



乔艳艳, 肖兴, 魏洪义. 粉蚧化学生态学研究进展 [J]. 环境昆虫学报, 2022, 44 (2): 305–315.

粉蚧化学生态学研究进展

乔艳艳^{1,2}, 肖兴¹, 魏洪义^{1*}

(1. 江西农业大学农学院, 南昌 330045; 2. 江西省棉花研究所, 江西九江 332100)

摘要: 粉蚧是农林经济作物的一类重要害虫, 由于体表覆盖一层蜡粉, 化学防治常需要大剂量反复用药该虫才能得以控制, 易造成环境污染及害虫再猖獗。本文从昆虫化学生态学的角度综述了粉蚧类害虫的寄主植物范围、天敌应用以及三重营养关系研究进展, 归纳已鉴定粉蚧性信息素化学结构特点及其在综合防治中应用概况, 探讨粉蚧类害虫化学生态学未来研究方向, 为其绿色防控提供理论基础。

关键词: 粉蚧; 寄主植物; 天敌昆虫; 化学生态学; 性信息素

中图分类号: Q968.1; S433

文献标识码: A

文章编号: 1674-0858 (2022) 02-0305-11

Research progress on the chemical ecology of mealybugs

QIAO Yan-Yan^{1,2}, XIAO Xing¹, WEI Hong-Yi^{1*} (1. College of Agronomy, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China; 2. Jiangxi Cotton Research Institute, Jiujiang 332100, Jiangxi Province, China)

Abstract: Mealybugs are important pests in agriculture crops and forestry plants. Large amounts of chemical pesticides need to be applied to control mealybugs which are covered with a powdery wax. However, dependence on insecticides has ultimately resulted in environmental pollution and increased incidence of pest resurgence. From the perspective of insect chemical ecology, it was reviewed the progress on the host plant range, application of natural enemies and the triple nutrition relationship of mealybugs in this paper. Meanwhile, the chemical structure characteristics and application of identified sex pheromones in mealybugs were summarized, and the future research direction of chemical ecology in mealybugs was discussed, which would provide a theoretical basis for the green control of mealybugs.

Key words: Mealybug; host plant; natural enemy insect; chemical ecology; sex pheromone

粉蚧(半翅目:粉蚧科)是一类小型植食性昆虫,也是破坏农林经济作物的重要害虫。根据 Ben-Dov (1994) 编制的系统分类学,粉蚧科包括约 290 属 1 900 多个物种,起源于热带及亚热带地区,在中、南美洲分布了 49 属、282 种粉蚧 (Williams and de Willink, 1992), 158 种粉蚧对美国农业造成威胁 (Miller *et al.*, 2002)。植物材料

的国际间运输和气候条件的变化加快了粉蚧的扩散传播。嗜桔粉蚧 *Pseudococcus calceolariae* 已经从它的原生栖息地入侵到世界各地 (El-Sayed *et al.*, 2010); 地中海地区危害柑橘的 6 种粉蚧,均是来自热带及亚热带地区的外来物种 (Franco *et al.*, 2004); 木槿曼粉蚧 *Maconellicoccus hirsutus* 原产于亚洲部分地区 (Williams, 1996), 1994 年出现在

基金项目: 江西省现代农业产业技术体系项目 (JXARS-23); 江西省重点研发计划项目 (20203BBF63037)

作者简介: 乔艳艳,女,1981 年生,黑龙江省肇州县人,在读博士,副研究员,研究方向为昆虫化学生态学及有害生物综合治理, E-mail: 66842025@qq.com

* 通讯作者 Author for correspondence: 魏洪义,教授,研究方向为昆虫化学生态学, E-mail: hywei@jxau.edu.cn

收稿日期 Received: 2021-01-06; 接受日期 Accepted: 2021-04-09

地中海, 2001 年已经蔓延到加勒比海盆地的 25 个地区, 从南部的圭亚那和委内瑞拉到北部的巴哈马、西部的伯利兹和加利福尼亚 (Kairo *et al.*, 2000) 都有分布。近年来, 在中国边境口岸相继报道了多种入侵性粉蚧, 如云南境内发现马缨丹绵粉蚧 *Phenacoccus parvus* (王戌勃和武三安, 2014)、热带拂粉蚧 *Ferrisia malvastra* (张江涛和武三安, 2016; 吴福中等, 2016), 广州境内报道了扶桑绵粉蚧 *Phenacoccus solenopsis* (武三安和张润志, 2009)、杰克贝尔氏粉蚧 *Pseudococcus jackbeardsleyi* (王玉生等, 2018)、南洋臀纹粉蚧 *Planococcus lilacius* (马骏等, 2019) 等。

粉蚧类具有体表覆盖蜡粉、聚集分布、虫体小而隐秘等特点, 为其防治带来挑战。昆虫的化学生态学是一门包括性信息素的利用、天敌保护、植物抗虫机理研究与应用、生物农药开发等研究的基础理论学科 (闫凤鸣等, 2013), 是害虫绿色防控的重要研究内容, 本文从粉蚧-植物-天敌间相互关系、粉蚧性信息素等方面概述该类害虫化学生态学研究概况, 并展望未来发展方向, 为其科学防治提供理论指导。

1 粉蚧-植物-天敌相互关系

1.1 寄主植物

粉蚧是一类多食性害虫, 当粉蚧在适合寄主植物上繁殖后, 随风吹落到周边其他植物上, 能够定殖并产生危害症状, 但并不适合发育和繁殖, 这些植物也被定为寄主 (Kairo *et al.*, 2000)。这些寄主植物非常广泛, 包括农田作物、蔬菜、观赏植物、果树、杂草, 几乎每种粉蚧都有多种寄主。无花果臀纹粉蚧 *Planococcus ficus* 寄主包括 16 属 19 种植物, 从亚热带植物葡萄 *Vitis vinifera*、柑橘 *Citrus reticulata* 等, 到热带植物无花果 *Ficus carica*、芒果 *Mangifera indica* 以及观赏植物夹竹桃 *Nerium oleander*、悬铃木等均可取食 (Walton, 2003; Walton and Pringle, 2004)。木槿曼粉蚧在埃及危害合欢 *Albizia julibrissin*、桑树 *Morus alba* 和木槿属 *Hibiscus*, 锦葵科 *Malvaceae* 受影响最严重; 在印度, 最初危害黄麻 *Corchorus capsularis* 等纤维作物, 后成为葡萄的主要害虫; 在加勒比海爆发高峰期, 果树、林木、观赏灌木、一年生作物和杂

草等 170 多种植物遭到攻击 (McComie, 1996)。寄主植物适应性是该类害虫种群繁衍及易扩散传播的重要因素之一。

1.2 天敌

天敌是调节和控制害虫种群数量最重要的生态因子。粉蚧在自然界中被各种天敌攻击, 包括寄生蜂、捕食者和昆虫病原真菌及线虫, 其中病原真菌与线虫的研究报道较少, 寄生蜂和捕食性瓢虫是粉蚧常见的天敌。天敌群落的组成在不同栖息地间差异很大, 资源非常丰富, 一种粉蚧可有多种天敌, 一种天敌可以捕食或寄生多种粉蚧。据不完全统计, 截止 2017 年, 中国报道的粉蚧寄生蜂有 5 科 45 种 (何衍彪等, 2017)。木槿曼粉蚧的天敌包括 16 种寄生蜂和 30 多种捕食性天敌 (Mani, 1989; Kairo *et al.*, 2000), 扶桑绵粉蚧天敌至少 53 种 (Fand and Sachin, 2015), *Anagyrus pseudococci* 可寄生柑橘臀纹粉蚧 *Planococcus citri* 和无花果臀纹粉蚧 (Franco *et al.*, 2011), 孟氏隐唇瓢虫 *Cryptolaemus montrouzieri* 是应用最多的捕食性天敌 (Kairo *et al.*, 2000; Maes *et al.*, 2014)。

