柑橘木虱趋性行为及其应用展望*

曹 旭[1, 2**] 刘 秀[1***] 黄琳雅[1] 赖 多[1, 2] 金晨钟[1] 李意成[1] 姚 志[1]

（1. 湖南人文科技学院农业与生物技术学院，湖南省农药无害化应用重点实验室，娄底 417000；2. 广东省农业科学院果树研究所，农业部南亚热带果树生物学与遗传资源利用重点实验室，广东省热带亚热带果树研究重点实验室，广州 510640）

摘 要 柑橘木虱 *Diaphorina citri* 主要危害柑橘、九里香、黄皮等芸香科植物，传播柑橘黄龙病病菌，对柑橘产业的发展产生了极大的制约。目前，柑橘木虱对于常见的杀虫剂已产生不同程度的抗药性，通过利用柑橘木虱的趋性行为进行防治是一种行之有效的方法。本文对柑橘木虱通过嗅觉、视觉、信息素产生的趋性行为及其对寄主种质的选择性四个方面的研究进行综述，为今后柑橘木虱的防治提供参考。

关键词 柑橘木虱；趋性行为；信息素；寄主种质

Review of the behavioral responses of *Diaphorina citri* to olfactory, visual and pheremonal cues, and prospects for the application of such cues to the control of this pest

CAO Xu[1, 2**] LIU Xiu[1***] HUANG Lin-Ya[1] LAI Duo[1, 2]
JIN Chen-Zhong[1] LI Yi-Cheng[1] YAO Zhi[1]

(1. Agricultural and Biotechnology College, Hunan University of Humanities, Science and Technology, Key Laboratory of Pesticide Harmless Application of Hunan Province, Loudi 417000, China; 2. Institute of Fruit Tree Research, Guangdong Academy of Agricultural Sciences, Key Laboratory of South Subtropical Fruit Biology and Genetic Resource Utilization, Ministry of Agriculture, Guangdong Provincial Key Laboratory of Tropical and Subtropical Fruit Tree Research, Guangzhou 510640, China)

Abstract *Diaphorina citri* is mainly harmful to citrus, *Murraya exotica* L, *Clausena lansium* (Lour.) Skeels and other Rutaceae plants, and is also a vector of *Candidatus liberibacter asiaticus*, the most widespread pathogen associated with Huanglongbing, a disease that has greatly restricted the development of citrus industry. Insecticide resistance is common in *D. citrus* so alternative methods of controlling this pest are required. This paper reviews research on the behavioural responses of *D. citrus* to olfactory, visual and pheromonal cues, and also host germplasm selectivity, to facilitate developing new methods for controlling this pest.

Key words *Diaphorina citri*; taxis behavior; pheromone; host germplasm

柑橘木虱 *Diaphorina citri* 是田间传播柑橘黄龙病（Huanglongbing，HLB）的主要媒介昆虫（江宏燕等，2018）。1907 年首次在我国台湾地区发现，随后 1934 年在广东发现其存在（贺辅民和周郁文，1935）。柑橘木虱繁殖能力强，成虫产卵在柑橘新生嫩梢，孵化后的若虫和成虫吸食嫩梢，严重时可使嫩梢凋零、畸变，还能传播黄龙病病原菌，从而引发黄龙病（姚廷山等，2018）。由于柑橘木虱自主飞行能力差，在柑橘园引发的黄龙病的扩散距离只有 25-50 m（毛润乾等，2013；桑文等，2018）。在黄龙病发生区域，柑橘木虱数量与黄龙病的发生率存在正相关性，且黄龙病很难彻底根除，极大地制约了全球柑橘产业的发展（Oppenoorth，1984；谢佩华等，

*资助项目 Supported projects：国家自然科学基金青年项目（31401789，31601699）；国家重点研发计划项目（2017YFD0202005）；广东重点研发计划项目（2019B020217003-04）；2019 年湖南人文科技学院研究生科研创新项目（12）

**第一作者 First author，E-mail：1834907986@qq.com

***通讯作者 Corresponding author，E-mail：liuxiu841027@163.com

收稿日期 Received：2019-07-05；接受日期 Accepted：2019-11-20

1989）。至今尚未研制出对柑橘黄龙病有效的药剂，因此防治柑橘木虱是有效控制黄龙病蔓延和传播的主要措施。

目前，防治柑橘木虱主要采用化学防治手段，但相同或者作用机理相同的杀虫剂的持续使用已经导致柑橘木虱产生抗药性（田发军等，2018；Liu *et al.*，2019）。邓明学等（2012）通过药膜法研究了广西果园中柑橘木虱对 6 种农药的抗药性，结果表明柑橘木虱对毒死蜱产生 8.8 倍抗性，对呋虫胺产生 17.1 倍抗性。

化学药剂的使用量随着柑橘木虱对其抗性提高而不断增加（Belasque *et al.*，2010；Rogers *et al.*，2016），容易引起果实农药残留、环境水体农药超标等问题，不符合绿色环保生态型农业发展需求。因此，非常有必要寻找新的高效环保的防治柑橘木虱的方法，有效降低黄龙病扩散对经济和环境带来的负面影响。近年来，通过利用矿物油、植物精油、色板、灯光、性信息素、寄主种质等调控柑橘木虱的趋性行为防治柑橘木虱的研究已取得了很大的进展。本文从嗅觉、视觉、信息素、寄主种质四个方面的研究进行综述，为进一步研究利用柑橘木虱的趋性行为对其进行防治提供参考。

