



柑橘木虱绿色防控技术研究进展*

桑文^{1,2**} 刘燕梅^{1,3} 邱宝利^{1,3}

(1. 广东省生物农药创制与应用重点实验室, 广州 510640; 2. 广东省害虫生物防治工程技术研究中心, 广州 510640; 3. 生物防治教育部工程研究中心, 华南农业大学昆虫学系, 广州 510640)

摘要 柑橘木虱 *Diaphorina citri* Kuwayama 是传播柑橘黄龙病的重要媒介昆虫, 威胁我国乃至世界柑橘产业的健康发展。柑橘木虱绿色防控对保证我国生态环境和农产品质量安全, 推动柑橘产业可持续发展具有重要作用。本文综述近年来以天敌、昆虫病原真菌、植物源农药为主的生物防治技术和以灯光、色板诱捕、反光膜驱避、防虫网阻隔为主的物理防治技术, 在柑橘木虱绿色防控中最新的研究进展, 分析其存在的问题, 并对发展趋势进行了展望, 为我国今后柑橘木虱科学、高效防控及其可持续治理提供参考, 不断推动我国柑橘产业的持续、稳定和健康发展。

关键词 柑橘木虱, 黄龙病, 生物防治, 物理防治

Advances in the eco-friendly management of *Diaphorina citri*

SANG Wen^{1,2**} LIU Yan-Mei^{1,3} QIU Bao-Li^{1,3}

(1. Key Laboratory of Bio-Pesticide Innovation and Application, Guangzhou 510640, China; 2. Engineering Technology Research Center of Agricultural Pest Biocontrol, Guangdong Province, Guangzhou 510640, China; 3. Engineering Research Center of Biological Control, Ministry of Education; Department of Entomology, South China Agricultural University, Guangzhou 510640, China)

Abstract *Diaphorina citri* Kuwayama is an important insect vector of citrus greening disease or Huanglongbing (HLB), which poses a major threat to the citrus industry in China and elsewhere. Eco-friendly techniques for the management of *D. citri* are important for ensuring the safety of both the environment and citrus fruit to consumers, and ultimately, the sustainable development of the citrus industry. This paper reviews the latest research on eco-friendly management methods for *D. citri*, including biological control based on natural enemies, entomopathogenic fungi, botanical pesticides, and physical control based on light/color trapping, reflective film and insect-proof netting. We analyze problems and trends in the development of these technologies. This paper provides a useful reference for effective control of *D. citri* and promotes the sustainable, stable and healthy development of the citrus industry in China.

Key words Asian citrus psyllid, HLB, biological control, physical control

柑橘木虱 *Diaphorina citri* Kuwayama 属半翅目木虱科 (Hemiptera), 是柑橘、柠檬、黄皮、九里香等芸香科植物上的重要害虫。柑橘木虱刺吸危害, 成虫分散在叶和嫩芽上吸食, 若虫群集在新梢、嫩芽和新叶上危害, 造成嫩梢、嫩芽黄

化、萎缩、干枯, 新叶扭曲畸形易脱落, 严重影响植物的生长。若虫在取食过程中分泌的白色蜜露附着于植物叶片表面影响植物光和作用, 同时引发煤污病 (Grafton-Cardwell *et al.*, 2013; 代晓彦等, 2014; Liu and Tsai, 2015)。相比直接取

*资助项目 Supported projects: 国家重点研发计划项目 (2017YFD0200900); 国家自然科学基金青年基金项目 (31701793); 广东现代农业产业技术体系创新团队项目 (2017LM1106); 广州市科技计划项目 (201804020070)

**通讯作者 Corresponding author, E-mail: sangwen@scau.edu.cn

收稿日期 Received: 2018-07-02, 接受日期 Accepted: 2018-07-24

食危害,柑橘木虱作为柑橘黄龙病(Huanglongbing)的重要传播媒介,对柑橘产业造成的损失更为巨大(Pelz-Stelinski *et al.*, 2010; Grafton-Cardwell *et al.*, 2013)。柑橘黄龙病是柑橘的毁灭性病害,呈世界性分布(Bové, 2006; Hall *et al.*, 2013)。黄龙病感染植株后,由于果树的生理状态和生长环境的差异,处于潜伏期,不易察觉,当病害发生时则导致植株果实着色异常、果小、畸形,叶片变小、均匀或斑驳黄化,根表皮易脱落、腐烂,直至大片橘树死亡(Bové, 2006; Gottwald *et al.*, 2007)。我国的11个柑橘种植省、区已受到柑橘黄龙病的严重影响,受灾面积占柑橘总栽培面积的80%以上。更为严重的是,随着全球气候变暖,黄龙病传播媒介柑橘木虱的分布北界开始向北迁移,直接威胁到我国中北部柑橘产区(范国成等, 2009)。因而,当下做好柑橘木虱的防控是遏制黄龙病蔓延的重要措施。

