

暗期不同光源的光周期和温度对丝棉木金星尺蛾滞育、发育时间和蛹重的影响*

朱地福** 程禹朦 龚慧蓉 钟春兰 苏清雨

徐小卉 黄 静 涂小云***

(江西师范大学生命科学学院, 南昌 330022)

摘 要 【目的】 探明暗期不同光源的光周期和温度对丝棉木金星尺蛾 *Calospilos suspecta* 滞育诱导、发育时间和蛹重的影响。【方法】 25 ℃和 28 ℃室温时, 分别测试暗期无光、暗期红光和暗期黄光各 6 个光周期下滞育率、滞育蛹对应的幼虫期、蛹重和蛹期。【结果】 (1) 各试验条件下均诱导了滞育, 28 ℃时滞育率多高于 25 ℃, 且 28 ℃时暗期红光和黄光提高了滞育率; (2) 25 ℃下所得滞育蛹对应的幼虫期多长于 28 ℃; (3) 28 ℃下所得滞育蛹多重于 25 ℃; (4) 各试验条件下所得滞育蛹的蛹期不一致, 25 和 28 ℃下 12L : 12D、11L : 13D 共 4 个处理组蛹期在 120 d 以上; 25 ℃下 12L : 12D 和 11L : 13D 处理组滞育蛹的蛹期分别是 84.6 d 和 86.1 d; 其余 30 个处理组滞育蛹的平均蛹期在 37-67 d。【结论】 试验条件下丝棉木金星尺蛾滞育生物学特性较为复杂, 受光照、温度及光温互作的影响; 从滞育蛹的蛹期来看, 2 个温度下短光照 (12L : 12D 和 11L : 13D) 诱导了冬季滞育, 25 ℃时 12L : 12R 和 11L : 13R 处理组滞育蛹蛹期介于冬季滞育和夏季滞育之间, 其余 30 个处理组诱导了夏季滞育。

关键词 丝棉木金星尺蛾; LED 光照; 温度; 滞育

Effects of artificial photoperiod created with different light sources, and temperature, on the diapause, development and pupal weight of *Calospilos suspecta* (Lepidoptera: Geometridae)

ZHU Di-Fu** CHENG Yu-Meng GONG Hui-Rong ZHONG Chun-Lan SU Qing-Yu

XU Xiao-Hui HUANG Jing TU Xiao-Yun***

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

Abstract 【Objectives】 To understand the effects of creating artificial photoperiods with different light sources, and temperature, on diapause induction, development and pupal weight in *Calospilos suspecta*. 【Methods】 Newly hatched larvae were exposed to different photoperiods created using different light sources during the dark phase at either 25 and 28 ℃ in a laboratory. The diapause rate, duration of the larval period, pupal weight and duration, of diapausing pupae were measured and compared. 【Results】 (1) Some pupae in each treatment group entered diapause, but the diapause rate at 28 ℃ was higher than that at 25 ℃ in most treatment groups. The diapause rate increased when red or yellow LEDs were used as the light source. (2) The duration of the larval period at 25 ℃ was longer than that at 28 ℃ in most treatment groups. (3) Diapausing pupae were heavier at 28 ℃, than at 25 ℃. (4) The duration of diapause varied between treatment groups. It was longer than 120 d in the 12L : 12D and 11L : 13D groups at either 25 or 28 ℃. However, at 25 ℃, diapause duration was 84.6 and 86.1 d in the 12L : 12D and 11L : 13D groups, respectively. Diapause duration in the other 30 treatment groups was 37-67 d. 【Conclusion】 Diapause in *C. suspecta* was complex and influenced by light source, temperature, and the interaction between these factors. Winter diapause was induced by photoperiods of 12L : 12D and 11L : 13D at either 25 or 28 ℃. However, the

*资助项目 Supported projects: 国家自然科学基金地区项目 (31960558); 江西省教育厅科学技术研究项目 (GJJ2200307)

**第一作者 First author, E-mail: 1748785101@qq.com

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

收稿日期 Received: 2022-12-19; 接受日期 Accepted: 2023-01-27

duration of diapause induced by these photoperiods at 25 °C was intermediate between that of winter and summer diapause.

Summer diapause was induced in the other 30 treatment groups.

Key words *Calospilos suspecta*; LED light; temperature; diapause

滞育是昆虫等动物对环境适应性策略之一,光照和温度是昆虫滞育诱导的重要影响因子,LED (Light emitting diode, 发光二极管) 作为新兴光源已广泛应用于农业增产补光及研究(时晓芳等, 2021; 马肖静等, 2022) 和城市建筑物亮化美化等(祁迹, 2021; 朱雅蓉, 2021), 夜间人工灯光(包括 LED 光照) 对昆虫行为学、生物学、生理学等有广泛的影响(冯国凤等, 2015; 朱敏等, 2016; 方梅等, 2017; Avalon and Sara, 2018; 钟春兰等, 2022), 且 LED 光源还影响昆虫及螨类滞育的诱导, 如毛健夜蛾 *Brithys crini*、二斑叶螨 *Tetranychus urticae* 等(涂小云等, 2013, 2014)。温度是影响昆虫滞育生物学特性另一重要环境因子, 温度可单独与其他生态因子(如光因子) 结合起作用, 如影响亚洲玉米螟 *Ostrinia furnacalis*、黄杨绢野螟 *Diaphania perspectalis* 滞育诱导(涂小云, 2011; 肖海军等, 2011; 郭建青等, 2013) 和毛健夜蛾滞育解除(涂小云等, 2013)。

