丝棉木金星尺蛾幼虫接受不同波长 LED 光照处理对生长发育及繁殖的影响*

朱地福[1**] 江敏嘉[2] 苏清雨[1] 程禹朦[1] 龚慧蓉[1]
钟春兰[1] 徐小卉[1] 涂小云[1***]

（1. 江西师范大学生命科学学院, 南昌 330022；2. 九江市林业科学研究所, 九江 332006）

摘 要 **【目的】** 探明丝棉木金星尺蛾 *Calospilos suspecta* 幼虫在暗期接受不同波长 LED 光照对生长发育及繁殖的影响。**【方法】** 处理组初孵幼虫于暗期分别接受 10 h 不同波长[红（620-625 nm）、黄（580- 585 nm）、蓝（465-467 nm）和绿色（520-523 nm）]LED 光照，光周期分别记为 14L：10R、14L：10Y、14L：10B 和 14L：10G，对照组在光周期为 14L：10D 条件下培养，观测计算化蛹率、羽化率、发育历期、产卵前期和成虫寿命，称量蛹重，统计单雌产卵量。**【结果】** （1）不同波长 LED 光照对丝棉木金星尺蛾化蛹率和羽化率存在显著影响（化蛹率：P=0.000；羽化率：P=0.027），蓝色 LED 光化蛹率最低（64.00%），绿色 LED 光羽化率最低（89.55%）；（2）不同波长 LED 光照均使幼虫期延长，雌幼虫期均长于雄幼虫期；不同波长 LED 光照使滞育蛹蛹期缩短，黄色 LED 光使滞育蛹蛹期缩短尤为明显；（3）不同波长 LED 光照均使蛹重减轻，蓝色 LED 光下雌雄蛹重最轻，且雌蛹重均显著高于雄蛹重（P<0.05）；（4）不同波长 LED 光照对丝棉木金星尺蛾产卵前期无显著影响（P=0.468），但与对照组相比，黄色、蓝色和绿色 LED 光雌雄成虫寿命均显著缩短（P<0.001）；与对照组产卵量[（170.6±46.7）粒]相比，红色 LED 光使丝棉木金星尺蛾产卵量显著增加[（218.1±52.7）粒]（P<0.001），蓝色 LED 光使产卵量显著减少[（140.9±33.0）粒]（P<0.001）。**【结论】** LED 光照对丝棉木金星尺蛾既有近期效应（包括幼虫期、蛹期、化蛹率和蛹重），也有远期效应（包括羽化率、成虫寿命和产卵量），其中蓝色和绿色 LED 光对其存活、生长发育和繁殖均有抑制作用。

关键词 丝棉木金星尺蛾；LED 光照；生长发育；繁殖

Effect of LED light of different wavelengths on the growth, development and reproduction of *Calospilos suspecta* (Lepidoptera: Geometridae) larvae

ZHU Di-Fu[1**] JIANG Min-Jia[2] SU Qing-Yu[1] CHENG Yu-Meng[1] GONG Hui-Rong[1]
ZHONG Chun-Lan[1] XU Xiao-Hui[1] TU Xiao-Yun[1***]

(1. College of Life Sciences, Jiangxi Normal University, Nanchang 330022, China;
2. Jiujiang Forestry Science Research Institute, Jiujiang 332006, China)

Abstract **[Aim]** To determine the effect of exposing *Calospilos suspecta* larvae to LED light of different wavelengths during the dark period on their subsequent growth, development and reproduction. **[Methods]** Newly hatched larvae were exposed to LED lights of different wavelengths [red (620-625 nm), yellow (580-585 nm), blue (465-467 nm), and green (520-523 nm)], for 10 h during the dark period, after which their pupation rate, emergence rate, developmental duration, pre-oviposition period and adult longevity, were measured and compared. Pupae were weighed, and the number of eggs laid per female counted. **[Results]** (1) Exposure to different wavelengths of LED light had significant effects on the pupation and

*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：2025-07-04；接受日期 Accepted：2025-11-20

emergence rates of *C. suspecta* (Pupation rate: $P < 0.001$; Eclosion rate: $P = 0.027$). The blue LED group had the lowest pupation rate (64.00%), and green LED group had the lowest emergence rate (89.55%). (2) Larval duration was prolonged by exposure to LED lights, and female larval duration was longer than male larval duration. Diapause pupal duration was shortened by exposure to LED light, especially yellow LED light. (3) Pupal weight was reduced by exposure to LED light; both female and male pupal weight were least in the blue LED light group, but female pupae were significantly heavier than male pupae ($P < 0.05$). (4) Exposure to LED light had no significant effect on the pre-oviposition duration of *C. suspecta* ($P = 0.468$). However, compared with the control group, the adult longevity of males and females exposed to yellow, blue and green LED light was significantly reduced ($P < 0.001$). Compared to the control group [(170.6±46.7) grains], exposure to red LED light significantly increased the number of eggs laid per female [(218.1±52.7) grains] ($P < 0.001$), whereas exposure to blue LED light significantly reduced the number of eggs laid [(140.9±33.0) grains] ($P < 0.001$). [**Conclusion**] Exposure to LED lights of different wavelengths during the dark period had short-term effects on the larval duration, pupation rate and pupal weight, of *C. suspecta*. Exposure to LED light also had long-term effects on pupal duration, emergence rate, adult longevity and egg production. Exposure to blue and green LED light inhibited the survival, growth, development and reproduction, of *C. suspecta*.

