

橘小实蝇对不同波长单色光及不同颜色LED灯的趋性反应

徐瑞瑞¹, 刘召², 任小云³, 张起恺⁴, 王海鸿¹, 王兆勇⁵, 雷仲仁^{1*}

(1. 中国农业科学院植物保护研究所, 植物病虫害生物学国家重点实验室, 北京 100193; 2. 西南大学植物保护学院, 北碚 400715; 3. 临沂大学农林科学学院, 临沂 276000; 4. 中国热带农业科学院环境与植物保护研究所, 农业农村部热带作物有害生物综合治理重点实验室, 海口 571101; 5. 青岛中益农生物科技有限公司, 青岛 266000)

摘要 橘小实蝇是一种世界性检疫害虫, 严重威胁我国的果蔬生产。本研究利用昆虫趋光性, 在室内使用光谱范围广、高分辨率单色仪以及自制昆虫趋光行为反应盒测定橘小实蝇雌、雄成虫在交配前后对8种不同波长单色光的行为反应, 并利用智能调控波长LED灯测定橘小实蝇雌雄虫对不同颜色光的趋向率。结果表明, 橘小实蝇雌成虫交配前趋光率较高的光为400 nm紫光和550 nm黄绿光, 交配后为500 nm绿光、550 nm黄绿光; 雄成虫交配前对400 nm紫光、500 nm绿光和550 nm黄绿光敏感, 交配后对紫光区400 nm和黄光区575 nm敏感; 趋向率对比试验中, 与日光对比, 雌成虫明显更加趋向506 nm绿光, 雄成虫则对506 nm绿光和553 nm黄绿光的趋向率更高。综合分析橘小实蝇在单色光刺激下的趋避光行为反应和对不同颜色LED灯趋向反应, 可见橘小实蝇对绿光和黄绿光更为敏感。

关键词 橘小实蝇; 趋光行为; 绿色防控; 波长

中图分类号: S 433 **文献标识码:** A **DOI:** 10.16688/j.zwbh.2022047

Phototaxis response of *Bactrocera dorsalis* (Hendle) to different wavelengths of monochromatic light and LED lights of different colors

XU Ruirui¹, LIU Zhao², REN Xiaoyun³, ZHANG Qikai⁴, WANG Haihong¹, WANG Zhaoyong⁵, LEI Zhongren^{1*}

(1. State Key Laboratory for Biology of Plant Diseases and Insect Pests, Institute of Plant Protection, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100193, China; 2. College of Plant Protection, Southwest University, Beibei 400715, China; 3. College of Agriculture and Forestry Science, Linyi University, Linyi 276000, China; 4. Key Laboratory of Integrated Pest Management on Tropical Crops, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Institute of Environment and Plant Protection, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences, Haikou 571101, China; 5. Qingdao Zhongyinong Biotechnology Co., Ltd., Qingdao 266000, China)

Abstract The oriental fruit fly, *Bactrocera dorsalis* (Hendle), is a quarantine pest in the world, which seriously threatens the production of fruits and vegetables in China. In this study, the behavioral responses of males and females of *B. dorsalis* to eight different wavelengths of monochromatic light before and after mating were detected by using a high-resolution monochromator device with a wide spectrum measurement range and a self-made phototactic response box, and the phototactic rates of male and female *B. dorsalis* to light of different colors were measured by intelligent wavelength controlled LED lights. The results indicated that the wavelengths eliciting a higher phototaxis response from female adults before mating were the purple light at 400 nm and the yellowish-green light at 550 nm. After mating, the sensitive light range for female adults was the green light at 500 nm and yellowish-green light at 550 nm. Before mating, the sensitive wavelengths for male adults were the purple light at 400 nm, green light at 500 nm and the yellowish-green light at 550 nm. The sensitive light wavelengths range for

收稿日期: 2022-01-24 修订日期: 2022-01-31

基金项目: 国家现代农业产业技术体系建设专项(CARS-23-C06)

* 通信作者 E-mail: leizhr@sina.com

male adults after mating were the purple light at 400 nm and the yellow light at 575 nm. In comparison experiments, the female adults showed a stronger phototaxis to the green light (506 nm), and the phototactic rates of the male adults were significantly higher to green light (506 nm) and yellowish-green light (553 nm) than to sunlight. Based on comprehensive analysis of the phototaxis and photophobism responses of *B. dorsalis* to monochromatic light and its phototactic rate to LED light of different colors, the results indicated that *B. dorsalis* was most sensitive to green light and yellowish-green light.

Key words *Bactrocera dorsalis*; phototactic behavior; green prevention and control; wavelength

橘小实蝇 *Bactrocera dorsalis* (Hendle) 属双翅目 Diptera、实蝇科 Tephritidae, 别名柑橘小实蝇、果蛆、东方果实蝇等, 是一种世界性检疫害虫, 主要以幼虫取食为害果实, 寄主范围十分广泛, 可为害多达 46 科 250 余种果蔬, 给多国果蔬、花卉产业造成了十分严重的经济损失, 严重威胁着我国的果蔬生产^[1-2]。橘小实蝇原产于东南亚, 是热带和亚热带国家果蔬产区的主要害虫, 自 1911 年在我国台湾首次发现、1937 年在大陆有记载之后, 现已广泛分布于我国台湾、香港、广东、云南、四川、贵州等地, 近年在河北、山东、北京等北方地区也发生为害^[3-4]。橘小实蝇是一种防治困难的危险性检疫害虫, 目前最有效的方法还是化学防治, 但随着化学农药的大量和连续使用, 橘小实蝇已经对多种杀虫剂产生了不同程度的抗药性^[5], 同时由于农药的长期过量使用也导致了环境污染和生物多样性的丧失^[6]。因橘小实蝇为害的大多是与人类健康紧密联系的果蔬, 因此需要寻求绿色、更加安全有效的防治方法。