丝棉木金星尺蛾 *Calospilos suspecta* 又名大叶黄杨尺蛾, 在我国主要分布于东北、华北、华东、华中南部、西北和内蒙古等地(李景科, 1987), 该虫以蛹在寄主植物根系附近的表层土越冬, 部分蛹能休眠越夏, 一年发生多代(张承国和吴庆芳, 1994)。丝棉木金星尺蛾在南昌地区一年发生 3-4 代, 越冬蛹于 3 月底羽化, 第一代 4 月上旬到 6 月中下旬, 第二代 5 月下旬到 10 月下旬, 第三代 7 月中旬到 10 月下旬, 局部四代 9 月下旬到 12 月上旬, 遇高温以蛹滞育越夏(胡梅操和章士美, 1986)。该虫主要寄主植物是大叶黄杨 *Buxus megistophylla*、金边黄杨 *Euonymus japonicus*、丝棉木 *Euonymus maackii*、扶芳藤 *Euonymus fortunei* 等(杨代凤等, 2007), 为害轻者叶片被啃食致残缺不全, 重者叶片全部被啃食干净, 茎皮亦被啃食, 致使大部分枝条枯死, 甚至全株死亡; 大发生时树冠下尽是虫粪及吐丝悬垂的幼虫, 严重影响城市绿化效应和市容市貌。

大叶黄杨和金边黄杨等为城市常用绿化植物, 这些绿化植物及其害虫丝棉木金星尺蛾多暴露于城市亮化工程的 LED 光环境下, LED 光环境对该虫的滞育和生长发育有何影响值得探明。为此, 本研究测试了温度和暗期不同光源的光周期对丝棉木金星尺蛾滞育诱导、发育时间和蛹重的影响, 为复杂光温环境下该害虫的预测预报提供理论依据, 亦可为益虫的繁育提供帮助。

1 材料与方法

1.1 供试材料

1.1.1 供试虫源及管理 自江西师范大学瑶湖校区校园内大叶黄杨上采集丝棉木金星尺蛾 2-3 龄幼虫, 室温 (26 ± 1) °C、相对湿度 75%、光周期为 13L : 11D, 置于透明长方形塑料盒(长×宽×高= 17.00 cm×11.50 cm×5.00 cm) 用新鲜大叶黄杨嫩叶饲养, 幼虫化蛹后分辨雌雄, 并置于 6 孔塑料板(孔径×深度= 3.50 cm×1.66 cm) 内待羽化。成虫羽化后雌雄配对, 单对置于含有 10% 蜂蜜水棉球的方形塑料盒中产卵, 饲养光周期为 14L : 10D。所产卵粒置于垫有微湿润纸巾的透明圆柱形塑料盒(直径×高= 6.10 cm×2.60 cm) 待其孵化, 初孵幼虫供试验用。

1.1.2 光源 本试验所用光源有日光灯(光照强度为 500 lx); 红色 (Red, R, 620-625 nm) 和黄色 LED 灯 (Yellow, Y, 580-585 nm) (杭州拓亚光电科技有限公司定制球泡灯, 光照强度均为 (200 ± 5) lx)。

1.2 试验设计

在实验室条件下, 设计了三因素试验: 温度 × 暗期光处理 × 光周期(表 1), 探究不同光照和温度组合条件对丝棉木金星尺蛾滞育的影响。

表 1 光周期中, L 为光期, 采用日光灯照明, 光照强度为 500 lx, D 为暗期, 不使用任何光照,

表 1 试验影响因子设计
Table 1 Experimental influence factors design

处理 Treatment	25 °C			28 °C		
	暗期无光 No light	暗期红光 Red LED light	暗期黄光 Yellow LED light	暗期无光 No light	暗期红光 Red LED light	暗期黄光 Yellow LED light
光周期 Photoperiod	16L : 8D	16L : 8R	16L : 8Y	16L : 8D	16L : 8R	16L : 8Y
	15L : 9D	15L : 9R	15L : 9Y	15L : 9D	15L : 9R	15L : 9Y
	14L : 10D	14L : 10R	14L : 10Y	14L : 10D	14L : 10R	14L : 10Y
	13L : 11D	13L : 11R	13L : 11Y	13L : 11D	13L : 11R	13L : 11Y
	12L : 12D	12L : 12R	12L : 12Y	12L : 12D	12L : 12R	12L : 12Y
	11L : 13D	11L : 13R	11L : 13Y	11L : 13D	11L : 13R	11L : 13Y