Key words　*Calospilos suspecta*; LED light; growth and development; reproduction

发光二极管（Light emitting diode，LED），是一种能够将电能转化为可见光的半导体器件，具有节能、长寿、环保、防震等优点，随着技术的进步和成本的降低，已广泛应用于农业增产补光及研究（柴贵贤, 2022; 杨碧云等, 2022）和城市建筑物亮化美化等（孙佳甲, 2021; 梁博, 2022）。资料显示，LED 光照对多种昆虫生长发育和繁殖生物学特性等有影响，如影响粘虫 *Mythimna separata*、稻螟赤眼蜂 *Trichogramma japonicun*、斜纹夜蛾 *Spodoptera litura* 和普通大蓟马 *Megalurothrips usitatus* 等的发育历期、存活率和蛹重（桑文等, 2018; 张俊杰等, 2018; 钟春兰等, 2020; 金海峰等, 2022）、灰茶尺蠖 *Ectropis grisescens* 的成虫寿命（乔利等, 2022）及毛健夜蛾 *Brithys crini* 和茄二十八星瓢虫 *Henosepilachna vigintioctopunctata* 产卵量等（涂小云等, 2012; 方梅等, 2018），另有研究表明暗期 LED 彩色光源闪烁对斜纹夜蛾生长发育及繁殖亦有影响（钟春兰等, 2022）。了解 LED 光源对昆虫发育生物学特性及种群动态的影响，可为复杂光环境下害虫预测预报提供参考资料和理论依据，亦可为益虫的繁育提供帮助。

丝棉木金星尺蛾 *Calospilos suspecta* 主要为害丝棉木、黄杨、卫矛、榆树、杨、柳等（朱建亚等, 2007），受害轻者叶片被啃食致缺刻，重者叶片甚至茎皮被啃食干净，致使大部分枝条枯死甚至全株死亡，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。该虫一般发生 4-5 代，以滞育蛹越夏和越冬（张承国和吴庆芳, 1994），持续晴热天气、食源短缺等会导致该虫扩散、寻找新的虫源地，高湿环境、晴热以及寒潮均能降低该虫发生为害程度（任建敏, 2022），在部分地区丝棉木金星尺蛾已成为大叶黄杨等寄主植物的毁灭性害虫，其危害性日益受到重视。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 光环境中，因此，广泛应用的 LED 照明对丝棉木金星尺蛾生长发育和繁殖的影响亟待研究。研究表明，斑须蝽 *Dolycoris baccarum* 在光照时长为 14 h（暗期 10 h）若虫期最长（40.89 d），此后不论光照时长缩短还是延长，其若虫期均逐渐缩短（柴华, 2020），而草地贪夜蛾 *Spodoptera frugiperda* 的总产卵量也以 14L∶10D（暗期 10 h）最多（1 950.64 粒）（孟令贺等, 2022）。本研究在实验室条件下测试了丝棉木金星尺蛾幼虫在暗期接受 10 h 不同波长 LED 光照对其生长发育及繁殖的影响，以期为该虫的测报和防治提供参考。

1　材料与方法

1.1　试供材料

1.1.1　供试虫源　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 3 龄幼虫，

室温（26±1）℃、相对湿度 75%±5%、光周期为 14L：10D 下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，并置于六孔塑料板（孔径×深度 =3.50 cm×1.66 cm）内待羽化。成虫在光周期 14L：10D 下置于透明长方形塑料盒，用 10%蜂蜜水（吸附于小纱布块中）饲喂，待其交配、产卵，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：日光灯（复合光），光照强度为 500 lx；红（620-625 nm）、黄（580-585 nm）、蓝（465-467 nm）、绿（520-523 nm）LED 光源[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）]（钟春兰等, 2023），光谱分布由购买时厂家提供，此研究中未对各波段光强进行能量校正。试验在光照培养箱（GZP-150-2D，浙江孚夏医疗科技有限公司）内进行。

1.2 不同波长 LED 光照下丝棉木金星尺蛾生长发育测试

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，分别于各试验条件下进行观察，光处理的转换采用人工转换的方法。每处理起始观察幼虫数为 25 头，重复 4 次（每处理观察幼虫数总计 100 头，但饲养过程中存在幼虫化蛹失败、虫蛹羽化失败等问题，造成最后观察数不足 100 头，为实验正常损耗）。光期给予 14 h 的日光灯光照，暗期 10 h 设置 5 种光处理：无光照（对照组）及红、黄、蓝和绿色 LED 光照，分别以 14L：10D、14L：10R、14L：10Y、14L：10B 和 14L：10G 表示。

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计算幼虫期，并于化蛹后第 2 天称取蛹重，后将蛹移入六孔塑料板内，置于光周期 14L：10D 条件下观察羽化情况并记录羽化日期，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，化蛹率=化蛹数/起始观察幼虫总数×100%，羽化率=羽化数/化蛹数×100%。