1 柑橘木虱趋性行为研究

1.1 利用嗅觉调控柑橘木虱趋性行为

1.1.1 利用嗅觉的驱避作用研究 柑橘木虱主要通过气味感受器的神经元感受不同寄主的气味，产生不同的嗅觉生理反应，进而表现出对不同寄主及气味物质的趋性反应（Coutinho-Abreu *et al.*，2014）。针对柑橘木虱嗅觉这一特性，可以利用具有强烈挥发性气味的物质，如植物精油和矿物油对柑橘木虱产生驱避作用（Mann *et al.*，2011）。植物精油是从植物中提取的、以挥发成分为主的、具有特殊气味的天然物质，对害虫有毒杀、驱避和干扰取食等多种生物活性（孙凌峰，2000）。Patt 等（2018）研究植物精油与 7 种不同浓度的嗅觉结合蛋白配体的结合作用对柑橘木虱寻找寄主植物的影响，结果表明其中 4 种配体（654、717、784、861）能增强柑橘木虱寻找寄主能力，配体 019 有减弱作用，配体 905 无作用，而配体 937 有显著增强作用但不同浓度处理结果无显著差异。

柑橘木虱对不同植物精油的趋性反应不同。邱海燕等（2018）研究了柑橘木虱对 45 种植物精油的趋性反应，发现对芫荽 *Coriandrum sativum* Linn.、欧芹 *Petroselinum* Hill、柠檬马鞭草 *Aloysia triphylla*、山鸡椒 *Litsea cubeba* (Lour.) Pers、艾纳香 *Blumea balsamifera* (Linn.) DC、尤加利 *Eucalyptus globules* Labill、柠檬桉 *Eucalyptus citriodora* Hook.f.、松 *Pinus* Linn、花梨木 *Dalbergia odorifera* T.Chen 9 种植物精油具有显著驱避作用，对藿香蓟 *Agratum conyzoides* L.精油具有显著的引诱作用。柑橘木虱对花梨木植物精油在 10 mL/L 浓度下表现出驱避作用，其它 8 种植物精油在 10 mL/L 和 0.1 mL/L 两个浓度处理下均表现出显著的驱避作用，且芫荽和欧芹在 10 mL/L 处理时对柑橘木虱的驱避效果最佳，分别达到 86.04%和 70.76%。王奇志等（2018）发现假臭草的植物精油对柑橘木虱的熏蒸驱避活性高于浸液处理致死活性，并指出差异性可能与其主要成分有关。卢慧林等（2017）研究了柑橘木虱对 2 种果园常见杂草藿香蓟和假臭草 *Praxelis clematidea* (Griseb.) R. M. King *et* H. Rob.的选择性，发现柑橘木虱对藿香蓟的选择率高于假臭草，而柑橘树会降低柑橘木虱对藿香蓟和假臭草的选择性。藿香蓟通过作为柑橘木虱的第二寄主降低柑橘园中木虱的化学防治效果（喷 1.8%阿维菌素乳油），而假臭草作为寄主的可能性较低，利用假臭草来防治柑橘木虱值得进一步研究。Kuhns 等（2016）研究柑橘木虱对 3 种植物精油的选择性，发现冷杉油具有驱避作用，山苍子油和香茅油无作用，但冷杉油不能单独作为防治柑橘木虱的手段，需要与其他方法综合防治。

利用刺探电位技术对柑橘木虱取食行为分析表明柑橘木虱若虫韧皮部取食时间越长则携带及传播黄龙病病菌的概率越大（George *et al.*，2018）。改变柑橘木虱的取食部位对于防治柑橘黄龙病有一定的效果。朱红梅等（2010）采用昆虫刺探电位技术研究柑橘木虱的取食行为以及取食部位，结果表明柑橘木虱在正常叶片上取食

表现为全韧皮部取食, 叶片经过 1 μg/mL 番石榴精油处理后, 取食行为发生显著改变, 韧皮部取食时间明显下降（62.12%), 并出现木质部取食。全金成等（2016）对于番石榴精油的驱避效果试验表明当浓度高于7.5 g/L时有一定的驱避效果, 浓度达到 15 g/L 后开始有显著的驱避作用。Barman 等（2016）利用 Y 型试管试验研究柑橘木虱的选择性发现柑橘嫩枝与番石榴叶端的柑橘木虱数量明显少于单独的柑橘嫩枝端, 试验结果表明间作番石榴可以减少柑橘木虱对柑橘的危害。

苦豆子生物碱提取物对柑橘木虱的寄主选择试验结果表明, 在黑暗的条件下, 九里香叶片上喷洒 15 mg/mL 和 30 mg/mL 苦豆子生物碱处理后分别只有 6.6%和 10.4%的柑橘木虱能正确的寻找到寄主, 对生物碱化学分析以及生物活性测定得出槐果碱（33.90%）和槐定碱（6.23%）对于影响柑橘木虱的寄主选择起主导作用, 且槐果碱与槐定碱按 1∶1 混合浓度为 50 mg/mL 效果最佳（Sétamou *et al.*, 2019）。

1.1.2　利用嗅觉的引诱作用研究　Augusto 等（2018）研究了 3 类强烈挥发物对柑橘木虱的诱集效果, 发现椰子油对柑橘木虱具有良好诱集效果（空白对照的 4.4 倍), 比商业引诱剂 Pest Wizard 和 Alpha Scents 对柑橘木虱的诱集捕获量高, 由此可见椰子油具有开发为柑橘木虱引诱剂的潜力。Lapointe 等（2016）研究发现甲酸和乙酸的混合物能促进柑橘木虱唾液鞘分泌（是对照组的 4.5 倍）增强柑橘木虱对食物的探寻, 可以考虑将其开发成诱捕器对柑橘木虱进行绿色综合防治。

