

暗期 LED 彩色光源闪烁对斜纹夜蛾 生长发育及繁殖的影响*

钟春兰** 朱地福 程禹朦 刘子航 付子欣 王剑颖 龚慧蓉 涂小云***

(江西师范大学生命科学学院, 南昌 330022)

摘 要 【目的】为明确暗期 LED 彩色光源闪烁对斜纹夜蛾 *Spodoptera litura* 生长发育和繁殖的影响。【方法】试验组设置 3 个处理, 即光源频率为 2.5 Hz 时, 变色灯带颜色选择红光、绿光和蓝光 (标记为 14L : 10F_{R-G-B-2.5Hz}) 和红光、绿光、蓝光、黄光、紫光和白光 (标记为 14L : 10F_{R-G-B-Y-P-W-2.5Hz}), 光源频率为 0.5 Hz 时, 变色灯带颜色选择红光、绿光、蓝光、黄光、紫光和白光 (标记为 14L : 10F_{R-G-B-Y-P-W-0.5Hz}), 对照组光周期为 14L : 10D, 观察斜纹夜蛾卵期、幼虫期、蛹期和成虫期并计算卵孵化率、化蛹率、成虫羽化率、发育历期和成虫寿命等参数。【结果】暗期 LED 彩色光源闪烁对斜纹夜蛾孵化率、化蛹率和羽化率均无显著影响 ($P>0.05$), 对卵期和雌幼虫期亦无显著影响 ($P>0.05$), 14L : 10F_{R-G-B-2.5Hz} 显著延长了雄幼虫期 (22.5 d); 各试验组的蛹期 (雌: 19.0、19.6 和 18.9 d; 雄: 22.4、23.2 和 22.0 d) 均较对照组 (雌: 18.2 d; 雄: 20.8 d) 显著延长 ($P=0.000$), 且雄蛹期显著长于雌蛹期 ($P=0.000$), 14L : 10F_{R-G-B-2.5Hz} 和 14L : 10F_{R-G-B-Y-P-W-2.5Hz} 使雄蛹重 (分别是 0.227 g 和 0.228 g) 显著增加; 各试验组成虫寿命 (雌: 16.8、18.2 和 16.8 d; 雄: 18.3、18.1 和 19.3 d) 和产卵前期 (5.2、6.1 和 5.1 d) 均显著长于对照组 (雌雄成虫寿命分别是 13.1 和 13.3 d, 产卵前期是 3.2 d, $P<0.05$), 但对产卵历期和产卵量无显著影响。【结论】10 lx 的 3 种彩色光源闪烁对斜纹夜蛾生长发育有影响, 尤其是对雄幼虫期、雌雄蛹期及成虫寿命有显著性, 且因彩色光源组分及闪烁频率不同而异, 但对斜纹夜蛾繁殖影响不大。

关键词 斜纹夜蛾; 闪烁; LED; 生长发育; 繁殖

Effects of exposing *Spodoptera litura* (Lepidoptera: Noctuidae) to flashing colored LED lights during the scotophase on the growth, development and reproduction of this species

ZHONG Chun-Lan** ZHU Di-Fu CHENG Yu-Meng LIU Zi-Hang
FU Zi-Xin WANG Jian-Ying GONG Hui-Rong TU Xiao-Yun***

(College of Life Sciences, Jiangxi Normal University, Nanchang 330022, China)

Abstract 【Objectives】To understand the effects of exposure to flashing, colored LED lights during the scotophase on the growth, development and reproduction of *Spodoptera litura*. 【Methods】Insects were randomly assigned to one of three treatment groups: 14L:10F_{R-G-B-2.5Hz}, 14L:10F_{R-G-B-Y-P-W-2.5Hz} and 14L : 10F_{R-G-B-Y-P-W-0.5Hz} (R, G, B, Y, P and W represent red, green, blue, yellow, purple and white light respectively, and the numeric subscripts 2.5 and 0.5 represent the light conversion frequency of different colored LEDs). The control group was kept under a standard photoperiod of 14L : 10D. The durations of the egg, larval and pupal stages, adult longevity, number of eggs laid per female, hatching rate, pupation rate and adult eclosion rate, were recorded and compared. 【Results】Exposure to flashing colored LED lights in the scotophase had no significant effect on the hatching rate, pupation rate or adult eclosion rate ($P>0.05$). There were also no significant effect on

*资助项目 Supported projects: 江西省教育厅科学技术研究项目 (GJJ191686)