目前生产上主要通过大量施用化学农药如:毒死蜱、吡虫啉、甲氰菊酯、乐果等,防治柑橘木虱(Boina *et al.*, 2009; Ichinose *et al.*, 2010; Tiwari *et al.*, 2011)。实际观测发现高强度的化学防治不但不能有效抑制新种植柑橘苗木黄龙病的侵染和扩散,反而导致柑橘木虱产生抗药性、天敌昆虫大量死亡、生物多样性丧失、果实农药残留超标、环境污染等一系列问题(Gottwald, 2007; Kanga *et al.*, 2016)。我国政府在2015年中央1号文件关于农业发展“转方式、调结构”的战略部署中明确指出:“十三五”期间将通过“化学肥料和农药减施增效综合技术研发”项目的实施,显著控制我国农药化肥的使用量,保障生态环境安全和农产品质量安全。因此,开发利用柑橘木虱绿色防控手段尤为重要。

生物防治和物理防治措施是害虫综合防治的重要组成部分,其作为化学防治的辅助及替代手段,具有高效、环保、便捷等优点,具有广阔的应用前景。本文根据国内外最新研究进展,较为系统的总结了当前用于柑橘木虱生物防治和物理防治技术手段,并对柑橘木虱未来的绿色防控发展趋势进行了展望,以期为柑橘黄龙病的防控和柑橘产业的可持续发展提供借鉴。

1 柑橘木虱生物防治

生物防治是利用生物及其产物控制害虫的方法。生物防治对害虫种群控制效果持久,对环境无污染,已在水稻、棉花、花生等多种作物的害虫防治中广泛应用,并取得了良好的经济效益。目前在柑橘木虱防治上应用的生物防治资源主要有寄生性天敌、捕食性天敌、昆虫病原微生物和植物源农药几大类。

1.1 寄生性天敌昆虫

寄生性天敌昆虫是柑橘木虱天敌昆虫中一大重要类群。目前所发现的柑橘木虱优势寄生蜂主要两种,分别是亮腹釉小蜂 *Tamarixia radiata* (Waterston)和阿里食虱跳小蜂 *Diaphorencyrtus aligarhensis* (Shafee, Alam and Argarwal), 二者都为柑橘木虱专性寄生蜂。它们最早的记录可追溯到北印度次大陆(Grafton-Cardwell *et al.*, 2013)。亮腹釉小蜂先后被人为引入到留尼汪岛、中国台湾、毛里求斯、菲律宾、圣地亚哥、爪哇、瓜德罗普岛、佛罗里达等地区。后来在中国、巴西、委内瑞拉、墨西哥、波多黎各和德克萨斯等国家和地区也有发现(Grafton-Cardwell *et al.*, 2013)。阿里食虱跳小蜂最早出现在中国、越南、菲律宾等国家,随后被引入留尼汪岛和圣地亚哥等地区(Hayat, 2006)。虽然,这两种寄生蜂能在同一区域共存,但是亮腹釉小蜂寄生能力要显著高于阿里食虱跳小蜂。

亮腹釉小蜂属于膜翅目 Hymenoptera 姬小蜂科 Eulophidae, 营筒性生殖,其主要寄生柑橘木虱4龄和5龄若虫,在温度为26℃、相对湿度70%的条件下世代发育历期约为11.4 d,单雌产卵量可超过300粒。亮腹釉小蜂除直接寄生柑橘木虱若虫致其死亡外,还能取食低龄若虫。1头亮腹釉小蜂雌虫通过寄生和取食活动,一生能杀死500多头柑橘木虱。亮腹釉小蜂的寄生能力受环境因素影响较大,在美国佛罗里达州,亮腹釉小蜂的春季的寄生率不足20%,而秋季可上升达88%。此外,寄主数量、农药使用、其它天敌都能影响亮腹釉小蜂的寄生能力和寿命(Chen and Stansly, 2014)。

阿里食虱跳小蜂属于膜翅目 Hymenoptera 跳小蜂科 Encyrtidae, 营孤雌生殖。与亮腹釉小蜂类似, 它主要寄生柑橘木虱 4 龄和 5 龄若虫, 也能取食一定数量的若虫, 但其对柑橘木虱的控制能力较亮腹釉小蜂弱。美国佛罗里达州曾在 1999 年和 2006 年两次从中国引种阿里食虱跳小蜂, 但最终都没有在田间建立总群, 其原因可能是当地的亮腹釉小蜂作为优势种群与其竞争 (Hoy *et al.*, 2001; Rohrig *et al.*, 2012)。

1.2 捕食性天敌昆虫

目前已经发现的柑橘木虱捕食性天敌主要包括瓢虫、草蛉、蜘蛛和蚂蚁几大类。自然界中这些天敌往往同时存在, 因此很难判断每种天敌所具体起到的作用。能够捕食柑橘木虱的瓢虫有龟纹瓢虫 *Propylea japonica* (Thunberg)、楔斑溜瓢虫 *Olla v-nigrum* (Mulsant)、六斑月瓢虫 *Menochilus sexmaculatus* (Fabricius)、异色瓢虫 *Harmonia axyridis* (Pallas) 等 12 个种类 (任顺祥和郭振中, 1990; 庞虹, 1991)。我国的优势瓢虫种类六斑月瓢虫、红星盘瓢虫和龟纹瓢虫对柑橘木虱的若虫和成虫都有很强的捕食作用。在佛罗里达州中部地区的夏秋季, 异色瓢虫、楔斑溜瓢虫和奇氏光缘瓢虫是捕食柑橘木虱若虫的主要瓢虫种类 (Michaud, 2004)。

