

DOI: 10.12101/j.issn.1004-390X(n).201911005

光谱和光强度对柑橘木虱成虫趋光行为的影响*

袁楷, 陈祯**, 杨婷婷, 姜静, 周文健

(玉溪师范学院 化学生物与环境学院, 云南 玉溪 653100)

摘要:【目的】明确柑橘木虱的敏感光谱和光强范围, 以期为今后研发出特异性强且绿色高效的柑橘木虱光色诱控技术提供参考。【方法】利用自制的昆虫趋光行为测试装置, 测定了其成虫对 16 种不同单色光(波长范围: 340~689 nm)和 6 种光强度(光强范围: 1~100 lx)的趋光行为反应。【结果】柑橘木虱成虫对全光谱自然光和 16 种不同单色光均具有正趋光性, 无避光反应。在整个测试光谱中, 380 nm 的紫外光对柑橘木虱成虫具有最强的吸引力, 其趋向率为 83.3%, 趋向位移为 31.3 cm; 其次为 414 nm 的紫色光、492 nm 的蓝色光、549~568 nm 的黄绿色光以及 589 nm 的黄色光, 对柑橘木虱成虫也具有很强的吸引力。从趋向率和趋向位移两项测试指标来看, 柑橘木虱成虫对 380 nm 紫外光的趋光反应显著大于对全黑暗处理(CK)、全光谱自然光(WL)及紫外光(340 nm)、蓝色光(450 nm)、蓝绿色光(504 和 510 nm)、绿色光(538 nm)、黄色光(577 nm)和红色光(601、628、649 和 689 nm)10 种单色光的趋光反应($P < 0.05$)。光强度对柑橘木虱成虫的趋光行为有显著影响($P < 0.05$), 表现为对不同光强度的趋光反应趋势呈近似倒“V”字形, 即随着光强度的增加, 其趋光反应逐渐增强, 达到一峰值后又逐渐减弱。【结论】柑橘木虱成虫对不同单色光和光强度的趋光反应存在显著差异, 生产上可特制波长为 380 nm 的光源诱捕器或反射波长为 549~568 nm 的黄绿色及 589 nm 的黄色诱虫色板对其进行监测或配合其他防治方法进行综合防治。

关键词: 柑橘木虱; 趋光性; 敏感光谱; 光强; 物理防治

中图分类号: Q 965

文献标志码: A

文章编号: 1004-390X(2020)05-0750-06

Spectral Sensitivity and Response to Light Intensity of *Diaphorina citri* Kuwayama (Hemiptera: Psyllidae)

YUAN Kai, CHEN Zhen, YANG Tingting, JIANG Jing, ZHOU Wenjian

(College of Chemical Biology and Environment, Yuxi Normal University, Yuxi 653100, China)

Abstract: [Purpose] To clarify the spectral sensitivity and response to light intensity of *Diaphorina citri* (Hemiptera: Psyllidae), which is a primary pest of citrus due to its status as a vector of the citrus disease, huanglongbing (HLB), the most serious disease affecting citrus globally. [Methods] Sixteen monochromatic lights (ranging from 340 to 689 nm) and six different light intensities (ranging from 1 to 100 lx) were adopted. [Results] *D. citri* adults showed a positive phototaxis to a broad spectrum of light, with four peak of sensitivity at 380, 492, 549-568 and 589 nm. UV light (380 nm) elicited the strongest behavioral response from *D. citri*, with 83.3% of psyllids responding and a mean displacement of 31.3 cm. Both the response rates and displacements in response of *D. citri* to UV light

收稿日期: 2019-11-02

修回日期: 2020-05-29

网络首发时间: 2020-08-27 15:05:09

*基金项目: 云南省地方本科高校基础研究联合专项面上项目(2017FH001-036); 国家级大学生创新训练项目(201911390002)。

作者简介: 袁楷(2000—), 男, 云南广南人, 在读本科生, 主要从事生物科学专业学习及昆虫行为生态学研究。E-mail: peac.cz@gmail.com