趋光性是大多数昆虫都具有的特性, 对昆虫的各种行为活动都能够产生一定影响, 进入 21 世纪以来, 利用昆虫的趋光性防治害虫越来越普遍, 利用昆虫趋光性开发的诱虫板、诱虫灯等产品, 相比化学药剂来说都是比较高效环保的, 在一定程度上能够延缓害虫抗药性, 具有对环境友好、操作简便、防治成本低等优点^[7-8]。刘晓英等^[9]利用诱虫灯探究果蝇 *Drosophila* 的趋光性, 发现其趋性最强的为波长 560 nm 的黄绿光; 周庆贤等^[10]利用光波技术诱捕橘小实蝇, 结果显示诱捕效果最好的组合为黄色粘板+橙汁; Li 等^[11]研究发现对南亚果实蝇 *Bactrocera tau* (Walker) 捕获效果最佳的波长是 595 nm(黄色)和 568 nm(黄绿色)。市场上现有的利用橘小实蝇的趋光趋色特性研发的诱虫色板、诱虫灯、诱蝇球等产品, 因其大多数波谱范围较为宽泛, 颜色标准不够精确, 一定程度上会减弱其捕获效果。目前针对橘小实蝇趋性的研究主要停留在颜色偏好上, 但对

橘小实蝇的趋光特性的研究鲜有报道, 因此有必要筛选橘小实蝇的最佳趋光波长。

本研究通过对橘小实蝇的雌雄虫分别进行不同波长单色光的刺激, 筛选橘小实蝇雌虫以及雄虫的最佳敏感光谱, 同时对交配前后的橘小实蝇雌雄虫进行单色光刺激, 探究橘小实蝇的交配行为是否对其趋光行为产生影响, 并对比橘小实蝇雌雄虫对日光与不同颜色 LED 灯的趋向率, 探究不同颜色光对其趋性的影响, 以此初步明确橘小实蝇的趋光特性, 为更好地利用趋光特性发展橘小实蝇绿色安全的防治策略提供依据。

1 材料与方法

1.1 材料

橘小实蝇 *Bactrocera dorsalis* 虻由西南大学昆虫分子生态研究团队提供, 置于光照培养箱 (MLR-351H, Sanyo Electric Co. Ltd.) 中, 待其羽化后用橙汁饲喂, 饲养条件为温度 (25±1)℃, 相对湿度 60%~70%, 光周期 L//D=14 h//10 h。

1.2 试虫处理

在橘小实蝇蛹期将其用离心管分装, 待其羽化分辨雌雄之后放入不同的笼子内饲养, 分别挑选羽化后 10 日龄的橘小实蝇雌雄成虫供试。在试验前准备好待测试虫, 在指形管底部放置一块橙汁浸湿的脱脂棉球供成虫取食, 每管接入 15 头待测试虫, 脱脂棉封口以防止试虫逃逸。为了保证供试成虫的复眼对光的适应状态保持一致, 在每次进行光刺激试验之前, 将试虫置于黑暗环境中适应 2 h 后再进行趋光行为试验。

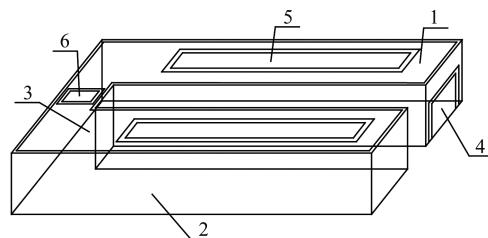
1.3 行为反应光路与试验装置

光谱行为反应试验中所用光源为 150 W 德国进口灯泡高压氙灯光源 HGILX150, 单光栅单色仪 HGIMS3012, 分辨率 0.1 nm, 光谱范围 330~1 000 nm, 均购买于北京衡工有限公司。趋光行为测试装置参照范凡、米娜等^[12-14]的设计制作。趋光

行为反应盒(图 1)整体呈 U 型,由趋光室($30\text{ cm} \times 6\text{ cm} \times 7\text{ cm}$)、避光室($30\text{ cm} \times 6\text{ cm} \times 7\text{ cm}$)、反应活动室($4\text{ cm} \times 3\text{ cm} \times 7\text{ cm}$)三部分组成,为了便于统计观察,趋光室和避光室上部配有透明亚克力有机玻璃板制成的盖子,其余部分均为不透明的黑色亚克力有机玻璃板^[13]。

对不同颜色光趋向率试验中所用测试装置包括可智能调节波长的 LED 光源、黑色不透明亚克力有机玻璃材料的隔光盒(含多个单光源室、暗室和一个反应室)、透明的十字形接虫 4 臂管(图 2)。每个 LED 灯对应一个单光源室,调整灯的位置,使 LED 灯产生的光照射于接虫 4 臂管的支管外端处,从而营

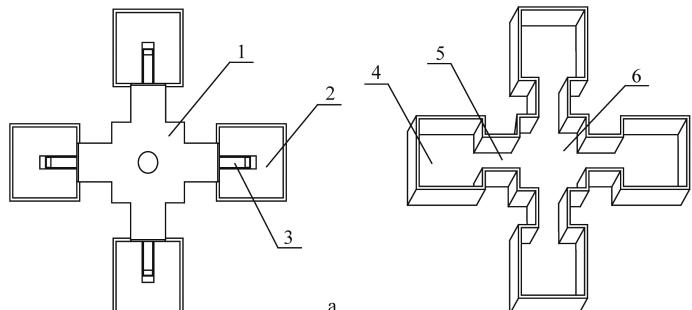
造出不同波长颜色光的趋光通道,位于接虫管主管内的试虫能快速观察到光线并做出趋性选择^[15]。



1: 趋光室; 2: 避光室; 3: 反应活动室; 4: 光源入口; 5: 透明盖子; 6: 放虫小孔。
1: Phototactic response chamber; 2: Photophobic response chamber; 3: Activity chamber; 4: Light source; 5: Transparent lid; 6: Insect entrance hole.