多数粉蚧天敌的自然寄生率或捕食率较高, 引进或释放天敌、人为的加以保护, 就能维持较高的控制效能。寄生蜂 *Anagyrus kamali* 对木槿曼粉蚧的寄生率为 66% ~ 100%, 孟氏隐唇瓢虫每天捕食 800 ~ 1 500 头木槿曼粉蚧若虫, 加勒比海地区引进 *A. kamali* 和孟氏隐唇瓢虫成功控制该粉蚧的种群增长 (Mani, 1989; Kairo *et al.*, 2000)。在非洲, 为防治木薯绵粉蚧 *Phenacoccus manihoti*, 寄生蜂 *Apoanagyrus lopezi* 成功在 26 个非洲国家建立种群, 将害虫密度降低到可接受范围内 (Neuenschwander, 2001)。帕劳从波多黎各引进并投放 3 种拟寄生蜂 *Anagyrus loecki*、*Pseudoleptomastix mexicana*、*Acerophagus papayae*, 防治木瓜粉蚧 *Paracoccus marginatus*, 6 个月内该粉蚧种群密度降低到可检测水平以下, 成为粉蚧天敌防治的经典案例 (Muniappan *et al.*, 2006)。

1.3 植物挥发物对粉蚧及其天敌行为的影响

植物挥发物主要有两类, 植物在自然条件下释放的有机化合物 (Volatile Organic Compounds, VOCs) 和在虫害诱导情况下释放的挥发物 (Herbivore-induced plant volatiles, HIPVs), VOCs 在害虫对寄主植物定位、取食、产卵、栖息等二级营养关系中起着重要的作用; HIPVs 通常由绿叶挥发物、萜类、脂肪族和芳香族化合物组成, 在

害虫-寄主植物-天敌三级营养关系中具有不可替代的化学通讯功能。植物 VOCs 对粉蚧行为的影响研究报道很少, 相比而言, HIPVs 对粉蚧天敌行为的影响研究较多。

植食性害虫的天敌能够识别受害植株和健康植株的气味, 造成这种差异的挥发性物质来自被侵害的植株, 并非害虫本身。在利马豆 *Phaseolus lunatus* - 二斑叶螨 *Tetranychus urticae* - 智利小植绥螨 *Phytoseiulus persimilis* 三级营养系统中, 利马豆被二斑叶螨为害后, 释放的 HIPVs 能引诱智利小植绥螨 (Dick *et al.*, 1990), 充分证明了 HIPVs 在天敌寄主定位中的作用。在其后 30 多年里, 通过气相色谱-质谱 (GC-MS) 分析, HIPVs 的作用在各种三级体系中得到了充分研究, 大量害虫尤其是鳞翅目害虫诱导的 HIPVs 成分已经通过气相色谱-触角电位检测 (GC-EAD) 和单细胞感受器记录 (SSR) 进行了生理学筛选, 在实验室用 Y 型嗅觉仪测定和风洞试验以及在野外诱饵试验研究了诱导气味剂对食草动物和捕食者/寄生者行为的影响。

Ph. manihoti 是非洲木薯上的重要害虫, 跳小蜂 *Epidinocars lopezi*、*Apoanagyrus lopezi* 作为其主要寄生天敌, 雌蜂能够被寄主为害的木薯吸引, 但不能被单独的寄主气味或健康木薯 *Manihot esculenta* 植株吸引 (Nadel and Alphen, 1987; Souissi *et al.*, 1998), *P. manihoti* 危害诱导木薯系统释放的挥发物也是吸引捕食性天敌雌性瓢虫 *Exochomus avientri* 向其定位的主要气味源, 双重选择试验表明, 单独的粉蚧和粉蚧危害的植物相比, 后者更受欢迎, 受害植物未受损的叶子也吸引该雌性瓢虫; 更有趣的是, *E. avientri* 甚至可以通过嗅觉判断同种雌瓢虫的存在, 并且能避免捕食已被寄生的粉蚧种群 (Rü and Makosso, 2001)。

Phenacoccus herreni 是南美木薯上的主要害虫, 3 种跳小蜂 *Acerophagus coccois*、*Aenasius vexans*、*Apoanagy rusdiversicornis* 可以寄生该粉蚧, 该粉蚧为害木薯释放的气味至少对 *A. vexans* 和 *A. diversicornis* 具有较强的吸引力, 受害的木薯叶片对 *A. diversicornis* 的吸引力强于健康叶片 (Bertschy *et al.*, 1997; Bertschy *et al.*, 2001)。

扶桑绵粉蚧取食为害显著提高了棉花 α 蒎烯, β 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 (黄俊等, 2016); 通过固相微萃取 (solid-phase microextraction, SPME) 和 GC-MS

对取食 24 h 棉花、机械损伤 24 h 以及健康棉花的挥发物测定发现, 取食 24 h 后棉花挥发物中存在酚类化合物水杨酸甲酯 (赵奕曼, 2014), 而该成分在三级营养关系中已被证明是一种由食草动物诱发的植物挥发物, 至少在 10 种 HIPVs 混合物中鉴定出来, 使用含此物质的受控释放分配器可显著增加葡萄园中食蚜蝇、瓢虫和膜翅目寄生蜂补充和滞留 (James, 2003; James and Price, 2004; James, 2005); 两种草蛉 *Chrysoperla* sp. 和 *Mallada desjardinsi* 雌雄成虫均能感受到棉花植株释放的挥发物, 且对受绵粉蚧为害的棉叶反应相对强烈 (Gautam *et al.*, 2010)。孟氏隐唇瓢虫可以利用柑橘臀纹粉蚧释放的化学物质定位气味源, 并且对其存在的植物有较强的嗅觉反应 (Kotika and Sengonca, 1999)。花椒绵粉蚧 *Phenacoccus azaleae* 危害花椒树的新鲜枝梢及水浴蒸馏馏分对主要天敌异色瓢虫 *Harmonia axyridis* 引诱率高于未受害新鲜枝梢, 前者的馏分中 15 种组分含量增加, 新增 9 种组分, 且引诱力随着受害枝梢量的增加而增强, 可持续约 2 个月 (谢映平等, 2004)。

总的来说, 粉蚧-植物-天敌相互作用研究不多, 还处于在实验室条件下对挥发性有机化合物吸引粉蚧寄生物或捕食者潜力进行评估的初期阶段, 从系统性、深入性和延续性需增强。

2 粉蚧性信息素

2.1 粉蚧生殖行为

害虫的生殖方式是评估信息素诱捕的可行性和交配干扰作用的重要因子。粉蚧的生殖方式包括有性生殖、孤雌生殖及兼性生殖。其中, 有性生殖和兼性生殖是使用性信息素控制种群繁衍的先决条件。

粉蚧类昆虫生殖可能存在两种遗传系统, 多数粉蚧通过一种不寻常的遗传系统进行有性繁殖。在该系统中, 雌雄都是二倍体, 但雄性在遗传学上是功能性单倍型的 (Brown and Nur, 1964), 单倍体的父染色体组在雄性中是异质化的, 在精子发生时被消除, 精子只携带母染色体, 雄性只将从母亲那里遗传的染色体传递给后代, 即父系基因组消除/父系染色体失活 (Paternal Genome Elimination, PGE) (Nur, 1980; Ross *et al.*, 2010)。理论上, 有 PGE 系统的粉蚧类昆虫, 雄性比雌性更偏向于雌性后代, 因为雄性只与雌性后代共享