1.2　利用视觉调控柑橘木虱趋性行为

灯光诱控技术是利用昆虫趋向光源运动的行为习性, 促使昆虫聚集在某一固定位置集中消灭的物理防治手段（姚廷山等, 2018）。李超峰等（2019）对柑橘木虱趋光行为及复眼结构分析指出柑橘木虱雌雄成虫在复眼结构和形态方面没有明显的差异, 且对于紫外光、蓝光、绿光的选择率显著高于白光。深入研究发现柑橘木虱对波长在 350-405 nm 的紫外线选择存在正相关（Paris *et al.*, 2017), 成虫对黄色（580 nm）和黄绿色（540 nm）具有显著正趋性, 对于红色（690 nm）趋性最弱（吴兰花等, 2018）。Hall 和 Hentz（2019）比较了不同自然光和发光二极管在玻璃温室的条件下对柑橘木虱发育历期的影响, 结果表明成虫数量与光照时长、辐照度、光照度呈正相关, 并得出最利于柑橘木虱生长发育的条件为日照 14 h、60 W/m^2、20 000 lx/m^2 以上（核对单位), 这对柑橘木虱繁殖有一定的参考价值。卢慧林等（2018）发现单波长 368 nm 光源和高效矿物油乳剂对柑橘木虱的拒避-诱杀的诱虫率为 48.33%, 与黄光组合使用能提高诱虫率, 为 58.67%。赵政等（2018）研究白色、红色、青色、绿色、灰色、黑色、黄色、紫色、蓝色、粉色共 10 种颜色的黏虫板和悬挂方式对柑橘木虱诱集, 试验表明黄色（560-590 nm）色板（均值 21.83 头), 南方向（28.00 头)、高度 150 cm（36.75 头)、间隔 4-5 m（32.33 头）诱集效果最好。林雄杰等（2013）研究太阳能诱虫器 LED 灯对柑橘木虱影响显示柑橘木虱成虫对波长 460 nm 光照强度 1 800 lx 的蓝光（67.55%）和波长 531 nm 光照强度 4 300 lx 的绿光（72.78%）的趋光性最佳。相同波长条件下, 其趋光性与光照强度和光照时长成正相关。

1.3　利用信息素调控柑橘木虱的趋性行为

昆虫信息素可以通过有机溶剂浸泡法、冷凝法、动态顶空吸附法、固相微萃取 4 种方法来提取（马涛等, 2018）。生产实践中可以利用人工合成的信息素干扰昆虫的取食、产卵、集结、交配等行为。性信息素对于昆虫种群控制的原理主要有两点, 第一诱杀雄性昆虫, 使其正常交配率降低, 则会使其产卵数量降低, 从而控制昆虫种群数量, 达到防治效果; 第二扰乱成虫正常活动规律, 从而影响其交配等行为, 达到控制种群数量的目的。我国对于一些主要害虫的性信息素的研究表明, 性信息素对于防治害虫有着不错的防治效果（戴建青, 2016; 李晓龙等, 2019), 这可以为研究和开发利用柑橘木虱性信息素提供参考。

柑橘木虱行为学研究表明来自雌虫的挥发

物对雄虫有一定的引诱作用（Wenninger *et al.*，2009）。Mann 等（2013）研究了柑橘木虱雄虫和雌虫的角质层提取物对其行为反应的影响，结果表明雌性木虱角质层的提取物对雄虫有引诱作用，而雄性木虱角质层的提取物没有引诱作用。进一步分析发现雌雄木虱表皮的角质层提取物成分存在差异，生物活性试验表明十二烷酸是吸引雄虫的活性物质。可以考虑利用表皮碳氢化合物十二烷酸作为性引诱剂诱捕木虱雄虫。Stockton 等（2017）研究雄性柑橘木虱的交配行为试验发现未经交配的雄性木虱在第一次交配以后对雌性木虱的探寻能力显著增加，表明其对雌性气味物质的识别可能需要通过交配后才能获得，并受到雌性栖息地的影响。Zanardi 等（2018）在实验室条件下研究发现，柑橘木虱的交配活动在羽化后第 4 天开始，第 7 天达到高峰期，而且雄性木虱能被同种的雌性木虱发出的气味挥发物所吸引。利用雌性木虱体内高含量的二十四醇乙酯（24Ac）进行田间诱捕试验，发现需要经过一段时间处理后才能引诱到雄虫，因此推测活性物质可能是其降解产物。然而其降解产物二十四醇没有引诱活性，因此推测其降解产物乙酸可能是活性物质。田间试验发现在诱捕剂放置一段时间后，在其中收集到了挥发物乙酸，另外，在交配高峰期的雌性木虱挥发物中收集到的乙酸含量高于雄性木虱，而且在 Y 型和 4 路嗅觉仪试验中，雄性木虱对乙酸表现出剂量响应的触角电位反应，而乙酸对雌性木虱无吸引作用。田间试验也证实乙酸能够成功诱捕到雄性木虱。因此乙酸可以考虑作为柑橘木虱雄性的引诱剂应用开发。李云明（2016）利用柑橘木虱信息素复合诱捕器进行试验，表明采用信息素复合诱捕器对成虫具有较好的诱集效果，诱捕器放置于柑橘树冠顶部效果最佳（50.2 头/套），相对于悬挂在中部和基部诱虫量分别增加了 25.2 头/套和 42.8 头/套，诱虫率分别增加 50.2%和 85.3%。

1.4 柑橘木虱对不同寄主种质的趋性行为

柑橘木虱主要危害芸香科植物，如柑橘、黄皮、九里香、枸杞等。柑橘木虱对不同种质的柑橘树的喜好不同，利用作物的抗虫性筛选抗性种质进而选育抗性品种，是有效防治柑橘木虱的一种方法（Teck *et al.*，2011）。陈建利等（2011）采用 13 种柑橘品种离体嫩枝进行试验，结果发现柑橘品种日辉（38%）+佩奇甜橙（15%）、台湾玫瑰橙（33%）+纽荷尔脐橙（20%）、早金（23%）+四季班叶橘（1%）两两组合处理后每组两个品种上的柑橘木虱数量差异显著；13 个品种一起组合试验表明纽荷尔、福橘和佩奇甜橙上每梢停留的虫量为 3.2-6.6 只/d，远远高于其它 10 个品种。试验表明柑橘木虱对纽荷尔脐橙、福橘和佩奇甜橙表现出较高的趋性。胡菡青等（2014）对 44 份田间柑橘种质苗以柑橘木虱成虫、若虫和卵的发生指数和虫口密度为感虫性指标，采用欧氏距离相似尺度和最长距离法进行聚类分析，将其分为五大类，分别为高感品种 9 种，介于高中感之间 2 种、中感 15 种、低感 12 种、不感 6 种。其中高感种质为九里香、3 个香橼品种、2 个枳橙品种、酸橙、宽皮桔和黎檬。不感种质为枳属、酒饼簕属、南庄橙、柠檬、花柚和红河橙。Felisberto 等（2019）对巴西森林柑橘园的柑橘亲缘属植物以柑橘木虱的选择性分类，指出巴伦西亚酸橙、柠檬和九里香为高适应类群；绿衣枳壳、黄皮为中适应类群；木橘、酒饼簕和肉豆蔻为不适应类群；山小橘、巴西芸香、香肉果、常山刺厥、狭叶蒲桃、西南猫尾木为非寄主类群。