图 1 U型趋光行为反应盒

Fig. 1 U-type phototactic response box



a: 趋光行为测试装置俯视图(1: 挡光盖板; 2: 隔光盒; 3: 接虫4臂管)。
a: Top view of the device used for testing phototactic behavior (1: Light barrier; 2: Light-isolating box; 3: Insect entrance tube with four arms).

b: 隔光盒(4: 单光源室; 5: 暗室; 6: 反应室)。c: 接虫4臂管(7: 盖子; 8: 主管; 9: 支管; 10: 管塞)。
b: Light-isolating box (4: Single light chamber; 5: Dark chamber; 6: Response chamber). c: Insect entrance tube with four arms (7: Lid; 8: Main tube; 9: Branch tube; 10: Tube plug).

图 2 趋光行为测试装置

Fig. 2 Device used for testing phototactic behavior

1.4 试验方法

1.4.1 橘小实蝇对单色光趋光行为反应测定

试验方法参照米娜等^[13],整个试验在黑暗无光的环境中进行,选取 350、400、450、500、550、575、600、625 nm 等 8 种波长的单色光,每次试验选取同日羽化的 10 日龄橘小实蝇雌虫或雄虫 15 头。试验开始前,将趋光室、避光室上部用相应的盖子盖好,将暗适应处理后的试虫从小孔放入反应活动室,盖好放虫孔,以防止试虫逃逸,用黑布将趋光行为反应装置盖好。试验时,调整趋光行为反应装置光源入口位置,让单色光经聚光镜之后聚于趋光室,位于反应活动室的试虫可同时观察到趋光室和避光室的情况,从而做出趋光或避光行为选择^[13]。每次光刺激 15 min,结束后立即取出趋光行为反应盒,迅速统计趋光室以及避光室内试虫的个数,计算相应的趋光率和避光率。试验重复 3 次。为了减少试验误差,

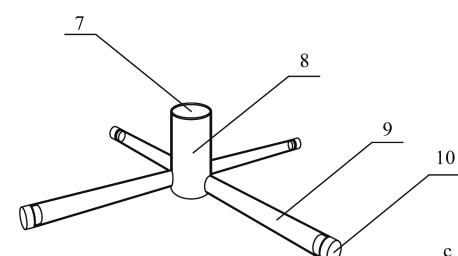
每次试验结束之后均要更换新的试虫,不重复使用。同时对交配后的橘小实蝇雌虫、雄虫也进行上述趋光行为试验。

$$\text{趋光率} = \frac{\text{趋光室内虫数}}{\text{试虫总数}} \times 100\%$$

$$\text{避光率} = \frac{\text{避光室内虫数}}{\text{试虫总数}} \times 100\%.$$

1.4.2 橘小实蝇对不同颜色光趋向率的测定

试验选取紫色(412 nm)、蓝色(465 nm)、绿色(506 nm)、黄绿色(553 nm)、红色(682 nm)5 种不同颜色波长的 LED 光源灯。整个试验在黑暗环境中进行。试验前,检查测试装置(图 2),将接虫 4 臂管 4 个端口用管塞塞好,通过 LED 灯智能调试功能设置好试验所需光源(日光灯作对照,波长范围为 400~750 nm)。试验时,将暗处理后的试虫接入 4 臂管主管中,用封口膜封口以防止昆虫逃逸,迅速将接虫管置于隔光盒内,盖好挡光盖板,光刺激 15 min,关闭 LED 灯,取下挡光盖板,快速观察并记录试虫在 4



臂管各趋光通道内的分布情况,计算相应的趋向率。每次试验选取同日羽化橘小实蝇雌虫或雄虫 15 头,试验重复 3 次。

趋向率=趋向某颜色光的虫数/做出趋向选择的试虫总数×100%。

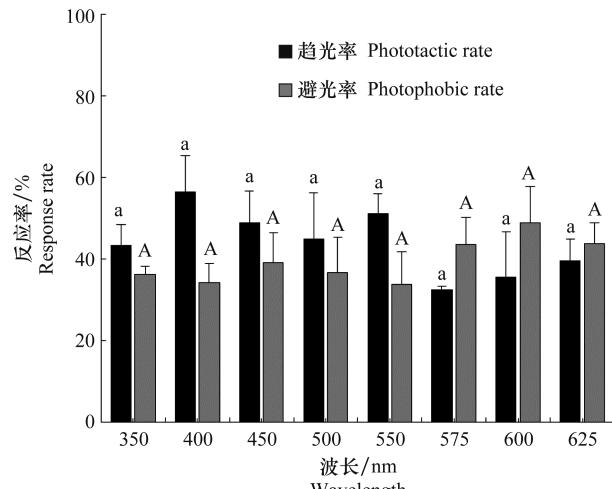
1.5 数据处理

采用 SPSS 24.0 统计软件进行数据分析处理,雌虫和雄虫交配前后趋光率以及对日光和不同颜色光趋向对比数据的差异性分析采用 *t* 测验;试虫对不同波长单色光趋性采用 One-way ANOVA 方差分析,差异显著性检验采用 Duncan 氏新复极差法比较($\alpha=0.05$),同时对试虫在相同波长下的趋、避光率进行差异显著性分析。在数据进行方差分析之前,要对每组数据进行方差齐性检验和正态分布检验,以判断试验数据是否满足方差分析的要求。

2 结果与分析

2.1 橘小实蝇雌、雄成虫交配前的光谱行为反应

未交配的橘小实蝇雌虫对不同波长单色光的行为反应如图 3 所示。趋光率较高的为紫光区的 400 nm 和黄绿光区的 550 nm,分别为(56.51±



数据为平均值±标准误; 不同大、小写字母分别表示橘小实蝇对不同波长单色光的避光率、趋光率差异显著(单因素方差分析, Duncan 氏新复极差法多重比较, $P<0.05$), 下同。

Data are mean±SE. Different uppercase letters or lowercase letters indicate significant difference in the phototactic rates or photophobic rates of *B. dorsalis* to different wavelengths of monochromatic lights, respectively (One-way ANOVA, Duncan's new multiple range test, $P<0.05$). The same applies below.