草蛉能够捕食柑橘木虱的卵和幼虫, 在我国的优势种群分别是亚非草蛉 *Chrysopa boninensis* Okamoto 和大草蛉 *Chrysopa septempunctata* Wesmael。佛罗里达州捕食柑橘木虱的草蛉主要是 *Ceraeochrysa lineaticornis* (Fitch) 和红通草蛉 *Chrysoperla rufilabris* Burmeister (Michaud 2004; 代晓彦等, 2014)。此外, 蜘蛛和蚂蚁在果园中也起到了一定的控害作用。目前发现能取食柑橘木虱若虫的蜘蛛有近管珠科蜘蛛 *Hibana velox* (Lawrence Becker)、幽禁红螯蛛 *Chiracanthium inclusum* (Hentz)、*Oxyopes lineatus* Latreille 和 *Hentzia palmarum* (Hentz) 4 种 (代晓彦等, 2014)。由于柑橘木虱在取食过程中会产生蜜露, 吸引多种蚂蚁, 这些蚂蚁在取食蜜露的同时也会取食木

虱若虫及其卵 (Navarrete *et al.*, 2013)。除了以上一些大的天敌类群以外, 也有一些报道表明捕食螨、食蚜蝇和螳螂也能捕食柑橘木虱。

1.3 病原真菌

在昆虫病原微生物中, 昆虫病原真菌种类占 60% 以上, 有着显著的流行潜力和生产便利性, 是很好的生防材料。目前世界上报道的柑橘木虱主要病原真菌有球孢白僵菌 *Beauveria bassiana* (Balsamo) Vuillemin、绿僵菌 *Metarhizium anisopliae* (Metchnikoff) Sorokin、玫烟色棒束孢 *Isaria fumosorosea* (Wize) Brown *et Smith*、桔形被毛孢 *Hirsutella citrififormis* Speare 和蜡蚧轮枝菌 *Lecanicillium lecanii* (Zimmermann) Vimmer 等 (Gandarilla-Pachec *et al.*, 2013; Navarrete *et al.*, 2013)。其中白僵菌、绿僵菌和玫烟色棒束孢的寄主范围广、致病性与适应性强, 受到关注较多。Lezama-Gutierrez 等 (2012) 分别测定了这 3 种真菌在田间对柑橘木虱致病力, 结果表明绿僵菌对柑橘木虱成虫和若虫的致死率最高, 分别达到 50% 和 60%。陈建立 (2012) 从柑橘木虱的生境及死亡虫体上分离筛选得到了对柑橘木虱具有高致病力的 2 株球孢白僵菌菌株 FJAT-9622 和 FJAT-9719, 其致病力在实验室条件下达到 73.3% 和 83.3% (陈建利, 2012)。代晓彦等 (2017) 分离得到 2 株高致病力菌株球孢白僵菌和玫烟色棒束孢菌株在孢子浓度为 $1 \times 10^5 - 1 \times 10^8 \text{ mL}^{-1}$ 和 $1 \times 10^6 - 1 \times 10^8 \text{ mL}^{-1}$ 时对柑橘木虱成虫的 LT_{50} 值为 5.2-4.4 d 和 5.3-4.9 d (代晓彦等, 2017)。通过实验室实验、半田间和田间试验的比较, 我们发现田间和半田间试验的真菌致死效果要显著低于实验室效果, 这与真菌孢子致病力受田间温度、湿度及紫外线等环境因素的影响有关, 因此将来的研究除了筛选得到高致病力的菌株以外, 还应考虑添加辅助物增强真菌制剂在田间的稳定性维持致病活性。

1.4 植物源农药

植物源农药是指植物本身、从植物中提取的活性成分和按结构合成的化合物及衍生物。植物

源农药源于植物,能在自然界降解,不会污染环境,对人和牲畜安全,对天敌伤害小,且不易导致害虫产生抗性,是化学农药良好的替代品之一。一些植物源农药能够直接影响柑橘木虱的发育致其死亡。印楝 *Azadirachta indica* A. Juss. 是研究较多的植物源农药中的一种,其有效成分为印楝素,印楝精油在温室内对柑橘木虱幼虫的致死率高达 92%,在田间的致死率达 30% (Weathersbee and Mckenzie, 2005)。而 Khan 等 (2012) 报道表明印楝提取物在田间能致使柑橘木虱成虫死亡率高达 80% (Khan *et al.*, 2012)。Volpe 等 (2016) 利用胡椒 *Piper aduncum* L. 精油,其有效成分为蒈油脑,处理柑橘木虱成虫和若虫 3 d 后,死亡率可达 90%-100% (Volpe *et al.*, 2016)。万寿菊 *Tagetes coronopifolia* (Asteraceae) 精油的提取物在 $0.01 \text{ mg} \cdot \text{mL}^{-1}$ 时对柑橘木虱若虫的致死率达 40%,当浓度到达 $10 \text{ mg} \cdot \text{mL}^{-1}$ 可造成成虫死亡 (Mendoza-Garcia *et al.*, 2015)。