**通信作者 Corresponding author: 陈祯(1983—), 男, 甘肃陇西人, 博士, 讲师, 主要从事昆虫行为生态学、资源昆虫及害虫综合治理研究。E-mail: cz@yxnu.edu.cn

网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/53.1044.S.20200826.1628.002.html>



(380 nm) were significantly higher than the response rates and displacements in the ten other monochromatic light treatments ($P<0.05$), including 340, 450, 504, 510, 538, 577, 601, 628, 649 and 689 nm. Furthermore, the phototactic response of *D. citri* to monochromatic light (549 nm) showed an 'Λ' shaped curve as light intensity increased. The psyllid response to different wavelengths and light intensities were significantly different ($P<0.05$). [**Conclusion**] We suggested that UV (380 nm) light source or green-yellow (549-568 nm) and yellow (589 nm) colour trap boards could be used for monitoring and controlling *D. citri*.

Keywords: *Diaphorina citri*; phototaxis; spectral sensitivity; light intensity; physical control

柑橘木虱 [*Diaphorina citri* Kuwayama (Hemiptera: Psyllidae)] 是柑橘类作物的主要害虫, 也是柑橘黄龙病病原 (*Candidatus Liberibacter asiaticus*) 主要的自然传播者, 目前已成为柑橘生产中危害最为严重的害虫^[1]。生产上对柑橘黄龙病尚无有效直接的防治技术手段, 主要通过严格防治柑橘木虱切断传播媒介来达到预防柑橘黄龙病发生的目的^[2-3]。目前柑橘木虱的防控主要依赖化防^[1-4], 而大量使用化学农药不仅导致害虫抗药性持续增强, 还导致柑橘农残超标和环境污染等诸多问题^[5]。在生物防治上主要采用一些植物或微生物源农药及利用天敌进行防治。但生物防治一般防效较慢, 易受环境因素干扰和影响^[6-8]。目前已知的大部分昆虫具有趋光或避光性, 趋(避)光性是昆虫在进化过程中所形成的一种固有属性^[9]。利用昆虫的趋光特性诱控害虫具有成本低、操作简单和对环境友好等优点。然而, 由于不同种类昆虫复眼对不同波长光的敏感度不同^[10-11], 而目前商品化的诱虫灯及色板的波谱范围宽泛、光色标准和量值没有针对性, 这不仅弱化其诱控效果, 也会对天敌昆虫等造成误伤^[12-13]。目前, 对柑橘木虱趋光性的研究鲜有报道。国内仅见李超峰等^[14]在室内测定了6种不同光色的LED灯光对该成虫的趋光率, 卢慧林等^[15]测试了LED单波光源与矿物油组合对其成虫的诱控效果; 国外仅见PARIS等^[16]报道了柑橘木虱对5种不同光色LED光源的趋光反应, ZAGVAZDINA等^[17]报道了大气压变化对柑橘木虱趋光反应的影响。尽管以上学者对柑橘木虱的趋光性进行了研究, 但所选的光源数量较少, 涉及的波谱范围较窄, 且均未考虑光强度对柑橘木虱趋光行为的影响。光强度和波长是光波最重要的2个特征属性, 相同光强的不同单色光或同一光色的不同光强刺激可引发昆

虫不同的光行为。为初步明确柑橘木虱的趋光行为特性, 筛选出该虫较敏感的趋、避光色及光强, 本研究利用自制的趋光行为反应测试装置, 测定柑橘木虱成虫对16种不同单色光(波长范围: 340~689 nm)和6种光强度(光强范围: 1~100 lx)的趋、避光率及位移, 以期为今后研发出特异性强且绿色高效的柑橘木虱光色诱控技术及作为柑橘木虱重要的监测手段或综合防治的有效措施提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料

