



全林发, 李文景, 王凤英, 池艳艳, 董易之, 陈炳旭. 荔枝蒂蛀虫成虫对 LED 光的趋性及其繁殖响应特征 [J]. 环境昆虫学报, 2021, 43 (6): 1581–1588.

荔枝蒂蛀虫成虫对 LED 光的趋性及其繁殖响应特征

全林发¹, 李文景¹, 王凤英², 池艳艳¹, 董易之^{1*}, 陈炳旭^{1*}

(1. 广东省农业科学院植物保护研究所/广东省植物保护新技术重点实验室, 广州 510642;

2. 广西农业科学院植物保护研究所/广西作物病虫害生物学重点实验室, 南宁 530007)

摘要: 为明确荔枝蒂蛀虫 *Conopomorpha sinensis* 成虫对不同 LED 光的趋性行为反应, 初步筛选出该虫趋光性不同的光色并进一步研究其对成虫繁殖生物学特性的影响, 以期今后研发特异性强且绿色高效的荔枝蒂蛀虫灯光防控技术提供理论依据。本文采用对比实验法, 测试了荔枝蒂蛀虫雌蛾对 9 种供试光源的趋性行为反应, 并进一步研究夜间 LED 光照射对荔枝蒂蛀虫成虫交配率、繁殖力及寿命的影响。结果显示, 荔枝蒂蛀虫雌成虫对不同 LED 光的趋光反应率由高到低为: 蓝 (445 ~ 450 nm) > 紫 (400 ~ 405 nm) > 红 (655 ~ 665 nm) > 蓝绿 (475 ~ 480 nm) > 橙 (600 ~ 605 nm) > 绿 (515 ~ 520 nm) > 黄 (570 ~ 575 nm) > 白 (400 ~ 700 nm) > 黑暗 > 紫外 (365 nm), 试虫对紫外光表现出明显的避光性, 对 7 种单色光表现为不同程度的趋光性, 其中对黄光和白光的趋光率在 50% 以下。在繁殖生物学方面, 夜间 50 lx 的 LED 黄光和白光持续照射能使荔枝蒂蛀虫成虫的交配率由 93.75% 降低至 50% 以下, 且产卵前期延长, 雌蛾产卵量显著降低。此外, 夜间不同 LED 光源照射能抑制已交配荔枝蒂蛀虫雌蛾产卵活动, 白光照射组的单雌日均产卵量降低程度最大, 为 50.71%, 黄光次之 (48.96%), 蓝光最小, 为 38.06%。综上所述, 荔枝蒂蛀虫雌蛾对 LED 白光和黄光的趋光性较弱, 夜间适当的 LED 白光 (400 ~ 700 nm) 和黄光 (570 ~ 575 nm) 持续照射可有效降低成虫交配率和繁殖力, 该结果对促进 LED 白光干扰防控荔枝蒂蛀虫技术的优化升级具有一定指导意义。

关键词: 荔枝蒂蛀虫; LED 光; 光行为反应; 繁殖

中图分类号: Q965; S433

文献标识码: A

文章编号: 1674-0858 (2021) 06-1581-08

The photo behavioral and reproductive responses of *Conopomorpha sinensis* adults to LED light

QUAN Lin-Fa¹, LI Wen-Jing¹, WANG Feng-Ying², CHI Yan-Yan¹, DONG Yi-Zhi^{1*}, CHEN Bing-Xu^{1*}

(1. Plant Protection Research Institute, Guangdong Academy of Agricultural Sciences/Guangdong Provincial Key Laboratory of High Technology for Plant Protection, Guangzhou 510640, China; 2. Plant Protection Research Institute, Guangxi Academy of Agricultural Sciences, Nanning 530007, China)

Abstract: To clarify the photobehavioral and reproductive responses of *Conopomorpha sinensis* adults to different LED light, so as to provide theoretical basis for the development of highly specific, green and efficient light control technology of *C. sinensis* in the future. In this experiment, the photobehavioral responds of *C. sinensis* female to 9 kinds of light sources was tested by comparative experiment, then we

基金项目: 财政部和农业农村部国家现代农业产业技术体系专项 (CARS-32); 国家自然科学基金 (32102222); 广东省荔枝产业技术体系 (2021KJ107-4); 广东省荔枝产业攻关示范项目 (403-2018-XMZC-0002-90); 以农业领域为单元的广东省现代农业产业共性关键技术研发创新团队建设项目 (绿色发展) (2021KJ112)

作者简介: 全林发, 女, 硕士, 助理研究员, 研究方向为果树害虫综合防治, E-mail: linfa_quan2016@126.com

*共同通讯作者 Author for correspondence: 董易之, 博士, 副研究员, 研究方向为果树害虫防治, E-mail: dongyizhi@126.com; 陈炳旭, 博士, 研究员, 研究方向为植物保护, E-mail: gzchenbx@163.com

收稿日期 Received: 2021-09-01; 接受日期 Accepted: 2021-10-07

further studied the effects of LED light exposure at night on the mating rate, fertility and longevity of the *C. sinensis* adults. Results showed, from high to low, the phototaxis response rate of the *C. sinensis* female were: Blue light, red light, green light, purple light, blue-green light, orange light, yellow light, white light, dark and ultraviolet light. Among them, the female showed obvious photophobia to ultraviolet light and phototaxis to 7 kinds of LED light, in which the phototaxis to yellow and white light were less than 50%. In terms of reproductive biology, 50 lx yellow and white light at night could reduce the mating rate of *C. sinensis* adults from 93.75% to less than 50%, prolong the preoviposition period and significantly reduce their oviposition. In addition, LED light irradiation at night could inhibit the oviposition of mated female. The daily average oviposition of per female in the white light irradiation decreased the most by 50.71%, followed by yellow light (48.96%), and blue light was the least (38.06%). In conclusion, the *C. sinensis* female had weak phototaxis to white light and yellow light. Appropriate irradiation of white light (400 ~ 700 nm) or yellow light (570 ~ 575 nm) at night could effectively reduce the mating rate and fecundity of adults. The results had certain guiding for optimization and upgrading of LED white light interference in control of *C. sinensis*.

