驱避的剂量响应。实验结果与水杨酸甲酯(Koschier *et al.*, 2002), 香芹酚、百里酚(Sedy and Koschier, 2010), 丁香酚(Koschier *et al.*, 2002; Riefler and Koschier, 2009)等对烟蓟马具有拒食和减少产卵量的作用的结果一致。本文研究结果为研发烟蓟马植物源驱避剂提供了研究思路。

烟蓟马识别定位寄主植物的机理尚在探索阶段, 通过室内试验研究得出的挥发物组分在田间对烟蓟马行为影响是否和在室内试验一致? 下一步还需深入研究, 以筛选植物挥发物中对烟蓟马具有引诱或驱避活性的活性组分, 将筛选活性组分通过不同比例混配后, 测定室内定向行为并评价田间引诱或驱避效果, 明确最佳配比的有效配方, 研发出烟蓟马引诱剂或驱避剂, 为绿色防控烟蓟马提供技术参考。

参考文献 (References)

- Abdullah ZS, Ficken KJ, Greenfield BPJ, Butt TM, 2014. Innate responses to putative ancestral hosts: Is the attraction of western flower thrips to pine pollen a result of relict olfactory receptors? *Journal of Chemical Ecology*, 40(6): 534–540.
- Abdullah ZS, Greenfield BPJ, Ficken KJ, Taylor JW, Wood M, Butt TM, 2015. A new attractant for monitoring western flower thrips, *Frankliniella occidentalis* in protected crops. *Springerplus*, 4(1): 89.
- Allen WJ, Mitchell VJ, Colhoun K, Attfield BA, Stanbury ME, Suckling DM, El-Sayed AM, 2015. Development of an efficient trapping system for New Zealand flower thrips, *Thrips obscuratus*. *Pest Management Science*, 71(2): 309–315.
- Allsopp E, Prinsloo GJ, Smart LE, Dewhurst SY, 2014. Methyl salicylate, thymol and carvacrol as oviposition deterrents for *Frankliniella occidentalis* (Pergande) on plum blossoms. *Arthropod-Plant Interactions*, 8(5): 1–7.
- Avellaneda J, Díaz M, Coy-Barrera E, Rodríguez D, Osorio C, 2019. Rose volatile compounds allow the design of new control strategies for the western flower thrips (*Frankliniella occidentalis*). *Journal of Pest Science*, 94(1): 129–142.
- Belder ED, Elderson J, Brink WJVD, Schelling G, 2002. Effect of woodlots on thrips density in leek fields: A landscape analysis. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 91(1/3): 139–145.
- Broughton S, Cousins DA, Rahman T, 2015. Evaluation of semiochemicals for their potential application in mass trapping of *Frankliniella occidentalis* (Pergande) in roses. *Crop Protection*, 67: 130–135.
- Bruce TJ, Wadhams LJ, Woodcock CM, 2005. Insect host location: A volatile situation. *Trends in Plant Science*, 10(6): 269–274.
- Cai XM, Li ZQ, Pan HS, Lu YH, 2018. Research and application of food-based attractants of herbivorous insect pests. *Chinese Journal of Biological Control*, 34(1): 8–35. [蔡晓明, 李兆群, 潘洪生, 陆宴辉, 2018. 植食性害虫食诱剂的研究与应用. 中国生物防治学报, 34(1): 8–35.]
- Cao Y, Meng YL, Yang H, Li J, Zhang GZ, Wang YW, Li C, 2020. Preliminary study on behavioral responses of *Thrips hawaiiensis* to volatiles of different flowers. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 49(9): 88–97. [曹宇, 孟永禄, 杨红, 李军, 张国洲, 王亚维, 李灿, 2020. 黄胸蓟马对不同花卉挥发物的行为反应初探. 河南农业科学, 49(9): 88–97.]
- Chermenskaya TD, Burov VN, Maniar SP, Pow EM, Roditakis N, Selytskaya OG, Wadhams LJ, Woodcock CM, 2001. Behavioural responses of western flower thrips, *Frankliniella occidentalis* (Pergande), to volatiles from three aromatic plants. *International Journal of Tropical Insect Science*, 21(1): 62–72.
- Cook SM, Khan ZR, Pickett JA, 2007. The use of push-pull strategies in integrated pest management. *Annual Review of Entomology*, 52: 375–400.