R 为红色 LED 光, Y 为黄色 LED 光, 光照强度均为 (200±5) lx。将 1.1.1 节中当日孵化幼虫用软毛笔移入透明长方形塑料盒, 以新鲜大叶黄杨嫩叶饲养, 分别于表 1 中各试验条件下进行观察, 光处理转换采用人工转换的方法。每处理起始观察幼虫数为 100 头。

每天于光期更换幼虫饲料, 直至化蛹并记录化蛹日期, 根据孵化日期和化蛹日期分别计算幼虫期, 并于化蛹后第 2 天称取蛹重, 后将蛹移入 6 孔塑料板内, 置于温度 (25±1) °C、相对湿度 75%、光周期 13L : 11D 条件下观察蛹的羽化并记录羽化日期情况, 根据化蛹和羽化日期计算蛹期, 超过 25 d 未羽化的活蛹判定为滞育蛹, 滞育率 (%) = 滞育蛹数 / (滞育蛹数 + 非滞育蛹数) × 100。

1.3 数据分析

利用 IBM SPSS Statistics 21.0 分析软件对不同光周期期间的滞育蛹对应的幼虫期、蛹重及蛹期进行 Duncan 氏多重比较, 对两温度间滞育蛹对应的幼虫期、蛹重及蛹期进行独立样本 *t* 检验, 对滞育率进行卡方检验, 对温度、暗期光处理和光周期进行三因素方差分析。

2 结果与分析

2.1 暗期不同光源的光周期和温度对丝棉木金星尺蛾滞育率的影响

除 13L : 11D 和 11L : 13D 处理组外, 其他光周期处理组滞育率均以 28 °C 为高; 暗期黄光

处理滞育率高于红光处理, 暗期无光处理滞育率最低 (图 1); 黄光处理时, 不同光周期期间差异不显著 (25 °C: $df=5$, $\chi^2=6.791$, $P=0.237$; 28 °C: $df=5$, $\chi^2=8.246$, $P=0.143$), 但暗期无光和红光处理时, 不同光周期期间滞育率有显著性差异。

2.2 暗期不同光源的光周期和温度对丝棉木金星尺蛾滞育蛹的幼虫期影响

暗期无光处理时, 25 °C 时光周期对滞育蛹的幼虫期有显著性影响, 表现为 12L : 12D 和 11L : 13D 幼虫期长达 30 d, 显著长于其余 4 个光周期, 28 °C 时与 25 °C 情况相似; 25 °C 和 28 °C 时的暗期红光和黄光处理, 光周期的影响均不显著 (表 2)。25 °C 时幼虫期多长于 28 °C, 其中有 6 个光周期处理组的幼虫期显著长于 28 °C, 其余差异不显著。

三因素方差分析结果表明, 温度、暗期光处理、光周期及温度与光周期、暗期光处理与光周期交互作用对幼虫期均有显著影响 (表 3)。

2.3 暗期不同光源的光周期和温度对丝棉木金星尺蛾滞育蛹蛹重的影响

暗期无光处理时, 25 °C 和 28 °C 下不同光周期对蛹重有显著性影响, 但暗期红光和黄光处理时, 光周期影响不显著。除 15L : 9D 外, 28 °C 时所得滞育蛹均重于 25 °C (表 4)。

三因素方差分析结果表明, 温度、暗期光处理、光周期、温度与暗期光处理及暗期光处理与光周期交互作用对蛹重均有显著性影响 (表 5)。

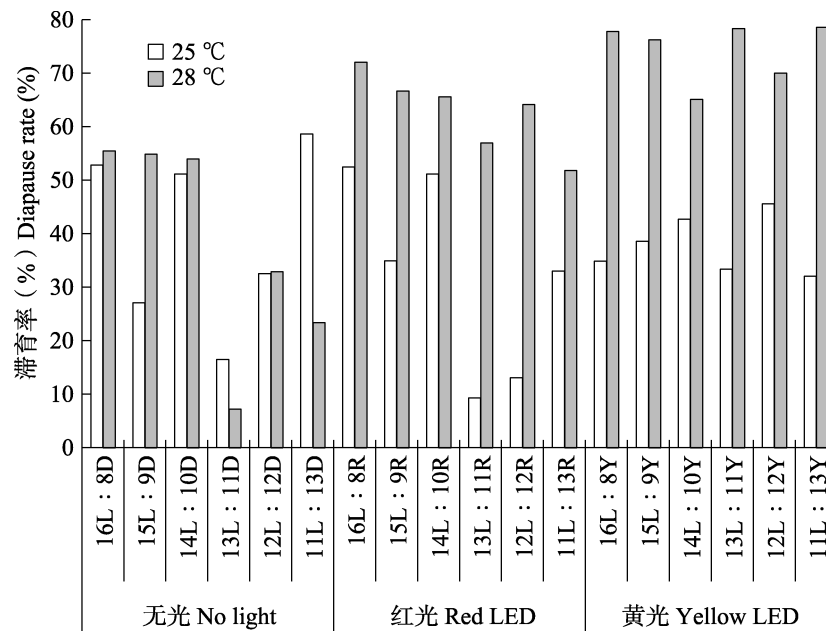


图 1 不同光照和温度下饲养的丝棉木金星尺蛾滞育率

Fig. 1 Diapause rate of *Calospilos suspecta* reared under different light and temperature