Key words: *Conopomorpha sinensis*; LED light; photobehavioral response; reproduction

荔枝蒂蛀虫 *Conopomorpha sinensis* Bradley 属于鳞翅目 Lepidoptera 细蛾科 Gracillariidae, 以幼虫钻蛀为害荔枝 *Litchi chinensis* Sonn.、龙眼 *Dimocarpus longan* Lour. 的果实、花穗、嫩梢和嫩叶, 尤其偏爱为害果实, 一年发生 9 ~ 12 代, 世代重叠严重。随着荔枝产业在中国的蓬勃发展, 荔枝蒂蛀虫已经取代荔枝蜡成为荔枝龙眼园内的第一大害虫。一般年份被荔枝蒂蛀虫为害的荔枝、龙眼虫果率 10% ~ 20%, 严重时达 60% ~ 90%, 使荔枝、龙眼产业蒙受巨大损失 (全林发等, 2018)。化学防治虽然能够快速高效地防治荔枝蒂蛀虫, 但是长期使用易引起该虫产生抗药性, 据报道该虫已经对拟除虫菊酯、苯甲酸基苯基脲等常用杀虫剂产生一定程度抗性, 因此寻求新的荔枝蒂蛀虫防控方法显得尤为重要。

利用外源光来控制害虫的物理防控技术在有害生物综合治理 (IPM) 中占据重要地位 (Johansen *et al.*, 2011), 其原理是利用昆虫对光谱的行为反应特性, 对靶标害虫直接进行诱杀或夜间活动干扰, 不易使靶标害虫产生抗性, 高效、环保。而大部分昆虫复眼具有两种光感受器: 紫外-蓝光感受器和绿-黄光感受器 (Briscoe & Chittka, 2001)。目前应用的黑光灯和频振式杀虫灯是利用昆虫复眼紫外-蓝光感受器的生物功能, 即昆虫的趋光性; 使用黄色灯防治蛾类害虫, 则是利用昆虫复眼的绿-黄光感受器的功能, 即昆虫的忌避性 (岡村雅広, 2004)。了解害虫的趋光性是利用外源光开展物理防治技术研发的重要基

础。近些年, 我国科研人员基于害虫的趋光特性也研发出一系列灯光防控的技术和产品。例如: 广泛应用于防控夜出习性害虫的诱虫灯, 尤其是对鳞翅目害虫吸引力强 (Van Grunsven *et al.*, 2014; Wakefield *et al.*, 2016; Mikkola *et al.*, 2018; Owens *et al.*, 2018); 用于捕获飞虱、叶蝉、蚜虫、粉虱、蓟马和潜叶蝇类日出型昆虫的有色装置, 如黄色粘虫板等 (李文景等, 2021)。再者是通过夜间介入外源光干扰和防控夜蛾和细蛾类常见农业害虫 (段云等, 2008; 段云等, 2016; 蒋月丽等, 2018), 如利用 LED 白光干扰防控荔枝蒂蛀虫等 (王凤英等, 2020; 李文景等, 2021)。然而, 目前人们仅围绕 LED 白光对荔枝蒂蛀虫繁殖调控及应用开展了部分研究和评价, 关于荔枝蒂蛀虫对其它 LED 光谱行为反应及繁殖响应方面的研究尚未见系统报道, 不利于荔枝蒂蛀虫成虫高效防控光源筛选以及利用灯光防控荔枝蒂蛀虫技术的优化升级。

为明确荔枝蒂蛀虫成虫的趋光行为特性, 初步筛选出该虫趋 (避) 性不同的光色并进一步研究其对成虫的影响, 本研究较全面测定了荔枝蒂蛀虫对全光谱白光、七色光和紫外光共 9 种 LED 光源 (波长范围: 365 ~ 700 nm) 的趋/避性行为反应, 进而选定几种荔枝蒂蛀虫趋性不同的 LED 光色并对其成虫进行夜间照射处理, 观察不同 LED 光照下试虫交配、繁殖及存活情况, 以期探明荔枝蒂蛀虫成虫的光谱行为反应以及夜间特定 LED 光照对荔枝蒂蛀虫繁殖生物学特性的影响,

为今后研发出特异性更强且绿色高效的荔枝蒂蛀虫灯光防控技术提供科学依据,同时为促进 LED 白光干扰防控荔枝蒂蛀虫技术的优化升级提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 材料

供试昆虫:选择 1 日龄荔枝蒂蛀虫处女蛾作为试验材料。2021 年的 4-5 月采自于广东省增城区竹园村三月红荔枝落地果,带回室内平铺于 50 cm×36 cm×3 cm 白瓷盘内,上面覆盖白色瓦楞纸,每天收集瓦楞纸的荔枝蒂蛀虫蛹,脱果幼虫化蛹 2~3 d 后,根据蛹外部形态鉴别雌、雄蛹并分装于养虫盒中羽化以确保雌、雄成虫均未交配,备用。试虫饲养在温度 25℃±1℃,空气湿度 75%±5%,光周期 L:D=14:10 (L, 6:00-20:00; D, 20:00-6:00) 的养虫室内。成虫羽化后,加入 10% 蜂蜜水供其补充营养,并将包裹好餐巾纸的新鲜荔枝果放入养虫笼中收集卵。

