

波长、密度和光强对黏虫趋光行为的影响



张 杰¹ 刘振兴¹ 雷朝亮¹ 朱 芬^{2*}

(1. 华中农业大学, 昆虫资源利用与害虫可持续治理湖北省重点实验室, 武汉 430070;

2. 华中农业大学昆虫资源研究所, 武汉 430070)

摘要: 为提高灯光诱控黏虫 *Mythimna separata* 的选择性与效果, 采取成虫趋光反应行为试验箱分别测定 14 种单色光波 LED 灯下、不同试虫密度下及不同光强下黏虫的趋光行为。结果表明: 在 18:00—21:00 时段, 不同光照时间下, 试虫密度为 20 头时黏虫成虫趋光率最高; 在光强为 40~640 lx 下, 光强对黏虫成虫趋光率无显著影响, 当光强为 160 lx 时, 黏虫雌、雄成虫趋光率最高, 分别为 52.0% 和 27.6%; 在 365~660 nm 波长范围内, 雌成虫的趋光率显著高于雄成虫。当波长为 420、590、600、630 和 660 nm 时, 黏虫雌成虫的趋光率较高, 分别为 41.0%、40.0%、41.0%、40.6% 和 45.0%; 当波长为 365、380、445 和 480 nm 时, 黏虫雌成虫的负趋光率较大, 分别为 33.6%、24.6%、20.0% 和 20.6%; 当波长为 570、590、630 和 660 nm 时, 黏虫雄成虫的趋光率较高, 分别为 33.6%、32.4%、30.8% 和 33.2%; 当波长为 365、590、600 和 630 nm 时, 黏虫雄成虫的负趋光率较大, 分别为 21.2%、20.2%、21.8% 和 21.2%, 表明黏虫趋光行为主要受波长影响, 且雌、雄成虫敏感波长不同。

关键词: 黏虫; 趋光行为; 密度; 光强; 波长

Effects of wavelength, density and light intensity on phototactic behavior of oriental armyworm *Mythimna separata*

Zhang Jie¹ Liu Zhenxing¹ Lei Chaoliang¹ Zhu Fen^{2*}

(1. Hubei Insect Resources Utilization and Sustainable Pest Management Key Laboratory, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, Hubei Province, China; 2. Institute of Insect Resources, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, Hubei Province, China)

Abstract: In order to improve the selectivity and effect of light-trap technology for oriental armyworm *Mythimna separata*, the phototactic behavior of adult *M. separata* under 14 monochromatic LED lights, different insect densities and different light intensities were measured in a phototactic behavior test chamber. The results showed that the phototactic rate was the highest when the density was 20 heads per box under different duration of illumination from 18:00 to 21:00. At 40–640 lx, the light intensity had no significant effect on the phototactic rate of *M. separata*. When the light intensity was 160 lx, the phototactic rates of female and male adults were the highest (52.0% and 27.6%, respectively). The phototactic rates of different sexes were significantly different when the wavelength ranged from 365 nm to 660 nm. When the wavelengths were 420, 590, 600, 630 and 660 nm, the phototactic rates of female adults were higher (41.0%, 40.0%, 41.0%, 40.6% and 45.0%, respectively); when the wavelengths were 365, 380, 445 and 480 nm, the photophobic rates of female adults were 33.6%, 24.6%, 20.0% and 20.6%, respectively. When the wavelengths were 570, 590, 630 and 660 nm, the phototactic rates of male adults were higher (33.6%, 32.4%, 30.8% and 33.2%, respectively); when the wavelengths were 365, 590, 600 and

630 nm, the photophobic rates of male adults were 21.2%, 20.2%, 21.8% and 21.2%, respectively. The results suggested that the phototactic behavior of *M. separata* was mainly affected by wavelength, and the sensitive wavelengths of male and female were different.

Key words: *Mythimna separata*; phototactic behavior; density; light intensity; wavelength

黏虫 *Mythimna separata* 属于鳞翅目夜蛾科, 食性杂, 可为害 16 科 104 种以上的植物, 且具有迁飞特性, 是一种易暴发成灾的重要害虫(张海龙, 2019; 杨灿等, 2021)。近年来, 黏虫因其迁飞特性, 在我国(除新疆维吾尔自治区外)频繁发生且大面积暴发, 严重影响粮食产量(于洪春等, 2021)。目前, 黏虫仍主要采用化学药剂进行防治, 但化学药剂易污染环境, 使害虫产生抗药性, 因此迫切需要开发新的防治方法来防治黏虫。生物防治因其无污染的特性越来越受到重视。如 Huang et al. (2018) 利用天敌赤眼蜂寄生防治黏虫; Lihuang et al. (2017) 测试了黏虫对 3 种植物挥发物的趋避反应, 以期通过合成类似的挥发物诱集控制黏虫, 由于诸多原因这些方法并未在生产中被广泛应用, 而灯光诱杀等物理防治策略不仅成本低, 而且不会破坏环境。