图 3 橘小实蝇雌虫交配前对不同波长光的趋光率和避光率

Fig. 3 Phototactic and photophobic rates of female *Bactrocera dorsalis* to different wavelengths of lights before mating

8.94)%和(51.25±4.73)%,最小趋光率出现在黄光区的 575 nm,为(32.48±0.85)%. 供试的 8 种单色光均能引起试虫趋光行为反应,但各趋光率间均无显著差异($F_{7,16}=1.126$, $P=0.395$);避光率最高值位于橙光区的 600 nm,为(48.89±8.89)%,最小避光率出现在黄绿光区的 550 nm,为(33.89±8.07)%,各避光率之间无显著差异($F_{7,16}=0.617$, $P=0.734$)。橘小实蝇雌成虫交配前对相同波长光的趋、避反应率间均无显著差异,说明交配前雌虫对不同波长单色光的趋避行为反应不明显,结合趋避光行为反应曲线,初步认为未交配的橘小实蝇雌成虫对紫光和黄绿光较为敏感。

如图 4 所示,橘小实蝇雄虫交配前对不同波长单色光表现出不同的行为反应,趋光率最高的为绿光区的 500 nm,为(61.43±11.64)%,最小趋光率出现在橙光区的 600 nm 处,为(37.78±5.88)%. 不同波长单色光引起的趋光率无显著差异($F_{7,16}=1.142$, $P=0.386$);不同波长单色光引起的避光率差异显著($F_{7,16}=3.044$, $P<0.05$)。避光率的最高值出现在橙光区的 600 nm,为(57.78±8.01)%,显著高于 400、450、500 nm 以及 550 nm 的避光率($P<0.05$),避光率最低值出现在紫光区的 400 nm,为(22.22±5.88)%. 橘小实蝇雄虫交配前在 400 nm ($t=4.428$, $df=4$, $P<0.05$) 和 550 nm ($t=3.637$, $df=4$, $P<0.05$) 下的趋光率和避光率间差异显著,

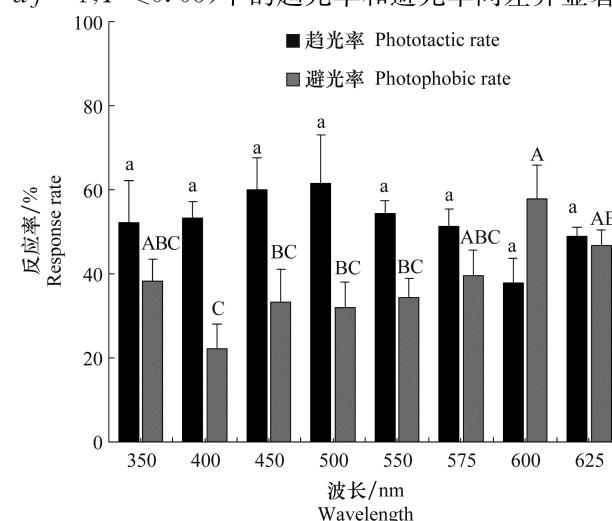


图 4 橘小实蝇雄虫交配前在不同波长下的趋光率和避光率

Fig. 4 Phototactic and photophobic rates of male *Bactrocera dorsalis* to different wavelengths of lights before mating

其余波长下趋、避光率间均无显著差异,表明试虫对400 nm 和 550 nm 有明显趋光性,结合趋避光行为反应,认为未交配的橘小实蝇雄虫对绿光、黄绿光、紫光较为敏感。

2.2 橘小实蝇雌、雄成虫交配后的光谱行为反应

橘小实蝇雌虫交配后对不同波长单色光的行为反应如图 5 所示。不同波长单色光引起的趋光率存在显著差异($F_{7,16} = 2.687, P < 0.05$),其趋光行为反应有明显最高值,位于绿光区 500 nm 处,趋光率为(62.25 ± 16.62)% ,其次为 550 nm [(53.33 ± 3.33)%],这两种波长下试虫的趋光率显著高于橙光区 600 nm [(24.36 ± 2.96)%]和红光区 625 nm [(23.33 ± 8.82)%]引起的趋光率($P < 0.05$)。避光行为反应中避光率较高区域有两个,一为 600~625 nm 光谱区,接近于一避光平台,避光率均在 50% 以上,其次为紫光区的 350 nm,避光率为(46.67 ± 12.02)% ,经方差分析,各避光率之间无显著差异($F_{7,16} = 1.128, P = 0.394$),最小避光率在绿光区的 500 nm,为(29.88 ± 13.64)%。比较同一波长试虫的趋避行为反应可知,橘小实蝇雌虫交配后在 550 nm 下有明显趋光性($t = 4.243, df = 4, P < 0.05$),在 600 nm 下有明显避光性($t = -3.165, df = 4, P < 0.05$)。结合其趋避光行为反应,可发现波长对交配后橘小实蝇雌虫的光谱行为反应有一定影响,其对绿光和黄绿光更为敏感。