表 2 不同光照和温度下饲养的丝棉木金星尺蛾滞育蛹的幼虫期

Table 2 Larval duration of *Calospilos suspecta* diapause pupae reared under different light and temperature

暗期光处理 Light treatment in dark period	光周期 Photoperiod	幼虫期 (d) Larval duration	
		25 °C	28 °C
无光 No light	16L : 8D	27.4±4.0(47) b	25.8±2.2(46) c
	15L : 9D	28.0±5.2(23) b	26.0±2.2(45) c
	14L : 10D	25.5±3.4(45) c	25.7±2.5(41) c
	13L : 11D	24.9±2.8(15) c	26.5±1.8(6) bc
	12L : 12D	30.4±4.4(26) a	28.3±3.0(26) ab
	11L : 13D	30.0±3.8(51) a	29.2±2.4(18) a
	16L : 8R	26.8±3.3(43) a	26.1±2.3(67) a
红光 Red LED light	15L : 9R	26.6±4.5(29) a	25.8±2.3(58) a
	14L : 10R	26.7±3.7(45) a	26.1±2.7(59) a
	13L : 11R	27.9±7.3(8) a	25.6±2.4(45) a
	12L : 12R	29.1±5.9(12) a	26.0±2.2(50) a
	11L : 13R	29.0±3.2(31) a	25.9±2.1(43) a
	16L : 8Y	28.0±4.2(30) a	25.7±2.5(63) a
	15L : 9Y	28.3±5.3(32) a	25.2±2.4(64) a
黄光 Yellow LED light	14L : 10Y	26.4±3.7(35) a	26.4±2.6(54) a
	13L : 11Y	27.8±3.8(27) a	25.8±2.4(65) a
	12L : 12Y	28.2±4.5(36) a	25.6±1.8(56) a
	11L : 13Y	27.0±3.9(25) a	26.1±2.5(66) a

表中数据为平均值±标准差,括号内数字为样本数;同一列数据后标有不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$, Duncan 氏检验)。表 4 和表 6 同。

Data are mean±SD, and data in brackets are the number of samples. Different lowercase letters after the data in same column indicate significant differences ($P < 0.05$, Duncan's test). The same for table 4 and table 6.

表 3 光照和温度对丝棉木金星尺蛾滞育蛹的幼虫期影响三因素方差分析
Table 3 Three-way analyses of variance for effects of light and temperature on larval duration of *Calospilos suspecta* diapause pupae

变异来源 Source of variation	df	F	P
温度 Temperature	1	54.452	0.000
暗期光处理 Light treatment in dark period	2	3.262	0.039
光周期 Photoperiod	5	11.257	0.000
温度 × 暗期光处理 Temperature × Light treatment in dark period	2	2.760	0.064
温度 × 光周期 Temperature × Photoperiod	5	3.826	0.002
暗期光处理 × 光周期 Light treatment in dark period × Photoperiod	10	4.967	0.000
温度 × 暗期光处理 × 光周期 Temperature × Light treatment in dark period × Photoperiod	10	1.785	0.059

表 4 不同光照和温度下饲养的丝棉木金星尺蛾滞育蛹蛹重
Table 4 Weight of *Calospilos suspecta* diapause pupae reared under different light and temperature

暗期光处理 Light treatment in dark period	光周期 Photoperiod	蛹重 (g) Pupae weight (g)	
		25 °C	28 °C
无光 No light	16L : 8D	0.090±0.021(47) b	0.108±0.019(46) b
	15L : 9D	0.112±0.030(23) a	0.108±0.023(45) b
	14L : 10D	0.097±0.023(45) b	0.102±0.023(41) b
	13L : 11D	0.092±0.021(15) b	0.106±0.020(6) b
	12L : 12D	0.109±0.026(26) a	0.122±0.028(26) a
	11L : 13D	0.110±0.020(51) a	0.124±0.024(18) a
红光 Red LED light	16L : 8R	0.084±0.019(43) a	0.099±0.019(67) a
	15L : 9R	0.089±0.018(29) a	0.099±0.020(58) a
	14L : 10R	0.092±0.022(45) a	0.096±0.018(59) a
	13L : 11R	0.092±0.025(8) a	0.102±0.021(45) a
	12L : 12R	0.097±0.020(12) a	0.102±0.020(50) a
	11L : 13R	0.093±0.022(31) a	0.106±0.020(43) a
黄光 Yellow LED light	16L : 8Y	0.084±0.022(30) a	0.105±0.021(63) a
	15L : 9Y	0.081±0.018(32) a	0.103±0.023(64) a
	14L : 10Y	0.082±0.017(35) a	0.104±0.022(54) a
	13L : 11Y	0.078±0.014(27) a	0.102±0.020(65) a
	12L : 12Y	0.075±0.016(36) a	0.106±0.022(56) a
	11L : 13Y	0.078±0.014(25) a	0.106±0.021(66) a