潘少霖等（2014）研究表明柑橘品种叶片下表皮气孔密度与柑橘木虱成虫选择性呈极显著正相关，叶片下皮层厚度与柑橘木虱成虫选择性呈显著负相关，柑橘叶片下表皮气孔密度和下皮层厚度可能影响柑橘木虱对寄主植物的选择性。王辉等（2011）研究柑橘木虱对福建茶以及芸香科植物的选择性，试验表明柑橘木虱的最适宿主为九里香，植株上成虫数为 60 头、存活率为 60.5%、生长历期为 15-17 d。许鑫等（2018）观察柑橘木虱在九里香上的取食和交尾行为，发现雌雄成虫的取食部位有差异，雌虫在成熟梢上的取食时间长于嫩梢且嗜食成熟叶的叶背，而雄虫无明显差异。任素丽等（2018）在柚、酸橘、黄皮、九里香、砂糖橘上对柑橘木虱的发育和繁殖试验揭露柑橘木虱成虫寿命与寄主植物有关，除九里香以外，砂糖橘上柑橘木虱成虫的存活时间

最长。

Tomaseto 等（2019）在新建柑橘园周围种植九里香，然后对九里香进行杀虫剂喷雾处理，在柑橘树上悬挂粘虫板，结果发现黄色粘虫板上柑橘木虱捕获量减少了 40%，定植在柑橘树上的木虱减少了 83%。通过在柑橘园种植柑橘木虱的高感种质九里香诱集木虱，柑橘黄龙病的发生率降低了 43%。因此九里香可以作为一种诱捕植物种植在柑橘园中来诱集柑橘木虱。White 和 Lindcove（2017）筛选了 100 种柑橘品种对黄龙病的抗性，发现澳大利亚砂糖橘属对黄龙病具有抗性，且可以遗传。柑橘木虱对 22 种柑橘亲缘属植物选择性试验发现三种化学成分植醇（叶绿醇）、(Z)-β-罗勒烯和 β-榄香烯影响柑橘木虱的寄生，其中九里香不含上述成分成为柑橘木虱的最适寄主植物，柑橘和甜橙的杂交品种因含有上述化学成分而成为吸引力最差的寄主植物，并由此推测这三种物质可以作为一种驱避剂（Andrade *et al.*，2016），但 β-罗勒烯会影响柑橘木虱天敌瓢虫对寄主的识别（Lin *et al.*，2016），因此将其应用于柑橘木虱的绿色综合治理还需要进一步研究。

2　利用柑橘木虱趋性行为的田间防治技术

从 1960 年开始全球已对柑橘木虱的生物学习性、化学药剂防治及生物防治等方面开展了系列研究，并取得了一定的研究成果（余继华等，2018）。近年来柑橘木虱抗药性增加引发的黄龙病防治问题和防治柑橘木虱引发的环境污染问题日益突出，因此深入探索利用趋性行为防治柑橘木虱对于延缓抗药性及发展绿色环保生态型农业都至关重要。为强化利用趋性行为防治柑橘木虱的防治效果，建议着重做好以下几个方面的研究工作：

（1）深化色板和诱虫灯的研究和推广

色板及诱虫灯诱杀技术是一项较为成熟的技术，色板诱杀最佳使用时间是在柑橘木虱还没形成种群之前，在少量害虫存在的情况下使用效果最佳（夏红军等，2011）。诱虫灯技术在农业上应用广泛，但诱虫灯对于非靶标昆虫没有选择性，大量使用诱虫灯会对非靶标昆虫产生极大的危害，因此在研究改善柑橘木虱灯光诱捕效果的同时，减少其对非靶标昆虫的影响是灯光诱控技术未来要解决的关键问题。

（2）加快信息素类型及应用研究

信息素诱杀害虫具有高效专一、持续时间长、距离远的优点。2018 年 2 月巴西国家科技研究所发现并合成了柑橘木虱的性信息素（农药编辑部，2018）。目前，已知信息素的类型较少，虽然已经有人工合成性信息素防治柑橘木虱的相关研究，但仅停留在理论研究阶段，缺乏实际应用研究，而且我国利用信息素诱杀柑橘木虱的研究几乎没有。因此，必须加快柑橘木虱性信息素类型拓展和应用研究。

（3）强化对抗虫种质资源的筛选和利用研究

中国柑橘品种资源丰富，各地柑橘产区蕴藏着不少抗虫性强的品种，将抗性品种和柑橘优良品种杂交选育出具有双方特性的优良品种，可以作为有效防治柑橘木虱措施之一。因此，需强化抗虫种质资源的筛选，拓展抗性柑橘品种的资源库，为今后柑橘木虱的防控提供更多选择。

（4）利用植物源物质开发驱避剂和引诱剂

自然界中存在许多对柑橘木虱具有驱避或者引诱作用的天然植物源活性物质，如一些植物体用来保卫自身在体内产生的挥发性物质能影响柑橘木虱的趋性（Govindarajan and Sivakumar，2011；李秋霞和王英，2017）。植物源活性物质对昆虫作用机制主要分为两类，第一类是挥发性植物次生化合物对昆虫产生驱避作用，使产卵期雌虫在一定距离内通过嗅觉感受器感觉，并产生负趋性反应。第二类即产卵驱避剂，雌虫与具有抑制作用的非挥发性植物次生化合物接触后拒绝在上面产卵（杨长龙等，2006；Showler and Harlien，2019）。植物源引诱剂和诱捕装置联用，不但可以控制害虫数量，还能持续监测柑橘园间柑橘木虱组成结构和种群动态，为预测园间柑橘木虱发生期、发生量提供参考（刘俊等，2017；滕小慧等，2017）。虽然具备驱避和引诱作用的植物种类十分丰富，但其中起决定因素的植物活性物质尚未明确。研究植物活性物质对于绿色防