昆虫具有趋光性, 可利用此特性来诱集害虫, 如陈琦等(2021)于 2015—2019 年在漯河市利用高空探测灯诱集迁飞性蛾类害虫, 并发现黏虫是其优势种; 边文波(2017)利用黑光灯在淄博市玉米试验田中诱捕到 1 081 头黏虫。昆虫的趋光行为受波长、光强、光谱、性别和发育状态等多种因素的影响(范凡等, 2012), 其中光强是影响昆虫趋光行为的重要因素之一, 如当光强低时华山松木蠹象 *Pissodes punctatus* 趋光反应增加, 当光强高时则其趋光反应下降(Chen et al., 2012); 蚊子可以感受到距离很远的光并向光源飞去, 但当靠近光源时却因光强过高而飞离亮区(Bidlingmayer, 1994); 陈友(2013)发现松蠹狄金小蜂 *Dinotiscus armandi* 的趋光率受光强影响, 在一定范围内, 松蠹狄金小蜂的趋光率随光强的增加逐渐升高。波长对害虫、天敌昆虫和中性昆虫等趋光行为的影响较大(蒋月丽等, 2015; 涂海华等, 2016; 王文龙等, 2017)。利用昆虫敏感波长不仅可以开发诱捕效果更好的诱虫灯, 还可以减少对天敌昆虫的误捕, 如波长 520 nm 的绿色 LED 灯对黏虫的诱集率是白、蓝色商用双波长光的 1.28 倍(Kim et al., 2018a); 同属鳞翅目的梨小食心虫 *Grapholita molesta* 成虫也对 520 nm 的绿光 LED 灯有很强的趋性(刘彦飞等, 2013); 2018 年 5 月—12 月吴霜等(2021)

在国家农作物蔬菜改良中心重庆分中心测试了 12 个市售窄波段光谱 LED 诱虫灯的效果, 结果表明 440~445 nm 蓝光灯对莲藕潜叶摇蚊 *Stenochironomus ne-lumbus* 的诱集效果最好。此外试虫密度也会影响趋光试验结果。王占霞(2015)研究认为趋光试验中试虫密度一般在 10~50 头之间适宜; 王争艳等(2016)研究发现谷蠹 *Rhizopertha dominica* 的趋光率随虫口密度的增加而升高。黏虫作为一种夜行性鳞翅目害虫, 具有趋光性, 但关于其趋光性及敏感波长的报道较少, 明确黏虫趋光行为的敏感波长对于物理防控黏虫具有重要意义。

为了提高灯光诱控黏虫的选择性与效果, 本研究分别测定 14 种单色光波 LED 灯下、不同试虫密度下及不同光强下黏虫的趋光行为, 明确黏虫趋光行为特点, 以期为研发选择性强、诱捕效果好的黏虫诱控灯提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 材料

供试昆虫: 黏虫为华中农业大学昆虫资源研究所 2015 年建立的实验室饲养种群, 于温度 (27 ± 2) °C、相对湿度 70%~80%、光周期 14 L: 10 D (04: 00—18: 00 为光期, 18: 00—04: 00 为暗期) 的室内用饲料连续饲养至今, 待其发育至成虫供试, 饲料配方参考江幸福等(2000)。

仪器和设备: GM1020 型多功能数字式照度计, 深圳市聚茂源科技有限公司。参考 Kim et al. (2018b) 方法自行设计成虫趋光反应行为试验箱, 该箱主体分为光区、暗区和静置室 3 个部分, 光区和暗区长 50 cm、宽 20 cm、高 20 cm; 静置室长 20 cm、宽 20 cm、高 20 cm; 昆虫入口直径 5 cm; 隔离板长 20 cm、宽 19 cm、高 25 cm, 材料为 3 mm 厚黑色不透明有机玻璃; 用孔径为 1.77 mm 的白色尼龙纱网封住光区照光的一侧(图 1)。14 种单色光波 LED 灯, 深圳市鑫宏显光电科技有限公司, 功率为 10 W, 14 种单色光波 LED 灯的波峰分别为 365、380、400、420、445、455、480、500、520、570、590、610、630 和 660 nm, 通过调整光的射入量和光源的远近来调节光强。

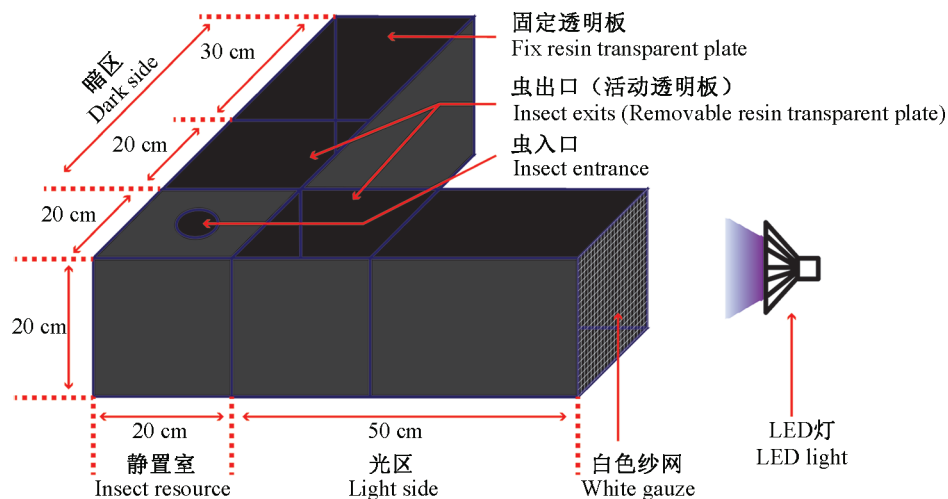


图1 成虫趋光反应行为试验箱示意图

Fig. 1 A sketch of the box for testing phototactic behavior of *Mythimna separata* adult