基因 (Ross *et al.*, 2010)。考虑到种群中雌性的优越性,其可能被迫强化信息素信号来吸引雄性,从而促进性信息素通讯的进化。另一个遗传系统是单性生殖,没有雄性,即孤雌生殖,具体又包括只产雄孤雌生殖,只产雌孤雌生殖,以及产两性孤雌生殖 (Franco *et al.*, 2009)。

除 *Antonina bambusae*, *Phenacoccus solani* 和 *Trionymus* spp 雌性只产生由未受精的卵子发育而来的雌性后代外 (Nur, 1971), 大多数粉蚧必须有性生殖才能产生后代。暗色粉蚧 *Pseudococcus viburni*、嗜桔粉蚧, 部分雌虫形成卵囊, 甚至产生不育的卵, 柑橘臀纹粉蚧雌虫没有产生卵囊和卵; 通过将雌粉蚧暴露给雄粉蚧, 大多数雌粉蚧则是继续可育的, 证明 3 种粉蚧必须经过交配才能产生后代 (Da Silva *et al.*, 2010); 长尾粉蚧 *Pseudococcus longispinus* 和无花果臀纹粉蚧也必须要有性生殖繁殖后代 (Waterworth *et al.*, 2011), 无花果臀纹粉蚧未交配的大部分雌性产生卵囊或卵, 但均为畸形, 加利福尼亚葡萄粉蚧 *Pseudococcus maritimus* 种群笼养实验表明, 雌性也不能单性生殖 (Waterworth and Millar, 2012)。

兼性生殖的物种是粉蚧繁殖方式中比较有争议的内容。在玫瑰茄 *Hibiscus sabdariffa* 上饲养木槿曼粉蚧的后代性别比为 1:1, 仅有性繁殖 (Ghose, 1972), 而在印度 Mesta (木槿属的一种) 上繁殖则只进行孤雌生殖 (Singh and Ghosh, 1970), 也有研究发现该粉蚧可进行有性生殖和孤雌生殖 (Sahito *et al.*, 2012)。菠萝洁粉蚧 *Dysmicoccus brevipes* (Beardsley, 1965), 双条拂粉蚧 *Ferrisia virgata* (Lapis, 1970)、*Planococcoides njalensis* (Padi, 1997) 等也进行兼性生殖。近年发现的扶桑绵粉蚧生殖方式也存在这样的争议, 对棉花 *Gossypium* spp. 上该粉蚧生态学观察认为其生殖方式是孤雌生殖 (Vennila *et al.*, 2010), 广州种群雌虫不与雄虫交配的情况下, 既不能产生卵囊, 也无法产卵 (关鑫等, 2011), 生殖解剖学观察未交配雌性的卵巢后期凋萎, 即便产生卵也无法正常发育, 认定该粉蚧以有性生殖繁殖后代 (朱艺勇, 2012; 赵瑞英, 2016), 但印度的一个种群则进行孤雌生殖 (Tong *et al.*, 2019), 该模式似乎与地理范围有关。近期通过多组学技术整合, 完成扶桑绵粉蚧染色体水平基因组分析, 证实其不存在性染色体, 成为迄今为止发布的第一个粉蚧昆虫高质量基因组, 对揭示 PGE 的表现遗传机制具有重要的推动作用 (Li *et al.*, 2020)。

2.2 粉蚧性信息素

性信息素具有种间专化的生物活性, 不伤害天敌种群, 也不会像化学杀虫剂引起环境污染及抗药性, 以适量性信息素为诱饵, 在田间条件下对相应害虫至少保持几个月的吸引力 (乐俊明等, 2019; 封传红等, 2020), 在害虫的综合防治中占有重要的位置。截至目前, 至少 19 种粉蚧 22 种性信息素成分被成功分离和鉴定出来, 其中包括粉蚧属 *Pseudococcus* 6 种、臀纹粉蚧属 *Planococcus* 4 种、灰粉蚧属 *Dysmicoccus* 3 种、绵粉蚧属 *Phenacoccus* 2 种、曼粉蚧属 *Maconellicoccus* 1 种、拂粉蚧属 *Ferrisia* 1 种、皤粉蚧属 *Crisicoccus* 1 种、*Delottococcus* 1 种。

2.3.1 粉蚧性信息素结构特点

粉蚧性信息素有别于鳞翅目昆虫信息素, 后者大多数是具有偶数碳链的脂肪酸及其衍生物、物种间可能用相同化合物的不同比例达到种间隔离, 粉蚧类性信息素具有以下共同特征: ①大多由单一化合物组成, 具有严格的种间专化性, 除香蕉灰粉蚧 *Dysmicoccus grassii* (2 种)、美地绵粉蚧 *Phenacoccus madeirensis* (2 种)、木槿曼粉蚧 (2 种); ②所有粉蚧性信息素都是萜烯类化合物, 大多是由 2 个异戊二烯单元通过不规则的方式连接而成的单萜, 且含有独特的萜类骨架的萜烯醇羧酸酯, 除核桃皤粉蚧 *Crisicoccus matsumotoi* 的性信息素 3-甲基-3-丁烯基-5-甲基己酸酯为半萜类化合物, 菠萝洁粉蚧的性信息素 (2)-抗-1,2-二甲基-3-亚乙基环戊二烯基) 乙醛, 它是一种具有不规则异戊二烯单元连接的单萜醛。

除上述 2 种较特殊的性信息素化学结构外, 其余 20 种含有独特萜类骨架的萜烯醇羧酸酯可以分为以下几类: 与薰衣草醇相关性的信息素结构, 如无花果臀纹粉蚧 (图 1)、香蕉灰粉蚧、大洋臀纹粉蚧 *Planococcus minor*、日本臀纹粉蚧 *Planococcus kraunhiae*、康氏粉蚧 *Pseudococcus comstocki*、新菠萝灰粉蚧 *Dysmicoccus neobrevipes* 的性信息素, 美地绵粉蚧和木槿曼粉蚧信息素成分中的一种; 与菊花醇相关的性信息素结构, 如嗜桔粉蚧、双条拂粉蚧, 以及美地绵粉蚧的另外一种成分; 与环丁烷结构相关的信息素结构, 如柑橘臀纹粉蚧、柑橘粉蚧 *Pseudococcus cryptus*、扶桑绵粉蚧以及木槿曼粉蚧性信息素的一种; 与环戊烷结构相关的信息素结构, 如葡萄粉蚧、长尾粉蚧 (图 2)、暗色粉蚧、*Delottococcus aberiae* (见表 1)。

