



谷小红, 蔡普默, 杨晴阳, 等. 阿里山潜蝇茧蜂对橘小实蝇危害诱导水果挥发物的行为反应及主要成分分析 [J]. 环境昆虫学报, 2017, 39 (4): 820–829.

阿里山潜蝇茧蜂对橘小实蝇危害诱导水果挥发物的行为反应及主要成分分析

谷小红, 蔡普默, 杨晴阳, 季清娥, 陈家骅*

(联合国(中国)实蝇防控研究中心, 福州 350002)

摘要: 为明确寄主植物挥发物在阿里山潜蝇茧蜂 *Fopius arisanus* Sonan 生境定位, 寄主或食物搜寻等过程中的作用, 采用 Y 型嗅觉仪测定了阿里山潜蝇茧蜂性成熟雌蜂对健康、虫害诱导及人为损伤的橙子、香蕉、西红柿的行为反应, 并用气相色谱-质谱联用仪分析鉴定受染前后的番石榴、橙子、香蕉和番茄挥发物成分。结果表明: 健康的、橘小实蝇危害和机械损害的香蕉、橙子对阿里山潜蝇茧蜂性成熟雌蜂均产生显著的引诱作用, 受染橙子引诱到寄生蜂的数量显著高于健康橙子, 其他组对于水果气味的选择并无显著性差异, 并且阿里山潜蝇茧蜂雌成蜂对虫害诱导水果的选择反应与为害时间密切相关。4 种不同水果挥发物成分种类多样, 相对含量及其比例差异较大。橘小实蝇为害后诱导水果新产生了乙酸叶醇酯、反-法呢烯、 β -罗勒烯、苯甲醛、顺-罗汉柏烯、柏木脑、辛酸乙酯、辛酸甲酯、十四烷、十五烷和二十烷。芳樟醇和 β -月桂烯在受染橙子的释放具有滞后性, 分别在橙子受染后第 2 天和第 3 天才被检测到, 并且相对含量逐渐上升。上述结果为研究水果挥发物调控阿里山潜蝇茧蜂的行为反应, 提高其生物防治效果奠定基础。

关键词: 阿里山潜蝇茧蜂; 橘小实蝇; 行为反应; 挥发物

中图分类号: Q965.9; S433.5

文献标识码: A

文章编号: 1674-0858 (2017) 04-0820-10

Behavioral responses of *Fopius arisanus* (Sonan) (Hymenoptera: Braconidae) to volatiles from fruits infested by *Bactrocera dorsalis* (Hendel) (Diptera: Tephritidae) and analysis of volatile components

GU Xiao-Hong, CAI Pu-Mo, YANG Qing-Yang, JI Qing-E, CHEN Jia-Hua* (UN (China) Center for Fruit Fly Prevention and Treatment, Fuzhou 350002, China)

Abstract: In order to investigate the roles of volatiles from host plants in the process of *Fopius arisanus* Sonan targeting habitats, searching for host or food, the behavioral responses of sexually mature *F. arisanus* females to intact fruits, fruits infested by *Bactrocera dorsalis* Hendel and damaged mechanically fruits of oranges, bananas and tomatoes were measured by Y-tube olfactometer, and the volatiles from intact fruits and fruits infested by *B. dorsalis* of guavas, oranges, bananas and tomatoes were identified by gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS). The results showed that the *F. arisanus* sexually mature females were significantly attracted by intact fruits, fly-infected and damaged mechanically fruits of bananas and oranges, the numbers of *F. arisanus* mature females attracted by infected orange were significantly more than intact oranges, and there were no significant differences in other groups. The selective responses of

基金项目: 国家教育部博士点专项科研基金 (K41110003); 福建省自然科学基金 (2016J01114)

作者简介: 谷小红, 女, 1990 年生, 湖南耒阳人, 硕士研究生, 研究方向为害虫生物防治, E-mail: 409383559@qq.com

* 通讯作者 Author for correspondence, E-mail: jhchen34@163.com

收稿日期 Received: 2016-09-25; 接受日期 Accepted: 2017-06-26

F. arisanus sexually mature females to infected fruits were closely related to the time of fruit fly infecting. Volatile compounds from four different fruits were diversity, their relative contents and proportion were quite different. Fruits infected by *B. dorsalis* newly released Leaf acetate, trans-Farnesol, beta-OCimene, Benzaldehyde, cis-Thujopsene, Cedrol, Octanoate ethyl, Octanoate methyl, Tetradecane, Pentadecane. The delayed release of Linalool and beta-Myrcene in infected oranges were observed. Linalool and beta-Myrcene were detected two and three after infection by oriental fruit fly respectively, and their relative contents increased as the time increased. The above results laid a necessary foundation for further research of volatiles regulating the behavioral responses of *F. arisanus* and to improve its biocontrol effectiveness.

Key words: *Fopius arisanus* Sonan; *Bactrocera dorsalis* Hendel; behavioral responses; volatiles

许多寄生蜂在害虫生物防治中占有重要地位,这很大程度上依赖于其在自然环境中通过感受周围环境与其寄主相关的物理和化学信息来发现和定位合适寄主的能力 (Reddy, 2012)。寄生蜂对于这些信息的利用往往取决于它们的可信性和可检测性 (Vet *et al.*, 1992; Steinberg *et al.*, 1993)。一般情况下,直接来自寄主昆虫的物理与化学信息,通常是最可信的,但能够被寄生蜂感受的距离往往较短 (Cotesia *et al.*, 1998)。例如在植物组织内的寄主,不易被寄生蜂看到,其化学信息也有可能被阻拦或掩盖。面对这一难题,寄生蜂已经形成多种应对策略,其中包括视觉上寻找被寄主损害的相关伤口 (Faeth, 1990),或通过感知寄主幼虫在植物组织内取食的动静和利用触角拍打产生的回声来定位寄主 (Wäckers *et al.*, 1998),以及感知受到寄主危害后植物释放的化学信息 (Pérez *et al.*, 2013)。其中,来自于寄主生境的挥发性物质通常具有挥发量大、作用距离长的特点,易被寄生蜂感受到。而植物受到植食性昆虫危害诱导释放的挥发物,又暗示着寄主存在的可靠性,因此此类物质在寄生蜂长距离的寄主定位中发挥着重要作用 (Vet *et al.*, 1990; Takabayashi *et al.*, 1994; Turlings *et al.*, 1994)。