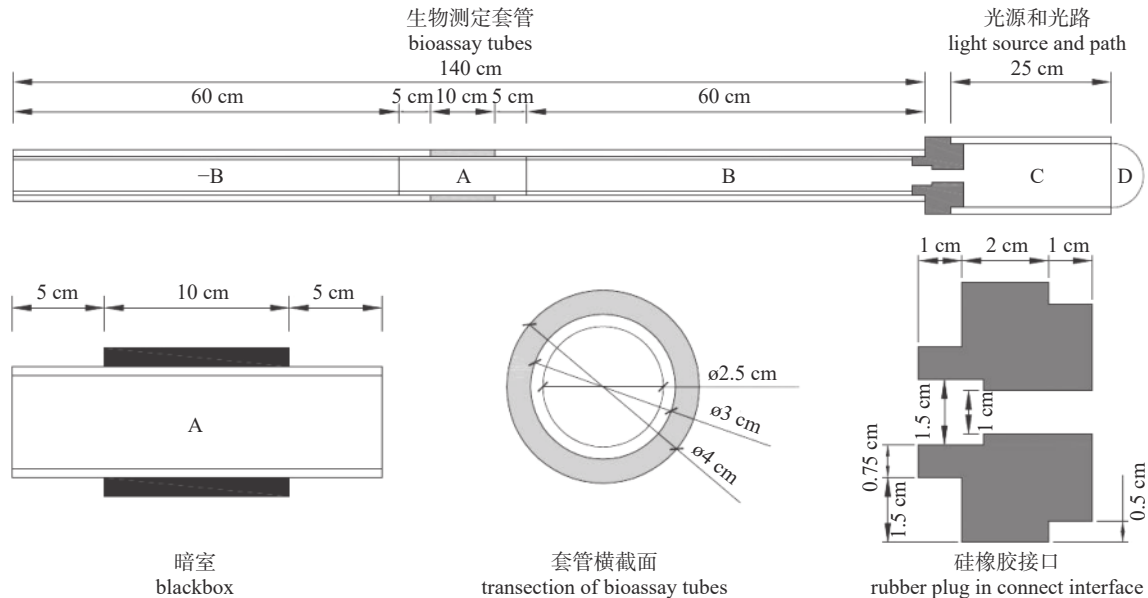
供试虫源: 供试的柑橘木虱种源采自云南省玉溪市新平县嘎洒镇柑橘园(N24°02'10.74", E101°34'37.94"), 将采集的柑橘木虱成虫及若虫接入网室(长×宽×高=60.0 cm×60.0 cm×120.0 cm, 100.0 目/cm²)中盆栽的柑橘苗上, 在温度(29.0±1.0)℃, 相对湿度(60.0±5.0)%室内繁育1代后, 取成虫进行趋光反应测试。测试前, 所有试虫均进行5 min的暗适应处理。

1.2 测试装置

在参考CHEN等^[18]趋光行为测试装置的基础上, 改进并自制了柑橘木虱趋光行为测试装置。该装置主要由光源区(卤素光源、光路和干涉滤光片)、连接区(硅橡胶接口)和测试区(测试套管、暗室)组成(图1)。

1.2.1 光源区

光源: 所选光源为卤素灯杯(厂家: OSRAM; 型号: MR16; 功率: 50 W; 辐射光谱范围300~2 500 nm)。光路: 光路由1根钢管构成(图1中C部分; 规格: 长×外径×内径=30.0 cm×6.0 cm×5.0 cm), 光路左端与硅橡胶接口(图1右下黑色部分)相接, 右端与光源相接。干涉滤光片: 单



注: A. 试虫释放区; +B 和 -B. 位移测量区; C. 光源区; D. 卤素灯杯。

Note: A. release area of *D. citri*; -B and +B. measurement area of displacement; C. area of light source; D. halogen lampcup.