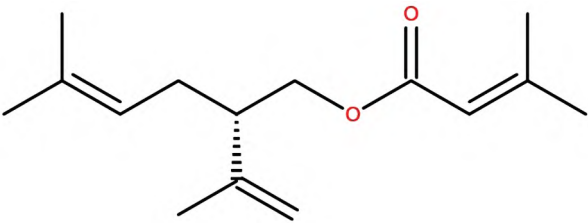


图1 无花果臀纹粉蚧性信息素结构式

Fig. 1 Sex pheromone structure of *Planococcus ficus*

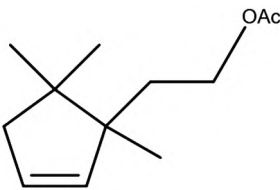


图2 长尾粉蚧性信息素结构式

Fig. 2 Sex pheromone structure of *Pseudococcus longispinus*

表1 19种粉蚧性信息素化学成分

Table 1 Pheromone component of 19 mealybugs

属 Genus	种 Species	性信息素结构 Pheromone component	参考文献 References
灰粉蚧属 <i>Dysmicoccus</i>	菠萝洁粉蚧 <i>Dysmicoccus brevipes</i>	(1S,2S) - (1,2-二甲基-3-亚甲基环戊基) 乙醛 (1S,2S) - (1,2-dimethyl-3-methylenecyclopentyl) acetaldehyde	Tabata <i>et al.</i> , 2017
	香蕉灰粉蚧 <i>Dysmicoccus grassii</i>	(R) -丙酸薰衣草酯 (R) -lavandulyl propionate (R) -乙酸薰衣草酯 (R) -lavandulyl acetate	De Alfonso <i>et al.</i> , 2012
	新菠萝灰粉蚧 <i>Dysmicoccus neobrevipes</i>	(E) -2-异丙基-5-六甲基-3,5-二烯基乙酸酯 (E) -2-isopropyl-5-methylhexa-3,5-dienyl acetate	Tabata and Ichiki, 2015a Tabata and Ohno, 2015b
臀纹粉蚧属 <i>Planococcus</i>	无花果臀纹粉蚧 <i>Planococcus ficus</i>	(S) - (+) -薰衣草烯酸脂 (S) - (+) -lavandulyl senecioate	Diane <i>et al.</i> , 2001
	柑橘臀纹粉蚧 <i>Planococcus citri</i>	(1R,3R) -3-异丙烯基-2,2-二甲基环丁基甲基乙酸酯 (1R,3R) -3-isopropenyl-2,2-dimethylcyclobutylmethyl acetate	Bierl-Leonhardt <i>et al.</i> , 1981
	日本臀纹粉蚧 <i>Planococcus kraunhiae</i>	2-异丙基-5-甲基-4-己烯-1-丁酸酯 isopropyliden-5-methyl-4-hexen-1-yl butyrate	Sugie <i>et al.</i> , 2008
	大洋臀纹粉蚧 <i>Planococcus minor</i>	(E) -2-异丙基-5-甲基-2,4-己二烯乙酸酯 (E) -2-isopropyl-5-methyl-2,4-hexadienyl acetate	Ho <i>et al.</i> , 2007
绵粉蚧属 <i>Phenacoccus</i>	美地绵粉蚧 <i>Phenacoccus madeirensis</i>	(1R,3R) -菊花醇 (R) -2-甲基丁酸酯 (1R,3R) -chrysanthemyl (R) -2-methylbutanoate (R) -薰衣草醇 (R) -2-甲基丁酸酯 (R) -lavandulyl (R) -2-methylbutanoate	Ho <i>et al.</i> , 2009
	扶桑绵粉蚧 <i>Phenacoccus solenopsis</i>	(2,2-二甲基-3-异丙二环丁基) 甲基(马康尼基) 酯 (2,2-dimethyl-3-isopropylidenecyclobutyl) methyl 3-methylbut-2-enoate	Tabata and Ichiki, 2016
粉蚧属 <i>Pseudococcus</i>	康氏粉蚧 <i>Pseudococcus comstocki</i>	2,6-二甲基-3-乙酰氧基-1,5-庚二烯 2,6-dimethyl-3-acetoxy-1,5-heptadiene	Bierl-Leonhardt <i>et al.</i> , 1980
	嗜桔粉蚧 <i>Pseudococcus calceolariae</i>	(1R,3R) -菊花醇-2-乙酰氧基-3-甲基丁酸酯 (1R,3R) -chrysanthemyl-2-acetoxy-3-methylbutanoate	El-Sayed <i>et al.</i> , 2010

续表 1 Continued table 1

属 Genus	种 Species	性信息素结构 Pheromone component	参考文献 Reference
	柑橘粉蚧 <i>Pseudococcus cryptus</i>	(1R,3R) 3-异丙烯基-2,2-二甲基环丁基甲基-3-甲基-3-丁烯酸酯 (1R,3R) 3-isopropenyl-2,2-dimethylcyclobutylmethyl 3-methyl-3-butenolate	Arai <i>et al.</i> , 2003
粉蚧属 <i>Pseudococcus</i>	长尾粉蚧 <i>Pseudococcus longispinus</i>	2-(1,5,5-trimethylcyclopent-2-en-1-yl) ethyl acetate 2-(1,5,5-三甲基环戊基-2-烯-1-基) 乙酸乙酯	Millar <i>et al.</i> , 2009
	葡萄粉蚧 <i>Pseudococcus maritimus</i>	反式-(3,4,5,5)-四甲基-2-环戊烯基 <i>trans</i> -(3,4,5,5)-tetramethyl-2-cyclopentenyl	Figadère <i>et al.</i> , 2007
	暗色粉蚧 <i>Pseudococcus viburni</i>	(2,3,4,4-四甲基环戊基) 薄荷基乙酰胺 (2,3,4,4-tetramethylcyclopentyl) menthyl acetata	Millar <i>et al.</i> , 2005
拂粉蚧属 <i>Ferrisia</i>	双条拂粉蚧 <i>Ferrisia virgate</i>	(1S, 3R) -顺式-菊花酯 (1S, 3R) - <i>cis</i> -chrysanthemyl tiglate	Tabata and Ichiki, 2017 a
曼粉蚧属 <i>Maconellicoccus</i>	木槿曼粉蚧 <i>Maconellicoccus hirsutus</i>	(R) -薰衣草-2-甲基丁酸酯 (R) -lavandulyl(S) -2-methylbutanoate (R) -马科内利(S) -2-甲基丁酸酯 (R) -maconelliyl(S) -2-methylbutanoat	Zhang <i>et al.</i> , 2004
皀粉蚧属 <i>Crisicoccus</i>	核桃皀粉蚧 <i>Crisicoccus matsumotoi</i>	3-甲基-3-丁烯基 5-甲基己酸酯 3-methyl-3-butenyl 5-methylhexanoate	Tabata <i>et al.</i> , 2012
<i>Delottococcus</i>	<i>Delottococcus aberiae</i>	(4,5,5-三甲基-3-亚甲基环戊-1-烯-1-基) 乙酸甲酯 (4,5,5-trimethyl-3-methylenecyclopent-1-en-1-yl) methyl acetate	Vacas <i>et al.</i> , 2019

2.3.2 粉蚧性信息素的应用

性信息素可以通过干扰交配、诱捕、诱杀及作为利它素吸引天敌 4 种方式来控制相应害虫种群 (Zou and Millar, 2015), 截止目前应用到大田实践的粉蚧性信息素非常有限, 主要由于大部分粉蚧性信息素结构复杂, 难以在工业规模上合成。一种相对简单的合成薰衣草醇相关结构方法的发明, 使部分与该种结构相关的粉蚧性信息素研究更深入, 甚至可以在实践中得以应用 (Tabata *et al.* , 2017 b), 如日本臀纹粉蚧和无花果臀纹粉蚧两种粉蚧的性信息素。

日本臀纹粉蚧对日本果园的破坏性特别大, 连续使用杀虫剂造成害虫再猖獗, 其性信息素 γ -lavandulyl butyrate 可以通过双键迁移的异构化反应从薰衣草醇中简单衍生和合成, 这使得日本臀纹粉蚧的信息素得到深入研究与应用。在日本柿

子园, 连续 3 年利用日本臀纹粉蚧性信息素设置陷阱捕获粉蚧, 季节性波动表明, 该粉蚧在一年产生 3~4 代, 并证实以信息素捕捉峰为基点, 结合有效积温, 可以用来预测第一代粉蚧若虫发生时间, 利于开展防治 (Sawamura *et al.* , 2015)。放置浸有性信息素的橡胶隔膜制成的分配器小区, 无论是雄性还是交配待产的雌性粉蚧数量都远远低于对照 (Teshiba *et al.* , 2009), 表明可通过性信息素干扰交配控制日本臀纹粉蚧种群繁衍。 γ -lavandulyl butyrate 还可吸引日本臀纹粉蚧的主要寄生蜂 *Anagyrus fuiikona* (Tsueda, 2014), 其合成过程中的环化副产物 cyclolavandulyl butyrate, 是另外两种粉蚧寄生蜂 *Anagyrus sawada*、*Anagyrus subalbipes* 的引诱剂 (Tabata *et al.* , 2011), 这两种蜂在自然条件下的柿子园可寄生日本臀纹粉蚧, 田间应用 cyclolavandulyl butyrate 可以成功的抑制