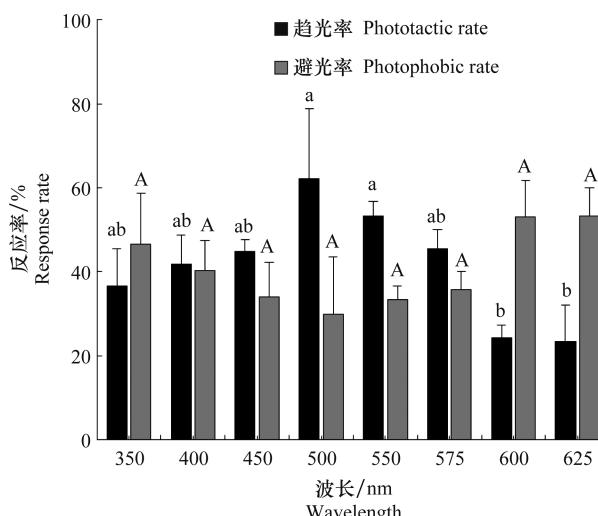


图 5 橘小实蝇雌虫交配后对不同波长光的趋光率和避光率

Fig. 5 Phototactic and photophobic rates of female *Bactrocera dorsalis* to different wavelengths of lights after mating

交配后橘小实蝇雄虫趋避光行为反应如图 6 所示。交配后的雄虫对不同单色光的趋光率存在显著差异($F_{7,16} = 3.250, P < 0.05$)。趋光率最高值出现在紫光区 400 nm 处,为(63.13 ± 6.80)% ,与黄光区 575 nm、紫光区的 350 nm 和绿光区的 550 nm 引起的趋光率相比无明显差异($P_{575 \text{ nm}} = 0.345, P_{350 \text{ nm}} = 0.221, P_{550 \text{ nm}} = 0.169$),但显著高于 450 nm 蓝光、500 nm 绿光、600 nm 橙光和 625 nm 红光刺激下的趋光率($P < 0.05$),最小趋光率出现在红光区 625 nm 处,为(26.67 ± 3.33)% ;同样,已交配雄虫最大避光率也出现在红光区 625 nm 处,为(56.67 ± 6.67)% ,显著高于其余单色光引起的避光率($P < 0.05$)。已交配雄虫在 400 nm 波长下的趋光率和避光率间差异显著($t = 3.831, df = 4, P < 0.05$),表明其对 400 nm 表现出明显趋光性,在 625 nm 波长下的趋、避光率间也存在显著差异($t = -4.025, df = 4, P < 0.05$),表明其对 625 nm 表现出明显避光性。结合发生交配行为后橘小实蝇雄虫的趋避光行为反应,可发现橘小实蝇雄虫在交配后,其光感受器对紫光和绿光更为敏感。

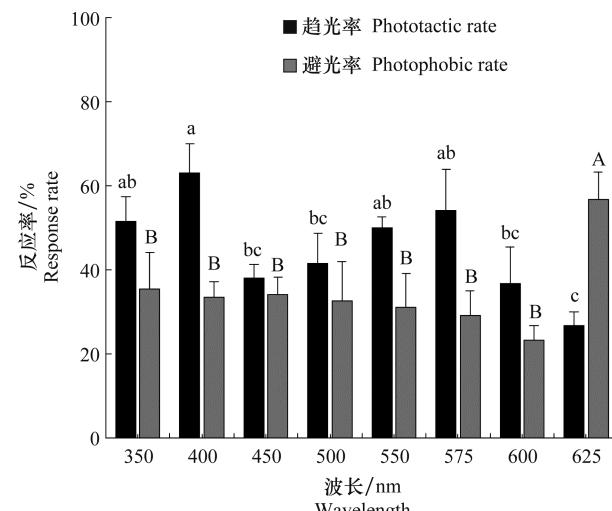


图 6 橘小实蝇雄虫交配后对不同波长光的趋光率和避光率

Fig. 6 Phototactic and photophobic rates of male *Bactrocera dorsalis* to different wavelengths of lights after mating

2.3 交配行为对趋光行为的影响

从图 3 和图 5 可以看出,橘小实蝇雌虫交配前后的趋光行为反应不完全一致,在 350~450 nm 和 600~625 nm,雌虫交配后的趋光率均低于交配前,特别是对 400 nm 的趋光率显著低于交配前($t =$

$5.625, df=2, P<0.05$),降低了14.76%。在500~575 nm光谱区,雌虫交配后趋光率均高于交配前,但经检验分析无显著差异(500 nm: $t=-1.006, df=2, P=0.420$; 550 nm: $t=-0.339, df=2, P=0.767$; 575 nm: $t=-2.581, df=2, P=0.123$)。

从图4和图6可以看出,橘小实蝇雄虫在交配前后的趋光行为反应也不完全一致,在红光区625 nm处,交配后其趋光率显著降低了45.44%($t=7.561, df=2, P<0.05$);交配前后对紫光区的400 nm和黄光区的575 nm趋光率都较高,交配后较交配前有所增高,但无显著差异(400 nm: $t=-0.990, df=2, P=0.427$; 575 nm: $t=-0.333, df=2, P=0.771$);在450~550 nm光谱区,雄虫交配后趋光率均低于交配前,经检验分析无显著差异(450 nm: $t=2.914, df=2, P=0.100$; 500 nm: $t=1.301, df=2, P=0.323$; 550 nm: $t=1.907, df=2, P=0.197$)。在8种不同波长单色光的刺激下,橘小实蝇雌虫、雄虫交配前后的趋光率均有所变化,除625 nm以外均无明显差异,表明交配行为对橘小实蝇的趋光行为反应有影响,但不明显。