控柑橘木虱具有现实意义和科研价值，值得进一步深入研究。

（5）对柑橘木虱进行综合治理

田间环境复杂，条件多变，不可控因素很多。利用单一防治技术往往无法达到预期效果，需采取多种防治技术以有效的控制柑橘木虱数量。现有单波光源+矿物油组成的拒避-诱杀组合、植物精油与矿物油组合、诱虫灯与植物精油、植物源引诱剂+性引诱剂组合等防治技术结合体系，均能对柑橘木虱达到良好的防治效果。因此，结合不同防控技术的优势，采取综合防治是柑橘木虱防治的重要策略。

3 展望

化学防治是当前柑橘木虱防治的主要措施，但随着生活水平的提高，绿色环保意识的增强，绿色防控将会削弱化学防治的主导地位。利用趋性行为防治柑橘木虱是柑橘害虫绿色防控的重要方法，能为实现绿色农业提供重要技术支撑。但利用柑橘木虱趋性行为的防治效果相对于化学防治还存在一定差距，有待进一步研究提高。研究者可以利用柑橘木虱的嗅觉、视觉、味觉特性及对寄主种质的选择性，开发更高效的驱避剂或引诱剂，选育更高抗性的柑橘品种种质，以达到有效防控柑橘木虱和黄龙病的目标，为柑橘产业保驾护航。

参考文献 (References)

Andrade MS, Ribeiro LP, Borgoni PC, Silva MF, Forim MR, Fernandes JB, Vieira, PC, Vendramin JD, Machado MA, 2016. Essential oil variation from twenty two genotypes of citrus in Brazil-chemometric approach and repellency against *Diaphorina citri* Kuwayama. *Molecules*, 21(6): 814.

Augusto RG, María Del Pilar VH, Natalia JB, Hermann RD, 2018. Evaluation of yellow sticky traps baited with citrus scents, coconut oil, and commercial lures as a simple tool to monitor *Diaphorina citri* (Hemiptera: Liviidae) under tropical dry forest conditions. *Journal of Economic Entomology*, 111(6): 2746–2754.

Barman JC, Campbell SA, Zeng X, 2016. Exposure to guava affects citrus olfactory cues and attractiveness to *Diaphorina citri* (Hemiptera: Psyllidae). *Environmental Entomology*, 45(3): 694–699.

Belasque J, Bassanezi RB, Yamamoto PT, 2010. Lessons from huonglongbing management in Sao Paulo State. *Journal of Plant Pathology*, 92(2): 285–302.

Chen JL, Ruan CQ, Liu B, Fan GC, Duan YP, Hall D, 2011. *Diaphorina citri's* gost preference on thirteen citrus varieties. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 26(2): 280–283. [陈建利, 阮传清, 刘波, 范国成, 段永平, Hall D, 2011. 柑橘木虱对柑橘不同品种的趋性. 福建农业学报, 26(2): 280–283.]

Coutinho-Abreu IV, Forster L, Guda T, Ray A, 2014. Odorants for surveillance and control of the Asian citrus psyllid (*Diaphorina citri*). *PLoS ONE*, 9(10): e109236.

Dai JQ, Chen DS, Ye JW, Lv X, Xu QY, Li ZG, Li J, An XC, Han SC, 2016. Development of regional attractants for diamondback moth, *Plutella xylostella* (Lepidoptera: Plutellidae) based on sex pheromones and its application in Pearl River Delta. *Journal of Environmental Entomology*, 38(6): 1245–1250. [戴建青, 陈大嵩, 叶静文, 吕欣, 徐齐云, 李志刚, 李军, 安新城, 韩诗畴, 2016. 珠江三角洲小菜蛾区域性引诱剂的研制及诱集效应研究. 环境昆虫学报, 38(6): 1245–1250.]

Deng MX, Pan ZX, Tan YL, Tang JF, Qin X, Chen GF, Tang ML, 2012. Monitoring of resistance of different citrus to chlorpyrifos and other pesticides in orchard of Guangxi. *China Plant Protection*, 32(4): 48–49. [邓明学, 潘振兴, 谭有龙, 唐际飞, 覃旭, 陈贵峰, 唐明丽, 2012. 广西果园柑橘木虱对毒死蜱等 6 种农药的抗药性监测. 中国植保导刊, 32(4): 48–49.]

Felisberto P, Girardi EA, Pena L, Felisberto G, Beattie GA, Lopes SA, 2019. Unsuitability of indigenous South American Rutaceae as potential hosts of *Diaphorina citri*. *Pest Management Science*, 75(7): 1911–1920.

George J, Ammar ED, Hall DG, Shatters RJ, Lapointe SL, 2018. Prolonged phloem ingestion by *Diaphorina citri* nymphs compared to adults is correlated with increased acquisition of citrus greening pathogen. *Scientific Reports,* 8(1): e10352.

Govindarajan M, Sivakumar R, 2011. Mosquito adulticidal and repellent activities of botanical extracts against malarial vector, *Anopheles stephensi* Liston (Diptera: Culicidae). *Asian Pacific Journal of Tropical Medicine*, 4(12): 941–947.

Hall DG, Hentz MG, 2019. Influence of light on reproductive rates of Asian citrus psyllid (Hemiptera: Liviidae). *Journal of Insect Science*, 19(1): 1–9.

Hoffmann WE, Zhou YW, 1935. Citrus insect fauna. *Lingnan Agricultural Journal*, 2(1): 205–206. [贺辅民, 周郁文, 1935. 柑橘树昆虫志. 岭南农刊, 2(1): 205– 206.]