**第一作者 First author, E-mail: 1436862785@qq.com

***通讯作者 Corresponding author, E-mail: txy1036@163.com

收稿日期 Received: 2022-01-13; 接受日期 Accepted: 2022-03-30

the duration of the egg or female larval stages ($P>0.05$), but the duration of the male larval stage was significantly prolonged by the 14L : 10F_{R-G-B-2.5Hz} treatment (22.5 d) compared to the control. Pupal duration in all three treatment groups was significantly longer (♀: 19.0, 19.6 and 18.9 d; ♂: 22.4, 23.2 and 22.0 d) than in the control (♀: 18.2 d; ♂: 20.8 d) ($P=0.000$). Male pupal duration was significantly longer than female pupal duration ($P=0.000$), and male pupal weights in the 14L : 10F_{R-G-B-2.5Hz} treatment group (0.227 g) and 14L : 10F_{R-G-B-Y-P-W-2.5Hz} treatment group (0.228 g) were significantly heavier than those of the control group (0.216 g). Adult longevity and the pre-oviposition period of all three treatment groups were significantly prolonged (adult longevity: ♀: 16.8, 18.2 and 16.8 d; ♂: 18.3, 18.1 and 19.3; pre-oviposition period: 5.2, 6.1 and 5.1 d) compared to the control group (adult longevity: ♀: 13.1 d, ♂: 13.3 d; pre-oviposition period: 3.2 d; $P<0.05$). However, exposure to flashing, colored LED lights had no significant effect on the oviposition period or the number of eggs laid per female. **[Conclusion]** Exposure to flashing, colored LED lights (10 lx) during the scotophase affected the growth and development of *S. litura*, especially the duration of the male larval stage, the duration of the female and male pupal stage, and adult longevity. Effects varied with the color of the LED lights and the frequency at which they flashed. However, exposure to flashing, colored LED lights had little effect on the reproduction of *S. litura*.

Key words *Spodoptera litura*; flashing; LED light; growth and development; reproduction

LED 在现代农业增产补光和城市亮化美化等工程中得到了广泛的应用(张莉等, 2019), 一些 LED 光的强弱或颜色变化不明显, 不易为人眼所识别, 呈相对静态, 而有些 LED 光为动态光照, 光的强弱或颜色的变化明显, 易为人眼所识别, 且使人产生不适感(如眩晕等)。研究表明, 不同闪烁频率的 LED 光刺激下所记录的脑电信号也不同(王怡玲等, 2014)。相对静态的 LED 光照影响昆虫的行为, 如红、黄、蓝、绿和白光影响柳圆叶甲 *Plagioderia versicolora* 的爬行、展翅和飞行等行为, 红、黄、蓝、绿和白光对茄二十八星瓢虫 *Henosepilachna vigintioctopunctata* 成虫的取食行为有影响(冯国凤等, 2015; 方梅等, 2018), 钟春兰等(2021)研究表明静态 LED 光照对多种蛾类昆虫的交配和产卵等生物学特征亦有影响。此外, LED 光源作为优质光源在害虫综合治理方面还可用于诱捕害虫(Kim *et al.*, 2019b)。动态 LED 光照可干扰蜜蜂 *Apis mellifera* 和家蝇 *Musca domestica* 等昆虫的行为(Inger *et al.*, 2014), 且研究表明利用 LED 闪烁光源对害虫的趋性可进行综合防治(刘启航和周强, 2011; 李波等, 2013)。然而, 有关夜间 LED 艺术灯光闪烁(尤其是 LED 彩色光源闪烁)对昆虫的影响鲜见报道。

斜纹夜蛾 *Prodenia litura* 食性广, 繁殖力强(秦厚国等, 2006), 自 20 世纪 90 年代以来其为害呈逐渐加重趋势(祝树德等, 2000)。研究

表明, 光周期显著影响斜纹夜蛾生长发育和繁殖(利广规等, 2013); 前期研究结果表明, 相对静态的 LED 光照对斜纹夜蛾生长发育和繁殖的影响因 LED 光源颜色不同而异(钟春兰等, 2020)。在此基础上, 本文进一步对不同频率的 LED 彩色光源闪烁对斜纹夜蛾生长发育和繁殖的影响进行研究, 以期揭示斜纹夜蛾种群对 LED 光照的响应机制, 为今后夜间 LED 光环境下害虫预测预报、生态治理及益虫利用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 供试虫源

斜纹夜蛾低龄幼虫采自南昌市艾溪湖湿地公园荷叶上, 带回室内置于预先放有新鲜荷叶的透明长方形塑料盒(15 cm×8 cm×6 cm)中饲养, 饲养条件为: 温度(26±1)℃, 相对湿度 75%±2%, 光周期为 14L : 10D。待幼虫化蛹后分辨雌蛹和雄蛹, 并置于六孔塑料板(孔径×深度=3.50 cm×1.66 cm)内待羽化, 成虫用 10%蜂蜜水饲喂。