2.4 不同颜色LED灯对橘小实蝇成虫趋性的影响

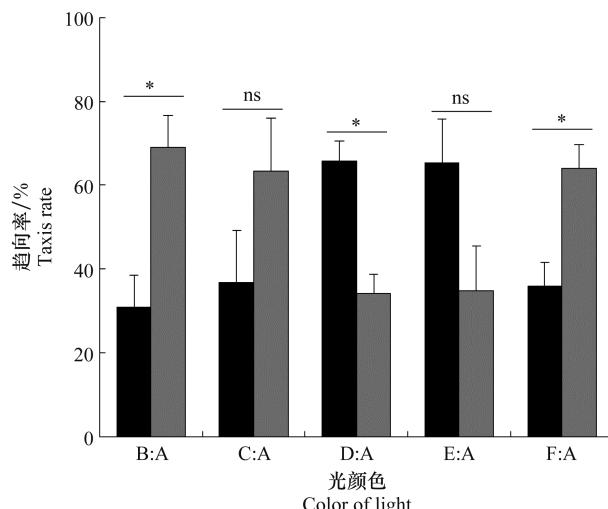
2.4.1 橘小实蝇雌虫对不同颜色光趋向率对比

橘小实蝇雌虫在以日光作为对照下对不同颜色LED灯的趋向率分别为绿光($65.83\pm4.64\%$),黄绿光($65.24\pm10.64\%$),蓝光($36.67\pm12.62\%$),红光($35.95\pm5.54\%$),紫光($30.95\pm7.65\%$)。橘小实蝇雌虫相对于日光明显更加趋向绿光($t=4.826, df=4, P<0.01$);在日光与紫光($t=-3.520, df=4, P<0.05$)和日光与红光($t=-3.587, df=4, P<0.05$)的对比试验中,试虫明显趋向日光,试虫对日光和蓝光($t=-1.494, df=4, P=0.209$)以及日光和黄绿光($t=-2.026, df=4, P=0.113$)的趋向率间无显著差异,综合分析可知与日光相比橘小实蝇雌虫对绿光趋性最强(图7)。

2.4.2 橘小实蝇雄虫对不同颜色光趋向率对比

橘小实蝇雄虫在以日光作为对照下对不同颜色LED灯的趋向率分别为绿光($62.33\pm4.73\%$),黄绿光($54.76\pm2.38\%$),蓝光($28.89\pm4.44\%$),紫光($25.56\pm7.29\%$),红光($13.20\pm3.23\%$),相较于日光,试虫明显更加趋向绿光($t=3.688, df=4, P<0.05$)和黄绿光($t=2.828, df=4, P<0.05$),对日光的趋向率显著高于紫光($t=-4.745, df=4, P<$

0.01)和蓝光($t=-6.718, df=4, P<0.01$),极显著高于红光($t=-16.099, df=4, P<0.001$),这表明在日光作对照条件下,橘小实蝇雄虫对绿光和黄绿光趋性较强(图8)。



A表示日光; B表示紫光; C表示蓝光; D表示绿光; E表示黄绿光; F表示红光。数据为平均值±标准误; *, **, *** 和 ns 分别表示橘小实蝇对不同颜色光的趋向率和对照(日光)相比在0.05、0.01和0.001水平差异显著和没有显著差异(检验),下同。

A: Daylight; B: Purple light; C: Blue light; D: Green light; E: Yellowish-green light; F: Red light. Data are mean±SE. The significant difference of taxis rates of *B. dorsalis* to different color lights from daylight is marked by ns, *, **, *** (t -test: ns indicates not significant, $P>0.05$; *, $P<0.05$; **, $P<0.01$; ***, $P<0.001$). The same applies below.

图7 橘小实蝇雌虫对不同颜色LED光的趋向率对比(以日光为对照)

Fig. 7 Comparison of the taxis rates of female *Bactrocera dorsalis* to LED light of different colors (daylight as the control)

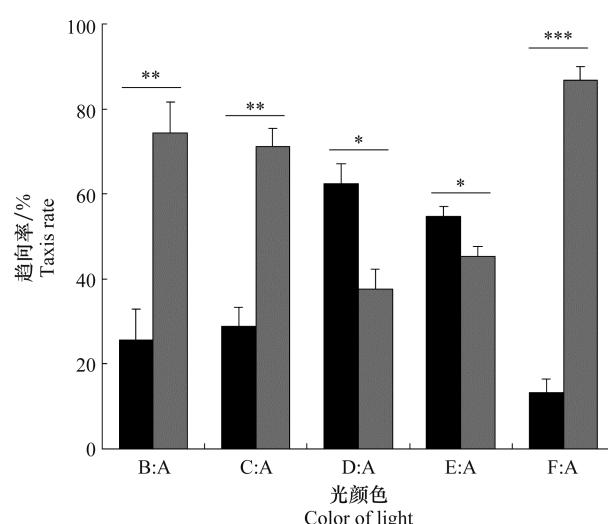


图8 橘小实蝇雄虫对不同颜色LED光的趋向率对比(以日光为对照)

Fig. 8 Comparison of the taxis rates of male *Bactrocera dorsalis* to LED light of different colors (daylight as the control)

3 结论与讨论

筛选靶标昆虫的敏感光谱有利于控制害虫的发生。大多数昆虫可以感知 350~700 nm 范围内的光并对其做出反应^[16-18]。Liu 等^[18]在室内试验发现橘小实蝇成虫对 6 种不同颜色波长 LED 灯的趋性由大到小为绿色(522 nm)>黄色(596 nm)>紫色(440 nm)>蓝色(450 nm)>红色(633 nm)。本研究在比较橘小实蝇对不同颜色的趋向率时发现,与对照日光相比,其更趋向绿光和黄绿光,与其对绿色光(522 nm)趋性最高结果基本吻合。交配前后,不论是橘小实蝇雌虫还是雄虫,避光率最高值均在红光区,并且在趋向率对比试验中,相较于日光,其对红色 LED 灯趋向率最低,说明试虫最不敏感的为红光区,与 Liu 等报道橘小实蝇成虫对红色光(633 nm)趋性最低的结果一致。杨子祥等^[19]在杨桃园中利用自制的诱捕器(添加糖醋液加挂不同颜色的气球)探究橘小实蝇成虫对不同颜色的趋性,发现挂紫色气球的诱捕器的诱集效果最好,这与本研究中橘小实蝇成虫对 400 nm 紫色光表现出高趋光性相符,但与趋向率对比试验中橘小实蝇相对于日光对紫色光表现出低趋性不一致,可能是由于试验设置条件不同,并且诱捕器形状、颜色、大小等也会影响试虫的反应。