Hu HQ, Lin XJ, Fan GC, Ruan CQ, Cai ZJ, 2014. Evaluation of susceptibility of different citrus germplasm seedlings to Asian

citrus psyllids in the field. *Southeast Horticulture*, 2(5): 21–25. [胡菡青, 林雄杰, 范国成, 阮传清, 蔡子坚, 2014. 田间柑橘种质实生苗对柑橘木虱的感虫性评价. 东南园艺, 2(5): 21–25.]

Jiang HY, Wu FN, Wang YJ, Tao L, Wang JF, Liu Z, Cen YJ, 2018. Research advances on the origin, distribution and dispersal of the Asian citrus psyllid (*Diaphorina citri* Kuwayama). *Journal of Environmental Entomology*, 40(5): 1014–1020. [江宏燕, 吴丰年, 王妍晶, 陶磊, 王吉锋, 刘喆, 岑伊静, 2018. 亚洲柑橘木虱的起源、分布和扩散能力研究进展. 环境昆虫学报, 40(5): 1014–1020.]

Kuhns EH, Martini X, Hoyte A, Stelinski LL, 2016. Repellent activity of botanical oils against Asian citrus psyllid, *Diaphorina citri* (Hemiptera: Liviidae). *Insects*, 7(3): e35.

Lapointe SL, Hall DG, George J, 2016. A phagostimulant blend for the Asian citrus psyllid. *Journal of Chemical Ecology*, 42(9): 941–951.

Li CF, Liu JL, Zeng XN, 2019. Phototactic behavior and compound eye structure of *Diaphorina citri*. *Journal of South China Agricultural University*, 40(2): 53–59. [李超峰, 刘家莉, 曾鑫年, 2019. 柑橘木虱趋光行为及复眼结构分析. 华南农业大学学报, 40(2): 53–59.]

Li QX, Wang Y, 2017. Progress on the research of plant-based repellents against mosquitoes. *China Tropical Medicine*, 17(5): 522–525, 536. [李秋霞, 王英, 2017. 植物源蚊虫驱避剂的研究进展. 中国热带医学, 17(5): 522–525, 536.]

Lin XJ, Fan GC, Hu HQ, Ruan CQ, Cai ZJ, Xia YL, Du YG, Liu B, 2013. Screening of LED light source of the adapter solar trap lamp for trapping the citrus psyllid. *Plant Protection*, 39(4): 52–55, 84. [林雄杰, 范国成, 胡菡青, 阮传清, 蔡子坚, Xia Yulu, 杜云贵, 刘波, 2013. 适配太阳能诱虫器诱杀柑橘木虱LED 光源的筛选. 植物保护, 39(4): 52–55, 84.]

Lin Y, Lin S, Akutse KS, Hussain M, Wang L, 2016. *Diaphorina citri* induces Huanglongbing-infected citrus plant volatiles to repel and reduce the performance of *Propylaea japonica*. *Frontiers in Plant Science*, 7: e1969.

Liu J, Zhou DM, Zhou GY, 2017. Screening of attractants of plant origin for pests of *Camellia oleifera* and the population dynamics of the trapped pests. *Plant Protection*, 43(5): 174–179. [刘俊, 周德明, 周国英, 2017. 油茶害虫植物源引诱剂筛选及其诱集的昆虫种群动态. 植物保护, 43(5): 174–179.]

Liu XQ, Jiang HB, Xiong Y, Peng P, Li HF, Yuan GR, Dou W, Wang JJ, 2019. Genome-wide identification of ATP-binding cassette transporters and expression profiles in the Asian citrus psyllid, *Diaphorina citri*, exposed to imidacloprid. *Comparative Biochemistry and Physiology*, 30: 305–311.

Li XL, Jia YH, Dou YP, Liu XL, Wang CL, Li F, 2019. Control effects of sex pheromone wire on the oriental fruit moth in mix orchards. *Plant Protection*, 45(1): 212–215. [李晓龙, 贾永华, 窦云萍, 刘晓丽, 王春良, 李锋, 2019. 性信息素迷向丝对不同果树梨小食心虫的防控效果. 植物保护, 45(1): 212–215.]

Li YM, 2016, Effect of *Diaphorina citri* pheromone compound trap on monitoring adult citrus psyllids. *Primary Agricultural Technology Extension*, 4(2): 21–22. [李云明, 2016. 柑橘木虱信息素复合诱捕器监测柑橘木虱成虫效果试验. 基层农技推广, 4(2): 21–22.]

Lu HL, Sun XY, Fang XD, Meng X, Hou BH, Ouyang GC, 2017. Effect of ageratum conyzoides and eupatorium catarium on the population of *Diaphorina citri* Kuwayama. *Journal of Environmental Entomology*, 39(6): 1214–1218. [卢慧林, 孙小媛, 方小端, 孟翔, 侯柏华, 欧阳革成, 2017. 藿香蓟和假臭草对柑橘木虱种群发展的影响. 环境昆虫学报, 39(6): 1214–1218.]

Lu HL, Wang CS, Hou BH, Ouyang GC, Fang XD, Meng X, 2018. Trapping effect of combination of monochromatic light source and mineral oil on *Diaphorina citri*. *Forest Pest and Disease*, 37(4): 19–22. [卢慧林, 王昌盛, 侯柏华, 欧阳革成, 方小端, 孟翔, 2018. 单波光源与矿物油组合对柑橘木虱的诱杀效果. 中国森林病虫, 37(4): 19–22.]

Ma T, Lin N, Liu XP, Zhang N, Zhang MY, Huang XN, Wen XJ, 2018. Extraction and analysis of insect sex pheromone. *Experimental Technology and Management*, 35(12): 68–71. [马涛, 林娜, 刘小蓓, 张娜, 张曼玉, 黄夏宁, 温秀军, 2018. 昆虫性信息素提取与分析. 实验技术与管理, 35(12): 68–71.]