植物受到植食性昆虫的取食或产卵危害后,其释放的挥发物含量和种类都会发生明显的变化,且能引诱天敌达到间接防御的效果 (Hilker and Meiners, 2012)。这已在多个植物—害虫—天敌的三级营养系统研究中得到证实 (Belda *et al.*, 2010; Reddy, 2012)。菜蚜茧蜂 *Diaeretiella rapa* McIntosh 对正常小麦 *Triticum aestivum* 和甘蓝 *Brassica oleracea* 叶片的气味没有反应,但对俄罗斯麦蚜 *Diuraphis noxia* Mordvilko、俄罗斯麦蚜和小麦复合体、甘蓝蚜和甘蓝复合体、蚜害小麦或蚜害甘蓝等的气味有较强烈的行为反应 (Reed *et al.*,

1995); 受地中海实蝇 *Ceratitis capitata* Wiedemann 危害的柑橘 *Citrus reticulata* 挥发物对长尾潜蝇茧蜂 *Diachasmimorpha longicaudata* Ashmead 有显著的吸引作用,这可能是由寄主与寄主生境共同作用产生的 (Segura *et al.*, 2012)。

阿里山潜蝇茧蜂 *Fopius arisanus* Sonan 是控制实蝇类害虫最有效的寄生蜂之一 (Rousse *et al.*, 2005),是实蝇综合治理体系中重要的生物防治因子。已有研究表明实蝇危害水果后诱导产生的挥发物能显著增强对阿里山潜蝇茧蜂的吸引作用 (Rousse, 2005; Altuzar *et al.*, 2014)。然而目前为止,在这一虫害诱导过程中究竟释放了哪些化合物,这些化合物对寄生蜂的行为产生何种作用,尚未明确。因此,本文采用 Y 型嗅觉仪测定了阿里山潜蝇茧蜂对不同处理的 3 种水果的行为反应,同时采用 GC-MS 分析了挥发物的主要成分,以揭示寄主植物挥发物在阿里山潜蝇茧蜂寻找寄主或食物等过程中的作用。

1 材料与方法

1.1 供试虫源

橘小实蝇 *Bactrocera dorsalis* Hendel 采自福建省漳州市,通过室内继代饲养建立了相对稳定的种群,参考梁光红等 (2010) 饲养方法。阿里山潜蝇茧蜂于 2005 年由福建农林大学益虫研究所从美国引进,在室内饲养并建立相对稳定的室内种群,参考耿军灵 (2009) 饲养方法。饲养条件: 温度 $25^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$, 相对湿度为 $70\% \pm 5\%$, 光照为 14 L: 10 D。

1.2 供试水果和化合物

本试验选择番石榴 *Psidium guajava*, 香蕉 *Musa paradisiaca*, 番茄 *Lycopersicon esculentum*, 橙 *Citrus sinensis* 为供试水果。据涂蓉 (2013) 等报

道, 此些水果皆为橘小实蝇较为偏好的寄主, 因此选为供试水果。挑选大小, 颜色相近的成熟水果, 洗净晾干后待用。将洗净晾干的水果置于装有 50 头橘小实蝇成熟雌虫的笼子中接受产卵, 作为虫害诱导水果, 处理 24 h 后置于人工气候箱中 (温度 26℃, 相对湿度为 75%), 1、3、5 d 后, 依次作为受染不同天数的水果样品, 未处理水果作为健康对照水果; 用针在健康水果的表面扎 100 个 2 mm 深的伤口, 作为人为损伤的水果样品。色谱纯正己烷购于北京索莱宝科技有限公司, 纯度均 $\geq 98\%$ 。

1.3 嗅觉行为反应

Y 型嗅觉仪依次由增氧泵、活性炭、空气加湿器、流量计、味源瓶和 Y 型管组成, 各部件间以硅胶管连接。无色透明的 Y 型玻璃管两臂长均 15 cm, 夹角为 60°, 柄长 20 cm, 内径 3.6 cm。在气流进入味源瓶之前, 由增氧泵送气, 经活性炭净化, 再经蒸馏水加湿, 两臂的气流量控制在 200 mL/min。两臂前方放置白炽光源, 保证两臂的均匀光照。行为测定开始时, 先通气 10 min, 再将 10 头饥饿处理 2 h 的寄生蜂放入 Y 型嗅觉仪柄口。当寄生蜂爬至超过 1/3 臂并保持 1 min 以上, 则记该虫对气味源做出选择, 观察时间为 30 min。每测定 10 头, 调换味源瓶和对照瓶的位置, 并更换干净的 Y 型管。试验重复 6 次, 共 60 头, 所有供试成虫只使用一次, 每日测定时间为 9:00–18:00。

1.4 水果挥发物的收集和鉴定

采用动态顶空收集法, 该收集装置进气端连有变色硅胶和活性炭用于过滤空气杂质。将处理后的水果置于圆筒玻璃缸内 (直径 20 cm, 高 30 cm), 并配有缸盖。缸盖上设有进气与出气口, 流速控制在 300 mL/min。气体进入玻璃缸内将水果挥发物带入内有吸附剂 Super Q 的收集柱 (长 8 cm, 内径 0.5 cm)。气体收集过程中, 缸盖固定密封。水果挥发物在同时段 (8:00–18:00) 收集 10 h。挥发物收集结束后, 用 500 μ L 色谱纯正己烷将吸附柱中的样品, 分多次洗于样品瓶中, 然后将瓶口密封, 置于 4℃ 冰箱中保存, 待检测。

采用美国 Agilent 7890 A-5975 C 气质联用仪对样品进行分析。进样口温度为 250℃, 载气为 99.99% 高纯 He, 流速为 1 mL/min, 样品进样量为 1 μ L, 毛细管柱为 DB-35MS (30 m $\times$ 0.25 mm $\times$ 0.25 μ m)。色谱条件: 柱温采取程序升温: 80℃

(1 min) $\rightarrow$ 4℃/min $\rightarrow$ 200℃ (2 min) $\rightarrow$ 15℃/min $\rightarrow$ 260℃ (5 min)。质谱条件: GC-MS 接口温度为 280℃, 无分流比。EI 离子源, 电力能 70 eV, 相对分子质量扫描范围为 40–600 amu, 采集方式为全扫描。检索谱库为 NIST 11。