1.2 方法

1.2.1 试虫密度对黏虫趋光行为的影响试验

试验于成虫趋光反应行为试验箱中进行,将试验箱置于温度为 $(27\pm 2)^{\circ}\text{C}$ 、相对湿度70%~80%的暗室中。试验前,将静置室与光区、暗区之间插上隔板。每天分别取3~6日龄、雌雄比为1:1、翅完整的10、20和40头成虫置于静置室中暗适应1 h,用波长为520 nm、光强为160 lx的LED灯照射,抽出隔板,在光区和暗区上部均覆盖黑布以避免干扰。分别统计光照5、10、15、20、30、45、60、75、90、105和120 min时光区内的黏虫数量,计算趋光率。每天分别于18:00—21:00和02:00—05:00两个时段进行试验,连续处理3 d,即每个时段重复3次。趋光率=光区的黏虫数量/试虫总数 $\times 100\%$ 。

1.2.2 光强对黏虫趋光行为的影响试验

取1日龄、翅完整的雌、雄成虫各20头,置于静置室中暗适应1 h,取波长为520 nm的LED灯照射,调节光源距离使光区光强分别为40、80、160、320和640 lx。照射45 min后统计光区内试虫数量,计算趋光率。每天分别于18:00、20:00、22:00、24:00和02:00进行试验,共5次,每次试验结束后,内壁用酒精棉擦拭并晾干,以避免干扰。连续5 d,每个处理共25个重复。

1.2.3 波长对黏虫趋光行为的影响试验

取1日龄、翅完整的雌、雄成虫各20头,置于静置室中暗适应1 h,分别取波长为365、380、400、420、445、455、480、500、520、570、590、610、630和660 nm的LED灯,调整光强为160 lx后照射45 min,统计光区、暗区内的试虫数量。处理时间和次数同1.2.2。

计算趋光率、负趋光率及活跃虫百分比。趋光率计算公式同1.2.1,负趋光率=暗区内黏虫数量/试虫总数 $\times 100\%$;活跃虫百分比=光区内和暗区内的黏虫数量/试虫总数 $\times 100\%$ 。

1.3 数据分析

采用GraphPad Prism 6软件对试验数据进行统计分析。不同波长下同性别黏虫的趋光率、负趋光率、活跃虫百分比均采用Duncan氏新复极差法进行差异显著性检验。不同试虫密度下和不同光强下趋光行为均采用Sidak法进行差异显著性检验。方差分析前,对试验数据进行方差齐性、正态分布检验和处理,不符合检验的数据进行转换后再进行方差分析。

2 结果与分析

2.1 试虫密度对黏虫趋光行为的影响

18:00—21:00时段,同一密度不同光反应时间下黏虫的趋光率差异均不显著($F_{10,99}=1.52$, $P=0.144$),当试虫密度为20头时,在所有光照时间下黏虫趋光率均最高;不同密度下黏虫趋光率总体随光照时间增加呈缓慢上升趋势,但相同光照时间下不同密度的黏虫趋光率之间无显著差异(图2-A)。02:00—05:00时段,不同密度下黏虫趋光率总体呈先降低再缓慢上升的趋势,但同一密度不同光照时间下黏虫趋光率之间无显著差异($F_{10,99}=1.21$, $P=0.294$,图2-B)。

2.2 光强对黏虫趋光行为的影响

在40、80、160、320和640 lx光强处理下,黏虫雌成虫的趋光率总体呈先增加后降低的趋势,但5个

光强下的趋光率之间差异不显著($F_{4,120}=1.557, P=0.190$);雄成虫的趋光率则呈波动变化的趋势,但5个光强下的趋光率之间差异不显著($F_{4,120}=0.953, P=0.436$);当光强为160 lx时,雌、雄成虫的趋光率均

最高,分别为52.0%和27.6%,两者之间差异显著($P<0.001$);当光强为40、80、160、320和640 lx时,雌成虫的趋光率均显著或者极显著高于雄成虫的($P<0.001$,图3)。

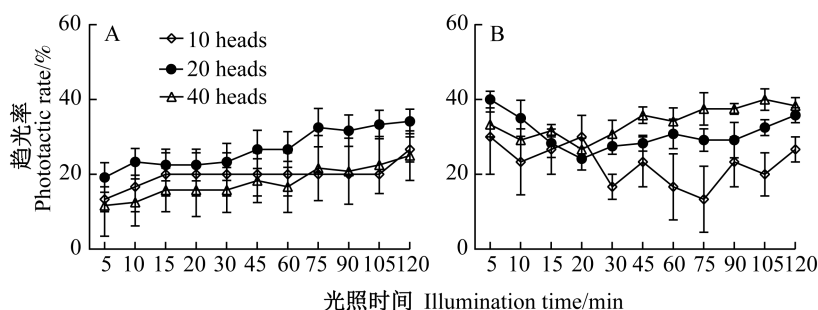


图2 18:00—21:00(A)和02:00—05:00(B)时段不同光照时间下黏虫的趋光率

Fig. 2 Phototactic rates of *Mythimna separata* under different durations of illumination during 18:00—21:00 (A) and 02:00—05:00 (B)

图中数据为平均数±标准误。Data are mean±SE.