1.3 不同波长 LED 光照下丝棉木金星尺蛾繁殖测试

分别收集 1.2 节中各光照条件下非滞育蛹当日所羽化的成虫，一雄一雌配对后用 10%蜂蜜水饲喂，置于透明长方形塑料盒内并在 14L：10D 条件下观察交配和产卵情况，记录第 1 次产卵日期，再根据羽化日期计算产卵前期；每天于光期更换塑料盒和蘸有蜂蜜水的小纱布块，并统计产卵量，记录成虫死亡日期，根据羽化日期和死亡日期计算成虫寿命。每处理观察的成虫交配对数不少于 15 对。

1.2 和 1.3 节中温度均为（25±1）℃，相对湿度均为 75%±5%。

1.4 数据分析

利用 IBM SPSS Statistics 21.0 分析软件对暗期不同光处理的发育历期、蛹重、成虫寿命和繁殖数据进行 Duncan 氏多重比较（在进行 Duncan 氏多重比较之前，对各数据进行方差齐性检验，数据通过方差齐性检验则继续进行 Duncan 氏多重比较，如数据未通过方差齐性检验，则尝试对原始数据进行对数变换、平方根变换等方式，以改善方差齐性。若变换后仍不满足条件，则选用 Tamhane's T2 法），对雌雄间差异进行独立样本 *t* 检验，对化蛹率和羽化率进行卡方检验。

2 结果与分析

2.1 不同波长 LED 光照对丝棉木金星尺蛾生长发育的影响

2.1.1 不同波长 LED 光照对丝棉木金星尺蛾化蛹率和羽化率的影响 暗期不同波长 LED 光源对丝棉木金星尺蛾幼虫化蛹率和羽化率影响不同（表 1），对照组化蛹率最高（89.00%），其次为红光（87.00%）和黄光（82.00%），绿光（67.00%）次之，蓝光（64.00%）最低，与对照组相比，黄、蓝和绿光组化蛹率均降低；红光组的羽化率（100.00%）高于对照组（95.51%），其他 3 种光处理幼虫后羽化率均降低，其中绿光组羽化率最低（89.55%）。

表 1　不同波长 LED 光照对丝棉木金星尺蛾化蛹率和羽化率的影响

Table 1　Effects of exposure to LED light of different wavelengths on pupation rate and eclosion rate of *Calospilos suspecta*

暗期光处理 Light treatment in dark period	化蛹率（%）Pupation rate (%)	羽化率（%）Eclosion rate (%)
14L：10R	87.00	100.00
14L：10Y	82.00	95.12
14L：10B	64.00	93.75
14L：10G	67.00	89.55
14L：10D（CK）	89.00	95.51
卡方检验 Chi-square test	df=4, χ^2=30.946, P<0.001	df=4, χ^2=10.947, P=0.027

对照组（CK）中 L 和 D 分别代表光期和暗期，实验组中 R、Y、B、G 分别表示红、黄、蓝和绿色 LED 光照。下表同。
In the control group (CK), L and D represent the light period and dark period, respectively, in the experimental group, R, Y, B, and G represent red, yellow, blue, and green LED light, respectively. The same below.

2.1.2　不同波长 LED 光照对丝棉木金星尺蛾发育历期的影响　不同波长 LED 光源对丝棉木金星尺蛾幼虫期影响不同（表 2）。红、黄、蓝和绿 LED 光的雄幼虫期均长于对照组[（24.7±3.3）d]，但差异不显著（P=0.069），蓝光[（26.5±2.8）d]和绿光[（26.5±2.4）d]雄幼虫期较长。不同波长 LED 光源处理对雌幼虫期有显著性影响（P<0.001），红、黄、蓝和绿 LED 光的雌幼虫期均长于对照组[（25.3±3.1）d]，且除黄光外其余均差异显著，同样表现为蓝光[（28.7±3.5）d]和绿光[（28.5±3.6）d]的雌幼虫期最长。暗期同一光条件下，雌幼虫期均长于雄幼虫期，其中红光、蓝光和绿光差异显著（P<0.05）。

表 2　不同波长 LED 光照对丝棉木金星尺蛾幼虫期的影响

Table 2　Effects of exposure to different wavelengths of LED light on the larval duration of *Calospilos suspecta*

暗期光处理 Light treatment in dark period	幼虫期（d）Larval duration (d)	
	♂	♀
14L：10R	25.4±3.0（38）a	27.0±3.2（49）b*
14L：10Y	25.3±3.4（42）a	26.1±2.8（40）bc
14L：10B	26.5±2.8（26）a	28.7±3.5（38）a*
14L：10G	26.5±2.4（28）a	28.5±3.6（39）a*
14L：10D（CK）	24.7±3.3（43）a	25.3±3.1（46）c
ANOVA	df_1=4, df_2=172, F=2.220, P=0.069	df_1=4, df_2=207, F=8.033, P<0.001

表中数据为平均值±标准差。括号内数字为每处理起始观察的 100 头幼虫经正常实验损耗后雌虫和雄虫的最终样本量。同一列数据后不同小写字母表示差异显著（P<0.05, Duncan 氏检验）。*表示雌雄间差异显著（P<0.05，t 检验）。表 3、表 4 和表 5 同。
Data in the table are mean±SD. The numbers in parentheses represent the final sample sizes of female and male adults after normal experimental losses from the initial 100 larvae observed in each treatment. Different lowercase letters after the data in same column show significant difference (P<0.05, Duncan's test). The asterisk indicates significant difference between male and female (P<0.05, t-test). The same for Table 3, Table 4 and Table 5.