1.5 数据处理

在进行嗅觉仪行为测定时, 以做出选择反应的寄生蜂成虫数量为样品总数, 分别以选择两臂的寄生蜂成虫数量为两个处理的发生数, 选择率 (%) = 发生数/样品总数 $\times$ 100。采用 Microsoft Excel 和 SPSS 17.0 软件对数据进行分析处理和制图, t 检验分析其差异显著性。应用 GC-MS 对不同处理水果挥发物化学成分进行检测, 根据质谱数据库 NIST 11 匹配度的高低确定成分, 并利用峰面积归一化法定量, 计算其相对含量。

2 结果与分析

2.1 对不同处理水果的行为反应

阿里山潜蝇茧蜂雌成蜂对不同处理的水果挥发物的选择性 (图 1), Y 型嗅觉仪测定表明, 健康的, 受橘小实蝇危害和人为损害的香蕉和橙子对阿里山潜蝇茧蜂均产生显著的引诱作用 ($P < 0.05$), 但健康的和受橘小实蝇危害的番茄对阿里山潜蝇茧蜂的引诱作用不显著 ($P > 0.05$)。此外, 除了受染橙子引诱到阿里山潜蝇茧蜂的数量显著高于健康橙子, 其他组分并无显著差异。

2.2 对受染后不同天数的水果的行为反应

Y 型嗅觉仪测定表明, 阿里山潜蝇茧蜂性成熟雌蜂对虫害诱导水果的选择性与为害时间密切相关 (图 2)。受染橙子对阿里山潜蝇茧蜂成熟雌蜂的引诱作用都显著大于空白对照 ($P < 0.05$), 并在受染后第 3 天的引诱力最强。受染香蕉对阿里山潜蝇茧蜂的引诱作用, 在受染后第 5 天显著大于对照组 ($P < 0.05$)。而受染番茄对阿里山潜蝇茧蜂的引诱作用在受染后第 1 天和第 3 天的引诱作用均不显著 ($P > 0.05$), 并在受染后第 5 天产生显著的趋避作用 ($P < 0.05$)。

2.3 水果挥发物成分分析

健康番石榴挥发物主要有 5 种化合物, 含量较多的成分有邻苯二甲酸二乙酯 (66.76%), 锡烷 (5.21%), 另外 3 种挥发物成分为十二烷, 十三烷, α -柏木烯, 相对含量均低于 1%。虫害诱导的番石榴挥发物主要有 12 种化合物, 含量最高的

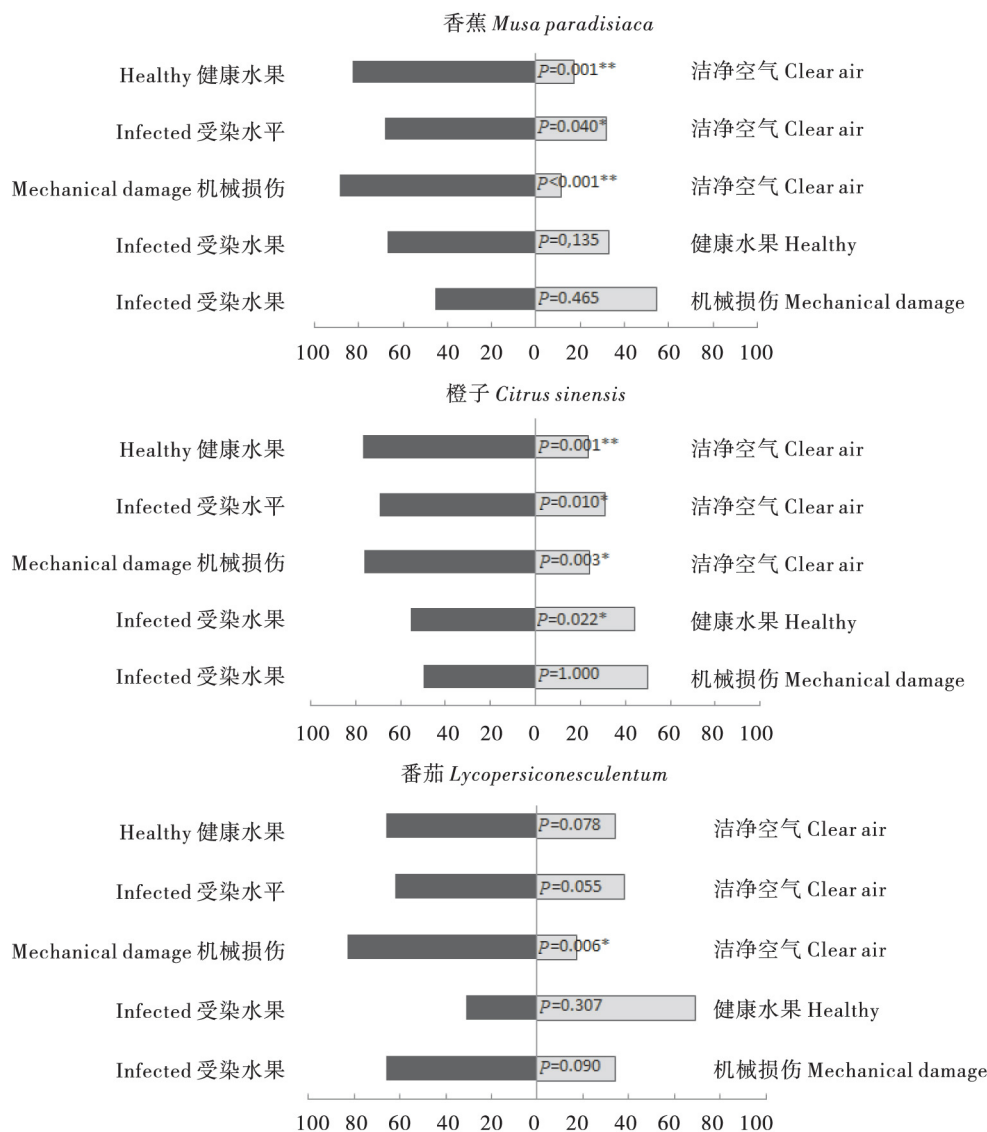


图1 阿里山潜蝇茧蜂雌对寄主水果挥发物的选择反应 (%)

Fig. 1 Selective responses of *Fopius arisanus* female adults to volatile from host fruits (mean $\pm$ SE)

注:*, 差异显著 ($P < 0.05$, T 检验); **: 差异极显著 ($P < 0.001$, T 检验); 图2同。Note: Asterisks indicate significant differences within a choice test: Paired - samples T test where * $P < 0.05$, ** $P < 0.001$, the same for Fig. 2.