植物源农药除直接导致柑橘木虱死亡外,还能影响柑橘木虱的行为。岑伊静等 (2005) 测定了柑橘木虱对多种非嗜食植物挥发油的趋性,实验表明薇甘菊 *Mikania micrantha* Kunth、马樱丹 *Lantana camara* Lantana、螞蛄菊 *Wedelia chinensis* (Osbeck) Merr.、假臭草 *Praxelis clematidea* (Griseb.) 的植物挥发物对柑橘木虱成虫都有明显的驱避作用。香菜、薰衣草、玫瑰和茶树精油对柑橘木虱成虫也有显著的趋避作用,并且能抑制柑橘叶片对木虱的吸引 (Mann *et al.*, 2012)。种植番石榴植株能驱避周边柑橘树上的木虱。番石榴叶面提取物浓度大于 $7.5 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$,喷洒九里香枝条时也能对柑橘木虱达到驱避效果 (全金成等, 2016)。柑橘木虱成虫在取食经 $1 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$ 的番石榴精油处理的砂糖橘时,相比对照组的刺吸取食行为发生改变,表现为非刺探活动和唾液分泌增加,韧皮部取食时间显著下降,并出现木质部取食 (朱红梅等, 2010)。

2 柑橘木虱物理防治

物理防治技术是使用物理因子抑制昆虫生

长繁殖的害虫防治方法,包括灯光诱捕技术、气调防治技术、辐照防治技术、机械阻隔技术和温控防治技术等。目前在柑橘木虱防治上主要使用的物理防治技术有灯光诱捕、色板诱捕、反光膜驱避以及防虫网阻隔等方法。

2.1 灯光诱捕

灯光诱控技术是利用昆虫趋向光源或远离光源运动的行为习性,促使昆虫聚集某一固定位置集中消灭的物理防治手段。该技术在我国农、林、渔、养殖和园林景观的害虫测报和防控中发挥了重要作用并取得良好的成效。以灯光诱杀为重点的害虫综合防控技术已在全国 20 多个省市的水稻、棉花、柑橘、蔬菜、玉米、茶叶、花生、甘蔗主产区大面积推广应用,取得了巨大的经济效益、社会效益和生态效益 (桑文等, 2016)。随着灯光诱捕技术在其它害虫防治成效日显突出,研究者开始关注如何利用该技术控制柑橘木虱。柑橘木虱具有发达的感光器官-复眼,具有较强的视觉和感光能力 (Wenninger *et al.*, 2009; Mann *et al.*, 2011)。林雄杰等 (2013) 分析绿光 (509-542 nm)、蓝光 (454-479 nm)、黄光 (582-600 nm) 和红光 (608-628 nm) 对柑橘木虱成虫趋光行为研究发现对蓝光和绿光的趋光率最强。Pairs 等 (2015) 比较了柑橘木虱对紫外 (355、365、375、390、405 nm)、蓝 (470 nm)、绿 (525 nm)、黄 (590 nm)、红 (628 nm) 9 种波长光源的趋光行为,结果表明,紫外光 (390 nm) 对柑橘木虱雌雄虫具有显著的吸引效果,此外绿光、黄光也有一定的吸引作用 (Paris *et al.*, 2015)。这两个实验结果存相差较大,可能是由于两人的所选择的光源光谱范围较大、波长不够集中所致,也可能是实验所处时间段内昆虫日活动节律存在差异造成的。随后 Paris 等 (2017) 通过利用产生更窄波段的滤光片研究了柑橘木虱对单色光趋光行为,结果表明柑橘木虱对短波长的紫外/绿蓝光区域 (350-430 nm) 正趋光性比长波长绿/橙光区域 (500-620 nm) 强的多,且柑橘木虱朝向 365 nm 的紫外光移动的距离和速度都要比其

它波长的单色光要大和快。此外,该实验还证明,柑橘木虱能区分白光中的水平和垂直偏振光,并对竖直偏振光的趋性强于水平偏振和非偏振光,但无法辨别单一波长光的偏振方向(Paris *et al.*, 2017a)。在利用组合光源研究柑橘木虱趋光性实验中发现,通过在黄光和绿光中加入紫外光能显著提高黄、绿两种光对柑橘木虱的吸引,而蓝光却能导致柑橘木虱的负趋光行为(Paris *et al.*, 2017b)。通过这些研究可以发现,不同的研究方法、行为装置、光源设置都会导致柑橘木虱趋光行为的研究结果有所差异,但是柑橘木虱对紫外光波长具有强的趋光行为是毋庸置疑的,这与柑橘木虱复眼具有紫外、蓝和黄/绿 3 种光受体的生理基础相符(Allan, 2012)。然而黄、绿和蓝光 3 种光谱在柑橘木虱趋光、避光、飞行定位等行为中所起的作用任需要进一步研究。虽然柑橘木虱对紫外光的趋性较强,但是基于该波长的诱虫灯对其它昆虫特别是天敌昆虫和中性昆虫也有很强的诱捕作用,因此如何提高柑橘木虱灯光诱捕效果的同时,减少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。