幼虫阶段暗期使用不同波长 LED 光源对丝棉木金星尺蛾蛹期影响不同（表 3）。非滞育蛹的蛹期差异显著（雌蛹：P=0.020；雌蛹：P=0.006），蓝光处理组雄蛹期最长[（11.9±1.1）d]，绿光次之[（11.7±1.0）d]，黄光[（11.1±0.9）d]和对照组[（11.1±0.6）d]最短；绿光处理组雌蛹期最长[（11.6±1.0）d]，蓝光[（11.5±0.9）d]和对照组[（11.5±0.8）d]次之，黄光最短[（10.7±0.8）d]。同一光条件下非滞育蛹的雌、雄蛹期无显著性差异（P>0.05），且雌、雄蛹蛹期均表现出黄光处理组缩短，蓝、绿光处理组延长。

滞育蛹的蛹期亦差异显著（P<0.001），对照组雌、雄蛹期均显著长于其他 4 个光处理，黄光处理组的雌雄蛹期均显著短于红光和绿光组。同一光条件下雌、雄滞育蛹的蛹期亦无显著性差异（P>0.05）。

2.1.3　不同波长 LED 光照对丝棉木金星尺蛾蛹重的影响　幼虫阶段暗期使用不同波长 LED 光源处理对非滞育与滞育的雌、雄蛹重均有显著性影响（表 4），与对照组相比，除红光组的非滞育蛹外，红、黄、蓝和绿光处理均使蛹重减轻，其中蓝光组的非滞育与滞育雌、雄蛹蛹重与对照组均存在显著性差异（P<0.05），即蓝光组蛹重

表 3 不同波长 LED 光照对丝棉木金星尺蛾蛹期的影响

Table 3 Effects of exposure to LED light of different wavelengths on the pupal duratin of *Calospilos suspecta*

暗期光处理 Light treatment in dark period	非滞育蛹蛹期（d）Non-diapause pupal duration (d)		滞育蛹蛹期（d）Diapause pupal duration (d)	
	♂	♀	♂	♀
14L∶10R	11.4±0.6（15）ab	11.3±0.9（27）a	45.9±6.6（23）b	49.4±6.6（22）b
14L∶10Y	11.1±0.9（23）b	10.7±0.8（24）b	37.1±7.0（18）c	39.7±8.2（13）c
14L∶10B	11.9±1.1（21）a	11.5±0.9（30）a	43.0±5.0（4）bc	46.4±9.4（5）bc
14L∶10G	11.7±1.0（18）a	11.6±1.0（28）a	46.2±7.1（6）b	48.5±6.8（8）b
14L∶10D（CK）	11.1±0.6（20）b	11.5±0.8（23）a	54.0±4.6（20）a	56.4±7.3（22）a
ANOVA	df_1=4, df_2=92, F=3.066, P=0.020	df_1=4, df_2=127, F=4.135, P=0.006	df_1=4, df_2=66, F=17.990, P<0.001	df_1=4, df_2=65, F=10.905, P<0.001

表 4 不同波长 LED 光照对丝棉木金星尺蛾蛹重的影响

Table 4 Effects of exposure to LED light of different wavelengths on the pupal weight of *Calospilos suspecta*

暗期光处理 Light treatment in dark period	非滞育蛹蛹重（g）Weight of non-diapause pupae (g)		滞育蛹蛹重（g）Weight of diapause pupae (g)	
	♂	♀	♂	♀
14L∶10R	0.078±0.016（15）a	0.105±0.018（27）a*	0.078±0.013（23）ab	0.106±0.021（22）a*
14L∶10Y	0.076±0.011（23）a	0.092±0.012（24）c*	0.073±0.012（19）bc	0.093±0.016（16）b*
14L∶10B	0.064±0.009（21）b	0.089±0.013（30）c*	0.064±0.011（5）c	0.081±0.014（8）b*
14L∶10G	0.070±0.010（18）ab	0.096±0.014（28）bc*	0.074±0.010（10）abc	0.106±0.011（11）a*
14L∶10D（CK）	0.076±0.013（20）a	0.101±0.015（23）ab*	0.084±0.014（23）a	0.109±0.023（23）a*
ANOVA	df_1=4, df_2=92, F=4.812, P=0.001	df_1=4, df_2=127, F=4.887, P=0.001	df_1=4, df_2=74, F=3.574, P=0.010	df_1=4, df_2=76, F=4.446, P=0.003

表 5 不同波长 LED 光照对丝棉木金星尺蛾产卵前期、成虫寿命及单雌产卵量的影响

Table 5 Effects of different wavelengths of LED light on the pre-oviposition period, adult longevity and number of eggs laid per female of *Calospilos suspecta*