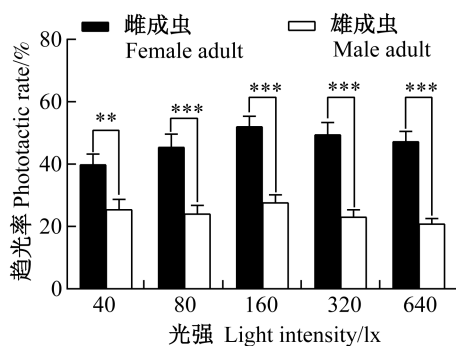


图3 不同光强对黏虫雌、雄成虫趋光率的影响

Fig. 3 Effects of different light intensities on the phototactic rates of female and male adults of *Mythimna separata*

图中数据为平均数±标准误。**和***分别表示经Sidak法检验在 $P<0.01$ 和 $P<0.001$ 水平差异显著。Data are mean±SE. ** or *** indicate significant difference at $P<0.01$ or $P<0.001$ level by Sidak test, respectively.

2.3 波长对黏虫趋光行为的影响

当波长为420、590、600、630和660 nm时,黏虫雌成虫的趋光率较高,分别为41.0%、40.0%、41.0%、40.6%和45.0%;当波长为365、380、445和480 nm时,黏虫雌成虫的负趋光率较大,分别为33.6%、24.6%、20.0%和20.6%;当波长为365、380、400、420、445、480、590、600、630和660 nm时,黏虫雌成虫的活跃虫百分比较高,分别为53.0%、52.6%、52.4%、58.0%、58.0%、58.0%、51.6%、60.4%、55.6%和59.0%(表1)。当波长为570、590、630和660 nm时,黏虫雄成虫的趋光率较高,分别为33.6%、32.4%、30.8%和33.2%;当波长为365、590、600和630 nm时,黏虫雄成虫的负趋光率较大,分别为

21.2%、20.2%、21.8%和21.2%;当波长为380、400、570、590、600、630和660 nm时,黏虫雄成虫的活跃虫百分比较高,分别为41.8%、41.2%、52.2%、52.6%、51.2%、52.0%和48.4%(表1)。

当波长为365 nm和400 nm时,黏虫雌成虫负趋光率与趋光率之间差异显著($P<0.01$),当波长为480 nm时,雌成虫负趋光率显著低于趋光率($P<0.001$),当波长为380 nm和455 nm时,雌成虫趋光率和负趋光率之间无显著差异,其他9种波长下雌成虫趋光率均显著大于负趋光率($P<0.0001$)。当波长为570 nm时,黏虫雄成虫趋光率显著大于负趋光率($P<0.01$),当波长为590 nm时,雄成虫趋光率显著大于负趋光率($P<0.05$),当波长为660 nm时,雄成虫趋光率显著大于负趋光率($P<0.001$),除波长365 nm外,其他10种波长下雄虫趋光率均大于负趋光率但差异不显著(表1)。

3 讨论

昆虫的趋光行为受多种因素的影响(陈友,2013)。在本研究所采用的成虫趋光反应行为试验箱空间中,试虫密度对黏虫趋光行为影响较小,且20头为较适宜的密度,但在更大空间或密度及田间生产中黏虫趋光与试虫密度的关系尚待进一步探索;此外在18:00—21:00与02:00—05:00时段中,相同密度下黏虫的趋光行为却差异较大,可能是昆虫求偶、交配和产卵等行为致使其在不同时间上表现出不同的上灯节律(伍苏然等,2013)。郭鄂等(1963)研究结果表明黏虫交配一般发生在12:00—

06:00时段,02:00—04:00时段是交配高峰期,这也 的主要原因。
可能是在02:00—05:00时段黏虫趋光率变化波动

表1 黏虫雌、雄成虫对14种单色光波LED灯的趋光行为

Table 1 Phototactic behaviors of female and male adults of *Mythimna separata* to 14 LEDs with monochromatic light