2.2 色板诱捕

昆虫的趋色性与趋光性一样,都是昆虫的固有习性,利用昆虫对颜色的趋性而发展起来的色板诱捕技术也在害虫的监测预报和防治上取得诸多成效,该技术成本低、操作简便。Sétamou 等(2014)在南德克萨斯州 4 月份到 7 月份期田间研究蓝、绿、红、白和黄 5 种颜色的色板对柑橘木虱诱捕效果发现,黄板对柑橘木虱成虫的捕获效果明显高于其它 4 种颜色,其次是红色。该结果与色板反射率值有密切关系:除了白色板以外,所有的色板在可见光区都有较高的反射率。特别是在橙色(590-635 nm)和红色(635-700 nm)区域,黄色和红色黏虫板的反射率要显著高于绿板和蓝板,此外,与红板相比黄板在(560-590 nm)区域的反射率更高,这说明柑橘木虱对色板的偏好主要取决于色板对 560 nm 以上光谱的反射率。这实际上与柑橘木虱喜欢取食嫩梢相关,因为嫩梢比老梢对黄、橙和红色的波

长区域反射比要高得多(Hall *et al.*, 2010; Sétamou *et al.*, 2014)。此外,Sétamou 等(2014)的研究还表明色板对柑橘木虱的捕获效果还与悬挂的环境有关,在柠檬园中黄板对柑橘木虱成虫的捕获率最高,其次是甜橙园,捕获效果最差的是葡萄柚,这是由于柠檬园中柑橘木虱的种群要显著大于其它两种果园,这种种群数量的差异与柠檬成熟叶片具有对可见光的高反射比有关。

色板对柑橘木虱成虫的捕获数量会随着一天时段变化而发生变化,通过对 24 h 内各时段黄色黏虫板对柑橘木虱的捕获数量分析表明,在下午的 12:00-16:00 的时间段黄板在一天中的捕获量达到高峰。这可能是由于在这个时间段自然界中光照强度和温度较高促进了柑橘木虱的活动和趋色行为(Sétamou *et al.*, 2012; Paris *et al.*, 2015)。

色板悬挂的方位、高度和间距也是影响柑橘木虱诱捕效果的重要因素。赵政等(2017)通过悬挂白色、红色、青色、绿色、灰色、黑色、黄色、紫色、蓝色、粉色共 10 种颜色的黏虫板对柑橘木虱的诱虫效果进行筛选结果表明,黄板的诱虫效果最好,且将黄板挂向南面方位、高 150 cm 处以及间距 4-5 m 为诱集柑橘木虱最佳悬挂方式。

目前为止,研究发现黄板对柑橘木虱的诱捕效果最佳,但实际运用过程中黄板往往会捕获多种天敌昆虫,如寄生蜂和瓢虫,使用受到一定的局限。昆虫对色板的识别是基于昆虫的色视觉识别机制,它除了受到色调,即红、黄、蓝,决定以外,还受到饱和度和明度的影响(Paris *et al.*, 2017b)。因此,明确颜色饱和度和明度对柑橘木虱趋色行为的影响将有利于提高色板诱控技术的精准性。

2.3 反光膜驱避

反光膜很早就被用来驱避植物上小型的飞行昆虫,如蚜虫、蓟马和粉虱等,阻止害虫飞落到植物上取食危害。20 世纪 50 年代铝箔首次被用于蔬菜害虫和特别是桃蚜的防控,从此,各色的反光膜开始被研制,并应用于多种农作物

(Pearson *et al.*, 1959; Greer and Dole, 2003)。Croxtton 和 Stansly (2014) 年首次比较了金属化聚乙烯地膜和白色聚乙烯地膜对柑橘幼苗上木虱的效果, 结果表明金属化聚乙烯地膜对柑橘木虱具有显著的趋避效果。昆虫复眼中紫外光感受器处在的位置不同, 其功能也存在差异, 在复眼前段和上端的紫外光受体感受紫外光后能刺激昆虫起飞, 腹面的紫外光受体接受刺激是会抑制昆虫降落。金属化聚乙烯膜能大量反射日光中的紫外光, 激活昆虫腹面的紫外光受体抑制昆虫降落到植物上, 从而达到驱避昆虫的目的 (Croxtton and Stansly, 2014; Paris *et al.*, 2017a)。此外, 金属化聚乙烯膜还能降低柑橘植株上蚜虫的种群数量, 但是对潜叶蛾和瓢虫的种群没有影响 (Croxtton and Stansly, 2014)。

反光薄膜驱避柑橘木虱的原理是反射日光中的紫外线, 在使用该技术的时候植株间需要有足够的空间, 接受阳光照射, 因此该技术常被用于柑橘封行以前的幼树阶段木虱防控。目前该项技术已经在美国的佛罗里达州部分地区投入使用, 对控制柑橘木虱对幼树的危害取得了较好的效果。

2.4 防虫网

防虫网是利用物理阻隔的方法直接阻挡害虫对作物的侵害。日本在 20 世纪末开始研究无农药蔬菜栽培技术, 其中就用到到了防虫网。防虫网主要用于设施蔬菜栽培。以色列在设施园艺栽培中使用 30-50 目防虫网, 其使用面积达 18 km²。我国从 1995 年开始引入防虫网覆盖蔬菜栽培技术, 随后在柑橘无病种苗培育过程中上也开始使用防虫网阻隔害虫。在佛罗里达州的部分柑橘农场也将防虫网覆盖技术引入大型柑橘树木网室栽培中。防虫网除了能阻隔柑橘木虱以外, 还能有效阻隔柑橘上的其它害虫如潜叶蛾、粉虱和潜叶蛾等 (张小凤等, 2017)。虽然防虫网对柑橘害虫有很好的控制作用, 但是防虫网透光透气性存在差异, 直接影响网室内温度、湿度、光照强度等环境因子的变化, 导致植株光合速率、生长发育、产量和品质发生改变。袁高鹏