1.2 试验设置

本研究设置的试验组和对照组均在人工气候箱中进行, 光周期为 14L : 10D, 光源均为日光灯, 光照强度为 500 lx。暗期使用的彩色闪烁

光源均为 2 m LED 变色灯带[5 V/0.3 W, 浙江金华天好光电有限公司, 光照强度为 (10 ± 2) lx], 试验组设置 3 个处理, 即光源频率为 2.5 Hz 时, 变色灯带颜色选择红光、绿光和蓝光 (标记为 14L : 10F_{R-G-B-2.5Hz}) 和红光、绿光、蓝光、黄光、紫光和白光 (标记为 14L : 10F_{R-G-B-Y-P-W-2.5Hz}), 光源频率为 0.5 Hz 时, 变色灯带颜色选择红光、绿光、蓝光、黄光、紫光和白光 (标记为 14L : 10F_{R-G-B-Y-P-W-0.5Hz}) 对照组暗期无任何光处理。

1.3 暗期 LED 彩色光源闪烁对斜纹夜蛾生长发育及繁殖的影响

将野外采集的试虫饲养于 14L : 10D 的光照条件下, 所得第 3 代虫源用于本研究。光处理的转换采用人工转换的方法, 试验温度为 (26 ± 1) °C, 相对湿度为 75% ± 2%。

1.3.1 对卵期的影响 将成虫当日所产卵块置于试验组和对照组各自光环境下, 每块卵粒数为 150-300 粒。待孵化后, 统计卵期和孵化率。每处理观察 5 块卵块, 重复 3 次。

1.3.2 对幼虫期和蛹期的影响 将刚孵化的 100 头幼虫置于试验组和对照组各自光环境下饲养, 直至化蛹 (化蛹第 4 天辨别雌雄并称重)、羽化, 计算幼虫期和化蛹率、蛹期和羽化率, 试验重复 3 次。

1.3.3 对成虫期的影响 当日羽化成虫配对后置于试验组和对照组各自光环境下, 用 10% 蜂蜜水饲养, 观察并记录交配、产卵及寿命等情况, 每处理所观察的成虫交配对数均为 20 对。

1.4 数据分析

所有数据用平均值 ± 标准误表示。采用 SPSS 21.0 (SPSS, Inc., Chicago, IL) 软件进行单因素方差分析 (One way ANOVA), Duncan’s 多重比较检验其差异显著性 (P < 0.05)。斜纹夜蛾雌雄幼虫期、雌雄蛹期、雌雄蛹重和雌雄成虫寿命的差异性分析采用独立样本 t-检验进行评估。

2 结果与分析

2.1 LED 彩色光源闪烁对斜纹夜蛾卵孵化率、化蛹率和成虫羽化率的影响

暗期频闪 LED 光对斜纹夜蛾卵孵化率、化蛹率和成虫羽化率均无显著影响 (表 1)。暗期给予闪烁光照射, 各试验组卵孵化率 (F=0.939, df=3,8, P=0.466) 和化蛹率 (F=0.149, df=3,8, P=0.927) 均值低于对照组, 但差异不显著, 其中 14L : 10F_{R-G-B-2.5Hz} 组成虫羽化率均值高于对照, 但各组间均无显著差异 (F=0.642, df=3,8, P=0.609)。

表 1 暗期 LED 彩色光源闪烁对斜纹夜蛾卵孵化率、化蛹率和成虫羽化率的影响
Table 1 Effects of colorful LED light flashing in scotophase on the egg hatching rate, pupation rate and adult eclosion rate of *Spodoptera litura*

光处理 Treatments	卵孵化率 (%) Egg hatching rate (%)	化蛹率 (%) Pupation rate (%)	成虫羽化率 (%) Adult eclosion rate (%)
14L : 10F _{R-G-B-2.5Hz}	90.7 ± 9.6 a	83.0 ± 12.8 a	75.9 ± 10.6 a
14L : 10F _{R-G-B-Y-P-W-2.5Hz}	78.3 ± 20.2 a	79.3 ± 13.2 a	68.9 ± 9.1 a
14L : 10F _{R-G-B-Y-P-W-0.5Hz}	79.3 ± 23.1 a	81.3 ± 9.1 a	70.4 ± 6.6 a
14L : 10D	96.9 ± 3.1 a	85.0 ± 6.9 a	75.8 ± 2.5 a

表中 L, D 和 F 分别代表光期、暗期和闪烁光照, 下标字母 R、G、B、Y、P、W 分别表示红、绿、蓝、黄、紫和白光, 下标数字 2.5 和 0.5 表示不同颜色 LED 光变换的频率。表中数据为平均值 ± 标准差, 同列数据后标有不同小写字母表示差异显著 (P < 0.05, Duncan’s 多重比较)。表 2, 表 3 和表 4 同。
L, D and F means photophase, scotophase and flashing light, respectively. Subscript letter R, G, B, Y, P and W represents red, green, blue, yellow, purple and white light, respectively. Subscript numbers 2.5 and 0.5 represent the light conversion frequency of LED with different colors. Data are mean ± SD, and followed by different letters in the same column indicate significant differences (P < 0.05, Duncan’s multiple comparison). The same as table 2, table 3 and table 4.