为乙酸叶醇酯 (56.42%), 其次是邻苯二甲酸二乙酯 (8.68%), α -柏木烯 (6.49%) 等。番石榴受染后增加的组分有乙酸叶醇酯, 苯甲醛 (3.96%), 柏木脑 (2.15%), 顺罗汉柏烯 (1.55%), 十五烷 (0.63%), 二十烷 (0.74%) 和反-法呢醇 (0.37%) (表1)。

健康香蕉挥发物主要有3种化合物, 分别为丁酸异丁酯 (91.48%), 丙酸 (4.97%) 和己烷 (3.55%)。而虫害诱导的香蕉挥发物减少了己烷, 主要由丁酸异丁酯 (49.15%) 和丙酸 (50.85%) 组成。

健康橙子挥发物主要有13种化合物, 含量最

多的为朱桉倍半萜 (47.17%), 其次为D-苧烯 (23.58%), 十一酸乙酯 (13.27%), 正己酸乙酯 (3.56%), α -人参烯 (2.45%), α -芹子烯 (2.40%), 石竹烯 (2.32%), α -柏木烯 (1.14%) 和十二酸乙酯 (1.03%) 等。虫害诱导橙子挥发物主要有12种化合物, 含量较多的为朱桉倍半萜 (43.34%), 其次为正己酸乙酯 (10.62%), β -罗勒烯 (9.28%), 辛酸乙酯 (8.86%), D-苧烯 (7.89%), β -人参烯 (4.03%), α -芹子烯 (3.25%), 环己烷 (2.53%) 和石竹烯 (2.38%) 等。橙子受染后增加的组分有 β -罗勒烯, 辛酸乙酯和十五烷 (0.98%)。

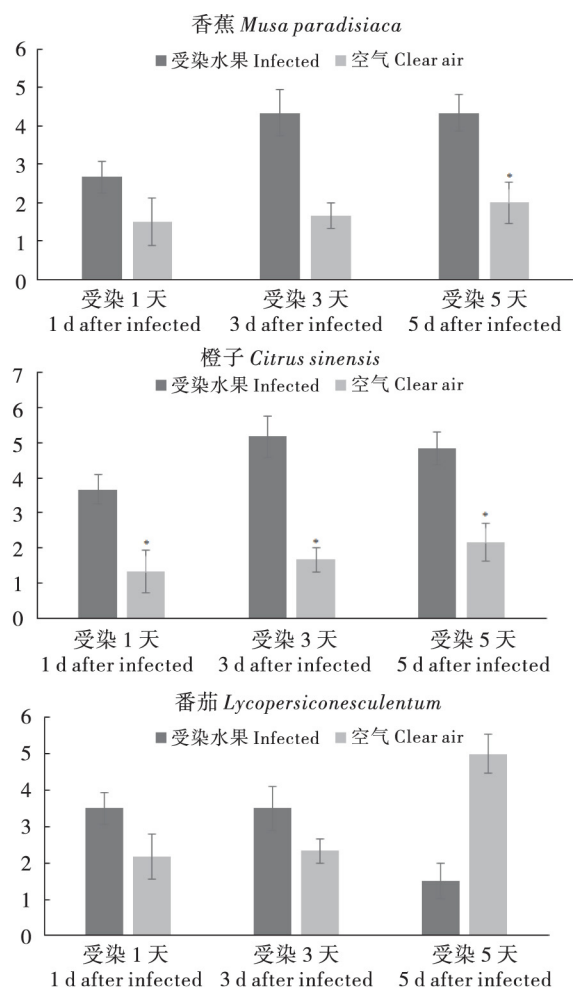


图2 阿里山潜蝇茧蜂雌蜂对感染不同天数水果挥发物的选择反应

Fig. 2 Selective responses of *Fopius arisanus* female adults to volatile from infected fruits after different days (mean $\pm$ SE)

而橙子感染后挥发物组分减少了十一酸乙酯, 十二酸乙酯, α -人参烯和柏木脑 (0.88%)。

健康番茄果实挥发物主要有 21 种物质, 含量最多的为 α -柏木烯 (25.69%), 其次为十三烷 (15.09%), 十二烷 (14.56%), β -柏木烯 (10.13%), 环己烷 (3.03%) 和十一烷 (3.03%) 等。虫害诱导番茄挥发物主要有 18 种物质, 含量较多的为 α -柏木烯 (26.97%), 其次为十三烷 (17.18%), 十二烷 (14.92%), β -柏木烯 (10.18%), 环己烷 (3.33%) 和十一烷 (3.11%) 等。番茄感染后挥发物组分增加了柏木脑 (2.02%), 却减少了 β -绿叶烯 (2.57%), 甲基丁香酚 (2.42%), 花侧柏烯 (1.11%), 乙酸 (1.06%) 和 γ -衣兰油烯 (0.89%)。

2.4 水果挥发物成分种类比较

不同处理的水果挥发物成分中, 成分种类多样, 相对含量差异较大 (图3)。其中, 酯类化合物的相对含量在健康的番石榴和香蕉挥发物组分中最高, 分别达到 66.76% 和 91.48%, 在感染后的挥发物组分中下降到 56.42% 和 49.15%。萜类化合物在健康的橙子和番茄挥发物成分中, 相对含量最多, 占 81.26% 和 47.05%, 在感染后的挥发物组分中降至 71.73% 和 46.49%。烃类在四种水果中都有分布, 在番茄挥发物组分中相对含量最高。酸类在香蕉挥发物组分中含量最高, 在健康番茄组分中有少量乙酸 (1.06%), 其他组分并无发现。酚类和醛类在所有水果挥发物中含量最低, 酚类 (2.42%) 仅存于健康番茄挥发物中, 醛类 (3.96%) 是感染

