

doi: 10.3969/j.issn.1674-0858.2016.04.6

# 扶桑绵粉蚧取食为害对棉花萜类化合物释放的影响

黄俊<sup>1</sup>, 张娟<sup>1</sup>, 吕要斌<sup>2\*</sup>

(1. 浙江省农业科学院花卉研究开发中心/浙江省萧山棉麻研究所, 杭州 311202;

2. 浙江省农业科学院植物保护与微生物研究所, 浙江省植物有害生物防控重点实验室-省部共建国家重点实验室培育基地, 杭州 310021)

**摘要:** 在室内条件下采用机械损伤叶片 (MW)、外源水杨酸诱导 (MeSA)、扶桑绵粉蚧短期 (S-MF) 及长期为害 (L-MF) 4 种方式处理棉花, 对棉花植株释放的萜类化合物进行了定性与定量研究。结果表明, 共有 5 种萜类化合物被定性检出, 分别为  $\alpha$ -蒎烯、 $\beta$ -蒎烯、长叶烯、A-柏木烯与雪松烯; 扶桑绵粉蚧的取食为害显著提高了棉花  $\alpha$ -蒎烯、 $\beta$ -蒎烯及 A-柏木烯的释放量, 并且新增加雪松烯与长叶烯的释放; 而叶片机械损伤与外源水杨酸诱导处理在一定程度上也提高了  $\alpha$ -蒎烯、 $\beta$ -蒎烯及 A-柏木烯的释放量。本研究结果为合理利用虫害诱导植物挥发物进行扶桑绵粉蚧的生物防治提供科学依据。

**关键词:** 扶桑绵粉蚧; 虫伤诱导挥发性化合物; 萜类物质

中国分类号: Q968.1; S433

文献标识码: A

文章编号: 1674-0858 (2016) 04-0704-06

## Changes in terpenoids emission of cotton plant infested by invasive mealybugs, *Phenacoccus solenopsis* Tinsley (Hemiptera: Pseudococcidae)

HUANG Jun<sup>1</sup>, ZHANG Juan<sup>1</sup>, LU Yao-Bin<sup>2\*</sup> (1. Flower Research and Development Centre, Zhejiang Academy of Agricultural Sciences/Xiaoshan Institute of Cotton and Fiber Crops, Hangzhou 311202, China; 2. State Key Laboratory Breeding Base for Zhejiang Sustainable Pest and Disease Control, Institute of Plant Protection and Microbiology, Zhejiang Academy of Agricultural Sciences, Hangzhou 310021, China)

**Abstract:** The terpenoids emission of cotton plants were analyzed qualitatively and quantitatively under laboratory condition with the treatments of mechanical wounding (MW), salicylic acid inducement (SA), short-term mealybugs injury (S-MF), and long-term mealybugs injury (L-MF). The results showed that total 5 kinds of terpenoids were qualitatively identified, including  $\alpha$ -Pinene,  $\beta$ -Pinene, (+)-Longifolene, (-)- $\alpha$ - (SG), and Cedrene. The infestation by the invasive mealybug *Phenacoccus solenopsis* elicited the Cedrene and (+)-Longifolene, and increased significantly the emission of  $\alpha$ -Pinene,  $\beta$ -Pinene, and (-)- $\alpha$ - (SG). The treatments of MW and SA also increase partly the emission of  $\alpha$ -Pinene,  $\beta$ -Pinene, and (-)- $\alpha$ - (SG). These results provide an important scientific basis for the biological control of *P. solenopsis* with the rational use of herbivore-induced plant volatiles.

**Key words:** *Phenacoccus solenopsis*; herbivore-induced plant volatiles; terpenoids

基金项目: 农业部公益性行业科研专项 (201103026); 浙江省自然科学基金 (LQ14C140004, LQ16C140004); 杭州市农业科研攻关专项 (20150432B36)

作者简介: 黄俊, 男, 1981 年生, 博士, 副研究员, 主要从事入侵生物学与园林害虫综合治理研究, E-mail: junhuang1981@aliyun.com