设备和仪器:GXZ 型人工智能气候箱,宁波江南仪器厂;LED 单色光灯,深圳市优品光电原厂;LED 白光,源自 Wi-Fi 智控全彩 SMD 灯泡,山东晶泰星光电科技有限公司。PP710 型照度计, SanLiangshang[®];昆虫趋光行为试验装置—生物测定 Y 型管(图 1),定制;50 cm×36 cm×3 cm 白瓷盘,市购;自制直径 20 cm、高 20 cm 的透明养虫盒。

1.2 方法

1.2.1 荔枝蒂蛀虫雌蛾室内光谱行为反应测定

根据荔枝蒂蛀虫成虫的行为特性并参考相关文献,设计趋光行为装置(图 1)。试验采用荔枝蒂蛀虫 2 日龄雌成虫种群进行。试验于 22:00-23:00 在暗室进行,暗室温度为 25℃~26℃,相对湿度 70%~80%。选取紫外光(365 nm)、紫光(400~405 nm)、蓝光(445~450 nm)、蓝绿光(475~480 nm)、绿光(515~520 nm)、黄光(570~575 nm)、橙光(600~605 nm)、红光(655~665 nm)和白光(400~700 nm) 9 种不同 LED 光源,以黑暗为对照。试验开始前,通过调节各生物测定 Y 型管光路上 LED 灯的高度,保持各光路中光照强度为 100 lx。将健壮试虫置于试虫活动室内,每次光刺激时长 60 min。每次试验选取健壮试虫 20 头为一组,重复 4 次。为了减小误差,每次试验采用的试虫均不重复使用,每处理

波长持续照射 60 min 后,取出反应盒,快速统计趋光室(B)和避光室(-B)内试虫的个数,计算其趋光率和避光率。趋光率(%)=趋光室内虫数/总虫数×100。

测试方法:首先,将试虫置于暗室(图 1-A)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 30 min 暗适应后,将暗室与试虫缓冲区 C 联通,同时去掉暗室(A)两侧的橡胶塞,迅速将试虫区(A+C)与测试套管+B和-B部分相连。测试光照强度恒定为 100 lx,测试时间为 60 min。60 min 后,快速统计趋光室(B)和避光室(-B)内试虫的个数。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下一次测试。测试过的荔枝蒂蛀虫不再重复使用。

1.2.2 夜间不同 LED 光照对荔枝蒂蛀虫成虫繁殖生物学特性的影响

荔枝蒂蛀虫羽化后,选取进入 2 日龄暗期前的健康雌、雄蛾 1:1 配对放入内径 20 cm、高 20 cm 的养虫盒中,每盒 3 对。养虫盒内放置一块浸润 10% 蜂蜜水的棉球用于补充营养,以及新鲜荔枝一颗用于收集荔枝蒂蛀虫卵。试虫的饲养条件为温度 25℃~26℃,相对湿度 70%~80%,光期设置为 06:00-20:00,光照强度统一设定为 3 500~4 000 lx;暗期为 20:00 至次日 06:00。试验于暗期介入 4 种 LED 光源进行持续照射,分别为蓝光(445~450 nm)、绿光(515~520 nm)、黄光(570~575 nm)和白光(400~700 nm),光照强度均设为 50 lx,每种光源处理试虫 6 盒,共 18 对成虫。每日定时(8:00 a.m.)更换各处理养虫盒内新鲜荔枝果和 10% 蜂蜜水,并观察记录成虫的产卵与存活情况,直至试虫全部死亡。成虫繁殖生物学指标主要以产卵前期、产卵期、产卵量、卵孵化率及成虫寿命来表示。另外,试验期间雌蛾自然死亡后立即解剖,根据雌蛾的交配囊形状的差异以确定成虫交配与否,统计交配率。按照公式计算交配率,交配率(%)=交配雌蛾数/雌蛾总数×100。此外,将试验各处理所收集的试虫卵置于人工智能气候箱中培育并逐日记录试虫卵的孵化情况,试虫卵的培育条件设为光周期 14 L:10 D,温度 25℃~26℃,相对湿度 70%~80%。

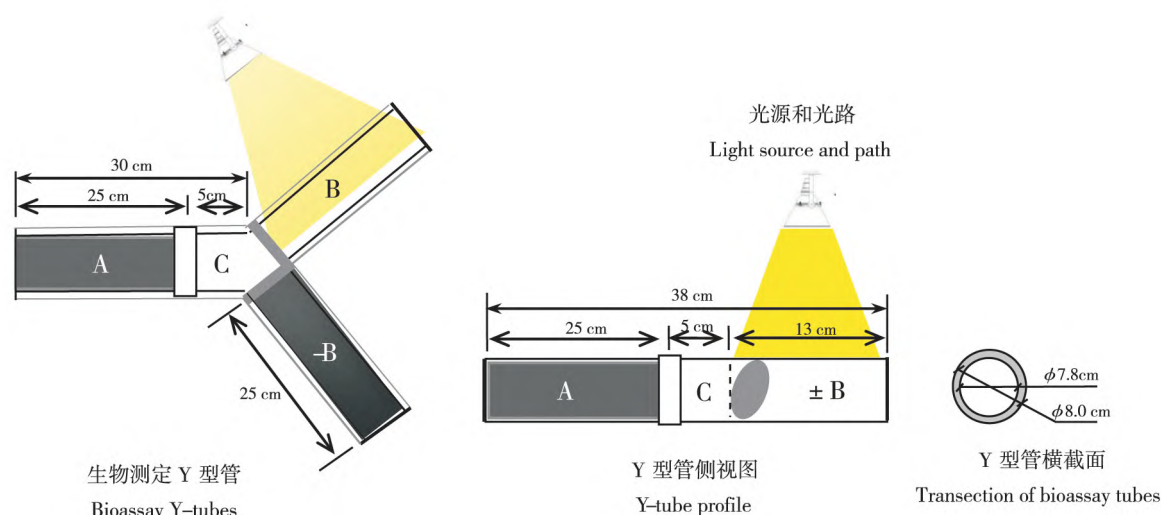


图1 生物测定 Y 型管

Fig. 1 Bioassay Y-tubes

注: A, 试虫释放暗室; +B 和 -B, 试虫选择区; C, 试虫缓冲区。Note: A, Release area of *Conopomorpha sinensis* adult; +B and -B, Selection area of *C. sinensis* adult; C, Buffer area of *C. sinensis* adult.