图 1 柑橘木虱趋光行为测定装置示意图

Fig. 1 A schematic diagram of experimental set-up for evaluating the phototactic response of *Diaphorina citri*

色光通过干涉滤光片获得, 共选用了 16 种相同规格不同波长的干涉滤光片 (厂家: 汇博光学; 规格: 镜片直径×保护套直径×厚度=1.0 cm×1.5 cm×0.5 cm), 其波长分别为 340、380、414、450、492、504、510、538、549、568、577、589、601、628、649 和 689 nm。通过调节滑动变阻器 (厂家: 上海灵欧电阻器有限公司; 型号: BX7-11) 获得所需光强。

1.2.2 连接区

连接区由打磨成型中间钻通的硅橡胶塞 (规格参数详见图 1) 构成, 其左端可放置滤光片, 右端可连通光路。

1.2.3 测试区

测试区由生物测定套管 (图 1 中 -B 和 +B 部分) 和暗室 (图 1 中 A 部分) 构成。测试套管由 2 根不透光的 PP-R 外套管 (规格: 长度×外径×内径=60.0 cm×4.0 cm×3.0 cm) 和透明的有机玻璃内衬管 (规格: 长度×外径×内径=60.0 cm×3.0 cm×2.5 cm) 构成, 内衬管外壁刻上 60.0 cm 的标准长度量度, 用于测量试虫的趋光位移。暗室 (图 1 中 A 部分) 由 1 根不透光的 PP-R 外套管 (规格: 长度×径×内径=10.0 cm×4.0 cm×3.0 cm) 和透明的有机玻璃内衬管 (规格: 长度×外径×内径=20.0 cm×3.0 cm×2.5 cm) 构成, 其功能是作为测试前试

虫的暗适应活动区及测试开始时试虫的释放区。

1.3 研究方法

1.3.1 柑橘木虱对不同单色光的行为反应测试

柑橘木虱对不同单色光的趋光行为反应试验采用以上装置 (图 1) 进行。该测试包括全黑暗对照处理 (CK)、全光谱自然光处理 (WL) 及 16 种不同波长单色光处理, 共 18 个处理。整个测试过程中室内温度恒定在 (29.0±1.0) °C, 相对湿度保持在 (60.0±5.0)%。

全黑暗对照处理: 该测试不涉及光源区 (图 1 中 C、D 部分), 只涉及 -B、A 和 +B 部分, 测试套管两端的开口处均用黑色不透光橡胶塞封堵, 目的是检查柑橘木虱在无光环境下的爬行情况, 作为试验对照处理。

全光谱自然光处理: 该测试采用以上完整的测试装置 (图 1) 进行, 左端 (-B) 的开口处用黑色不透光橡胶塞封堵, 右端 (+B) 让卤素灯杯产生的全光谱自然光直接通过硅橡胶塞中心孔进入测试区, 目的是检查柑橘木虱是否具有趋光性。

不同波长单色光处理: 该测试采用以上完整的测试装置 (图 1) 进行, 左端 (-B) 的开口处用黑色不透光橡胶塞封堵, 右端 (+B) 通过在硅橡胶接口处放置不同波长干涉滤光片获得不同光色的单色光, 目的是测试柑橘木虱对不同单色光的趋

光行为反应。测试过程: 首先, 将试虫置于暗室 (图 1A 部分), 迅速用黑色橡胶塞将暗室的两端封堵, 防止试虫逃离。然后, 用黑色遮光布将暗室包裹, 防止光线进入暗室。待置于暗室的试虫经过 5 min 暗适应后, 揭掉遮光布, 去掉暗室 (A) 两侧的橡胶塞, 迅速将暗室与测试套管-B 和 +B 部分相连, 且在外套管接口处包裹遮光布防止连接处漏光。测试光强恒定为 40 lx, 测试时间为 3 min。3 min 后, 迅速抽出内衬管, 记录柑橘木虱的位移。每次测试完之后用酒精擦拭管壁, 并用纯净水清洗, 然后用吹风机吹干后再进行一次测试。测试过的柑橘木虱不再重复使用。

全黑暗对照处理、全光谱自然光处理及 16 种不同波长单色光处理均分别测试 3 组, 每组测试 10 头, 每次测试 1 头成虫, 重复 30 次。每个处理计算趋向率。