该粉蚧种群增长 (Teshiba and Tabata, 2017)。

无花果臀纹粉蚧是世界上许多葡萄种植区的主要害虫 (Ben-Dov, 1994; Walton *et al.*, 2004), 其性信息素为薰衣草烯内酯 (S) - (+) - lavandulyl senecioate, 因该成分可以大规模、低成本生产, 被成功的进行商业开发, 并成为粉蚧类使用信息素作为诱饵进行陷阱监测 (Millar *et al.*, 2002)、交配中断应用最成功的案例 (Walton *et al.*, 2006)。在加州, 每年数千英亩葡萄园都会使用性信息素防治无花果臀纹粉蚧; 该成分也是天敌引诱剂, 田间试验观察到含有无花果臀纹粉蚧信息素分配器的小区, 捕获寄生蜂 *Anagyrus* sp. near *pseudococci* 和出现被寄生粉蚧的平均数量分别是对照诱捕器的 3.5 ~ 9.0 倍和 2.2 ~ 9.4 倍 (Franco *et al.*, 2011), 可作为交配干扰防治的补充应用。

除上述两种粉蚧的性信息素, 在日本柑橘园测试了柑橘粉蚧性信息素对成年雄性和天敌的吸引力, 性信息素可以诱捕雄性粉蚧, 而不能诱捕天敌 (Tomonori, 2002)。从成年未交配雌性扶桑绵粉蚧释放的挥发物中, 分离出其信息素 (2, 2-二甲基 3-异亚丙基氯丁基) 3-甲基丁-2-烯酸甲酯, 化学合成后陷阱生物测定对雄性粉蚧显示吸引力 71.8% ~ 99.8% (Tabata and Ichiki, 2016)。但大多数粉蚧的性信息素研究还停留在实验室分离、鉴定、生测及田间小试阶段, 更无相关性信息素合成途径及机制相关报道。

3 展望

3.1 与蚂蚁的互惠共生

半翅目蜜源昆虫与蚂蚁互作是物种间重要关系之一, 发挥着重要的生态功能, 能够促进产蜜昆虫的种群数量。在记录蚂蚁与半翅目昆虫相互作用对植物影响的 30 项研究中, 大多数 (73%) 表明植物实际上间接受益于这些相互作用 (Styrsky and Eubanks, 2007; Cheng *et al.*, 2015)。诱杀蚂蚁可以控制葡萄粉蚧和菠萝洁粉蚧的种群数量 (Phillips and Sherk, 1991), 红火蚁 *Solenopsis invicta* Buren 与扶桑绵粉蚧的共生显著减少了寄主植物上粉蚧重要寄生蜂班氏跳小蜂 *Aenasius bambawalei* 的种群数量, 提高了寄主植物上粉蚧存活率, 有利于其种群的扩增和繁殖, 也显著降低扶桑上粉蚧的竞争性昆虫美棘蓟马 *Echinothrips*

americanus 成虫和幼虫的数量, 使粉蚧可以占有更多的寄主植物, 为粉蚧种群的繁殖提供了更好的条件 (程寿杰等, 2013)。可见, 引入共生蚂蚁, 研究蚁类在田间粉蚧 - 寄主植物 - 天敌之间的具体作用, 也是发挥粉蚧化学生态防治作用与成效的重要方向之一。

3.2 植物挥发物的开发与利用

在粉蚧 - 寄主植物 - 天敌的三重营养关系中, 植物挥发物对粉蚧和天敌昆虫寻找寄主植物所起的作用目前缺少系统的研究, 很多研究的结果是初步的, 只在小空间尺度上得到很好的描述, 但在更大的空间如田间应用上的研究却很少, 主要原因是受田间多种因素的影响, 野外条件下确定挥发物的合成制剂功效评估、引发天敌反应最佳浓度和剂量、有效释放诱饵或分配系统的类型等尚少有报道, 植物的 VOCs 和 HIVs 在寄主定位中的作用及机制研究系统性和深度研究还远远不够。

3.3 性信息素的开发与利用

随着 EAG、气谱、质朴、核磁共振等仪器及联用技术在昆虫化学生态学上的应用, 昆虫的性信息素分离与鉴定已非难题, 但截至目前粉蚧的性信息素的利用却相对局限, 并不像鳞翅目害虫性信息素开发与应用的广泛, 主要原因是大部分粉蚧信息素化合物的成分及其构相复杂, 不利于人工合成; 即便克服合成难题, 其成本也很高, 限制了其开发与应用。但未来随着科技的进步, 使化学合成更简单, 成本更低廉, 促使更多害虫的性信息素走上应用的道路, 为粉蚧的绿色防控提供更有力的技术保证。

参考文献 (References)

- Arai T, Sugie H, Hiradate S, *et al.* Identification of a sex pheromone component of *Pseudococcus cryptus* [J]. *Journal of Chemical Ecology*, 2003, 29 (10): 2213 - 2223.
- Beardsley JW. Notes on the pineapple mealybug complex, with descriptions of two new species (Homoptera: Pseudococcidae). In: Hawaiian Entomological Society, ed. *Proceedings of the Hawaiian Entomological Society* [C]. Hawaii: Hawaiian Entomological Society, 1965: 55 - 68.
- Bertschy C, Turlings TCJ, Bellotti AC, *et al.* Chemically - mediated attraction of three parasitoid species to mealybug - infested cassava leaves [J]. *The Florida Entomologist*, 1997, 80 (3): 383 - 395.
- Bertschy C, Turlings TCJ, Bellotti AC, *et al.* The role of mealybug induced cassava plant volatiles in the attraction of the encyrtid parasitoids *Aenasius vexans* and *Apoanagyrus diversicornis* [J]. *Journal of Insect Behavior*, 2001, 14 (3): 363 - 371.

