间接外力对丝棉木金星尺蛾幼虫假死和蛹重的影响*

龚慧蓉[1**] 江敏嘉[2] 程禹朦[1] 罗园霞[1] 牛颖颖[1]
张嘉仪[1] 翟佳佳[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 332099）

摘 要 **【目的】**探究丝棉木金星尺蛾 *Calospilos suspecta* 幼虫应对外力干扰时假死行为发生规律和特点以及假死对后续生长发育的影响。**【方法】**在实验室条件下，用 3 N 外力撞击大叶黄杨 *Buxus megistophylla* 茎（枝条上有活动的丝棉木金星尺蛾幼虫），统计和分析外力对幼虫假死特征值和随后所化蛹重量的影响。试验分两组：（1）撞击 1-4 次/d，试验 4 d；（2）撞击 1 次/d，试验 1-4 d。**【结果】**（1）不同撞击次数之间幼虫假死发生率有显著性差异（P<0.05），随着撞击次数的增加，吐丝假死发生率有下降的趋势，且吐丝假死发生率显著高于相同撞击次数的坠地假死发生率（P<0.05）；不同撞击次数之间吐丝假死返回时间、吐丝长度和所化蛹的重量有显著性差异（P<0.05），雌、雄蛹的重量大于对照组（对照组为无外力撞击，雌蛹重量：0.102 g，雄蛹重量：0.088 g）。（2）不同撞击天数之间幼虫坠地假死发生率、吐丝假死返回时间和所化蛹的重量有显著性差异（P<0.05），且吐丝假死发生率显著高于相同撞击天数的坠地假死发生率（P<0.05）。**【结论】** 外力对丝棉木金星尺蛾幼虫假死的影响因受外力撞击次数和试验天数不同而异，吐丝假死发生率均显著高于坠地假死；幼虫受外力间接撞击后所化蛹后蛹的重量大多增加。

关键词 丝棉木金星尺蛾；外力；假死；蛹重

Effect of indirect external force on thanatosis and pupal weight in *Calospilos suspecta* larvae

GONG Hui-Rong[1**] JIANG Min-Jia[2] CHENG Yu-Meng[1] LUO Yuan-Xia[1]
NIU Ying-Ying[1] ZHANG Jia-Yi[1] ZHAI Jia-Jia[1] TU Xiao-Yun[1***]

(1. College of Life Sciences, Jiangxi Normal University, Nanchang 330022, China; 2. Jiujiang Institute of Forestry Science, Jiujiang 332099, China)

Abstract **[Aim]** To investigate the effect of indirect external force on thanatosis in *Calospilos suspecta* larvae, and on the subsequent growth and development of larvae. **[Methods]** *Buxus megistophylla* branches on which *C. suspecta* larvae were crawling were impacted by 3 N forces (1, 2, 3 and 4 impacts a day respectively, for 4 d, or one impact a day, for 1, 2, 3 and 4 d respectively). The thanatosis characteristics of larvae and their pupal weight were then statistically analyzed. **[Results]** (1) There were significant difference in the frequency of thanatosis among the different treatments (P<0.05). The frequency of spinning thanatosis decreased with increased frequency of impacts but was significantly higher than that of landing thanatosis after the same number of impacts (P<0.05). There were significant difference in the return time, and the length of silk, in spinning thanatosis among the different treatments. There were also significant difference in pupal weight among the different treatments (P<0.05). Female and male pupal weights were higher in treatment than in the control groups (The control group had no external impact, The weight of female pupal: 0.102 g, The weight of male pupal: 0.088 g). (2) There were significant difference in the frequency of landing thanatosis, the return time of spinning thanatosis, and pupal weight, among different treatments when branches were impacted once a day for a different number of days (P<0.05). The frequency of spinning

*资助项目 Supported projects：国家自然科学基金地区项目（32160244）；江西省教育厅科学技术研究项目（GJJ2200307）
**第一作者 First author，E-mail：1258388327@qq.com
***通讯作者 Corresponding author，E-mail：txy1036@163.com
收稿日期 Received：2024-06-24；接受日期 Accepted：2024-12-07

thanatosis was also significantly higher than that of landing thanatosis when branches were impacted once a day for the same number of days (P<0.05). **[Conclusion]** The effect of indirect external force on larval thanatosis in *C. suspecta* varied with impact frequency and the number of trial days. The frequency of spinning thanatosis was higher than that of landing thanatosis in all treatment groups. Larvae subjected to indirect force tended to have higher pupal weight than those in the control groups.