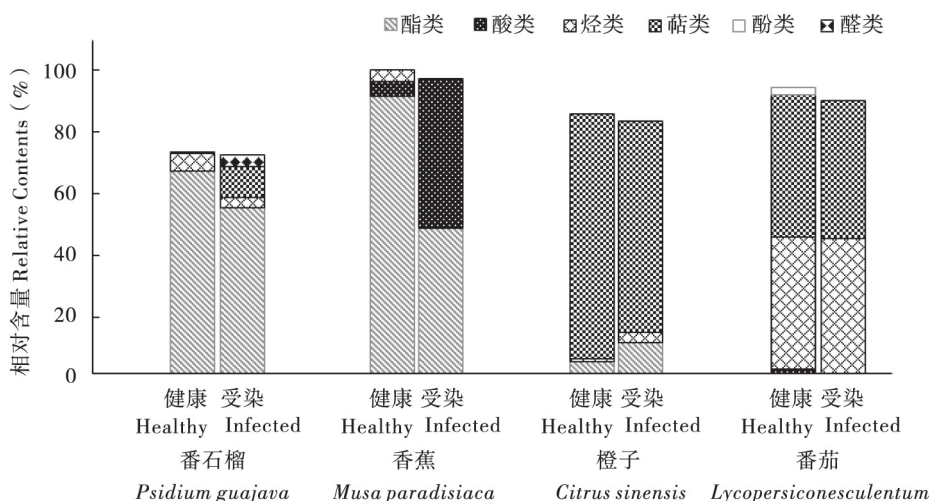


图3 水果挥发物成分种类比较

Fig. 3 Comparison of volatile species from fruits

表 1 橘小实蝇为害后水果挥发物主要成分及相对含量
Table 1 Main components and relative contents (%) of volatiles from fruits infected by *Bactrocera dorsalis*

序号 No.	化合物 Compounds	番石榴 <i>Psidium guajava</i>		香蕉 <i>Musa paradisiaca</i>		橙子 <i>Citrus sinensis</i>		番茄 <i>Lycopersicon esculentum</i>	
		健康 水果	虫害诱导 水果	健康 水果	虫害诱导 水果	健康 水果	虫害诱导 水果	健康 水果	虫害诱导 水果
		Healthy fruits	Infested fruits	Healthy fruits	Infested fruits	Healthy fruits	Infested fruits	Healthy fruits	Infested fruits
1	乙酸叶醇酯 Leaf acetate	—	56. 42	—	—	—	—	—	—
2	正己酸乙酯 Ethyl hexanoate	—	—	—	—	3. 56	10. 62	—	—
3	辛酸乙酯 Ethyl octanoate	—	—	—	—	—	8. 86	—	—
4	丁酸异丁酯 Isobutyl butyrate	—	—	91. 48	49. 15	—	—	—	—
5	十一酸乙酯 Ethyl undecanoate	—	—	—	—	13. 27	—	—	—
6	十二酸乙酯 Ethyl dodecanoate	—	—	—	—	1. 03	—	—	—
7	邻苯二甲酸二乙酯 Diethyl Phthalate	66. 76	8. 68	—	—	—	—	—	—
8	苯 (甲) 醛 Benzaldehyde	—	3. 96	—	—	—	—	—	—
9	乙酸 Acetic acid	—	—	—	—	—	—	1. 06	—
10	丙酸 Propanoic acid	—	—	4. 97	50. 85	—	—	—	—
11	环己烷 Cyclohexane	—	—	—	—	0. 90	2. 53	3. 33	3. 32
12	庚基环己烷 Heptylcyclohexane	—	—	—	—	—	—	0. 89	0. 79
13	壬基环己烷 n-Nonylcyclohexane	—	—	—	—	—	—	1. 07	1. 24
14	环十四烷 Cyclotetradecane	—	—	—	—	—	—	1. 48	1. 62
15	己烷 Hexane	—	—	3. 55	—	—	—	—	—
16	十一烷 Undecane	—	—	—	—	—	—	3. 03	3. 11
17	十二烷 Dodecane	0. 29	0. 76	—	—	—	—	14. 56	14. 92
18	十三烷 Tridecane	0. 29	0. 39	—	—	—	—	15. 09	17. 18
19	十四烷 Tetradecane	—	0. 68	—	—	—	—	2. 13	2. 30
20	十五烷 Pentadecane	—	0. 63	—	—	—	0. 98	—	—
21	二十烷 Eicosane	—	0. 74	—	—	—	—	—	—
22	锡烷 Stannane	5. 21	—	—	—	—	—	—	—
23	甲基丁香酚 Methyleugenol	—	—	—	—	—	—	2. 42	—
24	D-蒎烯 D-Limonene	—	—	—	—	23. 58	7. 89	—	—
25	β-罗勒烯 beta. -Ocimene	—	—	—	—	—	9. 28	—	—
26	α-柏木烯 alpha-Cedrene	0. 29	6. 49	—	—	1. 14	0. 52	25. 69	26. 97
27	β-柏木烯 β-Cedrene	—	—	—	—	—	—	10. 13	10. 48
28	石竹烯 Caryophyllene	—	—	—	—	2. 32	2. 38	—	—
29	别香树烯 Alloaromadendrene	—	—	—	—	0. 57	1. 04	—	—
30	α-芹子烯 g-Selinene	—	—	—	—	2. 40	3. 25	1. 08	1. 26