1.2.3 夜间不同 LED 光照对交配后荔枝蒂蛀虫雌蛾繁殖力的影响

为保证雌、雄成虫成功交配,选取 1 日龄健壮的成虫并按雌、雄成虫比为 1:1.5 放于养虫盒中饲养。养虫盒内放置一块浸润 10% 蜂蜜水的棉球用于补充营养,群体常规饲养 4 d 后,将雌蛾取出并放入内径 20 cm、高 20 cm 的养虫盒中单独饲养。试虫的饲养条件设为温度 25℃~26℃,相对湿度 70%~80%;光期为 06:00~20:00,光照强度统一设定为 3 500~4 000 lx;暗期为 20:00 至次日 06:00,试验的光期设置为 06:00~20:00,光照强度统一设定为 3 500~4 000 lx;暗期为 20:00 至次日 06:00。试验于暗期介入“1.2.2”中的所述的 4 种 LED 光源进行持续照射。每日定时(8:00 a. m.)更换各处理养虫盒内新鲜荔枝果,并逐日观察试虫产卵和存活情况,连续记录成虫产卵盛期(6 日龄至 11 日龄)的产卵量。试验期间雌蛾自然死亡后立即解剖,根据雌蛾的交配囊形状差异以确定成虫是否交配,以便剔除未成功交配雌虫的产卵量等无效数据。

1.3 数据分析

采用 SPSS 19.3 软件对试验数据进行统计分析,应用 Duncan 氏新复极差法进行差异显著性检验。光行为反应率、交配率和卵孵化率的原始数据经过反正弦转换后进行差异显著性检验。作图采用 Excel 和 Origin 95 软件。

2 结果与分析

2.1 荔枝蒂蛀虫雌蛾的光谱行为反应

在全光谱(LED 白光)和 7 种 LED 单色光(365~665 nm)刺激下,荔枝蒂蛀虫雌成虫均能产生一定的趋、避光反应,其趋、避光反应率如图 2 所示。荔枝蒂蛀虫雌成虫对不同 LED 光源的趋光反应率由高到低分别为:蓝光>紫光>红光>蓝绿光>橙光>绿光>黄光>白光>黑暗>紫外光;而对不同 LED 光源的避光反应率由高到低分别为:紫外光>黑暗>白光>黄光>绿光>蓝绿光>橙光>红光>蓝光>紫光。其中雌成虫对紫外光的趋光反应率显著低于避光反应率,表现出明显的避光性;而对其余 6 种单色光的趋光反应率均在 50% 以上,且明显高于其避光反应率,即对 6 种单色光表现为不同程度的趋光性;另外雌成虫对白光的趋光反应率为 41.42%,与其避光反应率(29.48%)无明显差异,即荔枝蒂蛀虫雌成虫对白光无明显的趋避光性(图 2)。

2.2 夜间不同 LED 光源照射对荔枝蒂蛀虫成虫繁殖和寿命的影响

对荔枝蒂蛀虫成虫夜间进行不同 LED 光持续照射后,荔枝蒂蛀虫成虫交配率、繁殖力及寿命会受到不同程度的影响(表 1)。在不同光源处理下,荔枝蒂蛀虫成虫的交配率和平均单雌产卵量由高到低分别为:黑暗>蓝光>绿光>黄光>白

光，其中 50 lx 的黄光和白光照射能显著降低成虫的交配率和单雌平均产卵量 ($P < 0.05$)，而蓝光和绿光处理组与对照组相比无显著差异 ($P > 0.05$)。相比于夜间无灯光干扰条件下，各光源处理组成虫产卵前期显著延长 ($P > 0.05$)，但产卵期没有明显差异。此外，除了 LED 白光处理组外，

其余 3 种单色光处理荔枝蒂蛀虫成虫的寿命有所延长，尤其是蓝光和绿光处理组雌、雄成虫寿命显著高于无灯光干扰组 ($P < 0.05$)。再者各光源持续照射后，荔枝蒂蛀虫 F_1 代卵的孵化率由高到低分别为：蓝光 > 黑暗 > 绿光 > 黄光 > 白光，其中仅白光处理组的卵孵化率显著低于无灯光干扰组。