Key words *Calospilos suspecta*; force; thanatosis; pupae weight

昆虫受到天敌或类似天敌的外部物理刺激时，足、触角等附肢收缩，身体蜷缩、强直静止或从原停留处落下，呈现“死亡”之状的行为被称作假死。假死是昆虫重要的防御行为，与生存策略密切相关，如假死可以使偏好活体的猎物主动放弃取食，还可借助假死逃避猎物的搜捕和抑制猎物的进食等（孟凡明和梁醒财, 2009）。然而，昆虫假死作为反捕食行为之一，与其他动物反捕食行为一样也可能要付出一些代价（Riessen, 1992），如昆虫假死后的持续时间使其取食时间、交配时间等减少，可能影响后续的种群增长。基于害虫的假死性，对植株进行摇动，使得处于植株上的害虫发生假死并滚落到地面上，方便进行幼虫的消杀处理并避免害虫停留到植株上（周国英等, 2007），如通过敲打树体，茶尺蠖 *Ectropis oblique*、丽长角巢蛾 *Xyrosaria lichneuta* 等的幼虫均会表现为吐丝下垂或坠地假死（郑俊仙等, 2012; 李喜旺等, 2017）。因此，研究昆虫假死除了可进一步丰富昆虫行为学和生物学理论知识，还可提高害虫综合防治效果。

丝棉木金星尺蛾 *Calospilos suspecta* 隶属鳞翅目 Lepidoptera 尺蛾科 Geometridae，以幼虫取食大叶黄杨 *Buxus megistophylla*、金边黄杨 *Euonymus japonicus*、丝棉木 *Euonymus maackii*、扶芳藤 *Euonymus fortunei* 等植物叶片（杨代凤等, 2007）。该虫暴发为害时，将寄主植物叶片甚至嫩的枝皮取食殆尽，直接影响大叶黄杨和金边黄杨等园林绿化树种的绿化效果。丝棉木金星尺蛾幼虫具有假死性（张英俊, 1979; 刘志芬, 1992; 郭松景等, 2007），在外力作用下，幼虫出现坠地和吐丝两种假死现象（曹亚汝等, 2018）。预试验结果表明，至少通过 3 N 的作用力撞击大叶黄杨的植株茎干，丝棉木金星尺蛾幼虫会发生假死行为。为研究外力撞击诱导幼虫假死后，是否对其后续生长发育有影响，故本试验测试了 3 N 外力撞击大叶黄杨茎干对枝条上丝棉木金星尺蛾幼虫假死发生及对后续化蛹重量的影响，以期为深入开展昆虫假死行为的生理机制研究提供基础资料，也为利用假死行为防治害虫提供参考。

1　材料与方法

1.1　供试虫源及管理

本试验的虫源是采自江西师范大学瑶湖校区校园内大叶黄杨上的丝棉木金星尺蛾 3 龄幼虫，幼虫于室内用大叶黄杨叶饲养，室温（26±1）℃、相对湿度 50%±10%，光周期为 12L∶12D（7：00-19：00 为白光，19：00-7：00 为黑暗）。羽化后成虫用质量分数 10%蜂蜜饲喂，第 2 代幼虫供试验用。取同一天孵化的幼虫，并用电子秤（余姚市纪铭称重校验设备有限公司）进行称重，选取体重大小适中的 3 龄幼虫（单头幼虫体重均控制在 0.8-1.2 g 范围内）。试验幼虫在温度为 22 ℃、光强 400-600 lx、湿度 75%±5%的光照培养箱（GZP-150-2D，浙江孚夏医疗科技有限公司）内进行培养，设置光周期为 12L∶12D（7：00- 19：00 为白光，19：00-7：00 为黑暗）。