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

收稿日期 Received: 2016-04-30; 接受日期 Accepted: 2016-06-14

在植物与植食性昆虫长期协同进化的过程中, 植物为了防御植食性昆虫的为害而释放虫害诱导产生的挥发性化合物 (HIPVs, herbivore-induced plant volatiles) (Kim and Felton, 2013; Girón-Calva *et al.*, 2014)。HIPVs 中有些成分除了能阻止害虫取食为害之外, 还能作为互利素引诱捕食性或寄生性天敌 (Clavijo *et al.*, 2012; Helms *et al.*, 2014; Menzel *et al.*, 2014)。在 HIPVs 中发挥引诱作用的组分主要是萜类化合物和绿叶性挥发物, 研究发现萜类化合物的种类和相对含量均高于健康植株的挥发物, 而绿叶性气味的相对含量则变化不明显 (Pare and Tumlinson, 1999; 娄永根和程家安, 2000)。因此, 萜类化合物一般也做为寄生蜂引诱剂筛选的主要物质 (郭祥令等, 2011)。

扶桑绵粉蚧 *Phenacoccus solenopsis* Tinsley, 又名棉花粉蚧, 隶属于半翅目、粉蚧科 (Cockerell, 1902), 原产于北美 (Tinsley, 1898)。该害虫通过刺吸式口器吸食植物汁液且分泌蜜露诱发煤污病, 严重威胁大田作物、园林观赏植物、果树和蔬菜等经济作物的安全生产 (武三安和张润志, 2009)。据报道, 有 55 科 200 多种植物受到该虫的取食为害 (Fand and Suroshe, 2015)。自 2008 年在我国广东省广州市的扶桑上首次发现该虫入侵以来, 现已在 13 个省 (直辖市/自治区) 发生 (Ahmed *et al.*, 2015)。由于该虫具有繁殖力大、世代重叠、抗逆性强及体背蜡壳等特点 (Hodgson *et al.*, 2008; Prasad *et al.*, 2012; Fand and Suroshe, 2015), 使其生态优势明显, 在化学防治上难以取得突破。因此, 其生物防治方法受到关注 (Rishi *et al.*, 2009; 陈华燕等, 2010; Fand *et al.*, 2011; 黄玲等, 2011; 黄俊等, 2012; 张娟等, 2014; Zhang *et al.*, 2016)。HIPVs 尤其是萜类化合物的分析与鉴定, 对于合理开发引诱剂以防治靶标害虫有着重要作用 (戈峰等, 2011)。目前对于扶桑绵粉蚧取食为害而诱导寄主植株释放挥发性化合物的了解还非常有限。Zhang 等 (2011) 发现扶桑绵粉蚧取食为害显著增加了棉株 3-己烯基乙酸酯、环己烷和  $\beta$ -石竹烯的释放量。本文在室内条件下通过对棉花进行不同人为诱导处理, 收集棉花释放的挥发性物质, 并对其进行定性、定量分析, 以明确各处理下棉花释放的萜类化合物的组分及其含量, 为合理运用 HIPVs 以防治扶桑绵粉蚧提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试材料

供试植物为盆栽棉花 *Gossypium hirsutum* (常规棉, 品种为浙棉 607), 花盆上、下口径及高分别为 11 cm、8 cm 及 9 cm, 盆内装有灭菌泥炭土和蘑菇土 (混合比例 1:1); 棉花放置在温室大棚内 ( $30^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ , RH 75%  $\pm$  5%), 水肥按常规管理, 且不施农药, 待植株长至 7-9 片叶时供试。扶桑绵粉蚧采自浙江省杭州萧山郊区 ( $30^{\circ}11'26''\text{N}$ ;  $120^{\circ}16'50''\text{E}$ ) 的大花马齿苋上, 在人工气候室内 ( $28^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ , RH 70%  $\pm$  5%) 以棉花为寄主继代增殖。前期研究发现, 3 龄若虫在转移过程中存活率较高, 而且该龄期若虫在棉株上的发育历期约 5-6 d (朱艺勇等 (2011)), 符合本试验设计, 因此我们选择该龄期若虫为供试虫体。

### 1.2 棉花处理

共设计 5 个处理, 分别是 (A) 叶片机械损伤处理 (mechanical wounding, 记为 MW): 每株随机选择 3 片生长一致的叶片, 用直径 0.32 mm 的昆虫标本针在叶片上扎 15 个孔; (B) 外源水杨酸诱导处理 (salicylic acid, 记为 SA): 参照 Zhang 等 (2011) 方法, 配制 1 mM 的水杨酸溶液, 利用小型手动喷雾器在每片叶上喷上约 1 mL 的液体, 诱导 24 h 后供试; (C) 扶桑绵粉蚧短期取食为害处理 (mealybug feeding, 记为 S-MF): 根据前期预备试验结果, 每株棉花接上 50 头扶桑绵粉蚧 3 龄若虫, 取食 5 d 后供试, 且虫体不去除; (D) 扶桑绵粉蚧长期取食为害处理 (记为 L-MF): 步骤同 C), 只是处理时间为 15 d; (E) 以健康植株为对照 CK。每处理重复 4 次。