趋向率 = 有效趋光反应的虫数/试虫数 × 100%。

1.3.2 柑橘木虱对不同光强的行为反应测试

柑橘木虱成虫对不同光强的趋光行为反应试验采用相同的测试装置 (图 1)、测试方法和环境条件。选择试验 1.3.1 节中趋光性较强的 549 nm 的黄绿色光作为光强行为反应试验的测试光源。该测试光源设 6 个光强梯度, 分别为 1、20、40、60、80 和 100 lx。每个光强处理分别测试 3 组, 每组测试 10 头, 每次测试 1 头成虫, 重复 30 次。

测试时间为 3 min, 测试过的柑橘木虱不再重复使用。

1.4 数据分析

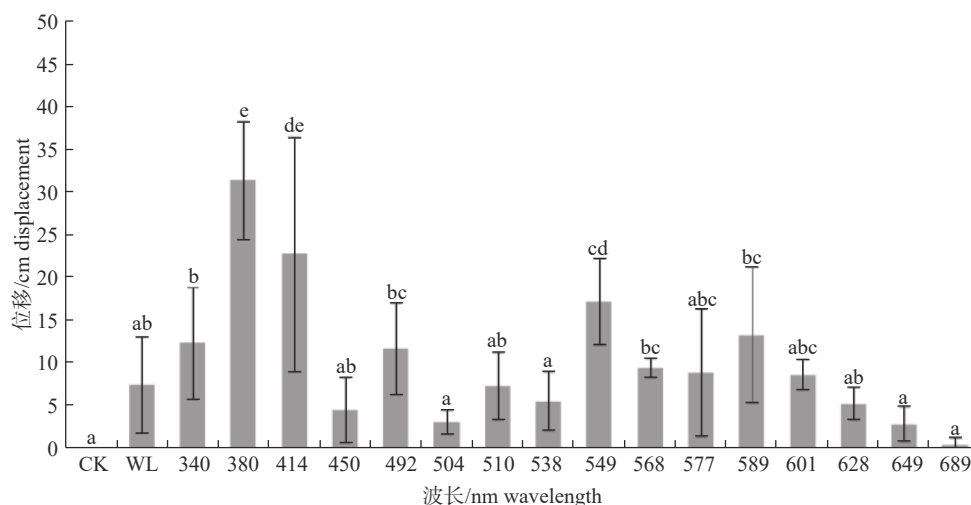
采用 SPSS 19.0 软件对数据进行统计分析。柑橘木虱成虫在不同单色光 and 不同光强处理下的趋向位移显著性差异分别进行单因素方差分析 (ANOVA, LSD)。根据统计结果, 按照 CIF 1931 色度图上的颜色区域^[19], 分析柑橘木虱成虫对不同颜色的趋性。

2 结果与分析

2.1 对不同单色光的行为反应

柑橘木虱对全光谱处理和 16 种单色光处理的趋向反应与全黑暗空白对照处理存在显著性差异 (ANOVA, $F_{17,53}=9.451$, $P=0.000$; 图 2、3)。成虫对全光谱处理和 16 种单色光处理的趋向位移和趋向率均大于全黑暗空白对照处理。空白对照组中所有试虫待在释放区没有作出移动反应; 全光谱测试中成虫的趋向率为 (36.7±5.8)%, 趋向位移为 (7.5±5.6) cm。

在整个测试光谱中, 380 nm 的紫外光对柑橘木虱成虫具有最强的吸引力, 其趋向率为 (83.3±5.8)%, 趋向位移为 (31.3±6.9) cm。414 nm 的紫色光、492 nm 的蓝色光、549~568 nm 的黄绿色光以及 589 nm 的黄色光对柑橘木虱成虫也具有



注: WL. 全光谱自然光处理; CK. 表示全黑暗对照处理; 不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$); 下同。

Note: WL. a white light control using the whole spectrum of halogen light; CK. dark control (no light); different letters mean significant difference ($P < 0.05$); the same as below.