1.2　假死行为判断和记录

种植在花盆中央的大叶黄杨植株高为 44 cm，枝下主干直径为 1.2 cm（图 1：A），用胶带固定住植株（保证撞击试验不会使植株发生偏移），花盆置于实验台边缘，使横枝与地面距约 110 cm，于枝条基部（枝下高为 6 cm）用 3 N 力（用育才教学设备有限公司生产的弹簧测力计控制，弹簧测力计的挂钩钩住大叶黄杨树干基部，并用胶带固定住挂钩，水平拉动弹簧测力计）撞击植株基部，使试虫附着的枝条震动。在室内（22±1）℃、相对湿度 50%±10%条件下，用镊子夹取单头幼虫放置在距枝条基部 16 cm 的横枝交叉处，待幼

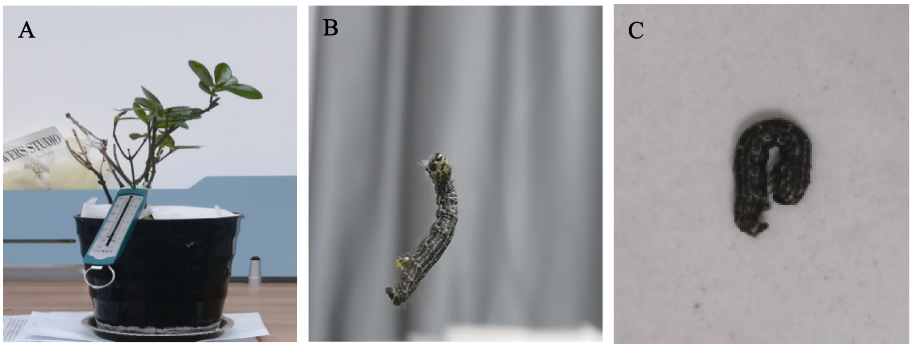


图 1　丝棉木金星尺蛾幼虫假死类型和大叶黄杨盆栽弹簧测力计装置

Fig. 1　Types of thanatosis of *Calospilos suspecta* and spring dynamometer device for potting with *Buxus megistophylla*

A. 大叶黄杨盆栽弹簧测力计装置；B. 吐丝假死；C. 坠地假死。

A. Spring dynamometer device for potting with *B. megistophylla*; B. Spinning thanatosis; C. Landing thanatosis.

虫恢复活动后，进行弹簧测力计撞击试验。若幼虫吐丝并悬挂在枝条上，判断为吐丝假死（图 1：B）（立即用卷尺测量吐丝长度，即测量吐丝幼虫头部到丝附着在枝条的距离）；若幼虫不吐丝而坠地卷曲，判断为坠地假死（图 1：C）；假死幼虫任何部位开始活动，判断为觉醒。对假死幼虫立即用手机秒表记录假死时间（坠地假死持续时间为坠落地面至觉醒的时间；吐丝假死返回时间为吐丝假死时间加觉醒后收丝完成返回枝条的时间）；计算假死率=（假死幼虫数/供试幼虫数）× 100%。

1.3　试验设计

1.3.1　每天撞击 1-4 次试验　共设 4 个处理，各处理组每天于光期 2 h 进行试验，第 1 处理组：单头试虫 1 d 撞击 1 次；第 2 处理组：单头试虫 1 d 连续撞击 2 次；第 3 处理组：单头试虫 1 d 连续撞击 3 次；第 4 处理组：单头试虫 1 d 连续撞击 4 次（连续撞击是指前后相继进行，即撞击后幼虫重返植株并恢复活动再进行下一次撞击试验），各试验组均持续 4 d，4 个试验处理分别记为“1×4、2×4、3×4 和 4×4”（次数×天数）；试验结束后，同组试虫集中在光照培养箱培养，饲喂大叶黄杨至化蛹，化蛹第 2 天称取蛹重。对照组不加外力处理，对照组试虫数为 30 头。