### 1.3 植株挥发物收集

收集气味物质之前, 参考 Zhang 等 (2008) 方法用铝箔纸对植株底部盆子进行包裹, 然后将植株放入收集缸 (透明、圆柱形的玻璃缸, 直径 23 cm、高 40 cm) 内, 每次放入 2 盆植株。挥发物收集装置参考 Turlings 等 (1998) 和 Zhang 等 (2008), 略有改动。气流由便携式大气采样器 (型号 ZC-Q, 浙江恒大仪器仪表有限公司生产) 导出, 依顺序分别通过活性炭和分子筛, 然后再通过流量计由底部进入到收集缸内, 气流流速为

350 mL/min。气流最后收集到收集缸顶部的吸附管 (15 cm 长、5 mm 直径) 内, 而吸附管内装有 60 mg、80/100 目数的 Porapak Q (Waters Corporation; Milford, MA)。整个装置的气流路线通过特氟龙管进行连接。

气味物质收集时间为 2.5 h, 之后取下吸附管, 用 500  $\mu$ L 二氯甲烷进行洗脱, 洗脱液装入色谱样品瓶内 (规格为 CNW-9 mm)。洗脱液中加入 300 ng 乙酸壬酯作为内标, 通过氮气吹扫浓缩至 30-50  $\mu$ L。气味收集试验安排在整洁的气候室内进行, 收集时间为每天的 9:30 至 15:30。

#### 1.4 植株挥发物分析

挥发物的定性定量分析采用 GC-MS (6890N-5973B)。毛细管柱: 非极性柱 HP-5MS (Agilent), 膜厚 0.25  $\mu$ m, 长 30 m, 内径 250  $\mu$ m; 程序升温: 40 $^{\circ}$ C 保持 3 min, 每分钟升温 6 $^{\circ}$ C, 直至 200 $^{\circ}$ C, 保留 3 min。每次进样 0.5  $\mu$ L, 不分流进样; 进样口温度 250 $^{\circ}$ C, 离子源温度 200 $^{\circ}$ C, 接口温度 230 $^{\circ}$ C,

溶剂延迟时间 3 min, 扫面时间, 3-35 min, 扫描模式全扫描, 扫描质荷比 40-350。挥发性物质的含量通过内标法定量。以单株棉花每小时释放挥发物的含量进行统计, 挥发物含量 (ng/hr/plant) = 挥发物的峰面积  $\times$  300 / (内标物峰面积  $\times$  2.5  $\times$  2)。采用 SPSS 14.0 软件对数据进行分析, 以 Duncan 氏新复极差法对各处理下萜类化合物的含量进行差异性分析。

## 2 结果与分析

由表 1、图 1 可以看出, 在本试验条件下, 棉株共释放了 5 种主要的萜类化合物, 分别为  $\alpha$ -蒎烯、 $\beta$ -蒎烯、长叶烯、A-柏木烯与雪松烯, 其中长叶烯只在粉蚧长期取食为害处理中被检测到, 而雪松烯在粉蚧取食处理中均能被检测到,  $\alpha$ -蒎烯、 $\beta$ -蒎烯与 A-柏木烯在各处理中均有检测到。

表 1 不同处理条件下棉株释放的萜类化合物及其含量

Table 1 Emission amount of terpenoids from cottons with different treatments

处理 Treatment	释放萜类化合物的含量 (ng/hr/plant) Emission amount of terpenoids				
	$\alpha$ -蒎烯 $\alpha$ -Pinene	$\beta$ -蒎烯 $\beta$ -Pinene	长叶烯 (+)-Longifolene	A-柏木烯 (-)-alpha-(SG)	雪松烯 Cedrene
叶片机械损伤处理 MW	0.860.11 b	0.110.01 b	n. d.	0.430.09 cd	n. d.
外源水杨酸诱导处理 SA	0.480.06 bc	0.090.02 b	n. d.	0.650.05 c	n. d.
粉蚧短期取食为害处理 S-MF	0.860.09 b	0.140.01 b	n. d.	0.910.08 b	0.460.06
粉蚧长期取食为害处理 L-MF	1.870.32 a	0.190.02 a	0.480.04	1.800.12 a	0.520.04
对照 CK	0.330.08 c	0.010.01 c	n. d.	0.310.06 d	n. d.