续上表

序号 No.	化合物 Compounds	番石榴 <i>Psidium guajava</i>		香蕉 <i>Musa paradisiaca</i>		橙子 <i>Citrus sinensis</i>		番茄 <i>Lycopersicon esculentum</i>	
		健康 水果	虫害诱导 水果	健康 水果	虫害诱导 水果	健康 水果	虫害诱导 水果	健康 水果	虫害诱导 水果
		Healthy fruits	Infested fruits	Healthy fruits	Infested fruits	Healthy fruits	Infested fruits	Healthy fruits	Infested fruits
31	β -人参烯 <i>beta.</i> -Panasinsene	—	—	—	—	0.75	4.03	—	—
32	α -人参烯 <i>alpha.</i> -Panasinsene	—	—	—	—	2.45	—	—	—
33	顺-罗汉柏烯 <i>cis</i> -Thujopsene	—	1.55	—	—	—	—	2.13	2.18
34	γ -衣兰油烯 γ -Muulolene	—	—	—	—	—	—	0.89	—
35	姜黄烯 <i>Curcumene</i>	—	—	—	—	—	—	1.05	1.12
36	b-桉叶烯 <i>b</i> -Eudesmene	—	—	—	—	—	—	0.74	0.79
37	花侧柏烯 <i>Cuparene</i>	—	—	—	—	—	—	1.11	—
38	d-杜松烯 <i>d</i> -Cadinene	—	—	—	—	—	—	1.01	1.02
39	b-绿叶烯 <i>b</i> -Patchoulene	—	—	—	—	—	—	2.57	—
40	法呢烯 <i>Farnesane</i>	—	—	—	—	—	—	0.65	0.65
41	柏木脑 <i>Cedrol</i>	—	2.15	—	—	0.88	—	—	2.02
42	反-法呢醇 <i>trans</i> -Farnesol	—	0.37	—	—	—	—	—	—
43	朱栾倍半萜 <i>Valencene</i>	—	—	—	—	47.17	43.34	—	—
44	萘 <i>Naphthalene</i>	—	—	—	—	—	—	1.62	1.58

注: —, 未检测到; 虫害诱导水果为受染 1 d 的水果。Note: —, Not detectable; Infected fruit was infected after one day.

表 2 受染后不同天数的橙子挥发物主要成分

Table 2 Main components of volatiles from *Citrus sinensis* after infected by *Bactrocera dorsalis* in different days

序号 No.	化合物 Compounds	相对含量 (%) Relative Contents				
		健康水果 Health fruit	受染 1 天 1 d after infected	受染 2 天 2 d after infected	受染 3 天 3 d after infected	受染 4 天 4 d after infected
1	D-柠檬烯 <i>D</i> -Limonene	0.77	20.30	20.85	26.85	24.35
2	芳樟醇 <i>Linalool</i>	—	—	0.56	2.10	5.42
3	辛酸甲酯 <i>Octanoate methyl</i>	—	0.52	2.11	0.94	—
4	辛酸乙酯 <i>Octanoate ethyl</i>	0.66	1.44	1.56	0.66	—
5	己酸乙酯 <i>Hexanoate ethyl</i>	1.12	1.99	2.64	0.72	—
6	石竹烯 <i>Caryophyllene</i>	3.46	1.66	1.38	0.96	0.38
7	(+) -朱栾倍半萜 (+) - <i>Valencene</i>	7.53	4.73	5.54	3.35	2.45
8	α -芹子烯 <i>alpha</i> -selinene	0.63	1.01	0.88	0.79	0.34
9	邻苯二甲酸二乙酯 <i>Diethyl Phthalate</i>	32.04	14.87	13.55	12.55	9.11
10	β -月桂烯 <i>beta</i> -Myrcene	—	—	—	1.85	2.96

注: —, 未检测到 Not detectable。

番石榴挥发物中特有成分。

2.5 受染不同天数的主要橙子挥发物

应用 GC-MS 对受橘小实蝇雌虫危害后 4 d 内的橙子主要挥发物成分进行检测, 分析其相对含量的变化。从表 2 可以看出, 橙子挥发物的主要成分有 10 种, 受染后橙子与健康橙子比较, 其相对含量明显增加的为 D-苧烯, 明显减少的有邻苯二甲酸二乙酯, 而辛酸甲酯, 芳樟醇和 β -月桂烯为橙子受染后检测到的挥发物组分, 且被检测到的天数依次推后。受染后的橙子挥发物成分随时间推移, 其相对含量变化各有不同。其中, α -葑子烯, 邻苯二甲酸二乙酯和石竹烯的相对含量随天数增加依次下降, 而芳樟醇和 β -月桂烯的相对含量随天数增加依次上升, 其他组分的相对含量呈倒 V 型, 分别在第 2 天和第 3 天出现峰值。

3 结论与讨论

植物挥发物在植食性昆虫和天敌昆虫的生境定位, 寄主或食物搜索等行为中起着重要作用。本文研究表明, 健康的、受染的和人为损伤的香蕉与橙子对阿里山潜蝇茧蜂性成熟雌蜂均产生显著的引诱作用, 且受染橙子对寄生蜂的引诱作用显著高于健康的橙子, 而不同处理的番茄对寄生蜂无显著引诱作用。这说明不同水果以及不同处理的同种水果对同种寄生蜂的吸引力存在差异。Rohrig 等 (2006) 试验表明, 不是所有的植物都对同种寄生蜂有同等的引诱效果, 长尾潜蝇茧蜂对香雪球 *Lobularia maritima* 有显著的趋向反应, 而对茜草 *Spermacoce verticillata* 则无。Pérez 等 (2013) 在研究阿里山潜蝇茧蜂对受染后的芒果与番石榴挥发物的反应时, 也得到类似的结果。本研究表明, 橙子受染后第 3 天和香蕉受染后第 5 天对阿里山潜蝇茧蜂性成熟雌蜂的吸引力最强, 说明阿里山潜蝇茧蜂性成熟雌蜂对虫害诱导水果的选择性与为害时间密切相关。而番茄受染后对阿里山潜蝇茧蜂性成熟雌蜂并无引诱作用, 并且在受染后的第 5 天, 番茄对寄生蜂产生了显著的趋避作用。原因很可能是番茄产生了对寄生蜂趋避作用的挥发物, 而随着番茄感染天数的增加, 这种趋避作用也会增加, 这种现象在其它昆虫也有报道 (谭晓玲, 2014; 温娟等, 2015)。