图 2 全光谱、黑暗和不同单色光刺激下柑橘木虱趋向位移比较 (mean±SE)

Fig. 2 The displacement of *D. citri* in the experimental arena in response to monochromatic light of various wavelengths

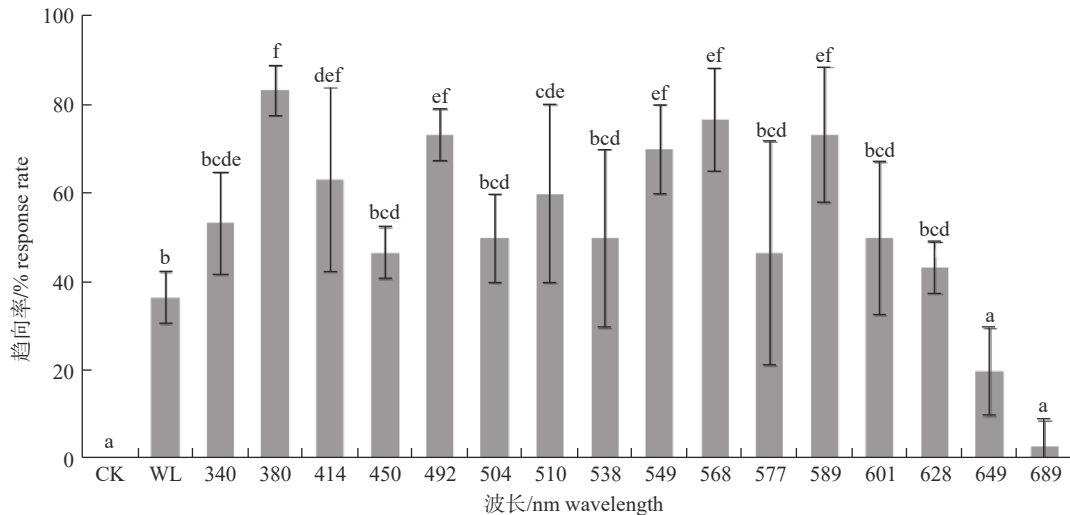


图 3 全光谱、黑暗和不同单色光刺激下柑橘木虱趋向率比较 (mean ± SE)

Fig. 3 The response rates of *D. citri* to monochromatic light of various wavelengths

很强的吸引力。从趋向率和趋向位移 2 项测试指标来看, 柑橘木虱成虫对 380 nm 紫外光的趋光反应显著大于对全黑暗处理 (CK)、全光谱自然光 (WL) 及紫外光 (340 nm)、蓝色光 (450 nm)、蓝绿色光 (504 和 510 nm)、绿色光 (538 nm)、黄色光 (577 nm) 和红色光 (601、628、649 和 689 nm) 10 种单色光的趋光反应。

2.2 对不同光强度的行为反应

柑橘木虱成虫对 549 nm 的黄绿色光不同光强度的趋向反应存在显著性差异 (ANOVA, $F_{5,17}=3.532$, $P=0.034$; 图 4), 其趋光反应具体表现为:

20>40>1>60>80>100 lx。在 1~100 lx 的测试光强范围内, 柑橘木虱成虫对不同光强度的趋光反应趋势呈近似倒“V”字形, 即随着光强度的增加, 其趋光反应逐渐增强, 达到峰值后又逐渐减弱。从趋向率和趋向位移 2 项测试指标来看, 光强度为 20 lx 时, 成虫的趋向反应最强, 其趋向率为 (76.7±20.8)%, 趋向位移为 (22.2±9.2) cm, 显著高于光强度为 100 lx 的趋向反应。光强度为 100 lx 时, 成虫的趋向反应最低, 其趋向率为 (36.7±5.8)%, 趋向位移仅为 (3.8±1.1) cm。