- Ben-dov Y. A Systematic Catalogue of the Mealybugs of the World (Insecta: Homoptera: Coccoidae: Pseudococcidae and Putoidae) with Data on Geographical Distribution, Host Plants, Biology and Economic Importance [M]. Andover: Intercept, 1994: 28.
- Bierl-Leonhardt BA, Moreno DS, Schwarz M, *et al.* Identification of the pheromone of the Comstock mealybug [J]. *Life Sciences*, 1980, 27 (5): 399–402.
- Bierl-Leonhardt BA, Moreno DS, Schwarz M, *et al.* Isolation, identification and synthesis of the sex pheromone of the citrus mealybug, *Planococcus citri* (Risso) [J]. *Tetrahedron Letters*, 1981, 22 (5): 389–392.
- Brown SW, Nur U. Heterochromatic chromosomes in the coccids [J]. *Science*, 1964, 145 (3628): 130–136.
- Cheng S, Zeng L, Xu Y. Mutualism between fire ants and mealybugs reduces lady beetle predation [J]. *Journal of Economic Entomology*, 2015, 108 (4): 1560–1569.
- Cheng SJ, Zeng L, Xu YJ. Effect of the mutualism between *Solenopsis invicta* (Hymenoptera: Formicidae) and *Phenacoccus solenopsis* Tinsley (Hemiptera: Pseudococcidae) on *Aenasius bambawalei* Hayat and *Echinothrips americanus* Morgan [J]. *Journal of Environmental Entomology*, 2013, 35 (5): 555–559. 程寿杰, 曾玲, 许益鏊. 红火蚁与扶桑绵粉蚧互惠关系对松粉蚧抑虱跳小蜂和美棘蓟马的影响 [J]. *环境昆虫学报*, 2013, 35 (5): 555–559.
- Da Silva EB, Mendel Z, Franco JC. Can facultative parthenogenesis occur in biparental mealybug species? [J]. *Phytoparasitica*, 2010, 38 (1): 19–21.
- De Alfonso I, Hernandez E, Velazquez Y, *et al.* Identification of the sex pheromone of the mealybug *Dysmicoccus grassii* Leonardi [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2012, 60 (48): 11959–11964.
- Diane M, Hinkens J, Steven M, *et al.* Identification and synthesis of the sex pheromone of the vine mealybug, *Planococcus ficus* [J]. *Tetrahedron Letters*, 2001, 42: 1619–1621.
- Dicke M, Beek TAV, Posthumus MA, *et al.* Isolation and identification of volatile kairomone that affects acarine predator-prey interactions involvement of host plant in its production [J]. *Journal of Chemical Ecology*, 1990, 16 (2): 381–396.
- El-Sayed AM, Unelius CR, Twidle A, *et al.* Chrysanthemyl 2-acetoxy-3-methylbutanoate: The sex pheromone of the citrophilous mealybug, *Pseudococcus calceolariae* [J]. *Tetrahedron Letters*, 2010, 51 (7): 1075–1078.
- Fand BB, Sachin S. 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.
- Feng CH, Zhang ZD, Xu X, *et al.* Field evaluation on control of *Grapholitha molesta* Busck by high dose sex pheromone release for mating disruption in the orchard [J]. *Chinese Journal of Biological Control*, 2020, 36 (6): 946–953. 封传红, 张志东, 徐翔, 等. 高剂量性信息素迷向技术防控梨小食心虫的田间应用效果评价 [J]. *中国生物防治学报*, 2020, 36 (6): 946–953.
- Figadère BA, McElfresh JS, Borchardt D, *et al.* Trans- α -necrodiol isobutyrate, the sex pheromone of the grape mealybug, *Pseudococcus maritimus* [J]. *Tetrahedron Letters*, 2007, 48 (48): 8434–8437.
- Franco JC, Suma P, da Silva EB, *et al.* Management strategies of mealybug pests of citrus in mediterranean countries [J]. *Phytoparasitica*, 2004, 32 (5): 507–522.
- Franco JC, da Silva EB, Fortuna T, *et al.* Vine mealybug sex pheromone increases citrus mealybug parasitism by *Anagyrus* sp. near *pseudococci* (Girault) [J]. *Biological Control*, 2011, 58 (3): 230–238.
- Franco JC, Zada A, Mendel Z. Novel Approaches for the Management of Mealybug Pests [M]. Berlin: Springer Netherlands, 2009: 233–278.
- Gautam S, Singh AK, Gautam RD. Olfactory responses of green lacewings, *Chrysoperla* sp. (*carnea* group) and *Mallada desjardinsi* on mealybug, *Phenacoccus solenopsis* (Homoptera: Pseudococcidae) fed on cotton [J]. *Acta Entomologica Sinica*, 2010, 53 (5): 497–507.
- Ghose SK. Biology of the mealybug *Macronellacoccus hirsutus* (Green) (Pseudococcidae: Hemiptera) [J]. *Indian Agriculturist*, 1972, 16: 323–332.
- Guan X, Lu YY, Zeng L. Biology of mealybug *Phenacoccus solenopsis* Tinsley from Guangzhou fed on cotton [J]. *China Cotton*, 2011, 38 (8): 11–13. 关鑫, 陆永跃, 曾玲. 棉花上扶桑绵粉蚧广州种群生物学特性观察 [J]. *中国棉花*, 2011, 38 (8): 11–13.
- He YB, Zhan RL, Chang JM, *et al.* Species of parasitic wasp against mealybug and their application in bio-control in China [J]. *China Plant Protection*, 2017, 37 (10): 23–29. 何衍彪, 詹儒林, 常金梅, 等. 我国粉蚧寄生蜂的种类及其在生物防治中的应用 [J]. *中国植保导刊*, 2017, 37 (10): 23–29.
- Ho HY, Hung CC, Chuang TH, *et al.* Identification and synthesis of the sex pheromone of the passion vine mealybug, *Planococcus minor* (Maskell) [J]. *Journal of Chemical Ecology*, 2007, 33 (10): 1986–1996.
- Ho HY, Su YT, Ko CH, *et al.* Identification and synthesis of the sex pheromone of the madeira mealybug, *Phenacoccus Madeirensis* Green [J]. *Journal of Chemical Ecology*, 2009, 35 (4): 724–732.
- Huang J, Zhang J, Lu YB. Changes in terpenoids emission of cotton plant infested by invasive mealybugs, *Phenacoccus solenopsis* Tinsley (Hemiptera: Pseudococcidae) [J]. *Journal of Environmental Entomology*, 2016, 4: 704–709. 黄俊, 张娟, 吕要斌. 扶桑绵粉蚧取食为害对棉花萜类化合物释放的影响 [J]. *环境昆虫学报*, 2016, 4: 704–709.
- James DG. Synthetic herbivore-induced plant volatiles as field attractants for beneficial insects [J]. *Environmental Entomology*, 2003, 32 (5): 977–982.
- James DG, Price TS. Field testing of methyl salicylate for recruitment and retention of beneficial insects in grapes and hops [J]. *Journal of Chemical Ecology*, 2004, 30 (8): 1613–1628.
- James DG. Further field evaluation of synthetic herbivore-induced plant volatiles as attractants for beneficial insects [J]. *Journal of*