Mann RS, Rouseff RL, Smoot JM, Stelinski LL, 2011. Sulfur volatiles from *Allium* spp. affect Asian citrus psyllid, *Diaphorina citri* Kuwayama (Hemiptera: Psyllidae), response to citrus volatiles. *Bulletin of Entomological Research*, 101(1): 89–97.

Mann RS, Rouseff RL, Smoot J, Rao N, Meyer WL, Lapointe SL, Robbins PS, Cha D, Linn CE, Webster FX, Tiwari S, Stelinski LL, 2013. Chemical and behavioral analysis of the cuticular hydrocarbons from Asian citrus psyllid, *Diaphorina citri*. *Insect Science*, 20(3): 367–378.

Mao RQ, Wu D, He Y, Chen SW, Xian JX, Zhen JH, 2013. Study on control effectiveness of Huanglongbing based on eradication of Asian citrus psyllid *Diaphorina citri* Kuwayama surrounding citrus orchard. *Journal of Environmental Entomology*, 35(4): 445–451. [毛润乾, 吴东, 何勇, 陈世伟, 贤家旭, 郑基焕, 2013. 防治果园周边柑橘木虱控制黄龙病效果研究. 环境昆虫学报, 35(4): 445–451.]

Oppenoorth FJ, 1984. Biochemistry of insecticide resistance. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 22(2): 187–193.

Pan SL, Huang JH, Lin XJ, Fan GC, Chen J, Hu HQ, 2014. The relationship between citrus leaf structure and host-selectivity of Asian citrus psyllid. *Southeast Horticulture*, 2(6): 15–18. [潘少霖, 黄镜浩, 林雄杰, 范国成, 陈瑾, 胡菡青, 2014. 柑橘叶片结构与柑橘木虱寄主选择性的关系. 东南园艺, 2(6): 15–18.]

Paris TM, Allan SA, Udell BJ, Stansly PA, 2017. Wavelength and polarization affect phototaxis of the Asian citrus psyllid. *Insects*, 8(3): e88.

Patt JM, Meikle WG, Niedz RP, Woods D, 2018. Synthetic ligands of olfactory binding proteins modulate aggregation response of Asian citrus psyllid in the presence of host-plant volatiles. *Frontiers in Plant Science*, 20(9): e1891.

Pesticide Editorial Department, 2018. Brazilian researchers have found that synthetic citrus psyllid sex pheromones may provide new ideas for the prevention and control of Huanglong disease. *Agrochemicals*, 57(3): 183. [农药编辑部, 2018. 巴西科研人员发现合成柑橘木虱性信息素或为黄龙病防治提供新思路. 农药, 57(3): 183.]

Qiu HY, Fu BL, Li SG, Tang LD, Liu K, 2018. Taxis response of citrus psyllid to 45 plant essential oils. *South China Fruits*, 47(2): 50–53. [邱海燕, 付步礼, 李善光, 唐良德, 刘奎, 2018. 柑桔木虱对 45 种植物精油的趋性反应. 中国南方果树, 47(2): 50–53.]

Quan JC, Lao GX, Peng HY, Mao RQ, Zheng JH, 2016. Repellent effect of essential oil of guava leaves on different citrus. *Guangxi Plant Protection*, 29(2): 5–7. [全金成, 老广炘, 彭海玉, 毛润乾, 郑基焕, 2016. 番石榴叶抽提物对柑橘木虱驱避效果. 广西植保, 29(2): 5–7.]

Ren SL, Ou D, Zhang LH, Sang W, Ji QH, Qiu BL, 2018. Effects of different host plants on the development and reproduction of the Asian citrus psyllid *Diaphorina citri*. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 55(4): 602–607. [任素丽, 欧达, 张利荷, 桑文, 吉前华, 邱宝利, 2018. 不同寄主植物对柑橘木虱发育和繁殖的影响. 应用昆虫学报, 55(4): 602–607.]

Rogers ME, Stansly PA, Stelinski LL, 2016. Florida citrus pest management guide: Asian citrus psyllid and citrus leafminer. Florida Cooperative Extension Service, Institute of Food and Agricultural Sciences, Electronic Data Information Source (University of Florida) ENY734/IN686. http://edis.ifas.ufl.edu/in686.

Sang W, Liu YM, Qiu BL, 2018. Advances in the eco-friendly management of *Diaphorina citri*. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 55(4): 557–564. [桑文, 刘燕梅, 邱宝利, 2018. 柑橘木虱绿色防控技术研究进展. 应用昆虫学报, 55(4): 557–564.]

Sétamou M, Saldana RR, Hearn JM, Dale J, Feria AT, Feria Arroyo TP, Czokajlo D, 2019. Screening sticky cards as a simple method for improving efficiency of *Diaphorina citri* (Hemiptera: Liviidae) monitoring and reducing nontarget organisms. *Journal of Economic Entomology*, 112(3): 1167–1174.

Showler AT, Harlien JL, 2019. Lethal and repellent effects of the botanical *p*-anisaldehyde on *Musca domestica* (Diptera: Muscidae). *Journal of Economic Entomology*, 112(1): 485–493.

Stockton DG, Martini X, Stelinski LL, 2017. Male psyllids differentially learn in the context of copulation. *Insects*, 8(1): e16.

Sun LF, 2000. Biological activities of plant essential oil and terpenes. *Journal of Jiangxi Normal University* (*Natural Science Edition*), 24(2): 159–163. [孙凌峰, 2000. 植物精油及萜类成分的生物活性. 江西师范大学学报(自然科学版), 24(2): 159–163.]

Teng XH, Gao XG, Gong DF, Zhang HF, Yan FM, Guo XR, Li WZ, Yuan GH, 2017. Field screening and evaluation of broad spectrum attractants of scarab beetles. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 54(5): 859–864. [滕小慧, 高新国, 龚东风, 张鸿飞, 闫凤鸣, 郭线茹, 李为争, 原国辉, 2017. 金龟甲广谱引诱剂配方筛选及田间评价. 应用昆虫学报, 54(5): 859–864.]