(2017) 及张小凤等 (2017) 研究发现防虫网栽培技术通过对柑橘害虫和网室温湿度的调控使柑橘花期提前, 显著增加新梢粗度、叶片数和节间长度, 促进新梢的生长, 但会显著减少植株产量。因此, 防虫网的材料透气性能和光学性质研究将是该项技术能够有效推广的关键。

3 结语

柑橘产业是一个巨大的经济产业, 无论是我国还是世界, 柑橘及其相关贸易都在现代经济生产中占有相当大的比重。然而, 柑橘黄龙病造成的危害对该产业产生严重的威胁。控制黄龙病媒介昆虫柑橘木虱对维持柑橘产业稳定健康发展具有重要意义。柑橘木虱绿色防控技术以生物防治与物理防治方法为主体, 具有绿色、环保、高效、持久等诸多优点, 是今后害虫可持续治理中最有效、应用前景最广的防治手段。目前, 我国实际生产中对柑橘木虱绿色防控技术的集成使用较少, 使用方式主要集中在色板、防虫网和植物源农药方面, 效果并不理想。其原因在于生物防治和物理防治技术都存在一定的技术瓶颈有待突破, 如柑橘木虱天敌的大规模饲养、天敌储藏运输、考虑各种环境因子的天敌释放、木虱病原微生物发酵施用、灯光色板精准诱控、生物/物理防治协同控害、各技术集成优化等都需在未来进行深入的研究。

参考文献 (References)

- Allan SA, 2012. Spectral sensitivity of the Asian citrus psyllid, *Diaphorina citri*. Entomological Society of America Meeting. 11. Lincoln.
- Boina DR, Onagbola EO, Salyani M, Stelinski LL, 2009. Antifeedant and sublethal effects of imidacloprid on Asian citrus psyllid, *Diaphorina citri*. *Pest Manag. Sci.*, 65(8): 870-877.
- Bové JM, 2006. Huanglongbing: A destructive, newly-emerging, century-old disease of citrus. *J. Plant Pathol.*, 88(1): 7-37.
- Cen YJ, Ye JM, Xu CB, Feng AW, 2005. The taxis of *Diaphorina citri* to the volatile oils extracted from non-host plants. *Journal of South China Agricultural University*, 26(3): 41-44. [岑伊静, 叶峻铭, 徐长宝, 冯安伟, 2005. 柑橘木虱对几种非嗜食植物挥发油的趋性反应测定. 华南农业大学学报, 26(3): 41-44.]