1.3.2　每天撞击 1 次试验　共设 4 个处理，各处理组每天于光期 2 h 进行试验，第 1 处理组：单头试虫 1 d 撞击 1 次，只撞击 1 d；第 2 处理组：单头试虫 1 d 撞击 1 次，连续撞击 2 d；第 3 处理组：单头试虫 1 d 撞击 1 次，连续撞击 3 d；第 4 处理组：单头试虫 1 d 撞击 1 次，连续撞击 4 d，4 个试验处理分别记为“1×1、1×2、1×3 和 1×4”（次数×天数）；试验结束后，同组试虫集中在光照培养箱培养，饲喂大叶黄杨至化蛹，化蛹第 2 天称取蛹重。

对照组不加外力处理。对照组和试验组试虫数范围为 30-35 头。

1.4　数据分析

试验数据均采用 IBM SPSS Statistics 21.0 软件进行差异性分析。不同处理间吐丝假死发生率、坠地假死发生率和总假死发生率的差异性分析采用卡方检验法（Chi-square test）；不同处理间吐丝假死返回时间、坠地假死持续时间、吐丝长度和蛹重的差异性进行单因素方差分析（One-way ANOVA），Duncan 氏多重比较法检验其显著性差异（P<0.05）；相同处理下的雌、雄蛹重量之间差异性进行独立样本 t 检验。

2　结果与分析

2.1　外力撞击次数的影响

2.1.1　外力撞击次数对幼虫假死发生率的影响

丝棉木金星尺蛾幼虫每天被撞击不同次数、连续撞击 4 d 处理下，吐丝假死发生率均显著高于坠地假死发生率（P<0.05）（表 1）。撞击 1

次处理组的吐丝假死发生率、坠地假死发生率和总假死率均最高，分别为 42.50%、25.00%和67.50%，撞击 3 次处理组的坠地假死发生率和总假死发生率均最低，分别为 5.07%和 28.09%，随着连续撞击次数的增加，假死发生率有下降的趋势。不同处理组之间差异性分析结果见表 2。

表 1　外力撞击次数对丝棉木金星尺蛾吐丝假死发生率、坠地假死发生率和总假死发生率的影响

Table 1　Effects of force impacts on frequency of spinning thanatosis, landing thanatosis and total thanatosis in *Calospilos suspecta*

试验处理（次数×天数） Treatments (frequency×days)	吐丝假死发生率（%） Frequency of spinning thanatosis (%)	坠地假死发生率（%） Frequency of landing thanatosis (%)	总假死发生率（%） Frequency of total thanatosis (%)
1×4	42.50 (51) *	25.00 (30) *	67.50 (81)
2×4	33.47 (83) *	5.24 (13) *	38.71 (96)
3×4	22.93 (86) *	5.07 (19) *	28.09 (105)
4×4	22.08 (121) *	10.22 (56) *	32.30 (177)

括号内的数据为各假死类型发生次数。*表示吐丝、坠地假死发生率间差异显著（P<0.05，卡方检验）。表 5 同。The data in parentheses represent the number of occurrences of various types of thanatosis. * indicates significant difference between the frequency of spinning and landing thanatosis (P<0.05, Chi-square test). The same for Table 5.

表 2　不同外力撞击次数下假死发生率卡方检验（df = 1）

Table 2　Chi-square test of frequency of thanatosis among different force impacts (df =1)

假死发生率分析 Analysis of frequency of thanatosis	试验处理（次数×天数） Treatments (frequency×days)	1×4	2×4	3×4
吐丝假死发生率分析 Analysis of frequency of spinning thanatosis	2×4	χ^2 = 14.853, P = 0.000		
	3×4	χ^2 = 39.742, P = 0.000	χ^2 = 8.380, P = 0.004	
	4×4	χ^2 = 46.961, P = 0.000	χ^2 = 11.616, P = 0.001	χ^2 = 0.093, P = 0.760
坠地假死发生率分析 Analysis of frequency of landing thanatosis	2×4	χ^2 = 30.593, P = 0.000		
	3×4	χ^2 = 40.499, P = 0.000	χ^2 = 0.009, P = 0.923	
	4×4	χ^2 = 19.175, P = 0.000	χ^2 = 5.342, P = 0.021	χ^2 = 7.917, P = 0.005
总假死发生率分析 Analysis of frequency of total thanatosis	2×4	χ^2 = 26.851, P = 0.000		
	3×4	χ^2 = 60.470, P = 0.000	χ^2 = 2.772, P = 0.096	
	4×4	χ^2 = 51.456, P = 0.000	χ^2 = 3.114, P = 0.078	χ^2 = 1.940, P = 0.164