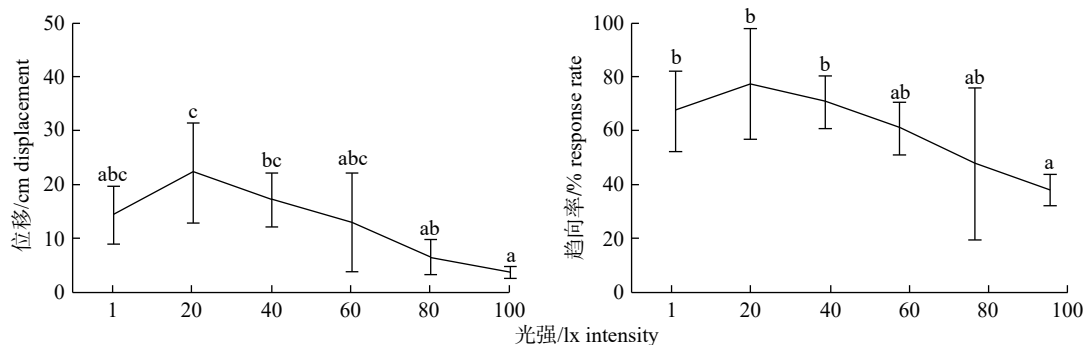


图 4 不同光强绿色光 (549 nm) 柑橘木虱趋向位移和趋向率

Fig. 4 The displacement and response rate of *D. citri* to different intensities of green (549 nm) light

3 讨论

近年来, 光趋性已在世界各地被广泛用于害虫防治及监测预报。然而, 作为长期进化而具有的高度复杂适应性的生理特征, 昆虫光趋性的机理和应用研究还有很大的难题和潜力。在基础理

论研究方面, 昆虫趋光行为的具体机理尚未得到科学的解释; 对昆虫色泽识别机理和昆虫趋光性机理的关系没有进行系统研究; 在田间应用研究方面, 专一性针对特定害虫、减少或避免对天敌昆虫的误伤方面的研究仍亟待开展。本研究结果

表明: 380 nm 的紫外光对柑橘木虱成虫的吸引力最强, 趋向率高达 83.3%, 其次, 414 nm 的紫光、492 nm 的蓝色光、549~568 nm 的黄绿色光以及 589 nm 的黄色光对柑橘木虱成虫也具有很强的吸引力, 这与 PARIS 等^[16]报道柑橘木虱对 390 nm 紫外光和 590 nm 黄色光表现出较强趋性的结论相似。值得注意的是, PARIS 等^[16]的研究结果表明: 柑橘木虱成虫对 525 nm 的绿色光表现出了较强的趋性; 但本研究结果表明: 该成虫对波长接近 525 nm 的蓝绿色光 (510 nm) 和绿色光 (538 nm) 并未表现出较强的趋性, 未来柑橘木虱复眼的视网膜电生理反应 (electroretinogram) 研究将有助于进一步揭示其感光和趋光机理。李超峰等^[14]在室内测定 6 种不同光色的 LED 灯光对柑橘木虱成虫趋光率的结果表明: 相比较蓝光 (470~475 nm)、绿光 (520~525 nm)、黄光 (590~592 nm) 和红光 (620~630 nm), 该成虫对 365~370 nm 的紫外光的趋光率最高, 为 66.6%~71.4%; 卢慧林等^[15]在自建避光帐篷内的测试结果表明: 波长为 340 nm 的 LED 荧光灯光源对该成虫的诱集率显著高于同功率 (12V、8W) 的 380 nm 的 LED 荧光灯光源, 其结果与本试验有一定出入, 可能与试验选择的测试光强不同有关。由此可见, 柑橘木虱成虫对 340~390 nm 的紫外光源具有很强的趋性。基于以上研究, 在生产上可考虑设计波长为 340~390 nm 的紫外光源与反射光谱为 549~568 nm 的黄绿色或 589 nm 的黄色诱虫色板组合诱虫装置对柑橘木虱成虫进行诱控, 理论上可提高诱集效果, 这需要进一步的田间试验验证。