注: 表中数据为平均值  $\pm$  标准误, 同列数据后相同小写字母表示差异不显著 ( $P < 0.05$ , 新复极差法); n. d. 表示该萜类化合物没被检测到。Note: Values are means  $\pm$  SE, and those in the same column followed by the same lowercase letters are not significantly different at 0.05 level by Duncan's multiple range test. n. d. indicate the terpenoid not detected.

由表 1 还可以看出, 在棉株挥发的  $\alpha$ -蒎烯以粉蚧长时间取食处理 (即 L-MF) 的释放量最大, 其次是叶片机械损伤 (即 MW) 与粉蚧短期取食处理 (即 S-MF), 对照中的释放量最小 ( $F = 14.09$ ,  $P < 0.001$ );  $\beta$ -蒎烯的挥发量也以 L-MF 处理的释放量最大, 其次为 MW、S-MF 与外源水杨酸诱导处理 (即 SA), 对照中最小 ( $F =$

15.61,  $P < 0.001$ ); 长叶烯的释放只出现在 L-MF 处理中, 挥发量约为 0.48 ng/hr/plant; A-柏木烯的挥发量也以 L-MF 处理的最大, 其次为 S-MF 处理, 再者为 MW 与 SA 处理, 对照中最小 ( $F = 54.70$ ,  $P < 0.001$ ); 雪松烯的释放出现在粉蚧取食处理中, 但是取食时间没影响该物质的释放量 ( $F = 74.65$ ,  $P < 0.001$ )。

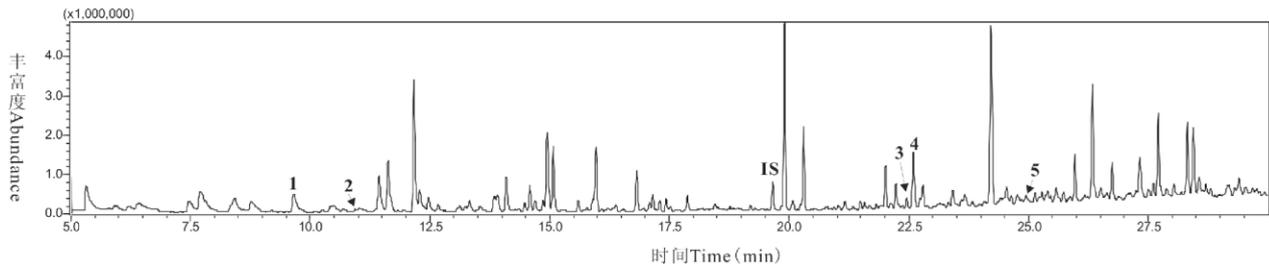


图 1 棉花挥发物气相色谱图谱

Fig. 1 GC spectrogram of volatile in cotton

1,  $\alpha$ -蒎烯; 2,  $\beta$ -蒎烯; 3, 长叶烯; 4, A-柏木烯; 5, 雪松烯; IS 内标, 乙酸壬酯。1,  $\alpha$ -Pinene; 2,  $\beta$ -Pinene; 3, (+)-Longifolene; 4, (-)- $\alpha$ - (SG); 5, Cedrene; IS, nonyl acetate.

### 3 结论与讨论

大量研究表明, HIPVs 中萜类物质(主要是单萜、倍半萜及其衍生物)的种类和含量均比未受伤的植株明显提高,而机械损伤或无虫害诱导的植株一般不产生或只产生少量的萜类化合物(Turling *et al.*, 1990; Pare and Tumlinson, 1999)。本研究也得到了较为一致的结果,人为诱导(包括接虫为害)显著提高了棉株萜类物质的释放量,其中扶桑绵粉蚧取食为害的诱导效应最为明显,其次为叶片机械损伤与外源水杨酸诱导处理,但是叶片机械损伤中 A-柏木烯的挥发量较对照并没显著提高。而且扶桑绵粉蚧取食为害处理显著提高了棉株萜类物质的种类,例如长叶烯与雪松烯是在该处理下植株新释放的萜类物质,这一方面的变化值得下一步深入探讨。而 Zhang 等(2011)研究发现扶桑绵粉蚧取食(5 d/共 50 头试虫且包含雌成虫与 3 龄幼虫)显著增加了  $\beta$ -石竹烯的释放量,但是没有新增的萜类物质。本研究结果不一致或许是由于供试棉株生长期以及虫体取食时间的不同,例如,本研究中粉蚧取食时间为 15 d,而且在气味收集阶段就已发现部分虫体已提前孵化并产生大量低龄幼虫。