- Chen JL, 2012. Biological characteristics of *Diaphorina citri* Kuwayama its parasitic funi isolation and utilization. Master dissertation. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University. [陈建利, 2012. 柑橘木虱生物学特性及其高毒力病原真菌的筛选与利用. 硕士学位论文. 福州: 福建农林大学.]
- Chen XL, Stansly PA, 2014. Biology of *Tamarixia radiata* (Hymenoptera: Eulophidae), parasitoid of the citrus greening disease vector *Diaphorina citri* (Hemiptera: Psylloidea): a mini review. *Fla. Entomol.*, 97(4): 1404–1413.
- Croxton SD, Stansly PA, 2014. Metalized polyethylene mulch to repel Asian citrus psyllid, slow spread of huanglongbing and improve growth of new citrus plantings. *Pest Manag. Sci.*, 70(2): 318–323.
- Dai XY, Ren SL, Zhou YT, Ren SX, Qiu BL, 2014. Advances in biological control of citrus psyllid *Diaphorina citri*, a vector insect of citrus huanglongbing disease. *Chinese Journal of Biological Control*, 30(3): 414–419. [代晓彦, 任素丽, 周雅婷, 任顺祥, 邱宝利, 2014. 黄龙病媒介昆虫柑橘木虱生物防治新进展. 中国生物防治学报 30(3): 414–419.]
- Dai XY, Li YH, Shen ZL, Xu WM, Wu JH, Ren SX, Qiu BL, 2017. The biocontrol effects of *Beauveria bassiana* and *Isaria fumosorosea* on Asian citrus psyllid. *Journal of South China Agricultural University*, 38(1): 63–68. [代晓彦, 李翌菡, 沈祖乐, 许炜明, 吴建辉, 任顺祥, 邱宝利, 2017. 球孢白僵菌与玫烟色棒束孢制剂对柑橘木虱的防治. 华南农业大学学报 38(1): 63–68.]
- Fan GC, Liu B, Wu RJ, Li T, Cai ZJ, Ke C, 2009. Thirty years of research on citrus Huanglongbing in China. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 24(2): 183–190. [范国成, 刘波, 吴如健, 李韬, 蔡子坚, 柯冲, 2009. 中国柑橘黄龙病研究 30 年. 福建农业学报, 24(2): 183–190.]
- Gandarilla-Pacheco FL, Galán-Wong LJ, López-Arroyo JI, Rodríguez-Guerra R, Quintero-Zapata I, 2013. Optimization of pathogenicity tests for selection of native isolates of entomopathogenic fungi isolated from citrus growing areas of México on adults of *Diaphorina citri* Kuwayama (Hemiptera: Liviidae). *Fla. Entomol.*, 96(1): 187–195.
- Gottwald TR, Graca JV, Bassanezi RB, 2007. Citrus huanglongbing: the pathogen and its impact. *Plant Health Progress*. 0906–01.
- Gottwald TR, 2007. Citrus canker and citrus huanglongbing, two exotic bacterial diseases threatening the citrus industries of the western hemisphere. *Outlooks on Pest Manag.*, 18(6): 274–279.
- Grafton-Cardwell EE, Stelinski LL, Stansly PA, 2013. Biology and management of Asian citrus psyllid, vector of the huanglongbing pathogens. *Annu. Rev. Entomol.*, 58(1): 413–432.
- Greer L, Dole JM, 2003. Aluminum foil, aluminium-painted, plastic, and degradable mulches increase yields and decrease insect-vectored viral diseases of vegetables. *Horttechnology*, 13(2): 276–284.
- Hall DG, Sétamou M, Mizell III RF, 2010. A comparison of sticky traps for monitoring Asian citrus psyllid (*Diaphorina citri* Kuwayama). *Crop Prot.*, 29(11): 1341–1346.
- Hall DG, Richardson ML, Ammar ED, Halbert SE, 2013. Asian citrus psyllid, *Diaphorina citri*, vector of citrus huanglongbing disease. *Entomol. Exp. Appl.*, 146(2): 207–223.
- Hayat M, 2006. 6. Indian Encyrtidae (Hymenoptera: Chalcidoidea). Aligarh, India: Aligarh Muslim Univ. 194.
- Hoy MA, Nguyen R, Jeyaprakash A, 2001. Classical biological control of Asian citrus psylla. *Citrus Industry*, 81: 48–50.
- Ichinose K, Bang DV, Tuan DH, Dien LQ, 2010. Effective use of neonicotinoids for protection of citrus seedlings from invasion by *Diaphorina citri* (Hemiptera: Psyllidae). *J. Econ. Entomol.*, 103(1): 127–135.
- Kanga LH, Eason J, Haseeb M, Qureshi J, Stansly P, 2016. Monitoring for insecticide resistance in Asian citrus psyllid (Hemiptera: Psyllidae) populations in Florida. *J. Econ. Entomol.*, 109(2): 832–836.
- Khan I, Zahid M, Khan GZ, 2012. Toxicity of botanic and synthetic pesticide residues to citrus psyllid *Diaphorina citri* Kuwayama and *Chrysoperla carnea* (Stephens). *Pakistan. J. Zool.*, 44(1): 197–201.
- Lezama-Gutiérrez R, Molina-Ochoa J, Chávez-Flores O, Ángel-Sahagún CA, Skoda SR, Reyes-Maryínez G, Barba-Reynoso M, Rebolledo-Dominguez O, Reyes-Martínez G, Foster JE, 2012. Use of the entomopathogenic fungi *Metarhizium anisopliae*, *Cordyceps bassiana* and *Isaria fumosorosea* to control *Diaphorina citri* (Hemiptera: Psyllidae) in Persian lime under field conditions. *Int. J. Trop. Insect Sci.*, 32(1): 39–44.
- Lin HJ, 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. [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.]
- Liu YH, Tsai JH, 2015. Effects of temperature on biology and life table parameters of the Asian citrus psyllid, *Diaphorina citri* Kuwayama (Homoptera: Psyllidae). *Ann. Appl. Biol.*, 137(3): 201–206.
- Mann RS, Rouseff RL, Smoot JM, Castle WS, Stelinski LL, 2011. Sulfur volatiles from *Allium* spp. affect Asian citrus psyllid, *Diaphorina citri* Kuwayama (Hemiptera: Psyllidae), response to citrus volatiles. *B. Entomol. Res.*, 101(1): 89–97.
- Mann RS, Tiwari S, Smoot JM, Rouseff RL, Stelinski LL, 2012. Repellency and toxicity of plant-based essential oils and their constituents against *Diaphorina citri* Kuwayama (Hemiptera: Psyllidae). *J. Appl. Entomol.*, 136(1/2): 87–96.
- Mendoza-Garcia EE, Ortega-Arenas LD, Cruz MAS, Cedillo FD, Villanueva-Jimenez JA, Lope-Arroyo JI, Perez-Pacheco R, 2015.