2.2 LED 彩色光源闪烁对斜纹夜蛾发育历期的影响

暗期 LED 彩色光源闪烁对斜纹夜蛾各虫态发育历期有所影响 (表 2)。与对照组相比, 各试验组卵期均值有所延长, 但各组间无显著差异 ($F=1.889$, $df=3,8$, $P=0.210$), 14L : 10F_{R-G-B-Y-P-W-2.5 Hz} 组卵期均值最长, 为 7.0 d。

14L : 10F_{R-G-B-2.5Hz} 处理组雄幼虫期均值最长 (22.5 d), 显著长于对照组 (21.8 d) 和 14L : 10F_{R-G-B-Y-P-W-0.5Hz} 组 (22.0 d), 其他两组与对照组无显著差异 (雌: $F=0.839$, $df=3,457$, $P=0.473$; 雄: $F=3.685$, $df=3,521$, $P=0.012$)。

试验组雌蛹和雄蛹历期均较对照组显著延

长 (雌蛹: $F=12.795$, $df=3,360$, $P=0.000$; 雄蛹: $F=31.875$, $df=3,350$, $P=0.000$)。14L : 10F_{R-G-B-2.5Hz} 组雌蛹和雄蛹历期均值均达到最长, 分别为 19.6 d 和 23.2 d, 显著长于对照组和其他试验组, 14L : 10F_{R-G-B-2.5Hz} 组和 14L : 10F_{R-G-B-Y-P-W-0.5Hz} 组雌、雄蛹期均值亦显著长于对照组, 但这两组间雌、雄蛹期均无显著差异。

同一光处理下雌雄幼虫发育历期均无显著差异 (t -检验, 试验组 14L : 10F_{R-G-B-2.5Hz}、14L : 10F_{R-G-B-Y-P-W-2.5Hz}、14L : 10F_{R-G-B-Y-P-W-0.5Hz} 和对照组 14L : 10D P 值分别为 0.307、0.438、0.996 和 0.480); 但各试验组和对照组的雄蛹期均显著性长于雌蛹期 (t -检验, $P=0.000$)。

表 2 暗期 LED 彩色光源闪烁对斜纹夜蛾发育历期的影响

Table 2 Effects of colorful LED light flashing in scotophase on the developmental duration of *Spodoptera litura*

发育阶段 Development stages	14L : 10F _{R-G-B-2.5Hz}	14L : 10F _{R-G-B-Y-P-W-2.5Hz}	14L : 10F _{R-G-B-Y-P-W-0.5Hz}	14L : 10D
卵期 (d) Egg duration (d)	5.3 ± 0.6 a	7.0 ± 1.0 a	6.7 ± 1.5 a	5.7 ± 0.6 a
幼虫期 (d) ♀	22.3 ± 1.7 a	22.3 ± 2.0 a	22.0 ± 2.2 a	21.9 ± 2.0 a
Larval duration (d) ♂	22.5 ± 1.9 a	22.1 ± 1.6 ab	22.0 ± 1.8 b	21.8 ± 2.0 b
蛹期 (d) ♀	19.0 ± 1.4 b	19.6 ± 1.5 a	18.9 ± 2.0 b	18.2 ± 1.3 c
Pupal duration (d) ♂	22.4 ± 1.6 b*	23.2 ± 1.6 a*	22.0 ± 2.1 b*	20.8 ± 1.5 c*

*表示雌和雄发育历期差异显著 ($P<0.05$, t -检验)。表 3 同。

The asterisk means significant differences between female and male developmental duration ($P<0.05$, t -test). The same as table 3.

2.3 LED 彩色光源闪烁对斜纹夜蛾蛹重的影响

不同光处理对斜纹夜蛾的蛹重影响略有不同 (表 3)。就雌蛹而言, 与对照组相比, 各试验组雌蛹重均值有所增加, 但差异不显著 ($F=2.465$, $df=3,457$, $P=0.062$); 而 14L : 10F_{R-G-B-2.5Hz} 和 14L : 10F_{R-G-B-Y-P-W-2.5Hz} 组的雄蛹重均值均显著高于 14L : 10F_{R-G-B-Y-P-W-0.5Hz} 组和对照组 ($F=5.504$, $df=3,521$, $P=0.001$)。

进一步比较同一种光处理下的雌、雄蛹重可知: 14L : 10F_{R-G-B-2.5Hz} 组雄蛹重显著大于雌蛹重 (t -检验, $P=0.017$), 14L : 10F_{R-G-B-Y-P-W-0.5Hz} 组雌雄蛹重却十分接近 (t -检验, $P=0.989$); 另一试验组 14L : 10F_{R-G-B-Y-P-W-2.5Hz} 和对照组的雌雄蛹重则差异不显著 (t -检验, P 值分别为 0.810 和 0.167)。

表 3 暗期 LED 彩色光源闪烁对斜纹夜蛾蛹重的影响

Table 3 Effects of colorful LED light flashing in scotophase on the pupal weight of *Spodoptera litura*