有研究表明昆虫为害程度不同,植株产生的挥发物也不尽相同(Hilker and Meiners, 2010),而昆虫的为害程度既可体现在虫体数量上也可以是取食时间的长短。例如,一种叶甲 *Oreina cacaliae* 短时间取食植物 *Adenostyles alliariae* 会释放更多的萜草烯和大根香叶烯,而长时间取食则会释放更多的金合欢烯(Kalberer *et al.*, 2001)。在本研究中,随着扶桑绵粉蚧取食时间的延长, $\alpha$ -蒎

烯、 $\beta$ -蒎烯及 A-柏木烯的释放量显著增加,并且新增了长叶烯的释放,这或许是由于处理时间延长导致雌成虫数量增加,从而改变了植株耐受其刺探取食的状态。当然,唾液分泌物的变化也可能是原因之一,因为昆虫取食植物过程中,除咬食或刺探所造成的损伤外,唾液是昆虫对植物施加影响的主要因素(de Vos and Jander, 2009; Li *et al.*, 2011),而且不同虫态个体会根据不同生理需要,通过唾液组分的改变以达到其取食和发育的目的(严盈等, 2008)。此外,昆虫自身也会释放一些挥发物,例如蚜虫在聚集、扩散、报警及吸引异性的过程中会释放一些萜类物质(Pickett *et al.*, 1992; Francis *et al.*, 2005; Schwartzberg *et al.*, 2008),而在本研究中用于气味收集的棉株是携带虫体的,因此不同虫态的扶桑绵粉蚧其自身释放的萜类物质或许也会干扰最终结果。还不能忽视的是,不同虫态的粉蚧其所排泄的蜜露量及其成分也会不同(Zhou *et al.*, 2013),因此,排泄的蜜露对叶片的覆盖或随之产生的霉污,以及蜜露自身的挥发物或许均会对 HIPVs 的释放状态造成一定影响。植株释放萜类化合物是一个动态变化的过程,而且随时受其自身生理状态以及外界因素的干扰,因此,今后还需进一步明确 HIPVs 中萜类物质的动态释放规律及释放机理,对于合理利用 HIPVs 进行害虫的生物防治具有重要意义。

致谢: 中国计量大学生命科学学院张蓬军博士对气味收集装置的改良提出了诸多宝贵意见,安徽农业大学植物保护学院 2012 级本科生纽建国、熊鸿鹏在气味收集过程中提供了帮助,一并致谢!