表 5 光照和温度对丝棉木金星尺蛾滞育蛹的蛹重影响三因素方差分析
Table 5 Three-way analyses of variance for effects of temperature and light on pupal weight of *Calospilos suspecta*

变异来源 Source of variation	df	F	P
温度 Temperature	1	128.472	0.000
暗期光处理 Light treatment in dark period	2	42.611	0.000
光周期 Photoperiod	5	5.519	0.000
温度 × 暗期光处理 Temperature × Light treatment in dark period	2	16.297	0.000
温度 × 光周期 Temperature × Photoperiod	5	1.902	0.091
暗期光处理 × 光周期 Light treatment in dark period × Photoperiod	10	3.727	0.000
温度 × 暗期光处理 × 光周期 Temperature × Light treatment in dark period × Photoperiod	10	1.069	0.383

2.4 暗期不同光源的光周期和温度对丝棉木金星尺蛾滞育蛹蛹期的影响

丝棉木金星尺蛾滞育蛹的蛹期长短与幼虫经历的光温条件密切相关(表6),除13L:11D和11L:13D、12L:12R和11L:13R处理组外,28℃下滞育蛹的蛹期均长于25℃,且大多有显著性差异;3个暗期光处理下,光周期对蛹

期都有显著性影响。25℃和28℃时,光周期12L:12D和11L:13D下所得滞育蛹的蛹期均在120d以上;25℃时,光周期12L:12Y和11L:13Y下所得滞育蛹的蛹期分别为84.6和86.1d;其他处理下所得滞育蛹的蛹期在37-67d。三因素方差分析结果表明,3个单因子及其组合均显著性地影响滞育蛹的蛹期(表7)。

表6 不同光照和温度下饲养的丝棉木金星尺蛾滞育蛹的蛹期
Table 6 Duration of *Calospilos suspecta* diapause pupae reared under different light and temperature

暗期光处理 Light treatment in dark period	光周期 Photoperiod	蛹期(d) Pupae duration (d)	
		25℃	28℃
无光 No light	16L:8D	58.3±6.2(45) c	66.6±10.2(29) b
	15L:9D	58.1±7.2(21) c	64.2±11.1(27) b
	14L:10D	55.3±6.2(42) c	56.9±12.3(35) c
	13L:11D	47.6±9.2(12) c	45.7±10.3(6) d
	12L:12D	120.4±33.1(13) b	126.3±10.9(15) a
	11L:13D	146.3±56.1(21) a	130.4±9.7(11) a
红光 Red LED light	16L:8R	55.5±5.6(40) b	59.1±9.0(41) ab
	15L:9R	55.4±6.4(28) b	61.4±11.0(38) a
	14L:10R	47.6±6.8(44) c	54.9±12.5(48) b
	13L:11R	41.1±8.5(8) c	49.0±9.1(42) c
	12L:12R	84.6±35.1(7) a	50.5±9.5(47) c
	11L:13R	86.1±38.3(8) a	47.2±8.3(41) c
黄光 Yellow LED light	16L:8Y	37.0±7.1(24) b	50.7±12.0(55) b
	15L:9Y	44.4±8.4(26) a	54.4±11.4(59) ab
	14L:10Y	38.2±7.5(31) b	50.4±11.8(52) b
	13L:11Y	36.6±9.2(20) b	54.3±12.5(52) ab
	12L:12Y	38.5±8.6(34) b	54.5±13.1(53) ab
	11L:13Y	40.3±7.8(21) ab	56.6±10.0(57) a

表7 光照和温度对丝棉木金星尺蛾滞育蛹蛹期影响的三因素方差分析
Table 7 Three-way analyses of variance for effects of temperature and light on duration of *Calospilos suspecta* diapause pupae

变异来源 Source of variation	df	F	P
温度 Temperature	1	6.152	0.013
暗期光处理 Light treatment in dark period	2	464.343	0.000
光周期 Photoperiod	5	161.261	0.000
温度 × 暗期光处理 Temperature × Light treatment in dark period	2	56.872	0.000
温度 × 光周期 Temperature × Photoperiod	5	12.671	0.000
暗期光处理 × 光周期 Light treatment in dark period × Photoperiod	10	91.444	0.000
温度 × 暗期光处理 × 光周期 Temperature × Light treatment in dark period × Photoperiod	10	9.855	0.000