光处理 Treatments	蛹重 (g) Pupal weight (g)	
	♀	♂
14L : 10F _{R-G-B-2.5Hz}	0.215 ± 0.040 a	0.227 ± 0.034 a*
14L : 10F _{R-G-B-Y-P-W-2.5Hz}	0.226 ± 0.072 a	0.228 ± 0.037 a
14L : 10F _{R-G-B-Y-P-W-0.5Hz}	0.212 ± 0.044 a	0.212 ± 0.044 b
14L : 10D	0.209 ± 0.041 a	0.216 ± 0.037 b

2.4 LED 彩色光源闪烁对斜纹夜蛾寿命和繁殖的影响

各试验组雌、雄成虫寿命均较对照组显著延长 (表 4) (雌: $F=3.448$, $df=3,76$, $P=0.021$; 雄: $F=3.591$, $df=3,76$, $P=0.017$), 但各试验组

间均无显著差异, 其中 14L : 10F_{R-G-B-Y-P-W-2.5Hz} 组雌成虫寿命均值最长 (18.2 d), 14L : 10F_{R-G-B-Y-P-W-0.5Hz} 组雄成虫寿命均值最长 (19.3 d)。同一光处理下, 雌雄成虫寿命差异均不显著 (*t*-检验, 14L : 10F_{R-G-B-2.5Hz}、14L : 10F_{R-G-B-Y-P-W-2.5Hz}、14L : 10F_{R-G-B-Y-P-W-0.5Hz} 和对照组的 *P* 值分别为 0.379、0.930、0.298 和 0.896)。

表 4 暗期 LED 彩色光源闪烁对斜纹夜蛾寿命和繁殖的影响
Table 4 Effects of colorful LED light flashing in scotophase on the longevity and reproduction of *Spodoptera litura*

繁殖阶段 Reproductive stages		14L : 10F _{R-G-B-2.5Hz}	14L : 10F _{R-G-B-Y-P-W-2.5Hz}	14L : 10F _{R-G-B-Y-P-W-0.5Hz}	14L : 10D
成虫寿命 (d)	♀	16.8 ± 4.1 a	18.2 ± 5.2 a	16.8 ± 7.1 a	13.1 ± 4.1 b
Adult longevity (d)	♂	18.3 ± 6.0 a	18.1 ± 5.6 a	19.3 ± 7.8 a	13.3 ± 5.5 b
产卵前期 (d)		5.2 ± 1.4 b	6.1 ± 1.4 a	5.1 ± 1.5 b	3.2 ± 1.3 c
Pre-oviposition period					
产卵历期 (d)		6.3 ± 2.3 a	5.8 ± 2.4 a	4.6 ± 3.0 a	5.2 ± 2.1 a
Oviposition period					
单雌产卵量		1 378.7 ± 735.9 a	1 024.3 ± 452.5 a	1 031.3 ± 585.3. a	1 335.6 ± 452.5 a
Number of eggs laid per female					

与对照组相比, 各试验组的产卵前期均显著延长, 其中 14L : 10F_{R-G-B-Y-P-W-2.5Hz} 组产卵前期均值最长 (6.1 d), 对照组最短 (仅为 3.2 d) (*F*=15.474, *df*=3,76, *P*=0.000)。

各试验组产卵历期均值亦均长于对照组, 但无显著差异性 (*F*=1.848, *df*=3,76, *P*=0.146)。各试验组和对照组的单雌产卵量亦无显著差异 (*F*=2.255, *df*=3,76, *P*=0.089)。

3 讨论

暗期 LED 光照对昆虫卵孵化率、化蛹率和羽化率有影响, 但因昆虫种类、LED 光源的波长 (或光色、或光质) 和强度及照射时长 (未发表资料) 等而异 (桑文等, 2018; Kim *et al.*, 2019a; 蒋月丽等, 2020b; 乔利等, 2021)。就斜纹夜蛾而言, 光照强度 1 000 lx 的不同光源显著降低了孵化率、化蛹率和羽化率 (董婉君, 2018), 但暗期给予 5 h 的静态 LED 单色光 (200 lx) 处理对斜纹夜蛾孵化率、化蛹率和羽化率没有显著性影响 (钟春兰等, 2020)。本研究结果表明, 当光照强度为 10 lx 时, 不同灯带颜色 and 不同频率的 3 种闪烁彩光对斜纹夜蛾孵化、化蛹及羽化影响不大, 不同闪烁光源之间及与对照组相比差异均不显著 (表 1), 但与几种静态 LED 单色光 (200 lx) 处理相比, 本研究中 3 种闪烁光源

(10 lx) 处理后孵化率、化蛹率和成虫羽化率都普遍偏高。另外, 本研究结果表明, 彩色光源闪烁对卵期无显著性影响 (表 2), 结合其对卵孵化率亦无显著性影响, 这可能与本研究中光照强度弱有关, 也可能与卵期胚胎发育过程中无感光系统 (如复眼、单眼或侧单眼) 或感光系统正在形成中有关。综上所述, 斜纹夜蛾卵孵化率、幼虫化蛹率及成虫羽化率可能与闪烁光源光照强度低有关, 今后应开展不同强度梯度的闪烁彩光实验予以验证。