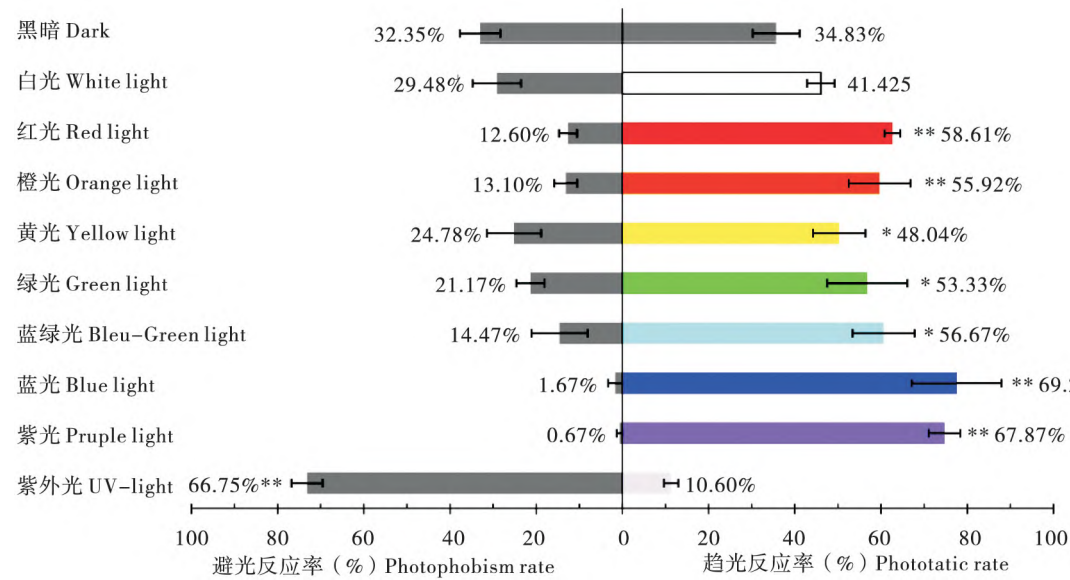


图 2 荔枝蒂蛀虫雌蛾对不同 LED 光的行为反应
Fig. 2 Behavioral response of *Conopomorpha sinensis* female to different LED light

表 1 夜间不同 LED 光照射对荔枝蒂蛀虫成虫繁殖和寿命的影响

Table 1 Effects of different LED lights on the fecundity and longevity of *Conopomorpha sinensis* adults

光源 Wavelength	交配率 (%) Matingrate	产卵前期 (d) Preoviposition period	产卵期 (d) Oviposition period	每雌平均产卵 量 (粒/♀) Number of eggs laid by per female	卵孵化 前期 (d) Pre-hatch period	F ₁ 代卵孵 化率 (%) Egg hatchability	雌蛾寿命 (d) Female lifespan	雄蛾寿命 (d) Male lifespan
黑暗 Dark	93.75 ± 10.21 a	4.40 ± 0.24 b	11.16 ± 1.16 a	181.31 ± 34.43 a	3.13 ± 0.06 b	89.85 ± 4.11a	14.37 ± 0.98 b	15.57 ± 0.27 c
蓝光 Blue	84.72 ± 7.47 ab	6.40 ± 0.75 a	13.00 ± 1.10 a	141.27 ± 29.61 ab	3.68 ± 0.07 a	90.32 ± 1.86 a	18.17 ± 1.14 a	18.39 ± 0.68 b
绿光 Green	73.33 ± 6.23 ab	5.00 ± 0.58 a	13.25 ± 2.46 a	124.7 ± 18.58 ab	3.51 ± 0.13 a	83.78 ± 4.93 ab	18.83 ± 0.94 a	21.61 ± 0.62 a
黄光 Yellow	46.67 ± 5.96 b	5.50 ± 0.29 a	10.75 ± 1.11 a	78.66 ± 15.69 b	3.71 ± 0.08 a	83.24 ± 3.78 ab	16.31 ± 0.99 ab	19.66 ± 0.77 b
白光 White	32.25 ± 4.13 b	5.20 ± 0.61 a	11.75 ± 2.19 a	69.72 ± 15.69 b	3.13 ± 0.06 b	73.71 ± 4.20 b	15.37 ± 1.98 ab	15.57 ± 0.27 c

注：表中数据为平均数 ± 标准误。同列不同小写字母表示经 Duncan 氏新复极差法检验在 $P < 0.05$ 水平上差异显著。
Note: Data were mean ± SE. Different lowercase letters indicated significant difference at $P < 0.05$ level by Duncan's new multiple range test.

2.3 夜间不同 LED 光照射对已交配荔枝蒂蛀虫雌蛾产卵量的影响

夜间不同 LED 光照射对已交配荔枝蒂蛀虫雌蛾产卵量有不同程度的影响 (图 3)。夜间在对照无灯光干扰条件下, 6~11 日龄雌成虫各日龄平均产卵量中位数为 17.33, 是平均产卵量 (18.26 粒/♀) 的 94.91% (图 3-A)。在夜间, 交配后的荔枝蒂蛀虫雌虫经不同 LED 光源持续照射后, 各处理组雌成虫产卵量均有所降低, 其中蓝光处理组雌成虫各日龄平均产卵量中位数为 7.00 粒/♀, 是平均产卵量 11.31 粒/♀ 的 61.89% (图 3-B); 绿光处理组雌成虫各日龄平均产卵量中位数为 7.50 粒/♀,

是平均产卵量 9.94 粒/♀ 的 66.31% (图 3-C); 黄光处理组雌成虫各日龄平均产卵量中位数为 6.25 粒/♀, 是平均产卵量 9.32 粒/♀ 的 67.06% (图 3-D); 白光处理组雌成虫各日龄平均产卵量中位数为 7.17 粒/♀, 是平均产卵量 9.00 粒/♀ 的 79.67% (图 3-E)。综合分析可以看出, 夜间白光和黄光持续照射能有效干扰已交配的雌虫的产卵活动, 导致单雌日均产卵量分别降低 48.96% 和 50.71%, 其中白光处理组雌虫低产卵量的个体占比较黄光处理组高; 另外蓝光对雌虫产卵活动的干扰最小, 单雌日均产卵量产卵量降低 38.06%。