波长 Wavelength/ nm	雌成虫 Female adult			雄成虫 Male adult		
	趋光率 Phototactic rate/%	负趋光率 Photophobic rate/%	活跃虫百分比 Total percentage of active insects/%	趋光率 Phototactic rate/%	负趋光率 Photophobic rate/%	活跃虫百分比 Total percentage of active insects/%
365	19.4±2.2 e	33.6±3.9 a**	53.0±4.0 abc	14.0±1.4 d	21.2±3.6 a	35.2±4.0 bcd
380	28.0±2.0 cde	24.6±3.8 b	52.6±3.9 abc	24.6±3.0 cd	17.2±2.7 b	41.8±4.7 abcd
400	33.0±2.6 bcd	19.4±3.1 bc**	52.4±4.3 abc	22.0±2.3 bcd	19.2±3.3 ab	41.2±4.8 abcd
420	41.0±3.1 ab	17.0±2.4 bcd****	58.0±3.6 ab	17.8±1.9 abcd	17.4±3.6 ab	35.2±5.0 bcd
445	38.0±3.6 ab	20.0±3.5 bc****	58.0±2.9 ab	22.6±2.4 abcd	16.0±3.1 ab	38.6±3.0 abcd
455	27.6±2.7 cde	18.2±2.6 bcd	45.8±2.9 c	24.2±2.6 abcd	14.4±2.5 ab	38.6±2.6 abcd
480	37.4±2.6 abc	20.6±3.0 bc***	58.0±3.1 ab	22.4±2.5 abcd	11.6±2.7 b	34.0±3.2 cd
500	35.0±2.5 bcd	10.0±1.8 d****	45.0±2.5 c	18.2±2.3 abcd	13.2±2.5 ab	31.4±2.5 d
520	32.2±2.6 bcd	13.8±1.8 cd****	46.0±2.8 c	25.0±3.0 abcd	13.6±2.1 ab	38.6±2.9 abcd
570	36.0±3.4 abcd	12.0±2.7 cd****	48.0±2.9 bc	33.6±3.2 abc	18.6±2.7 ab**	52.2±3.5 a
590	40.0±2.9 ab	11.6±2.4 cd****	51.6±2.8 abc	32.4±3.9 bcd	20.2±2.7 ab*	52.6±3.4 a
600	41.0±3.1 ab	19.4±3.0 bc****	60.4±2.8 a	29.4±2.7 a	21.8±3.0 a	51.2±2.8 ab
630	40.6±4.2 ab	15.0±2.4 cd****	55.6±3.6 abc	30.8±3.8 a	21.2±2.7 a	52.0±2.6 a
660	45.0±4.0 a	14.0±2.2 cd****	59.0±3.0 a	33.2±3.2 a	15.2±2.2 ab***	48.4±2.9 abc

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 $P<0.05$ 水平差异显著;*,**、***和****分别表示同性别趋光率和负趋光率之间经Sidak法检验在 $P<0.05$ 、 $P<0.01$ 、 $P<0.001$ 和 $P<0.0001$ 水平差异显著。Data in the table are mean±SE. Different lowercase letters in the same column indicate significant difference at $P<0.05$ level by Duncan's new multiple range test. *, **, *** or **** indicate significant difference of in the same sex between phototactic rate and photophobic rate at $P<0.05$, $P<0.01$, $P<0.001$ or $P<0.0001$ level by Sidak test, respectively.

一般来说,光强是影响昆虫趋光行为的重要因素。不同光强下昆虫趋光反应存在明显差异(Chen et al., 2012),如烟青虫 *Heliothis assulta* 成虫随着光强的增强,趋光率反应曲线呈S型(丁岩钦等, 1974);龟纹瓢虫 *Propylaea japonica* 成虫趋光率与光强呈正比关系(陈晓霞等, 2009);杨洪璋等(2014)发现在0.24、0.60和1.18 lx光强下,同属鳞翅目夜蛾科的棉铃虫 *Helicoverpa armigera* 的趋光率也随光强增强而增加。本研究结果显示,当光强为40~160 lx时黏虫雌成虫趋光率随光强的增强而升高,当光强超过160 lx时,其趋光率则呈下降趋势,即趋光率变化呈倒V型,究其原因可能与黏虫复眼的光强阈值有关。昆虫复眼仅在一定光强阈值内为活跃状态,超出阈值的光会抑制复眼,使其处于不活跃状态(袁楷等, 2020)。在田间黏虫的日龄和密度复杂多变,黏虫灯光诱控的最适光强还有待进一步试验验证。后续可探索不同日龄黏虫是否对光强有偏好,这将有利于在实际生产中更好地使用灯光诱控来防治黏虫。

本研究结果表明,在14种单色光波LED灯下黏虫趋光率为20%~45%,不同波长下黏虫趋光率较

弱,可能与其远距离迁飞习性有关,较弱的趋光行为能够避免外界光源对其的影响,进而完成远距离迁移。另外,黏虫具有一定的负趋光率,即在光强极低的情况下黏虫也能进行较强的生命活动,从而表明黏虫在夜间进行迁飞的可行性。本研究发现黏虫成虫在紫外光区和红光光区有较高的负趋光率,黏虫雌成虫对420、590、600、630和660 nm这5种波长敏感,黏虫雄成虫对570、590、630和660 nm这4种波长敏感,不同性别黏虫的敏感波峰存在差异。Kim et al. (2018b)研究发现在430~560 nm波长范围内,当波长为520 nm时黏虫趋光率最高,而本研究结果显示,在430~560 nm波长范围内,黏虫雌、雄成虫的趋光率分别在480 nm和520 nm波长处较高,这可能与试虫日龄有关,本研究所用黏虫为羽化后1日龄成虫,而Kim et al. (2019)则使用了3~5日龄黏虫成虫,3~5日龄黏虫的趋光率比1日龄成虫低。昆虫趋光行为的性别差异在鳞翅目、鞘翅目和半翅目等类群中也有报道(江幸福等, 2010;鞠倩等, 2010;冯娜等, 2015),如二点委夜蛾 *Athetis lepigone* 雌、雄成虫的敏感波峰不同,前者敏感波峰为360、440、524、562