暗期光处理 Light treatment in dark period	产卵前期（d）Pre-oviposition period (d)	成虫寿命（d）Adult longevity (d)		单雌产卵量（粒）Number of eggs laid per female (grain)
		♂	♀	
14L∶10R	2.5±1.1（15）a	18.5±3.5（15）a*	14.1±2.3（15）ab	218.1±52.7（15）a
14L∶10Y	2.4±0.6（22）a	14.2±2.2（22）b	13.5±2.5（22）b	157.1±37.2（22）bc
14L∶10B	2.5±1.3（20）a	14.0±2.5（20）b	13.1±1.6（20）b	140.9±33.0（20）c
14L∶10G	3.1±1.5（18）a	12.5±2.9（18）b	11.1±2.1（18）c	148.3±47.3（18）bc
14L∶10D（CK）	2.5±1.5（20）a	18.3±4.3（20）a*	15.5±3.5（20）a	170.6±46.7（20）b
ANOVA	df_1=4, df_2=90, F=0.900, P=0.468	df_1=4, df_2=90, F=13.736, P<0.001	df_1=4, df_2=90, F=7.876, P<0.001	df_1=4, df_2=90, F=8.154, P<0.001

最轻；各处理组非滞育与滞育的雌蛹重均大于雄蛹重，且存在显著性差异（P<0.05）。

2.2 不同波长 LED 光照对丝棉木金星尺蛾繁殖的影响

暗期使用不同波长 LED 光源处理对产卵前期无显著性影响（P=0.468），其中绿光组产卵前期最长[（3.1±1.5）d]，黄光组最短[（2.4±0.6）d]，红光组、蓝光组和对照组产卵前期分别为（2.5±1.1）、（2.5±1.3）和（2.5±1.5）d。

暗期使用不同波长 LED 光源处理对雌雄成虫寿命均有显著性影响（P<0.001），表现为雄

成虫寿命中，红光组寿命最长[（18.5±3.5）d]，对照组次之[（18.3±4.3）d]，绿光组最短[（12.5±2.9）d]，黄、蓝和绿光组中雄成虫寿命显著短于对照组（P<0.001）；雌成虫寿命中，对照组寿命最长[（15.5±3.5）d]，红光组次之[（14.1±2.3）d]，绿光组最短[（11.1±2.1）d]，且黄、蓝和绿光组中雌成虫寿命显著短于对照组（P<0.001）。雌虫成虫寿命均短于雄虫，其中红光组和对照组中雌虫寿命显著短于雄虫（P<0.001）。

暗期使用不同波长 LED 光源处理对单雌产卵量有显著性影响（P<0.001），表现为红光组产卵量显著高于其他组，蓝光组产卵量显著低于红光组和对照组。

3　结论与讨论

3.1　不同波长LED光照处理对丝棉木金星尺蛾生长发育的影响

3.1.1　不同波长 LED 光照处理对丝棉木金星尺蛾化蛹率和羽化率的影响　研究表明，不同 LED 光照下鳞翅目昆虫幼虫存活率或化蛹率不同（董婉君, 2018; 桑文等, 2018; 张敏, 2018; 钟春兰等, 2020）。本研究结果也表明，丝棉木金星尺蛾幼虫暗期接受 10 h 不同 LED 光照处理对其化蛹率影响不同（表 1），与对照组化蛹率（89.00%）相比，蓝光组（64.00%）和绿光组（67.00%）的化蛹率大幅降低，绿光组的羽化率（89.55%）也大幅降低（对照组为 95.51%），然而暗期 5 h LED 光照处理斜纹夜蛾幼虫后化蛹率和羽化率与对照组相比差异不显著（钟春兰等, 2020），原因可能是昆虫种类不同或暗期 LED 处理时长不同。

LED 蓝光比紫外光对昆虫更具有伤害作用（Hori *et al*., 2014），可能与蓝光携带超高的能量造成视网膜上的色素上皮细胞的萎缩甚至死亡有关（刘克中, 2021），这可能是本研究中蓝光条件下化蛹率和羽化率不高的原因之一。

3.1.2　不同波长 LED 光照处理对丝棉木金星尺蛾发育历期的影响　本研究表明，不同波长 LED 光照处理对丝棉木金星尺蛾幼虫期和蛹期影响不同（表 2，表 3）。处理组的雄幼虫期均长于对照组，但差异不显著，处理组的雌幼虫期也均长于对照组，且红光、蓝光和绿光与对照组差异显著。有研究表明稻螟赤眼蜂经 LED 红光处理后子代发育历期延长（张俊杰等, 2018），斜纹夜蛾雌雄幼虫期在夜间 LED 黄光处理下均延长，绿光处理下均缩短，雌雄蛹期经蓝绿光处理后均缩短（钟春兰等, 2020），与本研究结果有所不同，可能因丝棉木金星尺蛾与斜纹夜蛾、稻螟赤眼蜂的生活史策略、光感受系统（复眼结构、光受体种类）等方面均不相同，因此对相同或相近波长光照的响应模式可能不同。本研究结果还表明，LED 光照对发育历期的影响因性别和滞育状态而异，各 LED 光照条件下雌幼虫期均长于雄幼虫期，滞育蛹的雌蛹期均长于雄蛹期。