侧单眼是完全变态类昆虫幼虫仅有的感光器官, 具有一系列不同的感光色素系统, 能感知短、中、长波光, 具有辨别波长能力, 可感知颜色等 (刘红霞和彩万志, 2007)。结合本研究结果, 推测幼虫接受 3 种闪烁彩光处理后, 发育历期均有所延长, 尤其是雄幼虫, 以致取食时间延长, 蛹重增加, 且频率越高 (2.5 Hz), 影响越大 (表 2, 表 3)。棉铃虫 *Helicoverpa armigera* 雄蛾视蛋白基因 (*Ha-UV*、*Ha-BL*) 表达量高于雌蛾 (Xu *et al.*, 2018), 棉铃虫雄蛾长波视觉基因 (*Ha-LW*) 的表达量较高, 而这些视蛋白基因在性别上的差异, 可能与雌雄蛾在求偶及交配等方面的行为差异相关 (Yan *et al.*, 2014)。结合本研究结果, 作者认为斜纹夜蛾幼虫侧单眼视蛋白基因表达量可能也存在性别差异, 导致了感光的

性别差异, 进而影响其取食及幼虫期。

蛹在头部表皮具有对光敏感的透明区(颅顶板), 接受光刺激的器官是脑, 因此, 蛹期虽不见其单眼和复眼, 但仍可以感光(邓华山, 1980), 这也是光源的变化导致蛹期改变的原因(Kim *et al.*, 2019a)。前期研究结果表明, 静态 LED 单色光(200 lx) 缩短了雌蛹和雄蛹历期(钟春兰等, 2020), 而本研究中使用闪烁彩光(10 lx) 处理却延长了雌蛹和雄蛹历期(表 2), 这可能是光强度差异导致了两种相反的结果; 然而 14L : 10F_{R-G-B-Y-P-W-2.5Hz} 处理组蛹期延长更显著(表 2), 原因还不得而知。

研究表明 LED 对昆虫成虫寿命影响显著, 但因昆虫种类及性别、光源颜色及强度不同而异, 如夜间施以黄光延长了粘虫 *Mythimna separata* 雌雄成虫寿命(段云等, 2016), 相反给予 10 lx 和 100 lx 的黄光却缩短了甜菜夜蛾 *Spodoptera exigua* 雌成虫寿命(尤其是 100 lx 的黄光), 而对雄成虫寿命影响不显著(蒋月丽等, 2020b)。本研究结果表明, 各试验组均显著延长了雌成虫和雄成虫的寿命, 雌虫产卵前期也显著延长(表 4), 且 14L : 10F_{R-G-B-Y-P-W-2.5Hz} 组的产卵前期显著高于 14L : 10F_{R-G-B-2.5Hz} 组和 14L : 10F_{R-G-B-Y-P-W-0.5Hz} 组, 即闪烁频率高、波长种类多的试验组的产卵前期显著长于另外 2 组。LED 光能够延长产卵前期也见于草地贪夜蛾 *Spodoptera frugiperda* 和甜菜夜蛾等(蒋月丽等, 2008, 2020a)。斜纹夜蛾的产卵历期受到频闪 LED 光的影响不明显, 草地贪夜蛾和甜菜夜蛾的产卵历期受 LED 光照亦是影响不大(蒋月丽等, 2008, 2020a)。此外, 3 种彩色光源闪烁对斜纹夜蛾产卵量影响亦不显著(表 4), 原因可能是斜纹夜蛾生殖行为受低光强影响不明显, 棉铃虫则有所不同, 微光(0.5 lx) 可以促进棉铃虫雌蛾的求偶行为、性信息素的合成及交配(闫硕等, 2014), 棉铃虫作为弱光性昆虫适合在低强度的光照下生殖发育, 但目前尚不明确斜纹夜蛾适合何种光照强度。

综上所述, 3 种彩色光源闪烁对斜纹夜蛾的变态和产卵量无显著性影响, 而对发育历期影响较大, 如对雄幼虫期、雌雄蛹期及成虫寿命的影

响显著, 且因彩色光源组分及闪烁频率不同而异。导致这些差异性的电生理机制是否类似于人脑电信号因 LED 闪烁频率不同而异(王怡玲等, 2014), 值得进一步研究。

参考文献 (References)