3 讨论与结论

LED 灯与其他灯具相比有着环保低能的特点,同时色彩丰富,能够很好地保证城市夜景灯光的设计,满足照明需求,衬托景观(郭小曼, 2021)。然而,夜间 LED 灯的使用相当于 24 h 光暗循环的暗期被缩短(光期被延长),这可能使本该滞育的昆虫不适时地发育,并可能影响其随后的种群数量。昆虫是否进入滞育及进入滞育的个体数量或比例与光照长短和温度高低等有关,长光照和高温常常诱导更多的个体进入夏季滞育(Nakamura and Numata, 2006; Yang *et al.*, 2014),短光照和低温则常常诱导更多的个体进入冬季滞育。本研究结果表明,暗期无光时,13L:11D 时滞育率较低,暗期为红光时,25℃时 13L:11R 和 12L:12R 下滞育率也不高,滞育率最高的处理组是 28℃和 13L:11Y(图 1),其他处理滞育率都在 23%以上,即各光照和温度组合下都诱导了丝棉木金星尺蛾滞育,出现这种情况可能与该虫的冬季滞育和夏季滞育有关(郭松景等, 2007)。方泓和聂英奇(1999)报道了丝棉木金星尺蛾有夏滞育和冬滞育的特性,其蛹期分别长达 45-50 d 和 150-180 d;张承国和吴庆芳(1994)观察到丝棉木金星尺蛾第二代经历的温度越高,其蛹期反而越长。结合本研究测试的滞育蛹蛹期(表 6)和发表的资料来看,在暗期无光的短光周期下 25℃和 28℃均发生了冬季滞育:包括 28℃下 12L:12D(126.3 d)、11L:13D(130.4 d)和 25℃下 12L:12D(120.4 d)、11L:13D(146.3 d)4 个处理组。有趣的是,暗期为红光时 25℃下 12L:12R 和 11L:13R 处理组滞育蛹的蛹期分别降到 84.6 d 和 86.1 d;暗期为黄光时 25℃下 12L:12Y 和 11L:13Y 滞育蛹的蛹期分别仅为 38.5 d 和 40.3 d,28℃下分别为 54.5 d 和 56.6 d。其余处理组滞育蛹的平均蛹期在 37-67 d,应属夏季滞育。在自然界,完全变态的昆虫蛹期(包括滞育蛹)长短决定成虫羽化时间和下一代发生时期,为害虫测报的重要依据之一。本研究结果证实,该虫蛹期长短可分为 4 种情况,即上述 3 种滞育蛹蛹期和非滞育

蛹蛹期(10 d 左右)(另文发表),类似大猿叶虫 *Colaphellus bowringi* 分散繁殖(薛芳森等, 2002),归结为复杂的光温环境使该虫生活史更加多样化和复杂化,增强了该虫在自然界的适应能力,也给虫情测报带来了新的挑战,测报时应考虑环境中光温互作对昆虫发育和滞育的影响。

本研究结果还表明,25℃时幼虫期多长于 28℃,这符合外温动物发育的一般规律,但滞育蛹对应的幼虫期随暗期 D 的延长而延长(如 12L:12D 和 11L:13D),暗期使用 200 lx 红光(如 12L:12R 和 11L:13R)和黄光(如 12L:12Y 和 11L:13Y)处理在一定程度上抵消了长暗期 D 延长幼虫期的作用,尤其是黄光(表 2),因此需重视光周期及温度与光周期、暗期光处理与光周期交互作用对幼虫期的显著影响(表 3)。

多数处理组 28℃下蛹重于 25℃(表 4),原因可能有二:一是 28℃下,丝棉木金星尺蛾需增加蛹重、积累能源,度过较长的夏季滞育期,类似现象也见于棉铃虫 *Helicoverpa armigera*(陈元生等, 2012);二是环境因子(如温度)可能通过影响昆虫体内消化酶的活性来影响其体重(王宏民等, 2017),28℃下昆虫消化酶活性更强,摄食、消化能力更强,可能使蛹重增加。暗期光处理对蛹重有显著性影响(表 5),暗期无光时蛹最重,换言之暗期使用 LED 光可使蛹重减小,这种全日照、无暗期的光环境使蛹重减小的现象也见于黏虫 *Mythimna separata* 和斜纹夜蛾 *Spodoptera litura*(王熠等, 2019; 钟春兰等, 2020),这是否与暗期光照刺激了幼虫的活动、消耗了能量有关,值得进一步研究。资料显示,昆虫滞育个体的大小,受到滞育前一阶段的发育速率、取食行为和能量积累的影响(王小平和薛芳森, 2006),进入滞育前较长时间的取食可以使昆虫具有较大的个体,积累更多的代谢储备(Danks, 2002),较长的取食时间意味着较长的幼虫期,这就意味着滞育蛹的蛹重可能也受到滞育前幼虫期长短的影响。

综上所述,各试验条件下都有滞育发生,28℃时滞育率多高于 25℃,且 28℃时暗期红光和黄光提高了滞育率;25℃下所得滞育蛹对

应的幼虫期长于 28 ℃, 但 28 ℃下所得滞育蛹重于 25 ℃; 该虫滞育生物学特性较为复杂, 受光照、温度及光温互作的影响, 有待于深入研究。

参考文献 (References)