和605 nm,而后者敏感波峰为360、380、440、498和605 nm(杨心月等,2015)。黏虫雌、雄成虫的趋光高峰也存在差异,究其原因可能与复眼差异、体重等因素有关(Marshad et al.,2008)。此外本研究中供试黏虫均未交配,交配对某些昆虫的趋光行为也有重要影响,如在灯诱到的海灰翅夜蛾*Spodoptera litoralis*中,已交配雌成虫所占比例较大(Yathom et al.,1980)。交配前黏虫雄成虫较交配后表现出更强的趋光行为,然而交配后雌成虫比未交配的雌成虫趋光率更高(Kim et al.,2018b)。交配前后黏虫的趋光差异是否与波长有关未见报道,但进行该方面的研究将有助于更广泛地诱控黏虫。此外在不同波长下黏虫雌成虫的趋光率均大于雄成虫,这有利于通过灯光诱控来控制黏虫落卵。

明确昆虫的趋光行为特性对建立高效的灯光诱虫技术至关重要。本研究通过对试虫密度、光强和波长的筛选分析发现黏虫趋光行为主要受波长影响,且雌、雄成虫敏感波长不同。此外,交配和日龄等因素也对黏虫的趋光行为有一定影响,但波长在其中是否具有作用尚待研究。后期可进一步探索黏虫趋光行为的发生与调控机制。

参 考 文 献 (References)