## 参考文献 (References)

- Ahmed MZ, Ma J, Qiu BL, *et al.* Genetic record for a recent invasion of *Phenacoccus solenopsis* (Hemiptera: Pseudococcidae) in Asia [J]. *Environmental Entomology*, 2015, 44 (3): 907–918.
- Chen HY, He LF, Zheng CH, *et al.* Survey on the natural enemies of mealybug, *Phenacoccus solenopsis* Tinsley (Hemiptera: Pseudococcidae) from Guangdong and Hainan, China [J]. *Journal of Environmental Entomology*, 2011, 33 (2): 269–272. [陈华燕, 何娜芬, 郑春红, 等. 广东和海南扶桑绵粉蚧的天敌调查 [J]. *环境昆虫学报*, 2011, 33 (2): 269–272]
- Clavijo McCormick A, Unsicker SB, Gershenzon J. The specificity of herbivore-induced plant volatiles in attracting herbivore enemies [J]. *Trends in Plant Science*, 2012, 17 (5): 303–310.
- Cockerell TDA. Two new mealybugs from New Mexico [J]. *Canadian Entomologist*, 1902, 34 (2): 315–316.
- De Vos M, Jander G. *Myzus persicae* (green peach aphid) salivary components induce defence responses in *Arabidopsis thaliana* [J]. *Plant Cell and Environment*, 2009, 32 (11): 1548–1560.
- Fand BB, Gautam RD, Suroshe S. Suitability of various stages of mealybug, *Phenacoccus solenopsis* (Homoptera: Pseudococcidae) for development and survival of the solitary endoparasitoid, *Aenasius bambawalei* (Hymenoptera: Encyrtidae) [J]. *Biocontrol Science and Technology*, 2011, 21 (1): 51–55.
- Fand BB, Suroshe SS. The invasive mealybug *Phenacoccus solenopsis* Tinsley, a threat to tropical and subtropical agricultural and horticultural production systems: A review [J]. *Crop Protection*, 2015, 69: 34–43.
- Francis F, Vandermoten S, Verheggen F, *et al.* Is the (E)- $\beta$ -farnesene only volatile terpenoid in aphids? [J]. *Journal of Applied Entomology*, 2005, 129: 6–11.
- Ge F, Wu KM, Chen XX. Major advance on the interaction mechanism among plants, pest insects and natural enemies in China [J]. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 2011, 48 (1): 1–6. [戈峰, 吴孔明, 陈学新. 植物-害虫-天敌互作机制研究前沿 [J]. *应用昆虫学报*. 2011, 48 (1): 1–6]
- Girón-Calva PS, Li T, Koski TM, *et al.* A role for volatiles in intra- and inter-plant interactions in birch [J]. *Journal of Chemical Ecology*, 2014, 40 (11–12): 1203–1211.
- Guo XL, He YY, Pan F, *et al.* Roles of plant volatiles on host location of parasitoids [J]. *Chinese Journal of Biological Control*, 2011, 27 (3): 388–393. [郭祥令, 何余容, 潘飞, 等. 植物挥发物在寄生蜂寄主定位中的作用 [J]. *中国生物防治学报*, 2011, 27 (3): 388–393]
- Helms AM, De Moraes CM, Mescher MC, *et al.* The volatile emission of *Eurosta solidaginis* primes herbivore-induced volatile production in *Solidago altissima* and does not directly deter insect feeding [J]. *BMC Plant Biology*, 2014, 14: 173.
- Hilker M, Meiners T. How do plants “notice” attack by herbivorous arthropods? [J]. *Biological Reviews*, 2010, 85 (2): 267–280.
- Hodgson CJ, Abbas G, Arif MJ, *et al.* *Phenacoccus solenopsis* Tinsley (Sternorrhyncha: Coccoidea: Pseudococcidae), a new invasive species attacking cotton in Pakistan and India, with a discussion on seasonal morphological variation [J]. *Zootaxa*, 2008, 1913: 1–35.
- Huang J, Lu YB, Zhang J, *et al.* Paratitit functional response of *Aenasius bambawalei* Hayat (Hymenoptera: Encyrtidae) to *Phenacoccus solenopsis* Tinsley (Hemiptera: Pseudococcidae) [J]. *Acta Entomologica Sinica*, 2012, 55 (12): 1418–1423. [黄俊, 吕要斌, 张娟, 等. 班氏跳小蜂对扶桑绵粉蚧的寄生功能反应 [J]. *昆虫学报*, 2012, 55: 1418–1423]
- Huang L, Liu H, Xiao TG, *et al.* Biology of *Aenasius bambawalei* [J]. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 2011, 48 (6): 1734–1737. [黄玲, 刘慧, 肖铁光, 等. 扶桑绵粉蚧寄生性天敌班氏跳小蜂生物学研究 [J]. *应用昆虫学报*, 2011, 48 (6): 1734–1737]
- Kalberer NM, Turlings TC, Rahier M. Attraction of a leaf beetle (*Oreina cacaliae*) to damaged host plants [J]. *Journal of Chemical Ecology*, 2001, 27 (4): 647–661.
- Kim J, Felton GW. Priming of antiherbivore defensive responses in plants [J]. *Insect Science*, 2013, 20 (3): 273–285
- Li S, Xiong R, Wang X, *et al.* Five proteins of *Laodelphax striatellus* are potentially involved in the interactions between rice stripe virus and vector [J]. *PLoS ONE*, 2011, 6 (10): e26585.
- Lou YG, Cheng JA. Herbivore-induced plant volatiles: Primary characteristics, ecological functions and its release mechanism [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2000, 20 (6): 1097–1106. [娄永根, 程家安. 虫害诱导的植物挥发物: 基本特性生态学功能及释放机制 [J]. *生态学报*, 2000, 20 (6): 1097–1106]
- Menzel TR, Huang TY, Weldegergis BT, *et al.* Effect of sequential induction by *Mamestra brassicae* L. and *Tetranychus urticae* Koch on lima bean plant indirect defense [J]. *Journal of Chemical Ecology*, 2014, 40 (9): 977–985.
- Pare PW, Tumlinson JH. Plant volatiles as a defense against insect herbivores [J]. *Plant Physiology*, 1999, 121: 325–331.
- Pickett JA, Wadhams LJ, Woodcock CM, *et al.* The chemical ecology of aphids [J]. *Annual Review of Entomology*, 1992, 37: 67–90.
- Rishi K, Kranthi KR, Monga D, *et al.* Natural parasitization of *Phenacoccus solenopsis* Tinsley (Hemiptera: Pseudococcidae) on cotton by *Aenasius bambawalei* Hayat (Hymenoptera: Encyrtidae) [J]. *Journal of Biological Control*, 2009, 23 (4): 457–460.
- Schwartzberg EA, Kunert G, Stephan C, *et al.* Real-Time Analysis of Alarm Pheromone Emission by the Pea Aphid (*Acyrtosiphon pisum*) Under Predation [J]. *Journal of Chemical Ecology*, 2008, 34: 76–81.
- Tinsley JD. An ant's nest coccid from New Mexico [J]. *Canadian Entomologist*, 1898, 30 (2): 47–48.
- Turlings TCJ, Lengwiler UB, Bernasconi ML, *et al.* Timing of induced volatile emissions in maize seedlings [J]. *Planta*, 1998, 207: 146–152.
- Turling TC, Tumlinson JH, Lewis WJ. Exploitation of herbivore induced plant odors by host-seeking parasitic wasps [J]. *Science*, 1990, 250: 1251–1253.
- Wu SA, Zhang RZ. A new invasive pest, *Phenacoccus solenopsis*,