- Avalon CSO, Sara ML, 2018. The impact of artificial light at night on nocturnal insects: A review and synthesis. *Ecology and Evolution*, 8(22): 11337–11358.
- Chen YS, Duan DK, Chen C, Xue FS, 2012. Influence of the photoperiod and temperature on developmental periods and pupal weight of the cotton bollworm, *Helicoverpa armigera* Hübner. *Journal of Environmental Entomology*, 34(4): 407–414. [陈元生, 段德康, 陈超, 薛芳森, 2012. 光周期和温度对棉铃虫发育历期及蛹重的影响. 环境昆虫学报, 34(4): 407–414.]
- Danks HV, 2002. The range of insect dormancy responses. *European Journal of Entomology*, 99(2): 127–142.
- Fang H, Nie YQ, 1999. A preliminary report on *Calospilos suspecta* Warren. *Journal of Anhui Agricultural University*, 26(4): 461–464. [方泓, 聂英奇, 1999. 丝棉木金星尺蛾研究初报. 安徽农业大学学报, 26(4): 461–464.]
- Fang M, Dai ZY, Shuai YL, Liang LY, Zhang CQ, Xie JK, Tu XY, 2017. Effects of varying temporal exposure to light on the feeding and walking behavior of adult *Henosepilachna vigintioctopunctata* (Fabricius). *Chinese Journal of Applied Entomology*, 54(5): 813–823. [方梅, 戴志颖, 帅艳玲, 梁龙阳, 张超群, 谢建坤, 涂小云, 2017. 光期位点对茄二十八星瓢虫成虫取食和爬行行为节律的影响. 应用昆虫学报, 54(5): 813–823.]
- Feng GF, Feng XM, 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 *Plagioderia 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.]
- Guo JQ, Zhang HG, Wang ZY, He KL, 2013. Effects of photoperiod and temperature on diapause induction in *Ostrinia furnacalis* (Lepidoptera: Crambidae). *Acta Entomologica Sinica*, 56(9): 996–1003. [郭建青, 张洪刚, 王振营, 何康来, 2013. 光周期和温度对亚洲玉米螟滞育诱导的影响. 昆虫学报, 56(9): 996–1003.]
- Guo SJ, Li SM, Chen Q, Zhuo XN, Duan HG, 2007. Outbreak and control study of *Calospilos suspecta* in Luohe city. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 36(10): 58–61. [郭松景, 李世民, 陈琦, 卓喜牛, 段红光, 2007. 漯河市丝棉木金星尺蛾的发生与防治研究. 河南农业科学, 36(10): 58–61.]
- Guo XM, 2021. Analysis of lighting design in urban nightscape. *Appreciation*, 2021(8): 77–78. [郭小曼, 2021. 城市夜景中灯光设计分析. 艺术品鉴, 2021(8): 77–78.]
- Hu MC, Zhang SM, 1986. Biological chronology of 16 species of Geometridae in Nanchang suburb. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 1986(1): 25–36. [胡梅操, 章士美, 1986. 南昌郊区 16 种尺蛾科昆虫生物学记述. 江西农业大学学报, 1986(1): 25–36.]
- Li JK, 1987. Primary research on *Calospilos suspecta* (Lepidoptera). *Sichuan Journal of Zoology*, 6(3): 26–41. [李景科, 1987. 丝棉木金星尺蛾研究初报(鳞翅目). 四川动物, 6(3): 26–41.]
- Ma XJ, Liu ZQ, Liu YP, Zhang C, Sun KL, Huang S, Sun ZQ, Piao FZ, Zhang T, 2022. Effects of night light supplementation with different red and blue spectrum combinations on growth and physiological characters of tomato seedlings. *Shandong Agricultural Sciences*, 54(2): 51–56. [马肖静, 刘志强, 刘勇鹏, 张婵, 孙凯乐, 黄松, 孙治强, 朴凤植, 张涛, 2022. 不同红蓝光质组合夜间补光对番茄幼苗生长生理指标的影响. 山东农业科学, 54(2): 51–56.]
- Nakamura K, Numata H, 2006. Effects of photoperiod and temperature on the induction of adult diapauses in *Dolycoris baccarum* (Heteroptera: Pentatomidae) from Osaka and Hokkaido, Japan. *Applied Entomology and Zoology*, 41(1): 105–109.
- Qi J, 2021. Research on the application of LED in building nightscape lighting energy saving. *Science and Technology & Innovation*, 2021(2): 170–171. [祁迹, 2021. LED 在建筑夜景照明节能中的应用研究. 科技与创新, 2021(2): 170–171.]
- Shi XF, Lin L, Bai XJ, Guo RR, Xie LJ, Bai Y, Han JY, Zhang Y, Lin L, Cao XJ, 2021. Response of berries development and quality of Shine Muscat grape to different light qualities. *Journal of Southern Agriculture*, 52(6): 1641–1647. [时晓芳, 林玲, 白先进, 郭荣荣, 谢林君, 白扬, 韩佳宇, 张瑛, 林玲, 曹雄军, 2021. 阳光玫瑰葡萄果实生长发育及品质对不同光质的响应. 南方农业学报, 52(6): 1641–1647.]
- Tu XY, 2011. Geographic variation of diapause and biological characteristics in the Asian corn borer, *Ostrinia furnacalis* (Guenée) (Lepidoptera: Crambidae). Doctor dissertation. Nanchang: Jiangxi Agricultural University. [涂小云, 2011. 亚洲玉米螟滞育和生物学特性地理变异的研究. 博士学位论文. 南昌: 江西农业大学.]
- Tu XY, Chen YS, Zhi Y, 2014. Effects of light-emitting diode illumination on insect behavior and biological characters. *Plant Protection*, 40(2): 11–15. [涂小云, 陈元生, 支忆, 2014. LED 光源对昆虫行为学和生物学特性的影响. 植物保护, 40(2):