3.1.3　不同波长 LED 光照处理对丝棉木金星尺蛾蛹重的影响　昆虫蛹重与多种因素有关，如性别（涂小云等, 2011）、地理种群（肖亮等, 2014）和幼虫饲养时光环境（钟春兰等, 2020）。本研究结果表明，幼虫于暗期接受 LED 光处理后，蛹重变化与滞育与否、性别和 LED 光色有关，表现为雌雄滞育蛹蛹重均不同程度减轻，且雌蛹重均显著大于雄蛹重（表 4）；蓝光处理后滞育蛹和非滞育蛹蛹重均最轻。这可能与 LED 光照延长了幼虫期（表 2）有关，对于一些昆虫而言，幼虫期越长，可能标志着幼虫对食物的摄取越慢和吸收速率越低，导致蛹重较低。

3.2　不同波长LED光照处理对丝棉木金星尺蛾繁殖的影响

因滞育蛹羽化较为分散，同一处理下配对样本量有限，因此只测试了非滞育蛹羽化的成虫繁殖力。丝棉木金星尺蛾幼虫期接受不同波长 LED 光处理后，成虫寿命受到显著影响（表 5），表现为黄、蓝和绿光处理组的成虫寿命显著缩短，其中绿光处理组成虫寿命最短，红光下最长，且与暗期差异不显著，这是幼虫期接受 LED 处理表现出了成虫寿命改变的远期效应。然而草地贪夜蛾（蒋月丽等, 2020）、小菜蛾 *Plutella xylostella*（段云等, 2010）、斜纹夜蛾（钟春兰等, 2020）成虫接受 LED 处理亦可导致成虫寿命改变，表

现出近期效应。

丝棉木金星尺蛾幼虫期接受不同波长 LED 光处理后，产卵前期无显著性差异，并未表现出远期效应，然而荔枝蒂蛀虫 *Conopomorpha sinensis* 在成虫期夜间给予黄色和白色 LED 处理后产卵前期延长（全林发等, 2021），表现出了近期效应，丝棉木金星尺蛾成虫接受 LED 光照处理对产卵前期是否有影响则有待于进一步研究。非滞育蛹羽化的成虫单雌产卵量有显著性差异，其中红色 LED 灯处理后单雌产卵量显著增大。研究表明，桃蛀螟 *Conogethes punctiferails* 的精液蛋白 DN50710 和 DN59942 均为暗期微弱红光下表达量显著高于暗期黑暗条件，暗期微弱红光条件下产卵量显著高于暗期黑暗条件（胡晓静, 2019），这表明精液蛋白和产卵量密切相关，有可能是精液蛋白基因调控了产卵，从而导致暗期红光下的产卵量显著高于暗期黑暗条件下的产卵量。赤松毛虫 *Dendrolimus spectabilis* 雌蛹重与产卵量之间存在着极显著的线性正相关关系（王志广和高晓萍, 1999），因此红色 LED 灯处理后单雌产卵量显著增大可能也与红光处理下的非滞育蛹较重（尤其是雌蛹较重）有关，此外也可能与红色 LED 灯处理后雌、雄成虫寿命长有关（成虫寿命长，则能产卵的时间也更长），但绿色 LED 灯处理后单雌产卵量显著减小（可能与绿色 LED 处理组成虫寿命缩短有关）。夜间 LED 灯的使用扰乱甚至抑制了蛾类成虫的繁殖活动，雌蛾性信息素分泌减少（van Geffen *et al.*, 2015），可能是导致诸多蛾类单雌产卵量在不同 LED 光处理下减少的主要原因之一，如灰茶尺蠖成虫经黄光和绿光处理后，其单雌产卵量显著降低（乔利等, 2021）；甜菜夜蛾 *Beet armyworm* 成虫受白色和黄色荧光灯处理后寿命虽延长，产卵量却降低（刘长营等, 2010）。而本研究中单雌产卵量的改变应与幼虫期营养物质积累而表现出来的远期效应有关。同时，夜间增设不同 LED 光照，相当于在原本的光暗周期基础上延长了光照时间，可能干扰丝绵木金星尺蛾的生物节律，进而引发其内分泌系统功能紊乱，并最终影响其交配与产卵行为。类似现象也见于多种其他昆虫，例如黄地老虎 *Agrotis segetum* 成虫的交配行为受信息素生物合成激活神经肽（PBAN）调控，并受中枢生物钟系统精密控制（Rosén *et al.*, 2003）；而二点织螟 *Aphomia sabella* 雌蛾则能周期性分泌 6 种性信息素类似物，这些物质对雄蛾表现出显著的引诱活性（Levi-Zada *et al.*, 2014）。

综上所述，幼虫期接受不同波长 LED 光照对丝棉木金星尺蛾生长发育及繁殖均有影响，主要表现为化蛹率和羽化率降低，幼虫期延长，滞育蛹蛹期缩短、蛹重减轻；成虫寿命缩短，产卵量减少。蓝色和绿色 LED 灯对丝棉木金星尺蛾的生长发育和繁殖有明显的抑制作用，能显著延长幼虫期并显著缩短成虫寿命、降低雌蛾产卵量。LED 光照对昆虫既有近期效应，也有远期效应。基于此研究结果，在大叶黄杨、金边黄杨等绿化带、苗圃中间或周边安装夜间绿色和蓝色 LED 光源，理论上可明显降低丝绵木金星尺蛾幼虫的化蛹成功率，缩短成虫寿命和降低产卵量，降低随后种群数量。此外，今后研究应关注绿色和蓝色 LED 光的不同光照强度对丝棉木金星尺蛾生长发育和繁殖的影响。

参考文献 (References)

Chai GX, 2022. Application and prospect of LED in protected cultivation. *Seed Science & Technology*, 40(7): 142–144. [柴贵贤, 2022. LED 在设施栽培中的应用和前景. 种子科技, 40(7): 142–144.]