交配前后橘小实蝇雌雄成虫敏感光区发生了变化,相较于交配前,交配后雌虫对 400 nm 紫光趋性明显降低,对 350~450 nm 光区的趋光率均低于交配前,而对 500~575 nm 光区的趋光率则高于交配前;雄虫交配后对紫光趋性增加,但变化差异不大,对 450~550 nm 光区趋光率低于交配前,这些结果均表明交配行为对橘小实蝇的趋光行为反应产生了一定的影响。闫凯莉^[20]研究发现交配状态对普通大蓟马 *Megalurothrips usitatus* (Bagnall) 趋光率有明显影响,表现为交配后雌成虫对(461±5)nm 的蓝色 LED 光趋光率升高,雄成虫对其趋光率则显著低于交配前;尺蛾科昆虫 *Ligdia adustata* 交配后,雌虫趋光率升高;巴瑞弓背蚁 *Camponotus parius* 蚁后交配后,趋光率低于交配前^[21-23];这些发现都表明交配行为在一定程度上影响着昆虫的趋光性,但具体机制尚不明确。本研究中橘小实蝇在交配前后趋光率发生变化的原因可能是由于橘小实蝇成虫在交配前后生理状态有所不同,具体影响机制还有待

进一步研究。

整体来看,橘小实蝇雌雄成虫对单色光的趋光行为反应和对不同颜色 LED 灯的趋向行为反应均显示其对绿光和黄绿光有明显趋向性;而与 LED 灯趋向试验结果不同的是利用单色仪测定结果中橘小实蝇对 400 nm 紫光也较为敏感,表现在交配前雌虫和交配前后雄虫对其有较高趋光率。两者结果有所差异可能是由于仪器设备不同,运转发射波长等原理不同引起的,再者就是趋向率对比试验中对紫光的趋向率是以日光作对照得出的,这说明橘小实蝇相较于紫光更被日光所吸引,而用单色仪测定其在单色光刺激下的趋光行为反应时是在特定波长光之下,排除了日光因素影响所得出的,对于这种差异,后续可以利用 LED 灯进行不同颜色波长光之间两两对比试验以得出其最敏感波长。本文测定了橘小实蝇群体对不同波长单色光的趋性反应,试虫个体对同一波长单色光表现出了一定的趋光性或避光性,个体做出趋光或避光选择的差异性可能是由于暗适应时间、光刺激时间以及个体发育状态不同等原因造成的,刘振兴^[21]研究黏虫 *Mythimna separata* (Walker) 和棉铃虫 *Helicoverpa armigera* (Hübner) 趋光行为时也有类似发现,在同一波长下试虫有趋光率和负趋光率之分,并且特定波长下两者之间存在显著差异。利用昆虫趋光性诱捕害虫是一种有效的绿色防控方法,但对趋光性的研究仅局限于室内是远远不够的,在实际应用中,昆虫趋光性除了会受到昆虫龄期、生长发育状况、性别影响外,也会随着环境因素而改变,因此在初步了解橘小实蝇趋光特性的基础上,应该进一步研究影响其趋光特性的各种影响因子,并进行田间试验,验证其田间实际应用效果。

参考文献

- [1] 章玉萍, 李敦松. 桔小实蝇生物防治研究进展[J]. 昆虫天敌, 2007, 29(4): 173~181.
- [2] 郭腾达, 宫庆涛, 叶保华, 等. 桔小实蝇的国内研究进展[J]. 落叶果树, 2019, 51(1): 43~46.
- [3] 席涵, 刘秀, 舒海娟, 等. 推拉策略在桔小实蝇防治中的研究进展[J]. 农药, 2019, 58(4): 245~249.
- [4] 王玉玲. 桔小实蝇的发生与诱杀防治研究进展[J]. 环境昆虫学报, 2013, 35(2): 253~259.
- [5] 金梦娇, 范银君, 滕子文, 等. 桔小实蝇的化学防治措施及抗药性治理[J]. 农药, 2021, 60(1): 1~5.
- [6] KIM K N, HUANG Qiuying, LEI Chaoliang. Advances in in-