- 11–15.]
- Tu XY, Xu JC, Xu DM, Liu S, Yang S, 2013. Effects of light and temperature on diapause of *Brithys crini* Fabricius. *Northern Horticulture*, 37(22): 129–131. [涂小云, 徐佳辰, 徐冬梅, 刘思, 杨沙, 2013. 光照和温度对毛健夜蛾滞育解除的影响. 北方园艺, 37(22): 129–131.]
- Wang HM, Li YF, Yang MM, Zhang XH, 2017. Effects of temperature on weight gain, food conversion efficiency and digestive enzyme activities of *Tenebrio molitor* larvae. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 54(3): 434–439. [王宏民, 李亚芳, 杨萌萌, 张仙红, 2017. 温度对黄粉虫体重增加、食物转化率及消化酶活性的影响. 应用昆虫学报, 54(3): 434–439.]
- Wang XP, Xue FS, 2006. Post-diapause life-history traits in insects. *Chinese Bulletin of Entomology*, 43(1): 10–15. [王小平, 薛芳森, 2006. 昆虫滞育后的生物学特性. 昆虫知识, 43(1): 10–15.]
- Wang Y, Pang SH, Ji W, Yang C, Wang DW, Ma RY, 2019. Effects of photoperiod on growth, development and reproduction of the oriental army worm *Mythimna separata* (Lepidoptera: Noctuidae). *Journal of Plant Protection*, 46(3): 542–548. [王熠, 庞士海, 纪薇, 杨春, 王达文, 马瑞燕, 2019. 光周期对黏虫生长发育和生殖的影响. 植物保护学报, 46(3): 542–548.]
- Xiao HJ, Xin HQ, Zhu XF, Xue FS, 2011. Photoperiod and temperature response of diapause induction in *Diaphania perspectalis* (Lepidoptera:Pyralidae). *Chinese Journal of Applied Entomology*, 48(1): 116–120. [肖海军, 辛洪芹, 朱杏芬, 薛芳森, 2011. 黄杨绢野螟滞育诱导及光温反应. 应用昆虫学报, 48(1): 116–120.]
- Xue FS, Li AQ, Zhu XF, Gui AL, Jiang PL, Liu XF, 2002. Diversity in life history of the leaf beetle, *Colaphellus bowringi* Baly. *Acta Entomologica Sinica*, 45(4): 494–498. [薛芳森, 李爱青, 朱杏芬, 桂爱礼, 蒋佩兰, 刘晓芬, 2002. 大猿叶虫生活史的研究. 昆虫学报, 45(4): 494–498.]
- Yang DF, Hu GZ, Gu JR, Zhang Q, Zhou XW, Deng JH, Ma JY, 2007. Biological characteristics and control of *Calospilos suspecta*. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2007(6): 91–92. [杨代凤, 胡桂珍, 顾俊荣, 张青, 周新伟, 邓金花, 马锦义, 2007. 丝棉木金星尺蛾的生物学特性及防治技术. 江苏农业科学, 2007(6): 91–92.]
- Yang HZ, Tu XY, Xia QW, He HM, Chen C, Xue FS, 2014. Photoperiodism of diapause induction and diapause termination in *Ostrinia furnacalis*. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 162(153): 34–46.
- Zhang CG, Wu QF, 1994. Primary study on biological characteristics of *Calospilos suspecta*. *Entomological Journal of East China*, 3(2): 52–55. [张承国, 吴庆芳, 1994. 丝棉木金星尺蛾生物学特性的初步研究. 华东昆虫学报, 3(2): 52–55.]
- 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, Zhu DF, Cheng YM, Liu ZH, Fu ZX, Wang JY, Gong HR, Gong HR, 2022. Effects of exposing *Spodoptera litura* (Lepidoptera: Noctuidae) to flashing colored LED lights during the scotophase on the growth, development and reproduction of this species. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 59(6): 1421–1427. [钟春兰, 朱地福, 程禹朦, 刘子航, 付子欣, 王剑颖, 龚慧蓉, 涂小云, 2022. 暗期 LED 彩色光源闪烁对斜纹夜蛾生长发育及繁殖的影响. 应用昆虫学报, 59(6): 1421–1427.]
- Zhu M, Wang M, Chen LQ, Sheng LX, Chen YS, Tu XY, 2016. Factors that induce *Brithys crini* Fabricius (Lepidoptera: Noctuidae) larvae to play dead. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 53(4): 824–829. [朱敏, 王敏, 陈丽琼, 盛丽星, 陈元生, 涂小云, 2016. 毛健夜蛾幼虫假死行为诱导因子研究. 应用昆虫学报, 53(4): 824–829.]
- Zhu YR, 2021. Application of LED light source in architectural lighting design. *Lamps & Lighting*, 159(9): 12–13. [朱雅蓉, 2021. LED 光源在建筑照明设计中的应用. 光源与照明, 159(9): 12–13.]