- Davidson MM, Butler RC, Teulon DAJ, 2009. Pyridine compounds increase thrips (Thysanoptera: Thripidae) trap capture in an onion crop. *Journal of Economic Entomology*, 102(4): 1468–1471.
- Davidson MM, Perry NB, Larsen L, Green VC, Butler RC, Teulon DA, 2008. 4-Pyridyl carbonyl compounds as thrips lures: Effectiveness for western flower thrips in Y-tube bioassays. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 56(15): 6554–6561.
- Dudareva N, Negre F, Nagegowda DA, Orlova I, 2006. Plant volatiles: Recent advances and future perspectives. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 25(5): 417–440.
- Egger B, Koschier EH, 2014. Behavioural responses of *Frankliniella occidentalis* Pergande larvae to methyl jasmonate and cis-jasmone. *Journal of Pest Science*, 87(1): 53–59.
- Egger B, Spangl B, Koschier EH, 2014. Habituation in *Frankliniella occidentalis* to deterrent plant compounds and their blends. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 151(3): 231–238.
- El-sayed AM, Mitchell VJ, McLaren GF, Manning LM, Bunn B, Suckling DM, 2009. Attraction of New Zealand flower thrips, *Thrips obscuratus*, to cis-jasmone, a volatile identified from Japanese honeysuckle flowers. *Journal of Chemical Ecology*, 35(6): 656–663.
- El-Sayed AM, Mitchell VJ, Suckling DM, 2014. 6-Pentyl-2H-pyran-2-one: A potent peach-derived kairomone for New Zealand flower thrips, *Thrips obscuratus*. *Journal of Chemical Ecology*, 40(1): 50–55.
- Hall DR, Beevor PS, Cork A, Nesbitt BF, Vale GA, 1984. 1-Octen-3-ol. A potent olfactory stimulant and attractant for tsetse isolated from cattle odours. *International Journal of Tropical Insect Science*, 5(5): 335–339.
- James DG, Price TS, 2004. Field-testing of methyl salicylate for recruitment and retention of beneficial insects in grapes and hops. *Journal of Chemical Ecology*, 30(8): 1613–1628.
- Kirk WDJ, 1985. Effect of some floral scents on host finding by thrips (Insecta: Thysanoptera). *Journal of Chemical Ecology*, 11(1): 35–43.
- Koschier EH, 2008. Essential oil compounds for thrips control-A review. *Nature Product Communication*, 3(7): 1171–1182.
- Koschier EH, Hoffmann D, Riefler J, 2010. Influence of salicylaldehyde and methyl salicylate on post-landing behaviour

- of *Frankliniella occidentalis* Pergande. *Journal of Applied Entomology*, 131(5): 362–367.
- Koschier EH, Kogel WJ, Visser JH, 2000. Assessing the attractiveness of volatile plant compounds to western flower thrips *Frankliniella occidentalis*. *Journal of Chemical Ecology*, 26(12): 2643–2655.
- Koschier EH, Sedy KA, Novak J, 2002. Influence of plant volatiles on feeding damage caused by the onion thrips *Thrips tabaci*. *Crop Protection*, 21(5): 419–425.
- Kritzman A, Lampel M, Raccach B, Gera A, 2001. Distribution and transmission of *Iris yellow spot virus*. *Plant Disease*, 85(8): 838–842.
- Lebedev G, Abo-Moch F, Gafni G, Ben-Yakir D, Ghanim M, 2013. High level of resistance to spinosad, emamectin benzoate and carbosulfan in populations of *Thrips tabaci* collected in Israel. *Pest Management Science*, 69(2): 274–277.
- Ma C, Cui S W, Bai Q, Tian ZY, Zhang Y, Chen GM, Gao XY, Tian ZQ, Chen HS, Guo JY, Wan FH, Zhou ZS, 2020. Olfactory co-receptor is involved in host recognition and oviposition in *Ophraella communa* (Coleoptera: Chrysomelidae). *Insect Molecular Biology*, 29(4): 381–390.
- Matsuura S, Hoshino S, Koga H, 2006. Verbena as a trap crop to suppress thrips-transmitted tomato spotted wilt virus in chrysanthemums. *Journal of General Plant Pathology*, 72(3): 180–185.
- Pan HS, Lu YH, Wyckhuys KAG, Wu KM, 2013. Preference of a polyphagous mirid bug, *Apolygus lucorum* (Meyer-Dür) for flowering host plants. *PLoS ONE*, 8(7): e68980.