- sect phototaxis and application to pest management: a review [J]. Pest Management Science, 2019, 75(12): 3135–3143.
- [7] 靖湘峰, 雷朝亮. 昆虫趋光性及其机理的研究进展[J]. 昆虫知识, 2004, 41(3): 198–203.
- [8] 沈颖, 尉吉乾, 莫建初, 等. 昆虫趋光行为研究进展[J]. 河南科技学院学报(自然科学版), 2012, 40(5): 19–23.
- [9] 刘晓英, 焦学磊, 郭世荣, 等. 基于LED诱虫灯的果蝇趋光性试验[J]. 农业机械学报, 2009, 40(10): 178–180.
- [10] 周庆贤, 梁帆, 梁广勤, 等. 应用光波技术诱捕桔小实蝇试验[J]. 广东农业科学, 2008(3): 62–63.
- [11] LI Lei, MA Huabo, NIU Liming, et al. Evaluation of chromatic cues for trapping *Bactrocera tau* [J]. Pest Management Science, 2017, 73(1): 217–222.
- [12] 范凡, 任红敏, 吕利华, 等. 光谱和光强度对西花蓟马雌虫趋光行为的影响[J]. 生态学报, 2012, 32(6): 1790–1795.
- [13] 米娜, 张起恺, 王海鸿, 等. 烟蓟马趋光规律及不同波长色板田间诱捕效果[J]. 中国农业科学, 2019, 52(10): 1721–1732.
- [14] 范凡. 基于害虫-天敌关系的西花蓟马-东亚小花蝽趋光性的结构基础及其行为机理[D]. 保定: 河北农业大学, 2012.
- [15] 雷仲仁, 徐瑞瑞, 米娜, 等. 一种昆虫趋光行为测试装置: CN211910195U [P]. 2020-11-13.
- [16] ANTIGNUS Y. Manipulation of wavelength-dependent behaviour of insects: an IPM tool to impede insects and restrict epidemics [J]. Pest Management Science, 2017, 73(1): 217–222.
- [17] LAND M F. Visual acuity in insects [J]. Annual Review of Entomology, 1997, 42(1): 147–177.
- [18] LIU Huan, GAO Zhou, DENG Shuzhen, et al. The photokinetics of oriental fruit flies, *Bactrocera dorsalis*, to LED lights of various wavelengths [J]. Entomologia Experimentalis et Applicata, 2018, 166(2): 102–112.
- [19] 杨子祥, 沙毓沧, 袁理春, 等. 不同颜色和果实对桔小实蝇的诱集效果研究[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2011, 33(4): 64–66.
- [20] 闫凯莉. 普通大蓟马复眼形态结构及其趋光(色)行为研究[D]. 广州: 华南农业大学, 2016.
- [21] 刘振兴. 粘虫和棉铃虫趋光行为、复眼结构及光受体基因差异研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2019.
- [22] LONE S R, CHAKRAVARTHI A, SHARMA V K. Sex and age related changes in the locomotor activity and phototactic behaviors of two closely related species of *Camponotus* ants [J]. Journal of Insect Physiology, 2012, 58(1): 75–82.
- [23] ALTERMATT F, BAUMEYER A, EBERT D. Experimental evidence for male biased flight-to-light behavior in two moth species [J]. Entomologia Experimentalis et Applicata, 2009, 130(3): 259–265.

(责任编辑: 杨明丽)

(上接 104 页)

- [14] CORDAUX R, MICHEL-SALZAT A, FRELON-RAIMOND M, et al. Evidence for a new feminizing *Wolbachia* strain in the isopod *Armadillidium vulgare*: evolutionary implications [J]. Heredity, 2004, 93(1): 78–84.
- [15] 刘宏岳, 宋月, 王哲, 等. *Wolbachia* 在我国不同地理种群的玉米螟赤眼蜂中的分布[J]. 应用昆虫学报, 2009, 46(2): 266–271.
- [16] 宋月, 沈佐锐, 王哲, 等. *Wolbachia* 在螟黄赤眼蜂种群内的分布及其遗传稳定性[J]. 环境昆虫学报, 2010, 32(2): 188–193.
- [17] RONG Xia, ZHANG Yankai, ZHANG Kaijun, et al. Identification of *Wolbachia*-responsive microRNAs in the two-spotted spider mite, *Tetranychus urticae* [J/OL]. BMC Genomics, 2014, 15(1): 1122. DOI: 10.1186/1471-2164-15-1122.
- [18] STOUTHAMER R. The use of sexual versus asexual wasps in biological control [J]. Entomophaga, 1993, 38(1): 3–6.
- [19] 霍梁青, 李媛媛, 张丹, 等. 孤雌产雌生殖品系松毛虫赤眼蜂产卵强度对 *Wolbachia* 诱导的其生殖表型的影响[J]. 昆虫学报, 2021, 64(5): 597–604.
- [20] PINTUREAU B, CHAUDIER S, LASSABLIERE F, et al. Addition of *wsp* sequences to the *Wolbachia* phylogenetic tree and stability of the classification [J]. Journal of Molecular Evolution, 2000, 51(4): 374–377.
- [21] 肖庄婷, 王德森, 何余容. 安荔赤眼蜂在中国野外首次发现及其体内 *Wolbachia* 的检测[J]. 昆虫学报, 2021, 64(3): 409–418.
- [22] 吕琳, 李媛媛, 霍梁青, 等. 孤雌产雌松毛虫赤眼蜂种群间生殖表型的比较[J]. 中国生物防治学报, 2023, 39(2): 245–253.
- [23] 张美娇, 王轩, 李远玉, 等. 两种抗生素对携带 *Wolbachia* 的短管赤眼蜂生殖模式的影响[J]. 环境昆虫学报, 2020, 42(5): 1177–1182.
- [24] 陈茜, 王丽艳, 杨志强, 等. 温度通过影响 *Wolbachia* 滴度调控赤眼蜂生殖方式[J]. 昆虫学报, 2016, 59(4): 464–471.
- [25] 潘雪红, 何余容. 高温和四环素对 *Wolbachia* 诱导孤雌产雌短管赤眼蜂的影响[J]. 华中农业大学学报, 2010, 29(6): 687–691.
- [26] 崔宝玉, 钱海涛, 董辉, 等. 短期高温对感染 *Wolbachia* 的松毛虫赤眼蜂发育和繁殖的影响[J]. 昆虫知识, 2007, 44(5): 694–697.
- [27] 张海燕, 张莹, 丛斌, 等. 外界生态因子对感染 *Wolbachia* 的松毛虫赤眼蜂生殖稳定性影响[J]. 中国农业科学, 2009, 4(7): 2366–2372.
- [28] 张海燕, 丛斌, 田秋, 等. 温度对感染沃尔巴克氏体的松毛虫赤眼蜂种群参数的影响[J]. 昆虫学报, 2006, 49(3): 433–437.
- [29] 宁素芳. 温度对赤眼蜂体内 *Wolbachia* 滴度的影响及赤眼蜂雌雄间体的研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2017.

(责任编辑: 杨明丽)