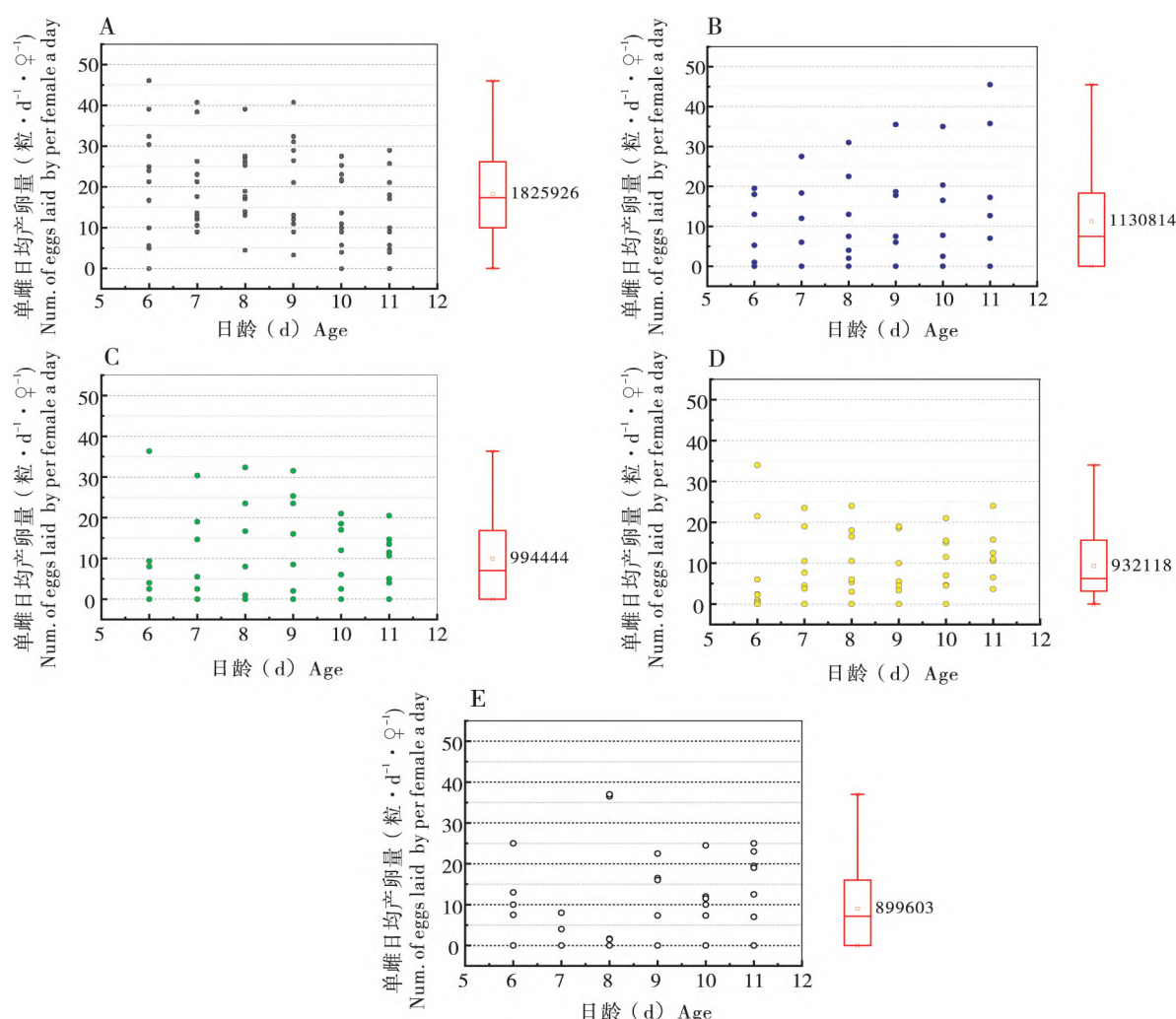


图 3 夜间不同 LED 光照射对已交配荔枝蒂蛀虫雌蛾产卵量的影响

Fig. 3 Effects of different LED light irradiation at night on fecundity of mated female of *Conopomorpha sinensis*

3 结论与讨论

昆虫具有独特且灵敏的光感受器 (复眼及单

眼) 结构, 其往往通过对光环境细微的变化来了解栖境的适合度, 继而调节自身的生理代谢, 最终对整个种群的发展规模及结构进行调节 (Abenes & Khan, 1990; Briscoe, 2001; 王甦等,

2014)。因此,光趋性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(边磊等,2012)。

昆虫趋光性的本质是接受光刺激后的行为响应,是对特定光源不可遏制的趋向行为,包括正趋光性和负趋光性(即避光)(蒋月丽等,2015)。昆虫对不同光谱敏感性的行为试验,可以筛选出昆虫敏感的波谱范围,这是研究昆虫感知颜色或光的重要方法之一。本研究结果表明,荔枝蒂蛀虫雌蛾对不同 LED 光源的趋光反应率由高到低分别:蓝(445 ~ 450 nm) > 紫(400 ~ 405 nm) > 红(655 ~ 665 nm) > 蓝绿(475 ~ 480 nm) > 橙(600 ~ 605 nm) > 绿(515 ~ 520 nm) > 黄(570 ~ 575 nm) > 白(400 ~ 700 nm) > 紫外(365 nm),其中对紫外光表现出明显的避光性,而对蓝光和紫光具有很强的吸引力,趋光反应率均在 65% 以上;其次是蓝绿光(475 ~ 480 nm)、绿光(515 ~ 520 nm)、橙光(600 ~ 605 nm)和红光(655 ~ 665 nm),趋向率在 50% ~ 60% 之间;而对 LED 白光和黄光的趋光反应率均在 50% 以下,尤其对 LED 白光无明显的光趋避性。这与李志强等(2009)报道的荔枝蒂蛀虫具有“惰光性”的不谋而合,其中“惰光性”可能限于白光、黄光等特定波长的光。由此作者推测夜间若给予足够光强的 LED 白光或黄光照射时,荔枝蒂蛀虫成虫的复眼将仍处于“明适应”状态,或使其视觉处于脱敏(Desensitization)状态,进而抑制其“暗眼”的发生,导致其趋、避行为反应迟钝,表现出“惰光性”。