Chai H, 2020. Effects of photoperiod and temperature on the induction of diapauses in *Dolycoris baccarum* (L.) (Heteroptera: Pentatomidae) from Hohhot. Master dissertation. Hohhot: Inner Mongolia Normal University. [柴华, 2020. 光周期和温度对斑须蝽呼和浩特种群滞育的影响. 硕士学位论文. 呼和浩特: 内蒙古师范大学.]

Duan Y, Wu RH, Wu YQ, Jiang YL, Zhao MX, 2010. Effects of LED illumination on the biology of *Plutella xylostella*. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 39(1): 80–89. [段云, 吴仁海, 武予清, 蒋月丽, 赵明茜, 2010. LED 光照对小菜蛾成虫生物学的影响. 河南农业科学, 39(1): 80–89.]

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.]

Fang M, Xie JK, Zhu M, Wang M, Tu XY, 2018. Effects of photoperiod and LED light on the behavior of *Henosepilachna vigintioctopunctata* (Coleoptera: Coccinelidae) 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.]

Hori M, Shibuya K, Sato M, Saito Y, 2014. Lethal effects of short-wavelength visible light on insects. *Scientific Reports*, 4: 7383.

Hu XJ, 2019. Effects of dim red light on mating and oviposition of *Conogethes punctiferails* in scotophase. Master dissertation. Chongqing: Southwest University. [胡晓静, 2019. 暗期微弱红光对桃蛀螟交配和产卵的影响. 硕士学位论文. 重庆: 西南大学.]

Jiang YL, Guo P, Li T, Li GP, Wang XQ, Wu YQ, 2020. 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, 2020. 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.]

Jin HF, Lu RC, Gong XY, Li F, Yang L, Wu SY, 2022. Effects of different wavelengths of light on growth and development of Asian bean thrips *Megalurothrips usitatus*. *Journal of Plant Protection*, 49(6): 1809–1810. [金海峰, 陆容材, 巩雪燕, 李芬, 杨磊, 吴少英, 2022. 不同波长光对普通大蓟马生长发育的影响. 植物保护学报, 49(6): 1809–1810.]

Levi-Zada A, David M, Fefer D, Seplyarsky V, Sadowsky A, Dobrinin S, Ticuchinski T, Harari D, Blumberg D, Dunkelblum E, 2014. Circadian release of male-specific components of the greater date moth, *Aphomia* (*Arenipses*) *sabella*, using sequential SPME/GC/MS analysis. *Journal of Chemical Ecology*, 40(3): 236–243.

Liang B, 2022. Analysis on the application of LED light source in architectural lighting design. *Lamps & Lighting*, 2022(3): 25–27. [梁博, 2022. 建筑照明设计中 LED 光源的运用分析. 光源与照明, 2022(3): 25–27.]

Liu CY, Liu ST, Duan AJ, Zhang ZQ, Wu YQ, 2010. Effect of the different illuminations in the adult stage of beet armyworm on the beet armyworm growth. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 38(11): 5698–5699. [刘长营, 刘顺通, 段爱菊, 张自启, 武予清, 2010. 成虫期不同光照处理对甜菜夜蛾的影响. 安徽农业科学, 38(11): 5698–5699.]

Liu KZ, 2021. Biosafety research of LED light source and investigation of outdoor light environment comfort. Master dissertation. Hefei: Anhui University. [刘克中, 2021. LED 光源的生物安全性研究及室外光环境舒适度调查. 硕士学位论文. 合肥: 安徽大学.]

Meng LH, Jiang XF, Li P, Xia JX, Zhang TQ, Cheng YX, Zhang L, 2022. Comparison of bisexual life tables of *Spodoptera frugiperda* in different photoperiods. *Plant Protection*, 48(3): 63–73. [孟令贺, 江幸福, 李平, 夏吉星, 张同强, 程云霞, 张蕾, 2022. 不同光周期下草地贪夜蛾两性生命表的比较. 植物保护, 48(3): 63–73.]

Qiao L, Zhang MM, Gong ZJ, Geng SB, Hong F, Yin J, Wu YQ, 2022. Effects of yellow LED light of different intensity on the development and reproduction of *Ectropis grisescens* Warren. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 59(4): 785–793. [乔利, 张苗苗, 巩中军, 耿书宝, 洪枫, 尹健, 武予清, 2022. 不同光强 LED 黄光对灰茶尺蠖发育和繁殖的影响. 应用昆虫学报, 59(4): 785–793.]

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.]

Quan LF, Li WJ, Wang FY, Chi YY, Dong YZ, Chen BX, 2021. The photo behavioral and reproductive responses of *Conopomorpha sinensis* adults to LED light. *Journal of Environmental Entomology*, 43(6): 1581–1588. [全林发, 李文景, 王凤英, 池艳艳, 董易之, 陈炳旭, 2021. 荔枝蒂蛀虫成虫对 LED 光的趋性及其繁殖响应特征. 环境昆虫学报, 43(6): 1581–1588.]