植物受到危害后, 诱导释放的挥发物中大多数化合物具有普遍性, 极少数具有一定程度的专

一性。(+) 朱栾倍半萜, 石竹烯和 α -葑子烯的相对含量在橙子受染后降低, D-苧烯的相对含量在受染后升高等现象, 符合虫害诱导的植物挥发物具有很高的多样性和可变性的规律 (温娟等, 2015)。萜烯类物质的释放相对于其他挥发性物质具有滞后性, 一般会在植食性昆虫为害一段时间后释放出来, 易于寄生蜂识别 (Mccall *et al.*, 1994)。本研究中, 芳樟醇和 β -月桂烯分别在橙子受染的第 2 天和第 3 天才被检测到, 并且相对含量逐步上升。阿里山潜蝇茧蜂是典型的卵-蛹期的跨期寄生蜂, 喜产卵于近孵化的橘小实蝇卵 (Cai *et al.*, 2017)。从时间上推算, 与选择橙子被害第 3 天较吻合, 但仍然对第 5 天的被害香蕉和橙子具有很强的趋向性, 说明具有滞后性的芳樟醇和 β -月桂烯在阿里山潜蝇茧蜂寄主定位过程中可能发挥了一定的作用。而芳樟醇和 β -月桂烯未必是寄主害虫自身释放的挥发性物质, 可能是植物遭胁迫之后释放的“信号”或者是植物上的微生物释放的挥发物。关于芳樟醇和 β -月桂烯的来源以及如何寄生蜂寄主定位中起作用仍需要大量工作。目前, 植物受到植食性昆虫危害后释放的挥发物对寄生蜂的吸引作用, 已在多个寄生蜂-寄主-植物系统中发现 (Segura *et al.*, 2012)。

昆虫对寄主的定位选择是一个复杂的过程, 昆虫对寄主的定位选择不仅受寄主的挥发物种类影响, 而且受寄主挥发物的相对含量和释放率的影响 (蔡普默等, 2017)。虫害诱导水果的挥发物变化, 主要表现在增加或减少挥发物组分和共同组分的相对含量。本研究中, 受染后水果挥发物组分都增加的物质, 有十五烷, 柏木脑, α -柏木烯, 而经橘小实蝇感染后的水果除番茄外, 都能在一定程度上增强对阿里山潜蝇茧蜂引诱作用, 说明这些增加的挥发物组分极可能与阿里山潜蝇茧蜂的寄主定位选择行为关系密切。植物受到植食性昆虫为害后诱导产生的挥发物的种类与其含量因植物种类, 植物生长阶段以及植食性昆虫种类和龄期等不同而有所差异 (Takabayashi *et al.*, 1994)。有研究者已分离并鉴定出植食性昆虫诱导植物释放的挥发物对寄生蜂有引诱作用的化合物, 例如, 反-法呢烯对姬小蜂 *Chrysonotomyia ruforum krausse* 的寄主定位中起关键作用 (Beyaert *et al.*, 2010), 乙酸叶醇酯对隐蚜茧蜂 *Aphidius funebris* Mackauer 有引诱作用 (Paraja *et al.*, 2007), 中红侧沟茧蜂成虫 *Microplitis mediator* 对 β -罗勒烯有显

著的趋向行为反应 (张康等, 2011)。本研究也在虫害诱导水果中检测到乙酸叶醇酯, 反-法呢烯和 β -罗勒烯, 同时橘小实蝇为害后诱导还产生了苯甲醛, 顺-罗汉柏烯, 柏木脑, 辛酸丁酯, 十四烷, 十五烷和二十烷。这些寄主水果被侵染后产生的挥发物是否能够引诱阿里山潜蝇茧蜂, 仍需进一步探索。笔者认为很多受染后的水果挥发物质未必是由害虫和寄主植物本身产生的, 可能是受染水果中的微生物产生的挥发物, 如果蝇与酵母菌的互利共生关系, 酵母菌是大部分果蝇幼虫和成虫的主要营养资源, 其能够释放挥发性有机化合物 (volatile organic compounds, VOCs)。果蝇能够识别与自己同源的酵母菌, 这类酵母菌通常有利于其生长、生存以及发展新的生态位 (蔡普默等, 2017)。

不同虫害诱导水果的变化各有不同, 主要是通过增加或减少挥发物组分和共同组分的相对含量。受染后的番石榴和橙子挥发物组分都增加了十五烷, 以及受染番石榴和番茄的挥发物组分都增加了柏木脑。不同水果的挥发物组分差异较大, 香蕉的挥发物组分与其他水果挥发物没有共同物质, α -柏木烯是番石榴、橙子和番茄共有的挥发物。受染后水果挥发物组分都增加的物质, 如十五烷、柏木脑、 α -柏木烯。然而, 阿里山潜蝇茧蜂也可能是感受某些特殊挥发物组分种类或者相对含量的减少, 而对寄主进行选择反应, 如虫害诱导的香蕉挥发物减少的己烷、橙子受染后的挥发物组分减少的十一酸乙酯、十二酸乙酯、 α -人参烯和柏木脑, 但这些物质是如何产生和减少的, 具体如何调控寄生蜂的寄主定位仍需大量工作进行探索。

参考文献 (References)