Teck SLC, Fatimah A, Beattie A, Heng RKJ, King WS, 2011. Influence of host plant species and flush growth, stage on the Asian citrus psyllid, *Diaphorina citri* kuwayama. *American Journal of Agricultural & Biological Science*, 6(4): 536–543.

Tian FJ, Liu JL, Zeng XN, 2018. Progress in research on insecticide resistance in the Asian citrus psyllid, *Diaphorina citri*. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 55(4): 565–573. [田发军, 刘家莉, 曾鑫年, 2018. 柑橘木虱抗药性研究进展. 应用昆虫学报, 55(4): 565–573.]

Tomaseto AF, Marques RN, Fereres A, Zanardi OZ, Volpe HXL, Alquézar B, Peña L, Miranda MP, 2019. Orange jasmine as a trap crop to control *Diaphorina citri*. *Scientific Reports*, 9(1): e2070.

Wang H, Ding F, Zhong Y, Jiang B, Yi GJ, Wang GP, 2011. The selectivity of *Diaphorina citri* to *Carmonam icrophylla* and Rutaceae hosts, and its to lerance to starvation and thirstiness. *Journal of Plant Protection*, 38(3): 283–284. [王辉, 丁芳, 钟云, 姜波, 易干军, 王国平, 2011. 柑橘木虱对福建茶和芸香科植物的选择性及其耐饥渴能力. 植物保护学报, 38(3): 283–284.]

Wang QZ, Liu YM, Li SM, Zhao Y, Wang W, 2018. Chemical composition of essential oil of the invasive plant *Praxelis clematidea* and its repellence and lethality to *Diaphorina citri*. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 55(1): 117–125. [王奇志, 刘育梅, 李书明, 赵颖, 王伟, 2018. 假臭草花精油的化学组成及对柑橘木虱的驱避和致死活性. 应用昆虫学报, 55(1): 117–125.]

Wenninger EJ, Stelinski LL, Hall DG, 2009. Relationships between

adult abdominal color and reproductive potential in *Diaphorina citri* (Hemiptera: Psyllidae). *Annals of the Entomological Society of America*, 102(3): 476–483.

White H, Lindcove REC, 2017. Developing citrus varieties resistant to huanglongbing disease. *California Agriculture*, 71(1): 18–20.

Wu LH, Chen RC, Han RC, Wei HY, Zheng LX, 2018. Study on the preference of *Diaphorina citri* Kuwayama to different colors. *Journal of Fruit Science*, 35(12): 1509–1515. [吴兰花, 陈仁琛, 韩若琛, 魏洪义, 郑丽霞, 2018. 柑橘木虱对不同颜色的趋性研究. 果树学报, 35(12): 1509–1515.]

Xia HJ, Ding CX, Fu JW, Li JY, Shi MZ, Wang M, 2011. Attractive effects of different color boards to orchard pests and natural enemies. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 27(19): 287–290. [夏红军, 丁春霞, 傅建炜, 李建宇, 史梦竹, 王沫, 2011. 不同色板对果树害虫及天敌的引诱作用差异. 中国农学通报, 27(19): 287–290.]

Xie PH, Su CA, Lin ZG, 1989. Studies on the biology of *Diaphorina citri*. *Journal of Zhejiang University*, 15(2): 198–202. [谢佩华, 苏朝安, 林自国, 1989. 柑橘木虱生物学研究. 浙江农业大学学报, 15(2): 198–202.]

Xu X, Xiao ZT, Cen YJ, 2018. Feeding and mating behavior of *Diaphorina citri* Kuwayama on *Murraya exotica* L. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 55(4): 615–621. [许鑫, 肖庄婷, 岑伊静, 2018. 亚洲柑橘木虱成虫在九里香上的取食与交尾行为观察. 应用昆虫学报, 55(4): 615–621.]

Yang CL, Jiang SH, Xu HH, 2006. Research progresses in plant-originated repellents. *Plant Protection*, 32(6): 4–9. [杨长龙, 江世宏, 徐汉虹, 2006. 植物源驱避剂研究进展. 植物保护, 32(6): 4–9.]

Yao TS, Zhou Y, Zhou CY, 2018. Advances in researches on the occurrence and control of Asia citrus psyllid. *Journal of Fruit Science*, 35(11): 1413–1421. [姚廷山, 周彦, 周常勇, 2018. 亚洲柑橘木虱的发生与防治研究进展. 果树学报, 35(11): 1413–1421.]

Yu JH, Huang ZD, Zhang MR, Zhang N, Li P, Lu L, Yang X, 2018. The biological research progress and prevention of Asian citrus psyllid. *Plant Quarantine*, 32(5): 8–13. [余继华, 黄振东, 张敏荣, 张宁, 李萍, 卢璐, 杨晓, 2018. 亚洲柑橘木虱的生物学研究进展及防治. 植物检疫, 32(5): 8–13.]

Zanardi OZ, Volpe H, Favaris AP, Silva WD, Luvizotto R, Magnani RF, Esperança V, Delfino JY, Freitas RD, Miranda MP, Parra, JRP, Bento JMS, Leal WS, 2018. Putative sex pheromone of the Asian citrus psyllid, *Diaphorina citri*, breaks down into an attractant. *Scitific Report*, 8: e455.

Zhao Z, Xia CX, Yao ZC, Yan X, Fang YW, Zhang HY, 2018. The effects of different colors and different hanging modes for trapping Asian citrus psyllid. *Journal of Fruit Science*, 35(5): 596–601. [赵政, 夏长秀, 姚志超, 严翔, 方贻文, 张宏宇, 2018. 不同色板和悬挂方式对柑橘木虱的诱集效果. 果树学报, 35(5): 596–601.]

Zhu HM, Zeng XN, Syed MZ, Cen YJ, 2010. In fluence of the essential oil of guava leaves on the feeding behavior of the Asian citrus psyllid. *Journal of Environmental Entomology*, 32(4): 483–487. [朱红梅, 曾鑫年, Syed MZ, 岑伊静, 2010. 番石榴精油对柑橘木虱刺吸取食行为的影响. 环境昆虫学报, 32(4): 483–487.]