- Deng HS, 1980. The effect of sensitization and diapause on pupa silkworms. *Acta Sericologica Sinica*, 6(2): 125–128. [邓华山, 1980. 关于柞蚕蛹期感光解除滞育的效应. 蚕业科学, 6(2): 125–128.]
- Duan Y, Miao J, Gong ZJ, Jiang YL, Li T, Li HL, Wu YQ, 2016. Effects of yellow light on the oviposition and adult longevity of *Mythimna separata*. *Plant Protection*, 42(3): 175–177. [段云, 苗进, 巩中军, 蒋月丽, 李彤, 李慧玲, 武予清, 2016. 黄色光对黏虫成虫产卵和寿命的影响. 植物保护, 42(3): 175–177.]
- Dong WJ, 2018. Effects of different light sources on the growth and reproduction of five insects. Master dissertation. Wuhan: Huazhong Agricultural University. [董婉君, 2018. 不同光源对五种昆虫生长发育和繁殖的影响研究. 硕士学位论文. 武汉: 华中农业大学.]
- Feng GF, Feng XH, Deng QW, Gou LC, Kang HR, Zhu YL, Fu L, Xia F, Li XN, Tu XY, 2015. Effects of LED sources on the behavior of adult *Plagioder versicolora*. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 52(4): 983–992. [冯国凤, 冯兴海, 邓倩文, 苟璐琛, 康浩然, 朱云龙, 付莉, 夏飞, 李晓娜, 涂小云, 2015. LED 光源对柳圆叶甲成虫行为的影响. 应用昆虫学报, 52(4): 983–992.]
- Fang M, Xie JK, Zhu M, Wang M, Tu XY, 2018. Effects of photoperiod and LED light on the behavior of *Henosepilachna vigintioctopunctata* (Coleoptera: Coccinellidae) adults. *Acta Entomologica Sinica*, 61(11): 1295–1299. [方梅, 谢建坤, 朱敏, 王敏, 涂小云, 2018. 光周期和LED光源对茄二十八星瓢虫成虫行为的影响. 昆虫学报, 61(11): 1295–1299.]
- Inger R, Bennie J, Davies TW, Gaston KJ, 2014. Potential biological and ecological effects of flickering artificial light. *PLoS ONE*, 9(5): e98631.
- Jiang YL, Duan Y, Wu YQ, 2008. Effects of green-yellow light with three different wavelengths on the oviposition biology of *Spodoptera exigua* (Hübner). *Journal of Plant Protection*, 35(5): 473–474. [蒋月丽, 段云, 武予清, 2008. 三种不同波长绿-黄光对甜菜夜蛾产卵生物学的影响. 植物保护学报, 35(5): 473–474.]
- Jiang YL, Guo P, Li T, Li GP, Wang XQ, Wu YQ, 2020a. Effects of yellow and green light on the reproduction and adult longevity of fall armyworm *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae). *Journal of Plant Protection*, 47(4): 902–903. [蒋月丽, 郭培, 李彤, 李国平, 王雪琴, 武予清, 2020a. 黄光和绿光照射对草地贪夜蛾成虫生殖和寿命的影响. 植物保护学报, 47(4):