利用荔枝蒂蛀虫成虫“惰光性”和“趋隐蔽性”设计的 LED 白光干扰防控技术成为目前荔枝园荔枝蒂蛀虫治理优选策略之一。其原理是通过夜间介入特定外源光干扰或破坏成虫暗期活动行为节律,影响成虫交尾、产卵等生殖行为,降低雌蛾产卵量,进而抑制种群的发展(Jiggins *et al.*, 2001; 李文景等,2021)。而光环境作为自然环境中最重要因素之一,能调控昆虫生长发育、捕食能力和生殖行为(Firebaugh & Haynes, 2016; 许喆等,2019)。尤其是蛾类昆虫的视觉系统对黑暗环境比较适应,而白天强烈的阳光或夜间给予灯光则会对其产生一定的影响和干扰。如毛健夜蛾 *Brithys crini* 交尾高峰期和产卵高峰期因暗期位点不同而异(邱小芳等,2016);用 505 nm、

540 nm、589 nm 的黄光照射对甜菜夜蛾 *Spodoptera exigua* 交配产生阻碍效应后,使产卵前期明显延长,卵的孵化率明显降低(蒋月丽等,2020)。本研究基于荔枝蒂蛀虫雌成虫的光谱行为反应在室内进一步补充研究了 LED 光源对荔枝蒂蛀虫成虫的影响,较完整的评价了夜间 4 种 LED 光照对荔枝蒂蛀虫成虫交配率、繁殖力及寿命的影响。结果显示:夜间 50 lx 的 LED 黄光和白光持续照射能使荔枝蒂蛀虫成虫的交配率由 93.75% 降低至 50% 以下,产卵前期延长,并有效降低雌蛾的产卵量,其中白光还能显著降低其 F_1 代卵的孵化率。此外,不同 LED 光源照射对交配后荔枝蒂蛀虫雌蛾产卵也具有一定的抑制效应,其中夜间白光和黄光持续照射能有效干扰已交配雌虫的产卵活动,使得单雌日均产卵量降低 48.96% ~ 50.71%。由此可见,夜间适当的 LED 白光(400 ~ 700 nm)或黄光(570 ~ 575 nm)持续照射能够通过干扰昆虫交尾和产卵行为的方式有效控制害虫种群发展,该研究结果为优选黄光作为荔枝蒂蛀虫灯光防控的高效绿色替补光源提供科学依据,对目前 LED 白光干扰防控荔枝蒂蛀虫技术的优化升级具有重要指导意义。

目前,市场上 LED 白光多为混合全光谱光源(400 ~ 700 nm),波长范围较大,特异性不强,研究报道 LED 白光对荔枝蒂蛀虫的田间控害效果明显(王凤英等,2020),但不能忽视其长期应用可能对作物及非靶标生物产生不良影响,为此开发特异性强、高效绿色的替换光源对于荔枝蒂蛀虫灯光防控技术的优化升级,害虫抗逆性及环境光污染的治理具有长远意义。本研究初步筛选出 2 种干扰防控荔枝蒂蛀虫成虫繁殖的高效光源,首次提出了 570 ~ 575 nm 黄光作为目前荔枝蒂蛀虫灯光干扰防控技术重要的替补光源之一,为利用特定光谱干扰防控荔枝蒂蛀虫成虫技术的开发提供了重要支撑。然而,本试验仅是在室内封闭条件下进行,需要进一步在田间测定不同光源对荔枝蒂蛀虫繁殖的影响。其次,本试验仅分析了荔枝蒂蛀虫对 9 种 LED 光源的趋性行为反应,侧重评价了 50 lx 的 4 种 LED 光照下成虫繁殖生物学特性的变化,未能涉及全光谱的筛选测试,以及 LED 光照对该虫生殖行为活动影响和繁殖调控相关机制的研究,今后将进一步补充开展相关研究工作,以期荔枝蒂蛀虫物理防控技术研究增砖添瓦。

参考文献 (References)