- Ren XY, Wu SY, Xing ZL, Gao YL, Cai WZ, 2020. Abundances of thrips on plants in vegetative and flowering stages are related to plant volatiles. *Journal of Applied Entomology*, 144(8): 1–11.
- Riefler J, Koschier EH, 2009. Behaviour-modifying activity of eugenol on *Thrips tabaci* Lindeman. *Journal of Pest Science*, 83(2): 115–121.
- Rueda AA, 2000. Developing the research and education components for an intergrated pest management program for sweet onions in Honduras. Doctoral dissertation. Ithaca: Cornell University.
- Satoshi T, Takeshi S, 2008. Olfactory responses of the predatory mites (*Neoseiulus cucumeris*) and insects (*Orius strigicollis*) to two different plant species infested with onion thrips. *Journal of Chemical Ecology*, 34(5): 605–613.
- Sedy KA, Koschier EH, 2010. Bioactivity of carvacrol and thymol against *Frankliniella occidentalis* and *Thrips tabaci*. *Journal of Applied Entomology*, 127(6): 313–316.
- Silva R, Hereward JP, Walter GH, Wilson LJ, Furlong MJ, 2018. Seasonal abundance of cotton thrips (Thysanoptera: Thripidae) across crop and non-crop vegetation in an Australian cotton producing region. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, (256): 226–238.
- Sun LH, Sun LM, 2009. Research advances on geraniol. *Journal of Northwest Pharmacy*, 24(5): 428–430. [孙立宏, 孙立明, 2009. 香叶醇的研究进展. 西北药学杂志, 24(5): 428–430.]
- Tang LD, Han Y, Wu JH, Fu BL, Zhang RM, Qiu HY, Liu K, 2015. The effect of host plants and chemicals on behavioral response of *Megalurothrips usitatus* (Bagnall). *Journal of Environmental Entomology*, 37(5): 1024–1029. [唐良德, 韩云, 吴建辉, 付步礼, 张瑞敏, 邱海燕, 刘奎, 2015. 豆大蓟马对寄主植物及挥发性化合物的趋性. 环境昆虫学报, 37(5): 1024–1029.]
- Teulon DAJ, Castaé C, Nielsen MC, El-Sayed AM, Perry NB, 2014. Evaluation of new volatile compounds as lures for western flower thrips and onion thrips in New Zealand and Spain. *New Zealand Plant Protection*, 67: 175–183.
- Teulon DAJ, Davidson MM, Hedderley DI, James DE, Fletcher CD, Larsen L, Green VC, Perry NB, 2007. 4-Pyridyl carbonyl and related compounds as thrips lures: Effectiveness for onion thrips and New Zealand flower thrips in field experiments. *Journal Agricultural Food Chemistry*, 55(15): 6198–6205.
- Teulon DAJ, Davidson MM, Perry NB, Nielsen MC, Castaé C, Bosch D, Riudavets J, Van Tol RWHM, DeKogel WJ, 2017. Methyl isonicotinate-a non-pheromone thrips semiochemical-and its potential for pest management. *International Journal of Tropical Insect Science*, 37(2): 50–56.
- Ullman DE, Meideros R, Campbell LR, Whitfield AE, Sherwood JL, German TL, 2002. Thrips as vectors of tospoviruses. *Advances in Botanical Research*, 36: 113–140.
- Xie YH, Li ZY, Zhang HR, 2011. Research advances on *Thrips tabaci*. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 39(5): 2683–2685, 2785. [谢永辉, 李正跃, 张宏瑞, 2011. 烟蓟马研究进展. 安徽农业科学, 39(5): 2683–2685, 2785.]
- Yan SC, Zhang DD, Chi DF, 2003. Advances of studies on the effects of plant volatiles on insect behavior. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 14(2): 310–313. [严善春, 张丹丹, 迟德富, 2003. 植物挥发性物质对昆虫作用的研究进展. 应用生态学报, 14(2): 310–313.]
- Zhang J, Zhi JR, Yang GM, 2015. Behavioral responses of *Frankliniella occidentalis* to kidney bean plants and their volatiles under different treatments. *Chinese Journal of Ecology*, 34(2): 425–430. [张骏, 郑军锐, 杨广明, 2015. 西花蓟马对不同处理菜豆及其挥发物的行为反应. 生态学杂志, 34(2): 425–430.]