- threatening seriously to cotton production [J]. *Chinese Bulletin of Entomology*, 2009, 46 (1): 159 – 162. [武三安, 张润志. 威胁棉花生产的外来入侵新害虫—扶桑绵粉蚧 [J]. 应用昆虫学报, 46 (1): 159 – 162]
- Yan Y, Liu WX, Wan FH. Roles of salivary components in piercing – sucking insect – plant interactions [J]. *Acta Entomologica Sinica*, 2008, 51 (1): 537 – 544. [严盈, 刘万学, 万方浩. 唾液成分在刺吸式昆虫与植物关系中的作用 [J]. 昆虫学报, 2008, 51 (1): 537 – 544]
- Zhang J, Huang J, Lu YB, et al. Effects of temperature and host stage on the parasitization rate and offspring sex ratio of *Aenasius bambawalei* Hayat in *Phenacoccus solenopsis* Tinsley [J]. *PeerJ.*, 2016, 4 (1): E1586.
- Zhang J, Huang J, Lu YB. Effects of host stage of *Phenacoccus solenopsis* Tinsley on the fitness of the offspring of *Aenasius bambawalei* Hayat [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, 25 (4): 1151 – 1155. [张娟, 黄俊, 吕要斌. 扶桑绵粉蚧虫态对班氏跳小蜂寄生适合性的影响 [J]. 应用生态学报, 2014, 25 (4): 1151 – 1155]
- Zhang P, Zhu X, Huang F, et al. Suppression of jasmonic acid – dependent defense in cotton plant by the mealybug *Phenacoccus solenopsis* [J]. *PLoS ONE*, 2011, 6 (7): e22378.
- Zhou AM, Lu YY, Zeng L, et al. Effect of host plants on honeydew production of an invasive mealybug, *Phenacoccus solenopsis* (Hemiptera: Pseudococcidae) [J]. *Journal of Insect Behavior*, 2013, 26 (2): 191 – 199.
- Zhu YY, Huang F, Lu YB. Bionomics of mealybug *Phenacoccus solenopsis* Tinsley (Hemiptera: Pseudococcidae) on cotton [J]. *Acta Entomologica Sinica*, 2011, 54: 246 – 252. [朱艺勇, 黄芳, 吕要斌. 扶桑绵粉蚧生物学特性研究 [J]. 昆虫学报, 2011, 54: 246 – 252]