除光谱以外, 光强度也是影响昆虫趋光行为的重要因子。本研究结果表明: 光强度对柑橘木虱成虫的趋光行为影响显著, 表现为对不同光强度的趋光反应趋势呈近似倒“V”字形, 即随着光强度的增加, 其趋光反应逐渐增强, 达到峰值后又逐渐减弱。可见并非光强越大, 昆虫的趋光性越强。这种现象在其他昆虫中也普遍存在。如魏国树等^[20]对棉铃虫蛾 (*Helicoverpa armigera*) 的研究发现: 一定光强度范围内, 棉铃虫蛾的趋光率随白光和单色光强度的增强而快速增大, 增至一定强度时增速变缓, 呈近似“S”形, 作者认为棉铃虫蛾仅在一定光强阈值内其复眼处于活跃状态, 超出该阈值时将受到抑制或处于非活跃状

态, 从而得出光强度强弱直接影响其趋光行为表现的结论。因此, 为达到最佳的诱集效果, 在田间应用灯光诱集柑橘木虱时, 应考虑光源的亮度以及光源与诱集对象之间的设置距离。ZAGV-AZDINA 等^[17]报道了大气压变化对柑橘木虱趋光反应的影响, 结果显示: 在 9~24 h 的时间范围内, 柑橘木虱的趋光反应随着大气压的持续降低而逐渐增强。可见, 环境因子对昆虫趋光行为的影响不容忽视。昆虫栖息的光环境和气象因子等环境要素对其趋光行为的影响将是昆虫趋光性研究的另一热点问题。

4 结论

因直接危害柑橘嫩梢及传播柑橘黄龙病病原, 柑橘木虱已成为柑橘生产中威胁最大的害虫, 迫切需要开发出新型、绿色、高效的综合防控技术, 而利用其趋光特性研发专一性诱控装置作为监测手段或综合防治措施之一具有一定的应用前景。本研究结果为研发特异性强的诱虫色板以及光源诱捕器高效防治柑橘木虱提供了理论支持。

[参考文献]

- [1] DA GRACA J V, DOUHAN G W, HALBERT S E, et al. Huanglongbing: an overview of a complex pathosystem ravaging the world's citrus[J]. *Journal of Integrative Plant Biology*, 2016, 58(4): 373. DOI: 10.1111/jipb.12437.
- [2] BOINA D R, BLOOMQUIST J R. Chemical control of the Asian citrus psyllid and of huanglongbing disease in citrus[J]. *Pest Management Science*, 2015, 71(6): 808. DOI: 10.1002/ps.3957.
- [3] 陈凯男, 李充璧. 柑橘黄龙病研究概况 [J]. *浙江农业科学*, 2015, 56(7): 1048. DOI: 10.16178/j.issn.0528-9017.20150730.
- [4] 陈丽芬, 徐昭焕, 王建国. 柑橘木虱的研究进展 [J]. *贵州农业科学*, 2016, 44(6): 43. DOI: 10.3969/j.issn.1001-3601.2016.06.013.
- [5] 邓明学, 潘振兴, 谭有龙, 等. 柑橘木虱对 4 种新烟碱类杀虫剂的交互抗性 [J]. *农药*, 2012, 51(2): 153. DOI: 10.3969/j.issn.1006-0413.2012.02.025.
- [6] 代晓彦, 任素丽, 周雅婷, 等. 黄龙病媒介昆虫柑橘木虱生物防治新进展 [J]. *中国生物防治学报*, 2014, 30(3): 415. DOI: 10.3969/j.issn.2095-039X.2014.03.022.
- [7] 宋晓兵, 彭埃天, 程保平, 等. 利用虫生真菌生物防治柑橘木虱的研究进展 [J]. *生物安全学报*, 2016, 25(4): 256. DOI: 10.3969/j.issn.2095-1787.2016.04.003.

(下转第 884 页)