- Abenes M, Khan ZR. Attractiveness of light color to selected predators of rice pests [J]. *International Rice Research Newsletter*, 1990, 15 (4): 24–25.
- Bian L, Sun XL, Gao Y, *et al.* Research on the light tropism of insects and the progress in application [J]. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 2012, 49 (6): 1677–1686. [边磊, 孙晓玲, 高宇, 等. 昆虫光趋性机理及其应用进展 [J]. 应用昆虫学报, 2012, 49 (6): 1677–1686]
- Briscoel AD, Chittka L. The evolution of color vision in insects [J]. *Annual Review of Entomology*, 2001, 46: 471–510.
- Duan Y, Miao J, Gong ZJ, *et al.* Effects of yellow light on the oviposition and adult longevity of *Mythimna separata* [J]. *Plant Protection*, 2016, 42 (3): 175–177. [段云, 苗进, 巩中军, 等. 黄色光对黏虫成虫产卵和寿命的影响 [J]. 植物保护, 2016, 42 (3): 175–177]
- Duan Y, Liu ST, Duan AJ, *et al.* The preventive effects of yellow light on *Lithocolletis ringoniella* Matsumura [J]. *Henan Agricultural Sciences*, 2008, 12: 73–75. [段云, 刘顺通, 段爱菊, 等. 黄色灯对金纹细蛾的防治作用 [J]. 河南农业科学, 2008, 12: 73–75]
- Firebaugh A, Haynes KJ. Experimental tests of light–pollution impacts on nocturnal insect courtship and dispersal [J]. *Oecologia*, 2016, 182 (4): 1203–1211.
- Jiang YL, Guo P, Li T, *et al.* Interference effect study on reproductive behavior and adult longevity of *Spodoptera exigua* (Lepidoptera: Noctuidae) on different yellow light intensity [J]. *Journal of Environmental Entomology*, 2020, 42 (5): 1230–1234. [蒋月丽, 郭培, 李彤, 等. 黄光光照强度对甜菜夜蛾成虫生殖行为和寿命的干扰效果 [J]. 环境昆虫学报, 2020, 42 (5): 1230–1234]
- Jiang YL, Wu YQ, Li T, *et al.* Behavioural responses of *Anomala corpulenta* Motschulsky (Coleoptera: Scarabaeoidea) to different spectral light [J]. *Acta Entomologica Sinica*, 2015, 58 (10): 1146–1150. [蒋月丽, 武予清, 李彤, 等. 铜绿丽金龟对不同光谱的行为反应 [J]. 昆虫学报, 2015, 58 (10): 1146–1150]
- Jiang YL, Zhang JZ, Yuan SX, *et al.* Progresses in the research and application of yellow light for pest control [J]. *Plant Protection*, 2018, 44 (3): 6–10. [蒋月丽, 张建周, 袁水霞, 等. 黄色灯防治害虫的研究与应用进展 [J]. 植物保护, 2018, 44 (3): 6–10]
- Johansen NS, Vänninen I, Pinto DM, *et al.* In the light of new greenhouse technologies; 2. Direct effects of artificial lighting on arthropods and integrated pest management in greenhouse crops [J]. *Annals of Applied Biology*, 2011, 159 (1): 1–27.
- Li WJ, Quan LF, Dong YZ, *et al.* Effects of white LED light on reproduction of *Conopomorpha sinensis* (Lepidoptera: Gracillariidae) and its field application [J]. *Journal of Fruit Science*, 2021, 38 (8): 783–792. [李文景, 全林发, 董易之, 等. LED 白光对荔枝蒂蛀虫繁殖的影响及其田间防控效果研究 [J]. 果树学报, 2021, 38 (8): 783–792]
- Li ZQ, Qiu YP, Ou LX, *et al.* Observation on the influence of night light on living habits of litchi borer, *Conopomorpha sinensis* Bradley [J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2009, 7: 131–134. [李志强, 邱燕萍, 欧良喜, 等. 夜晚光照影响荔枝蒂蛀虫生活习性的观察 [J]. 广东农业科学, 2009, 7: 131–134]
- Mikkola K. Behavioral and electrophysiological responses of night–flying insects, especially Lepidoptera, to near–ultraviolet and visible light [J]. *Annales Zoologici Fennici*, 1972, 9: 225–254.
- Owens ACS, Lewis SM. The impact of artificial light at night on nocturnal insects: A review and synthesis [J]. *Ecology and Evolution*, 2018, 8: 11337–11358.
- Qiu XF, Xie JK, Wu LP, *et al.* Effects of varied photoperiods on the mating and oviposition of *Brithys crini* (Lepidoptera: Noctuidae) adults [J]. *Acta Entomologica Sinica*, 2016, 59 (10): 1103–1114. [邱小芳, 谢建坤, 吴丽萍, 等. 光周期变化对毛健夜蛾交配和产卵的影响 [J]. 昆虫学报, 2016, 59 (10): 1103–1114]
- Quan LF, Chen BX, Yao Q, *et al.* Research tendency on the litchi fruit moth *Conopomorpha sinensis* Bradley based on bibliometric and Citespace parameters [J]. *Journal of Fruit Science*, 2018, 35 (12): 1516–1529. [全林发, 陈炳旭, 姚琼, 等. 基于文献计量学和 Citespace 的荔枝蒂蛀虫研究态势分析 [J]. 果树学报, 2018, 35 (12): 1516–1529]
- Van Grunsven R, Donners M, Boeke K, *et al.* Spectral composition of light sources and insect phototaxis, with an evaluation of existing spectral response models [J]. *Journal of Insect Conservation*, 2014, 18 (2): 225–231.
- Wakefield A, Broyles M, Stone EL, *et al.* Experimentally comparing the attractiveness of domestic light to insects: Do LEDs attract fewer insects than conventional light types [J]. *Ecology and Evolution*, 2016, 6 (22): 8028–8036.
- Wang FY, Li LF, Wei QX, *et al.* Effects of different light environments on oviposition of *Conopomorpha sinensis* and its control efficacy in field [J]. *Journal of Southern Agriculture*, 2020, 51 (2): 313–318. [王凤英, 黎柳锋, 韦桥现, 等. 不同光环境对荔枝蒂蛀虫产卵的影响及田间防效调查 [J]. 南方农业学报, 2020, 51 (2): 313–318]
- Wang S, Guo XJ, Zhang MJ, *et al.* Copulatory behavior of predaceous ladybird *Harmonia axyridis* (Coleoptera: Coccinellidae) under different illuminative conditions [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34 (24): 7428–7435. [王甦, 郭晓军, 张君明, 等. 异色瓢虫不同光环境下的交配行为 [J]. 生态学报, 2014, 34 (24): 7428–7435]
- Xu Z, Cui J, Bi R, *et al.* Effects of light intensity on the growth, development and reproduction of *Megacopta cribraria* (Hemiptera: Plataspidae) [J]. *Acta Entomologica Sinica*, 2019, 62 (5): 645–652. [许喆, 崔娟, 毕锐, 等. 光照强度对筛豆龟蜡生长发育及繁殖的影响 [J]. 昆虫学报, 2019, 62 (5): 645–652]
- 岡村雅広. “虫の眼”と“光の色”との関係 [R] // 日本第9回農林害虫研究会報告. 高知三翠園, 2004, 26.