- Bian WB. 2017. Preliminary study on the trapping effect of black light and sex attractant on three main pests in corn field. *Bulletin of Agricultural Science and Technology*, (6): 65–67 (in Chinese) [边文波. 2017. 利用黑光灯和性诱剂对玉米田三种主要害虫的诱集效果初探. *农业科技通讯*, (6): 65–67]
- Bidlingmayer WL. 1994. How mosquitoes see traps: role of visual responses. *Journal of the American Mosquito Control Association*, 10(2): 272–279
- Chen Q, Duan Y, Hou YH, Liu D, Fan ZY, Shen HL, Chen L, Li LL, Wang WH, Duan CY, et al. 2021. Monitoring and analysis of migratory moths trapped by the searchlight in Luohe, Henan Province. *Plant Protection*, 47(3): 226–231 (in Chinese) [陈琦, 段云, 侯艳红, 刘迪, 范志业, 沈海龙, 陈莉, 李雷雷, 王文豪, 段宸宇, 等. 2021. 漯河市高空灯下迁飞性蛾类害虫监测与分析. *植物保护*, 47(3): 226–231]
- Chen XX, Yan HY, Wei W, Qiao WN, Wei GS. 2009. Effect of spectral sensitivity and intensity response on the phototaxis of *Propylea japonica* (Thunberg). *Acta Ecologica Sinica*, 29(5): 2349–2355 (in Chinese) [陈晓霞, 闫海燕, 魏玮, 乔玮娜, 魏国树. 2009. 光谱和光强度对龟纹瓢虫成虫趋光行为的影响. *生态学报*, 29(5): 2349–2355]
- Chen Y. 2013. Studies on phototaxis of *Pissodes punctatus* and its three parasitic wasps. Ph. D thesis. Kunming: Yunnan University (in Chinese) [陈友. 2013. 华山松木蠹象及其三种主要寄生蜂的趋光特性研究. 博士学位论文. 昆明: 云南大学]
- Chen Z, Kuang RP, Zhou JX, Liu X. 2012. Phototactic behaviour in *Aphidius gifuensis* (Hymenoptera: Braconidae). *Biocontrol Science and Technology*, 22(3): 271–279
- Ding YQ, Gao WZ, Li DM. 1974. Study on the phototactic behaviour of nocturnal moths the response of *Hiliothis armigera* (Hübner) and *Heliothis assulta* Gueneé to different monochromatic light. *Acta Entomologica Sinica*, 17(3): 307–317 (in Chinese) [丁岩钦, 高慰曾, 李典谟. 1974. 夜蛾趋光特性的研究: 棉铃虫和烟青虫成虫对单色光的反应. *昆虫学报*, 17(3): 307–317]
- Fan F, Ren HM, Lü LH, Zhang LP, Wei GS. 2012. Effect of spectral sensitivity and intensity response on the phototaxis of *Frankliniella occidentalis* (Pergande). *Acta Ecologica Sinica*, 32(6): 1790–1795 (in Chinese) [范凡, 任红敏, 吕利华, 张莉萍, 魏国树. 2012. 光谱和光强度对西花蓟马雌虫趋光行为的影响. *生态学报*, 32(6): 1790–1795]
- Feng N, Fan F, Tao B, Yang XF, Wei GS. 2015. Effect of spectral sensitivity response on the phototaxis of *Orius sauteri* (Poppius). *Acta Ecologica Sinica*, 35(14): 4810–4815 (in Chinese) [冯娜, 范凡, 陶晔, 杨小凡, 魏国树. 2015. 光谱对东亚小花蝽趋光行为的影响. *生态学报*, 35(14): 4810–4815]
- Guo F, Wu QY, Cai HL, Liu JL. 1963. Studies on the reproduction of armyworm (*Leucania separata* Walker) I: general characteristics of adults. *Acta Entomologica Sinica*, 12(5/6): 565–577 (in Chinese) [郭邦, 吴秋雁, 蔡惠罗, 刘金龙. 1963. 粘虫(*Leucania separata* Walker)生殖的研究I: 成虫的一般特性. *昆虫学报*, 12(5/6): 565–577]
- Huang J, Hua HQ, Zhang F, Li YX. 2018. Suitability assessment of three *Trichogramma* species in the control of *Mythimna separata* (Lepidoptera: Noctuidae). *Journal of Applied Entomology*, 142(1/2): 131–140
- Jiang XF, Luo LZ, Hu Y. 2000. Influences of rearing temperature on flight and reproductive capacity of adult oriental armyworm, *Mythimna separata* (Walker). *Acta Ecologica Sinica*, 20(2): 288–292 (in Chinese) [江幸福, 罗礼智, 胡毅. 2000. 饲养温度对粘虫飞行和生殖能力的影响. *生态学报*, 20(2): 288–292]
- Jiang XF, Zhang ZZ, Luo LZ. 2010. Phototaxis of the beet webworm *Loxostege sticticalis* to different wavelengths and light intensity. *Plant Protection*, 36(6): 69–73 (in Chinese) [江幸福, 张总泽, 罗礼智. 2010. 草地螟成虫对不同光波和光强的趋光性. *植物保护*, 36(6): 69–73]
- Jiang YL, Wu YQ, Li T, Gong ZJ, Duan Y, Miao J, Guo YY. 2015. Behavioural responses of *Anomala corpulenta* Motschulsky (Coleoptera: Scarabaeoidea) to different spectral light. *Acta Entomologica Sinica*, 58(10): 1146–1150 (in Chinese) [蒋月丽, 武予清, 李彤, 巩中军, 段云, 苗进, 郭予元. 2015. 铜绿丽金龟对不同光谱的行为反应. *昆虫学报*, 58(10): 1146–1150]
- Ju Q, Qu MJ, Chen JF, Zhao ZQ, Niu HL, Zhou Q, Yu SL. 2010. The influence of spectral and sexual differences on phototaxis action of several kinds of beetles. *Chinese Bulletin of Entomology*, 47(3): 512–516 (in Chinese) [鞠倩, 曲明静, 陈金凤, 赵志强, 牛虎力, 周强, 禹山林. 2010. 光谱和性别对几种金龟子趋光行为的影响]