- Chemical Ecology*, 2005, 31 (3): 481–495.
- Kairo MTK, Pollard GV, Peterkin DD, *et al.* Biological control of the hibiscus mealybug, *Maconellicoccus hirsutus* Green (Hemiptera: Pseudococcidae) in the caribbean [J]. *Integrated Pest Management Reviews*, 2000, 5 (4): 241–254.
- Kotika K, Sengonca C. Olfactory responses of mealybug predator, *Cryptolaemus montrouzieri* Mulsant (Coleoptera: Coccinellidae) to the kairomones of prey arthropods, their host plants and the predator itself [J]. *Journal of Biological Control*, 1999, 13 (1): 1–6.
- Lapis EB. The biology of the grey mealybug, *Ferrisia virgata* (Cockerell) (Pseudococcidae, Homoptera) [J]. *Philippine Entomologist*, 1970: 397–405.
- Li M, Tong H, Wang S, *et al.* A chromosome-level genome assembly provides new insights into paternal genome elimination in the cotton mealybug *Phenacoccus solenopsis* [J]. *Molecular Ecology Resources*, 2020, 20 (6): 1733–1747.
- Le JM, Yang H, Ding Y, *et al.* Preparation and application of *Spodoptera litura* Lure in Guiyang [J]. *Guizhou Agriculture Science*, 2019, 47 (7): 46–48, 53. [乐俊明, 杨航, 丁映, 等. 斜纹夜蛾诱芯的制作及其在贵阳地区的应用 [J]. 贵州农业科学, 2019, 47 (7): 46–48, 53]
- Maes S, Antoons T, Grégoire JC, *et al.* A semi-artificial rearing system for the specialist predatory ladybird *Cryptolaemus montrouzieri* [J]. *Biology Control*, 2014, 59: 557–564.
- Mani M. A review of the pink mealybug *Maconellicoccus hirsutus* (Green) [J]. *International Journal of Tropical Insect Science*, 1989, 10 (2): 157–167.
- Ma J, Liang F, Lin L, *et al.* Occurrence of *Planococcus lilacinus* (Cockerell) (Hemiptera: Pseudococcidae) in Guangzhou as a new invasive pest [J]. *Journal of Environmental Entomology*, 2019, 41 (5): 1006–1010. [马骏, 梁帆, 林莉, 等. 新发入侵害虫—南洋臀纹粉蚧在广州的发生情况调查 [J]. 环境昆虫学报, 2019, 41 (5): 1006–1010]
- McComie LD. Incidence and treatment of the hibiscus mealybug *Maconellicoccus hirsutus* (Green) August 1995 – February 1996. In: Proc. 1st Sem., ed. Hibiscus Mealybug [C]. Trinidad and Tobago: Ministry of Agriculture, Land and Marine Resources, 1996: 59–77.
- Miller DR, Miller GL, Watson GW. Invasive species of mealybugs (Hemiptera: Pseudococcidae) and their threat to U. S. agriculture [J]. *Proceedings Entomological Society of Washington*, 2002, 104 (4): 825–836.
- Millar JG, Midland SL, McElfresh JS, *et al.* (2, 3, 4, 4 – Tetramethylcyclopentyl) methyl acetate, a sex pheromone from the obscure mealybug: First example of a new structural class of monoterpenes [J]. *Journal of Chemical Ecology*, 2005, 31 (12): 2999–3005.
- Millar JG, Moreira JA, McElfresh JS, *et al.* Sex pheromone of the longtailed mealybug: A new class of monoterpene structure [J]. *Organic Letters*, 2009, 11 (12): 2683–2685.
- Muniappan R, Meyerdirk DE, Sengebau FM, *et al.* Classical biological control of the papaya mealybug, *Paracoccus marginatus* (Hemiptera: Pseudococcidae) in the Republic of Palau [J]. *Florida Entomologist*, 2006, 89 (2): 212–217.
- Nadel H, Alphen JJM. The role of host – and host – plant odours in the attraction of a parasitoid, *Epidinocarsis lopezi*, to the habitat of its host, the cassava mealybug, *Phenacoccus manihoti* [J]. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 1987, 45 (2): 181–186.
- Neuenschwander P. Biological control of the cassava mealybug in Africa: A review [J]. *Biological Control*, 2001, 21 (3): 214–229.
- Normark BB. The evolution of alternative genetic systems in insects [J]. *Annual Review of Entomology*, 2003, 48 (1): 397–423.
- Nur U. Evolution of Unusual Chromosome Systems in Scale Insects (Coccoidea: Homoptera) [M]. Blackwell, Oxford: In *Insect Cytogenetics*, 1980: 97–118.
- Nur U. Parthenogenesis in coccids (Homoptera) [J]. *American Zoologist*, 1971, 11 (2): 301–308.
- Padi B. Parthenogenesis in mealybugs occurring on cocoa. In: Owusu GK, Padi B, Ol-lennu LAA, Manu EO, eds. *Proceedings of the First International Cocoa Pests and Diseases Seminar*, 6–10 December 1995 Accra [C]. Accra: Cocoa Research Institute Accra Ghana, 1997: 242–248.
- Phillips PA, Sherk CJ. To control mealybugs, stop honeydew – seeking ants [J]. *California Agriculture*, 1991, 45 (2): 26–28.
- Ross L, Pen I, Shuker DM. Genomic conflict in scale insects: The causes and consequences of bizarre genetic systems [J]. *Biological Reviews*, 2010, 85: 807–828.
- Rü BL, Makosso JPM. Prey habitat location by the cassava mealybug predator *Exochomus flaviventris*: Olfactory responses to odor of plant, mealybug, plant-mealybug complex, and plant-mealybug–natural enemy complex [J]. *Journal of Insect Behavior*, 2001, 14 (5): 557–572.
- Sahito HA, Soomro RB, Talpur MA, *et al.* Biology of mulberry mealybug, *Maconellicoccus hirsutus* (Green) in laboratory conditions [J]. *Basic Research Journal of Agricultural Science and Review*, 2012, 1 (1): 11–18.
- Sawamura N, Narai Y, Teshiba M, *et al.* Forecasting the occurrence of young Japanese mealybug larva *Planococcus kraunhiae* (Kuwana) (Hemiptera: Pseudococcidae) using sex pheromone traps and total effective temperature for persimmon [J]. *Japanese Journal of Applied Entomology and Zoology*, 2015, 59 (4): 183–189.
- Souissi R, Nénon JP, Rü BL. Olfactory responses of parasitoid *Apoanagyrus lopezi* to odor of plants, mealybugs, and plant mealybug complexes [J]. *Journal of Chemical Ecology*, 1998, 24 (1): 37–48.
- Singh MP, Ghosh SN. Studies on *Maconellicoccus* (*Phenacoccus*) *hirsutus* Gr. causing ‘bunchy top’ in mesta [J]. *Indian Journal of science & Industry*, 1970, 4: 99–105.
- Styrsky JD, Eubanks SMD. Ecological consequences of interactions between ants and honeydew-producing insects [J]. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2007, 274 (1607): 151–164.
- Sugie H, Teshiba M, Narai Y, *et al.* Identification of a sex pheromone