- Altuzar A, Montoya P, Rojas JC. Response of *Fopius arisanus* (Hymenoptera: Braconidae) to fruit volatiles in a wind tunnel [J]. *Florida Entomologist*, 2004, 87 (4): 616–618.
- Belda C, Riudavets J, Belda C. Attraction of the parasitoid *Anisopteromalus calandrae* (Howard) (Hymenoptera: Pteromalidae) to odors from grain and stored product pests in a Y-tube olfactometer [J]. *Biological Control*, 2010, 54 (1): 29–34.
- Beyaert I, Wäschke N, Scholz A, et al. Relevance of resource-indicating key volatiles and habitat odour for insect orientation [J]. *Animal Behaviour*, 2010, 79 (5): 1077–1086.
- Cai PM, Gu XH, Yao MY, et al. The optimal age and radiation dose for *Bactrocera dorsalis* (Hendel) (Diptera: Tephritidae) eggs as hosts for mass-reared *Fopius arisanus* (Sonan) (Hymenoptera: Braconidae) [J]. *Biological Control*, 2017, 108: 89–97.
- Cai PM, Xiang HJ, Yi CD, et al. Advances in and researches on the mechanism of *Drosophila suzukii* Matsumura infesting healthy fruit [J]. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 2017, 39 (2): 295–301.
- 蔡普默, 向候君, 仪传冬, 等. 斑翅果蝇危害健康水果机理研究进展 [J]. *江西农业大学学报*, 2017, 39 (2): 295–301.
- Faeth SH. Structural damage to oak leaves alters natural enemy attack on a leafminer [J]. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 1990, 57 (1): 57–63.
- Geng JL. Study on Mass-Rearing of *Fopius arisanus* and Biological Control Effects on *Bactrocera dorsalis* in Orchards [D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2009.
- 耿军灵. 阿里山潜蝇茧蜂大量饲养及对橘小实蝇的控制研究 [D]. 福州: 福建农林大学, 2009.
- Hilker M, Meiners T. Plants and insect eggs: How do they affect each other? [J]. *Phytochemistry*, 2011, 72 (13): 1612–1623.
- Liang GH, Chen JH. Mass-rearing of the *Bactrocera dorsalis* parasitoid *Psytalia incisi* (Hymenoptera: Braconidae) [J]. *Entomological Journal of East China*, 2006, 15 (2): 107–111.
- 梁光红, 陈家骅. 橘小实蝇寄生蜂切割潜蝇茧蜂的人工繁殖技术 [J]. *华东昆虫学报*, 2006, 15 (2): 107–111.
- Mccall PJ, Turlings TCJ, Loughrin J, et al. Herbivore-induced volatile emissions from cotton (*Gossypium hirsutum* L.) seedlings [J]. *Journal of Chemical Ecology*, 1994, 20 (12): 3039–3950.
- Morgan DJW, Hare JD. Volatile cues used by the parasitoid, *Aphytis melinus*, for host location: California red scale revisited [J]. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 1998, 88 (3): 235–245.
- Pareja M, Moraes MC, Clark SJ, et al. Response of the aphid parasitoid *Aphidius funebris* to volatiles from undamaged and aphid-infested *Centaurea nigra* [J]. *Journal of Chemical Ecology*, 2007, 33 (4): 695–710.
- Pérez J, Rojas JC, Montoya P, et al. Anastrepha egg deposition induces volatiles in fruits that attract the parasitoid *Fopius arisanus* [J]. *Bulletin of Entomological Research*, 2013, 103 (3): 1–8.
- Reed HC, Tan SH, Haapanen K, et al. Olfactory responses of the parasitoid *Diaeretiella rapae* (Hymenoptera: Aphididae) to odor of plants, aphids, and plant-aphid complexes [J]. *Journal of Chemical Ecology*, 1995, 21 (4): 407–418.
- Reddy GV. Recent Trends in the Olfactory Responses of Insect Natural Enemies to Plant Volatiles [M]. Berlin Heidelberg: Springer, 2012, 14: 281–301.
- Rohrig E, Sivinski J, Teal P, et al. A floral-derived compound attractive to the tephritid fruit fly parasitoid *Diachasmimorpha longicaudata* (Hymenoptera: Braconidae) [J]. *Journal of Chemical Ecology*, 2008, 34 (4): 549–557.
- Rousse P, Quilici S, Harris EJ. *Fopius arisanus*, an egg-pupal parasitoid of Tephritidae overview [J]. *Cirad*, 2005: 26.
- Rousse P, Chiroulet F, Veslot J, et al. The host-and microhabitat olfactory location by *Fopius arisanus*, suggests a broad potential host range [J]. *Physiological Entomology*, 2008, 32 (4): 313–321.

- Segura DF, Viscarret MM, Ovruski SM, *et al.* Response of the fruit fly parasitoid *Diachasmimorpha longicaudata*, to host and host-habitat volatile cues [J]. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 2012, 143 (2): 164–176.
- Steinberg S, Dicke M, Vet LEM. Relative importance of infochemicals from first and second trophic level in long-range host location by the larval parasitoid *Cotesia glomerata* [J]. *Journal of Chemical Ecology*, 1993, 19 (1): 47–59.
- Takabayashi J, Dicke M, Posthumus MA. Volatile herbivore-induced terpenoids in plant-mite interactions: Variation caused by biotic and abiotic factors [J]. *Journal of Chemical Ecology*, 1994, 20 (6): 1329–1354.
- Tan XL. Induced Resistance by Preinfestations of Tomato Plants with *Myzus persicae* (Hemiptera: Aphididae) to *Bemisia tabaci* Biotype B (Hemiptera: Aleyrodidae) and Interactions with Natural Enemies [D]. Shaanxi: Northwest Agriculture and Forestry University, 2014. 谭晓玲. 桃蚜预侵染番茄产生对 B 型烟粉虱的诱导抗性及其二者与其天敌之间的交互关系 [D]. 陕西: 西北农林科技大学, 2014]
- Tu R, Ji QE, Chen JH. Behaviors by oriental fruit fly, *Bactrocera dorsalis* Hendel, in response to volatiles of different fruits and their component compounds [J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2013, 34 (11): 2267–2271. 涂蓉, 季清娥, 陈家骅. 桔小实蝇对不同水果及挥发性化合物行为反应的研究 [J]. 热带作物学报, 2013, 34 (11): 2267–2271]
- Turlings TCJ. The active role of plants in the foraging successes of entomophagous insects [J]. *Norwegian Journal of Agricultural Sciences*, 1994, 16: 211–219.
- Vet LEM, Groenewold AW. Semiochemicals and learning in parasitoids [J]. *Journal of Chemical Ecology*, 1990, 16 (11): 3119–3135.
- Vet LEM, Dick M. Ecology of infochemicals use by natural enemies in a tritrophic context [J]. *Annual Review of Entomology*, 1992, 37 (1): 141–172.
- Wäckers FL, Mitter E, Dorn S. Vibrational sounding by the pupal parasitoid *Pimpla (Coccygominus) turionellae*: An additional solution to the reliability-detectability problem [J]. *Biological Control*, 1998, 11 (2): 141–146.
- Wen J, Zhi JR, Lv ZY, *et al.* Behavioral responses of *Frankliniella occidentalis* to tomato plants infested with *Tetranychus urticae* and analysis of the volatile compounds of tomato plants [J]. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 2015, 52 (4): 968–976. 温娟, 郅军锐, 吕召云, 等. 西花蓟马对二斑叶螨为害后番茄的行为反应及挥发物成分分析 [J]. 应用昆虫学报, 2015, 52 (4): 968–976]
- Zhan K, Ren LY, Li KM, *et al.* Effect of volatile odors on taxis response of *Microplitis mediator* and its efficiency in field trapping test [J]. *Chinese Journal of Biological Control*, 2011, 27 (2): 157–164. 张康, 任丽燕, 李科明, 等. 植物挥发性气味物质对红侧沟茧蜂的趋向行为影响及田间诱集效果 [J]. 中国生物防治学报, 2011, 27 (2): 157–164]