Ren JM, 2022. Biological characteristics of *Calospilos suspecta* and green pest control strategies. *Anhui Forestry Science and Technology*, 48(4): 12–18, 58. [任建敏, 2022. 丝棉木金星尺蛾生物学特性与绿色防控策略. 安徽林业科技, 48(4): 12–18, 58.]

Rosén WQ, Han GB, Löfstedt C, 2003. The circadian rhythm of the sex-pheromone-mediated behavioral response in the turnip moth, *Agrotis segetum*, is not controlled at the peripheral level. *Journal of Biological Rhythms*, 18(5): 402–408.

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.]

Sun JJ, 2021. Application of intelligent LED lighting technology in the context of smart city. *Lamps & Lighting*, 2021(9): 21–23. [孙佳甲, 2021. 智慧城市背景下智能LED照明技术的应用. 光源与照明, 2021(9): 21–23.]

Tu XY, Chen YS, Chen J, Hu ZL, Jin YQ, Xu F, 2012. Effects of

different LED light sources on the behavior of *Brithys crini* (Lepidoptera: Noctuidae). *Acta Entomologica Sinica*, 55(10): 1185–1192. [涂小云, 陈元生, 陈娟, 胡章龙, 金义钦, 徐飞, 2012. 不同波段 LED 光源对毛健夜蛾行为的影响. 昆虫学报, 55(10): 1185–1192.]

Tu XY, Xia QW, Chen C, Chen YS, Kuang XJ, Xue FS, 2011. Geographic variation in body weight and size of the Asian corn borer, *Ostrinia furnacalis* Guenée (Lepidoptera: Pyralidae). *Acta Entomologica Sinica*, 54(2): 143–148. [涂小云, 夏勤雯, 陈超, 陈元生, 匡先钜, 薛芳森, 2011. 亚洲玉米螟体重和体型的地理变异. 昆虫学报, 54(2): 143–148.]

van Geffen KG, van Eck E, de Boer RA, van Grunsven RHA, Salis L, Berendse F, Veenendaal EM, 2015. Artificial light at night inhibits mating in a geometrid moth. *Insect Conservation and Diversity*, 8(3): 282–287.

Wang ZG, Gao XP, 1999. Analysis of the relationship between female pupa weight and egg production in *Dendrolimus spectabilis*. *Liaoning Forestry Science and Technology*, 1999(3): 29–31, 35. [王志广, 高晓萍, 1999. 赤松毛虫雌蛹重与产卵量关系的分析. 辽宁林业科技, 1999(3): 29–31, 35.]

Xiao L, Fu S, He HM, Xue FS, 2014. Sexual size dimorphism in the Asian corn borer *Ostrinia furnacalis* and the relationship between larval period and pupal weight. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 51(6): 1576–1581. [肖亮, 傅淑, 何海敏, 薛芳森, 2014. 亚洲玉米螟性体型二型性及幼虫发育历期与蛹重的关系. 应用昆虫学报, 51(6): 1576–1581.]

Yang BY, Xu Y, Chen YQ, 2022. Discussion on the application of artificial light supplement in promoting the production of facility fruits and melons. *Agricultural Engineering Technology*, 42(13): 23–26. [杨碧云, 徐永, 陈艺群, 2022. 人工补光在促进设施瓜果生产上的应用探讨. 农业工程技术, 42(13): 23–26.]

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.]

Zhang JJ, Zhang X, Du WM, Zang LS, Ruan CC, 2018. Effects of LED lights of different wavelengths on the development and reproduction of *Trichogramma japonicum*. *Chinese Journal of Biological Control*, 34(2): 204–208. [张俊杰, 张雪, 杜文梅, 臧连生, 阮长春, 2018. 不同波长LED光源对稻螟赤眼蜂发育与繁殖的影响. 中国生物防治学报, 34(2): 204–208.]

Zhang M, 2018. Effects of different light conditions on biological characteristics of five insect species. Master dissertation. Wuhan: Huazhong Agricultural University. [张敏, 2018. 不同光环境对5 种昆虫生物学特性的影响研究. 硕士学位论文. 武汉: 华中农业大学.]

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, Tu XY, 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.]

Zhong CL, Zhu DF, Cheng YM, Gong HR, Cao LZ, Huang SD, Rao JL, Xu HR, Tu XY, 2023. Effects of exposure to different LED lights during the scotophase on the growth, development and reproduction of *Spodoptera litura* (Lepidoptera: Noctuidae). *Chinese Journal of Applied Entomology*, 60(5): 1451–1457. [钟春兰, 朱地福, 程禹朦, 龚慧蓉, 曹玲珍, 黄少迪, 饶嘉玲, 徐鸿儒, 涂小云, 2023. 暗期不同LED光转换处理对斜纹夜蛾生长发育及繁殖的影响. 应用昆虫学报, 60(5): 1451–1457.]

Zhu JY, Lu Y, Fan MJ, 2007. Preliminary report on the observation of the life pattern of *Calospilos suspecta* on *Euonymus japonicus*. *China Plant Protection*, 27(1): 28–29. [朱建亚, 陆彦, 范美娟, 2007. 丝棉木金星尺蛾在绿篱冬青卫矛上的生活规律观察初报. 中国植保导刊, 27(1): 28–29.]