- 影响. 昆虫知识, 47(3): 512-516]
- Kim KN, Huang QY, Lei CL. 2019. Advances in insect phototaxis and application to pest management: a review. *Pest Management Science*, 75(12): 3135-3143
- Kim KN, Song HS, Li CS, Huang QY, Lei CL. 2018b. Effect of several factors on the phototactic response of the oriental armyworm, *Mythimna separata* (Lepidoptera: Noctuidae). *Journal of Asia-Pacific Entomology*, 21(3): 952-957
- Kim KN, Yun CN, Sin UC, Huang ZJ, Huang QY, Lei CL. 2018a. Green light and light stress in moth: influence on antioxidant enzymes in the oriental armyworm, *Mythimna separata* (Lepidoptera: Noctuidae). *Environmental Science and Pollution Research International*, 25(35): 35176-35183
- Lihuang KM, Zhang ZL, Kim K, Huang QY, Lei CL. 2017. Antennal and behavioral responses of *Mythimna separata* (Walker) to three plant volatiles. *Environmental Science and Pollution Research International*, 24(32): 24953-24964
- Liu YF, Yu HL, Wu JX. 2013. Phototaxis of the oriental fruit moth, *Grapholita molesta* (Lepidoptera: Tortricidae) to LED lights and related affecting factors. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 50(3): 735-741 (in Chinese) [刘彦飞, 于海利, 仵均祥. 2013. 梨小食心虫对LED光的趋性及影响因素的研究. 应用昆虫学报, 50(3): 735-741]
- Marshad HA, Corless A, Copeland J, Moiserff A. 2008. A method for measuring the surface features of the firefly (Coleoptera: Lampyridae) compound eye. *Journal of Entomological Science*, 43(3): 279-290
- Tu HH, Tang NX, Hu XX, Yao ZW, Wang GL, Wei HY. 2016. LED multispectral circulation solar insecticidal lamp application in rice field. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 32(16): 193-197 (in Chinese) [涂海华, 唐乃雄, 胡秀霞, 姚志文, 王广利, 魏洪义. 2016. LED多光谱间歇发光太阳能杀虫灯对稻田害虫诱杀效果. 农业工程学报, 32(16): 193-197]
- Wang WL, Ren LL, Zhang LS, Ma YB, Luo YQ. 2017. Evaluation of trapping *Dendrolimus tabulaeformis* Tsai et Liu using different wavelength LED lights. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 54(6): 955-960 (in Chinese) [王文龙, 任利利, 张连生, 马云波, 骆有庆. 2017. 不同波长LED灯对油松毛虫的诱捕效果与评价. 应用昆虫学报, 54(6): 955-960]
- Wang ZX. 2015. Study on the taxis to light and colors and behavior mechanism of *Bradysia odoriphaga*. Master thesis. Baoding: Hebei Agricultural University (in Chinese) [王占霞. 2015. 韭菜迟眼蕈蚊光色趋性及其行为机理. 硕士学位论文. 保定: 河北农业大学]
- Wang ZY, Miao SY, Lu YJ, Sun L. 2016. Phototaxis behavior of *Rhyzopertha dominica* (Fabricius). *Plant Protection*, 42(5): 75-79 (in Chinese) [王争艳, 苗世远, 鲁玉杰, 孙雷. 2016. 谷蠹的趋光行为及部分影响因素研究. 植物保护, 42(5): 75-79]
- Wu S, Zhang YM, Guo X, Huang YF, Liu JF. 2021. Effectiveness of different wavelength LED insect lamp traps in vegetable fields. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 58(1): 172-180 (in Chinese) [吴霜, 张谊模, 郭萧, 黄云峰, 刘剑飞. 2021. 不同波长LED诱虫灯对菜地昆虫的诱集效果. 应用昆虫学报, 58(1): 172-180]
- Wu SR, Xiong GR, Yang BP, Zhan RL, Cai WW, Yang NB, Li GP, Zhang SZ. 2013. Population dynamics of phototactic insects in the sugarcane producing regions of Hainan Province. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 34(12): 2430-2435 (in Chinese) [伍苏然, 熊国如, 杨本鹏, 詹儒林, 蔡文伟, 杨乃博, 李国平, 张树珍. 2013. 海南蔗区趋光性昆虫种类及其动态研究. 热带作物学报, 34(12): 2430-2435]
- Yang C, Mu YL, Wang J, Chen XS. 2021. Research progress on biological control of *Mythimna separata* (Walker). *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 49(4): 10-15 (in Chinese) [杨灿, 母银林, 王洁, 陈祥盛. 2021. 黏虫生物防治研究进展. 安徽农业科学, 49(4): 10-15]
- Yang HZ, Wen LZ, Yi Q, Xu H. 2014. Effects of light on the phototaxis of several important agricultural pests. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 30(25): 279-285 (in Chinese) [杨洪璋, 文礼章, 易倩, 许浩. 2014. 光波和光强对几种重要农业害虫趋光性的影响. 中国农学通报, 30(25): 279-285]
- Yang XY, Fan F, Chen J, Liu TH, He YZ. 2015. Effects of spectral sensitivity on the phototaxis of *Aethis lepigone* adults. *Journal of Plant Protection*, 42(6): 1009-1013 (in Chinese) [杨心月, 范凡, 陈洁, 刘廷辉, 何运转. 2015. 光谱对二点委夜蛾成虫趋光行为的影响. 植物保护学报, 42(6): 1009-1013]
- Yathom S, Navon A, Rosilio D. 1980. Sex ratio and mating status of *Spodoptera littoralis* females collected from light traps in Israel. *Phytoparasitica*, 8(2): 99-103
- Yu HC, Chen JH, Sun LF, Song XD, Wang CR, Zhuang BL, Li RZ. 2021. Study on relationship between population density and yield loss of spring maize and economic threshold of armyworm, *Mythimna separata* (Walker). *Journal of Northeast Agricultural University*, 52(3): 13-19 (in Chinese) [于洪春, 陈佳欢, 孙苓英, 宋显东, 王春荣, 庄宝龙, 李润钊. 2021. 黏虫虫口密度与春玉米产量损失关系及经济阈值研究. 东北农业大学学报, 52(3): 13-19]
- Yuan K, Chen Z, Yang TT, Jiang J, Zhou WJ. 2020. Spectral sensitivity and response to light intensity of *Diaphorina citri* Kuwayama (Hemiptera: Psyllidae). *Journal of Yunnan Agricultural University (Natural Science)*, 35(5): 750-755, 884 (in Chinese) [袁楷, 陈祯, 杨婷婷, 姜静, 周文健. 2020. 光谱和光强度对柑橘木虱成虫趋光行为的影响. 云南农业大学学报(自然科学), 35(5): 750-755, 884]
- Zhang HL. 2019. Key points of control technology of corn armyworm. *Agriculture & Technology*, 39(11): 105-106 (in Chinese) [张海龙. 2019. 玉米粘虫防治技术要点. 农业与技术, 39(11): 105-106]

(责任编辑:张俊芳)