- component of the Japanese mealybug, *Planococcus kraunhiae* (Kuwana) [J]. *Applied Entomology and Zoology*, 2008, 43 (3): 369–375.
- Tabata J, Teshiba M, Hiradate S, *et al.* Cyclolavandulyl butyrate: An attractant for a mealybug parasitoid, *Anagyrus sawadai* (Hymenoptera: Encyrtidae) [J]. *Applied Entomology & Zoology*, 2011, 46 (1): 117–123.
- Tabata J, Narai Y, Sawamura N, *et al.* A new class of mealybug pheromones: A hemiterpene ester in the sex pheromone of *Crisicoccus matsumotoi* [J]. *Naturwissenschaften*, 2012, 99 (7): 567–574.
- Tabata J, Ichiki RT. A new lavandulol-related monoterpene in the sex pheromone of the grey pineapple mealybug, *Dysmicoccus neobrevipes* [J]. *Journal of Chemical Ecology*, 2015 a, 41 (2): 194–201.
- Tabata J, Ohno S. Enantioselective synthesis of the sex pheromone of the grey pineapple mealybug, *Dysmicoccus neobrevipes* (Hemiptera: Pseudococcidae), for determination of the absolute configuration [J]. *Applied Entomology and Zoology*, 2015 b, 50 (3): 341–346.
- Tabata J, Ichiki RT. Sex pheromone of the cotton mealybug, *Phenacoccus solenopsis*, with an unusual cyclobutane structure [J]. *Journal of Chemical Ecology*, 2016, 42 (11): 193–1200.
- Tabata J, Ichiki RT, Moromizato C, *et al.* Sex pheromone of a coccoid insect with sexual and asexual lineages: Fate of an ancestrally essential sexual signal in parthenogenetic females [DB/OL]. London: The Royal Society, (2017–3–21) [2021–04–05]. <https://doi.org/10.1098/rsif.2017.0027>
- Tabata J, Ichiki RT. (1s, 3r)-cis-chrysanthemyl tiglate: Sex pheromone of the striped mealybug, *Ferrisia virgata* [J]. *Journal of Chemical Ecology*, 2017 a, 43 (8): 745–752.
- Tabata J, Yasui H, Tsujii N, *et al.* Mating disruption: Progress and perspective for application to non-lepidopteran insects [J]. *Japanese Journal of Applied Entomology & Zoology*, 2017 b, 61 (2): 63–71.
- Teshiba M, Shimizu N, Sawamura N, *et al.* Use of a sex pheromone to disrupt the mating of *Planococcus kraunhiae* (Kuwana) (Hemiptera: Pseudococcidae) [J]. *Japanese Journal of Applied Entomology and Zoology*, 2009, 53 (4): 173–180.
- Teshiba M, Tabata J. Suppression of population growth of the Japanese mealybug, *Planococcus kraunhiae* (Hemiptera: Pseudococcidae), by using an attractant for indigenous parasitoids in persimmon orchards [J]. *Applied Entomology and Zoology*, 2017, 52 (1): 153–158.
- Tomonori A. Attractiveness of sex pheromone of *Pseudococcus cryptus* Hempel (Homoptera: Pseudococcidae) to adult males in a citrus orchard [J]. *Applied Entomology and Zoology*, 2002, 37 (1): 69–72.
- Tong HJ, AO Y, Li ZH, *et al.* Invasion biology of the cotton mealybug, *Phenacoccus solenopsis* Tinsley: Current knowledge and future directions [J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2019, 18 (4): 758–770.
- Tsueda H. Response of two parasitoid wasps to the sex pheromone of Japanese mealybug, *Planococcus kraunhiae* [J]. *Japanese Journal of Applied Entomology and Zoology*, 2014, 58 (2): 147–152.
- Vacas S, Fuertes IN, Marzo J, *et al.* Sex pheromone of the invasive mealybug citrus pest, *Delottococcus aberiae* (Hemiptera: Pseudococcidae), a new monoterpene with a necrodane skeleton [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2019, 67 (34): 9441–9449.
- Vennila S, Deshmukh A, Pinjarkar D, *et al.* Biology of the mealybug, *Phenacoccus solenopsis* on cotton in the laboratory [J]. *Journal of Insect Science*, 2010, 10 (115): 1–9.
- Walton VM. Development of An Integrated Management System for Vine Mealybug, *Planococcus ficus* (signoret) in the Western Cape Province, South Africa [D]. Stellenbosch: Agriculture and Forestry Sciences University of Stellenbosch, 2003.
- Walton VM, Pringle KL. Vine mealybug, *Planococcus ficus* (Signoret) (Hemiptera: Pseudococcidae), a key pest in south African vineyards. A review [J]. *South African Journal of Enology & Viticulture*, 2004, 25 (2): 54–62.
- Walton VM, Daane KM, Bentley WJ, *et al.* Pheromone-based mating disruption of *Planococcus ficus* (Hemiptera: Pseudococcidae) in California vineyards [J]. *Journal of Economic Entomology*, 2006, 99 (4): 1280–1290.
- Waterworth RA, Wright IM, Millar JG. Reproductive biology of three cosmopolitan mealybug (Hemiptera: Pseudococcidae) species, *Pseudococcus longispinus*, *Pseudococcus viburni*, and *Planococcus ficus* [J]. *Annals of the Entomological Society of America*, 2011, 104 (2): 249–260.
- Waterworth RA, Millar JG. Reproductive biology of *Pseudococcus maritimus* (Hemiptera: Pseudococcidae) [J]. *Journal of Economic Entomology*, 2012, 3: 949–956.
- Wang XB, Wu SA. A new pest, *Phenacoccus parvus* Morrison (Hemiptera: Coccoidea: Pseudococcidae), in mainland China [J]. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 2014, 51 (4): 1098–1103. [王成勃, 武三安. 中国大陆一种新害虫: 马缨丹绵粉蚧 [J]. *应用昆虫学报*, 2014, 51 (4): 1098–1103]
- Wang YS, Zhou P, Tian H, *et al.* Dispersal of the jack beardsley mealybug, *Pseudococcus jackbeardsleyi* Gimpel & Miller (Hemiptera: Pseudococcidae) in mainland China [J]. *Journal of Biosafety*, 2018, 27 (3): 171–177. [王玉生, 周培, 田虎, 等. 警惕杰克贝尔氏粉蚧 *Pseudococcus jackbeardsleyi* 在中国大陆扩散 [J]. *生物安全学报*, 2018, 27 (3): 171–177]
- Williams DJ, de Willink MCG. Mealybugs of Central and South America [D]. Wallingford, UK: CAB International, 1992: 487
- Williams DJ. A brief account of the hibiscus mealybug *Macronellus hirsutus* (Hemiptera: Pseudococcidae), a pest of agriculture and horticulture, with descriptions of two related species from southern Asia [J]. *Bulletin of Entomological Research*, 1996, 86 (5): 617–628.
- Wu FZ, Liu HJ, Liu ZH, *et al.* A new mealybug *Ferrisia malvastrae* (Hemiptera: Pseudococcidae) in the border of Yunnan and ASEAN [J]. *Journal of Biosafety*, 2016, 25 (3): 181–184. [吴福中, 刘海军, 刘志红, 等. 发生在云南与东盟边境的一种新害虫

- 热带拂粉蚧 (同翅目: 粉蚧科) [J]. 生物安全学报, 2016, 25 (3): 181–184]
- 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, 169. 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]. 昆虫知识, 2009, 46 (1): 159–162, 169]
- Xie YP, Xue JL, Tang XY, et al. The bunge prickl-ash tree damaged by a mealybug, *Phenacoccus azaleae* attracting the ladybug, *Harmonia axyridis* [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2004, 5: 116–122. 谢映平, 薛皎亮, 唐晓燕, 等. 绵粉蚧危害的花椒树对异色瓢虫的招引作用 [J]. 林业科学, 2004, 5: 116–122]
- Yan FM, Chen JL, Tang QB. Advances and perspectives in insect chemical ecology [J]. *Plant Protection*, 2013, 39 (5): 9–15. 闫凤鸣, 陈巨莲, 汤清波. 昆虫化学生态学研究进展及未来展望 [J]. 植物保护, 2013, 39 (5): 9–15]
- Zhang JT, Wu SA. A new record species of the genus *Ferrisia fullaway* (Hemiptera: Coccoidea: Pseudococcidae) from China [J]. *Journal of Environmental Entomology*, 2016, 38 (5): 1061–1065. 张江涛, 武三安. 中国拂粉蚧属一新记录种 (半翅目, 蚧总科, 粉蚧科) [J]. 环境昆虫学报, 2016, 38 (5): 1061–1065]
- Zhang A, Amalin D, Shirali S, et al. Sex pheromone of the pink hibiscus mealybug, *Maconellicoccus hirsutus*, contains an unusual cyclobutanoid monoterpene [J]. *PNAS*, 2004, 101 (26): 9601–9606.
- Zhao RY. The Mode of Reproductive and the Development Characteristics of Cotton Mealybug *Phenacoccus solenopsis* Tinsley [D]. Jinhua: Zhejiang Normal University, 2017. 赵瑞英. 扶桑绵粉蚧的生殖方式及其卵巢发育特点 [D]. 金华: 浙江师范大学, 2017]
- Zhao YM. Studies on Ecological and Ethology Characteristics of *Phenacoccus solenopsis* Tinsley [D]. Hangzhou: Zhejiang A & F University, 2014. 赵奕曼. 扶桑绵粉蚧对棉花挥发物影响的研究及其生殖方式的研究 [D]. 杭州: 浙江农林大学, 2014]
- Zhu YY. Biological of Characteristics An Invasive Exotic Mealybug Pest *Phenacoccus solenopsis* Tinsley (Hemiptera: Pseudococcidae) [D]. Jinhua: Zhejiang Normal University, 2012. 朱艺勇. 外来入侵害虫——扶桑绵粉蚧的生物学特性研究 [D]. 金华: 浙江师范大学, 2012]
- Zou YF, Millar JG. Chemistry of the pheromones of mealybug and scale insects [J]. *Natural Product Reports*, 2015, 32: 1067–1113.