- 902–903.]
- Jiang YL, Guo P, Li T, Hao CQ, Miao J, Gong ZJ, Duan Y, Liu QH, Wu YQ, 2020b. Interference effect study on reproductive behavior and adult longevity of *Spodoptera exigua* (Lepidoptera: Noctuidae) on different yellow light intensity. *Journal of Environmental Entomology*, 42(5): 1230–1234. [蒋月丽, 郭培, 李彤, 郝超群, 苗进, 巩中军, 段云, 刘启航, 武予清, 2020b. 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. 环境昆虫学报, 42(5): 1230–1234.]
- Kim KN, Jo YC, Huang ZJ, Song HS, Ryu KH, Huang QY, Lei CL, 2019a. Influence of green light illumination at night on biological characteristics of the oriental armyworm, *Mythimna separata* (Lepidoptera: Noctuidae). *Bulletin of Entomological Research*, 110(1): 1–8.
- Kim KN, Huang QY, Lei CL, 2019b. Advances in insect phototaxis and application to pest management: A review. *Pest Management Science*, 75(12): 3135–3143.
- Liu HX, Cai WZ, 2007. The structure and function of simple eyes of insect. *Chinese Bulletin of Entomology*, 44(4): 603–607. [刘红霞, 彩万志, 2007. 昆虫单眼的结构和功能. 昆虫知识, 44(4): 603–607.]
- Liu QH, Zhou Q, 2011. Experiment of locust phototactic response to flash and cosine alternating light. *Journal of Jiangsu University(Natural Science Edition)*, 32(3): 260–265. [刘启航, 周强, 2011. 频闪光源和交变光源对蝗虫趋光响应的试验. 江苏大学学报(自然科学版), 32(3): 260–265.]
- Li B, Liu QH, Zhou Q, 2013. Investigations of LED insecticidal lamp trap and kill orchard insect. *Agricultural Engineering*, 3(S1): 21–25. [李波, 刘启航, 周强, 2013. LED 杀虫灯诱杀果园昆虫测试. 农业工程, 3(S1): 21–25.]
- Li GG, Lv SX, Yang X, Xu SL, Zheng CG, Chen QJ, 2013. Influence of the photoperiod on the artificial rearing, *Spodoptera litura* (Fabricius). *Guangdong Agricultural Sciences*, 40(10): 89–90, 116. [利广规, 吕思行, 杨欣, 徐树兰, 郑常格, 陈其津, 2013. 光周期对人工半合成饲料饲养斜纹夜蛾的影响. 广东农业科学, 40(10): 89–90, 116.]
- Qin HG, Wang DD, Ding J, Huang RH, Ye ZX, 2006. Host plants of *Spodoptera litura*. *Acta Agriculturae Jiangxi*, 18(5): 51–58. [秦厚国, 汪笃栋, 丁建, 黄荣华, 叶正襄, 2006. 斜纹夜蛾寄主植物名录. 江西农业学报, 18(5): 51–58.]
- Qiao L, Hong F, Jin YL, Geng SB, Yin J, Wang CS, 2021. Effects of yellow and green light on biological habit of *Ectropis grisescens* Warren. *Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition)*, 49(7): 69–75. [乔利, 洪枫, 金银利, 耿书宝, 尹健, 王春生, 2021. 黄光和绿光对灰茶尺蠖成虫生物学习性的影响. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 49(7): 69–75.]
- Sang W, Dong WJ, Huang QY, Zhu F, Wang XP, Guo SH, Lei CL, 2018. Effects of different light wavelengths on the growth and reproduction of *Mythimna separata*. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 55(5): 810–816. [桑文, 董婉君, 黄求应, 朱芬, 王小平, 郭墅濠, 雷朝亮, 2018. 不同光环境对粘虫生长发育的影响. 应用昆虫学报, 55(5): 810–816.]
- Wang YL, Qin YR, Guo ZC, 2014. The research of brain voltage changes based on different light stimulus of flicker frequency. *Chinese Journal of Medical Physics*, 31(5): 5184–5187. [王怡玲, 覃玉荣, 郭湛超, 2014. 基于不同闪烁频率光刺激的脑电压变化研究. 中国医学物理学杂志, 31(5): 5184–5187.]
- Xu P, Lu B, Xiao H, Fu X, Murphy RW, Wu K, 2018. The evolution and expression of the moth visual opsin family. *PLoS ONE*, 8(10): e78140.
- Yan S, Li HT, Zhu WL, Zhu JL, Zhang QW, Liu XX, 2014. Effects of light intensity on the sexual behavior of the cotton bollworm, *Helicoverpa armigera* (Lepidoptera: Noctuidae). *Acta Entomologica Sinica*, 57(9): 1045–1050. [闫硕, 李慧婷, 朱威龙, 朱家林, 张青文, 刘小侠, 2014. 光强度对棉铃虫交配行为的影响. 昆虫学报, 57(9): 1045–1050.]
- Yan S, Zhu JL, Zhu WL, Zhang XF, Li Z, Liu XX, Zhang QW, 2014. The expression of three opsin genes from the compound eye of *Helicoverpa armigera* (Lepidoptera: Noctuidae) is regulated by a circadian clock, light conditions and nutritional status. *PLoS ONE*, 9(10): e111683.
- Zhu SD, Lu ZQ, Chen LF, Yu W, Zhang SJ, 2000. Effect of temperature and food on *Spodoptera litura* population. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 11(1): 111–114. [祝树德, 陆自强, 陈丽芳, 郁伟, 张绍军, 2000. 温度和食料对斜纹夜蛾种群的影响. 应用生态学报, 11(1): 111–114.]
- Zhang L, Yu XP, Huang YT, Yuan YK, Liang LF, Li C, 2019. Application and development trend of LED artificial light for plant lighting. *Journal of Foshan University(Natural Science Edition)*, 37(1): 50–55. [张莉, 喻晓鹏, 黄依婷, 袁毅凯, 梁丽芳, 李程, 2019. LED 人工补光在植物照明中的应用及发展趋势. 佛山科学技术学院学报(自然科学版), 37(1): 50–55.]
- Zhong CL, Chen SH, Zhou XM, Weng RY, Xiao GQ, Zheng HH, Tu XY, 2020. Effects of 5 h LED light of different wavelengths in scotophase on the growth, development and reproduction of *Spodoptera litura* (Lepidoptera: Noctuidae). *Acta Entomologica Sinica*, 63(12): 1490–1496. [钟春兰, 陈苏泓, 周小妹, 翁如玉, 肖国权, 郑欢欢, 涂小云, 2020. 暗期 5 h 不同波长 LED 光照对斜纹夜蛾生长发育及繁殖的影响. 昆虫学报, 63(12): 1490–1496.]
- Zhong CL, Liu ZH, Zhu DF, Cheng YM, Tu XY, 2021. Effects of light factors on mating percentage and oviposition in moths. *Biological Disaster Science*, 44(3): 332–336. [钟春兰, 刘子航, 朱地福, 程禹朦, 涂小云, 2021. 光因子对蛾类昆虫交配率和产卵量的影响. 生物灾害科学, 44(3): 332–336.]