- Biological effect of *Tagetes coronopifolia* (Asteraceae) oil against *Diaphorina citri* (Hemiptera: Liviidae). *Rev. Colomb. Entomol.*, 41(2): 157–162.
- Michaud JP, 2004. Natural mortality of Asian citrus psyllid (Homoptera: Psyllidae) in central Florida. *Biol. Control*, 29(2): 260–269.
- Navarrete B, Mcauslane H, Deyrup M, Peña JE, 2013. Ants (Hymenoptera: Formicidae) associated with *Diaphorina citri* (Hemiptera: Liviidae) and their role in its biological control. *Fla. Entomol.*, 96(2): 590–597.
- Pang H, 1991. Observation on the predation of three species of ladybugs on the adult of *Diaphorina citri* (Homoptera: Psyllidae). *Natural Enemies of Insect*, 13(4): 186–188. [庞虹, 1991. 三种瓢虫对木虱成虫的捕食量观察. *昆虫天敌*, 13(4): 186–188.]
- Paris TM, Croxton SD, Stansly PA, Allan SA, 2015. Temporal response and attraction of *Diaphorina citri* to visual stimuli. *Entomol. Exp. Appl.*, 155: 137–147.
- Paris TM, Allan SA, Udell BJ, Stansly PA, 2017a. Wavelength and polarization affect phototaxis of the Asian citrus psyllid. *Insects*, 8(3): 88.
- Paris TM, Allan SA, Udell BJ, Stansly PA, 2017b. Evidence of behavior-based utilization by the Asian citrus psyllid of a combination of UV and green or yellow wavelengths. *PLoS ONE*, 12(12): e0189228.
- Pearson RK, Odland ML, Noll CJ, 1959. Effect of aluminum mulch on vegetable crop yields. Pa. State Univ. College Agr. Prog. Rpt. 205.
- Pelz-Stelinski KS, Brlansky RH, Ebert TA, Rogers ME, 2010. Transmission parameters for *Candidatus Liberibacter asiaticus* by Asian citrus psyllid (Hemiptera: Psyllidae). *J. Econ. Entomol.*, 103(5): 1531–1541.
- Quan JC, Lao GX, Peng HY, Mao RQ, Zheng JH, 2016. Effect of guava leaf extract on repelling of citrus hibiscus. *Guangxi Plant Protection*, 29: 5–7 [王金成, 老广圻, 彭海玉, 毛润乾, 郑基煊, 2016. 番石榴叶抽提物对柑橘木虱驱避效果. *广西植保*, 29: 5–7.]
- Ren SX, Guo ZZ, 1990. The Natural Enemies of Citrus Pests and Their Utilization. Guiyang: Guizhou Science and Technology Press. 147–161. [任顺祥, 郭振中, 1990. 柑桔害虫天敌及其利用. 贵阳: 贵州科技出版社 147–161.]
- Rohrig EA, Hall DG, Qureshi JA, Stansly PA, 2012. Field release in Florida of *Diaphorencyrtus aligarhensis* (Hymenoptera: Encyrtidae), an endoparasitoid of *Diaphorina citri* (Homoptera: Psyllidae), from mainland China. *Fla. Entomol.*, 95(2): 479–481.
- Sang W, Zhu ZH, Lei CL, 2016. Review of phototaxis in insects and an introduction to the light stress hypothesis. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 53(5): 915–920. [桑文, 朱智慧, 雷朝亮, 2016. 昆虫趋光行为的光胁迫假说. *应用昆虫学报*, 53(5): 915–920.]
- Sétamou M, Sanchez A, Patt JM, Nelson SD, Jifon J, Louzada ES, 2012. Diurnal patterns of flight activity and effects of light on host finding behavior of the Asian citrus psyllid. *J. Insect Behav.*, 25(3): 264–276.
- Sétamou M, Sanchez A, Saldana RR, Patt JM, Summy R, 2014. Visual responses of adult Asian citrus psyllid (Hemiptera: Liviidae) to colored sticky traps on citrus trees. *J. Insect Behav.*, 27(4): 540–553.
- Tiwari S, Mann RS, Rogers ME, Stelinski LL, 2011. Insecticide resistance in field populations of Asian citrus psyllid in Florida. *Pest Manag. Sci.*, 67(10): 1258–1268.
- Volpe HX, Fazolin M, Garcia RB, Magnani RF, Barbosa JC, Miranda MP, 2016. Efficacy of essential oil of *Piper aduncum* against nymphs and adults of *Diaphorina citri*. *Pest Manag. Sci.*, 72(6): 1242–1249.
- Weathersbee IIIA, Mckenzie CL, 2005. Effect of a neem biopesticide on repellency, mortality, oviposition, and development of *Diaphorina citri* (Homoptera: Psyllidae). *Fla. Entomol.*, 88(4): 401–407.
- Wenninger EJ, Stelinski LL, Hall DG, 2009. Roles of olfactory cues, visual cues, and mating status in orientation of *Diaphorina citri* Kuwayama (Hemiptera: Psyllidae) to four different host plants. *Environ. Entomol.*, 38(1): 225–234.
- Yuan GP, 2017. Study on environmental factors and physiological changes of citrus trees under insect-proof screen cultivation. Master dissertation. Chongqing: Southwest University [袁高鹏, 2017. 防虫网栽培下环境因子及柑橘生理变化研究. 硕士学位论文. 重庆: 西南大学.]
- Zhang XF, Guo YJ, Jiang H, Guo LY, Zhou XQ, Hu YP, Ji QH, 2017. Effect of the change of temperature and humidity in spring insect-proof net on the growth of spring tip of *Citrus reticulata* cv. Shatangju. *Hubei Agricultural Sciences*, 56(22): 4337–4340. [张小凤, 郭雁君, 蒋惠, 郭丽英, 周希琴, 胡亚平, 吉前华, 2017. 春季防虫网温湿度变化对砂糖橘春梢生长的影响. *湖北农业科学*, 56(22): 4337–4340.]
- Zhao Z, Xia CX, Yao ZC, Yan X, Fang YW, Zhang HY, 2017. 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, 2017. 不同色板和不同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, Zaka SM, Cen YJ, 2010. Influence 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, Zaka Syed M, 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.]