2.1.2　外力撞击次数对幼虫假死持续时间和吐丝长度的影响　每天撞击不同次数、连续撞击 4 d 处理下，丝棉木金星尺蛾幼虫坠地假死持续时间没有显著性差异（P>0.05），吐丝假死返回时间和吐丝长度有显著性差异见表 3（P<0.05）。撞击 1 次处理组吐丝假死返回时间最长[（133.13±16.93）s]，吐丝长度也最长[（13.62±1.35）cm]。

2.1.3　外力撞击次数对蛹重的影响　每天撞击不同次数、连续撞击 4 d 处理后对丝棉木金星尺蛾雌、雄蛹重量有显著影响见表 4（P<0.05），各处理组雌、雄蛹的重量均大于对照组，且各组雌蛹的重量均极显著大于雄蛹（P<0.001）。

2.2　外力撞击天数的影响

2.2.1　外力撞击天数对幼虫假死发生率的影响

每天撞击 1 次时，不同撞击天数之间下丝棉木金星尺蛾的吐丝假死发生率和总假死发生率无显著性差异（P>0.05），但不同撞击天数下的坠地假死发生率有显著性差异（P<0.05），见表 6。撞击 4 d 处理组坠地假死发生率和总假死发生率最高（表 5）。相同撞击天数下的吐丝假死发生率均显著高于坠地假死发生率。随着撞击天数的增加，坠地假死和总发生率有上升的趋势，吐丝假死发生率的变化较为平缓。

表 3 外力撞击次数对丝棉木金星尺蛾吐丝长度、吐丝假死返回时间和坠地假死持续时间的影响

Table 3 Effects of force impacts on silk length, return time of spinning thanatosis and duration of landing thanatosis in *Calospilos suspecta*

试验处理（次数×天数） Treatments （frequency×days）	吐丝长度（cm） Silk length (cm)	吐丝假死返回时间（s） Return time of spinning thanatosis (s)	坠地假死持续时间（s） Duration of landing thanatosis (s)
1×4	13.62±1.35 (51) c	133.13±16.93 (51) b	11.69±0.59 (30) a
2×4	9.07±1.11 (72) b	105.79±13.72 (83) b	14.73±2.32 (13) a
3×4	6.34±0.84 (86) a	65.00±6.99 (86) a	14.37±2.64 (19) a
4×4	7.86±0.76 (120) ab	71.75±5.98 (121) a	13.71±1.84 (56) a
F 值 *F*-value	$F_{3.337} = 7.655^{**}$	$F_{3.337} = 8.071^{**}$	$F_{3.113} = 0.360$

表中数据为平均值±标准误，括号内的数据为各假死类型发生次数，同列数据后不同小写字母表示不同撞击次数间吐丝长度、吐丝假死返回时间和坠地假死持续时间差异显著（*P*<0.05，Duncan 氏多重比较）。* 表示不同撞击次数下吐丝长度、吐丝假死返回时间和坠地假死持续时间差异显著（*P*<0.05，独立样本 *t* 检验），** 表示不同撞击次数下吐丝长度、吐丝假死返回时间和坠地假死持续时间差异极显著（*P*<0.01，独立样本 *t* 检验）。表 7 同。

Data in the table are mean±SE. The data in parentheses represents the number of occurrences of various types of thanatosis, and different lowercase letters in the same column indicate that there are significant difference in the silk length, return time of spinning thanatosis and duration of landing thanatosis among different impact frequency (*P*<0.05, Duncan's multiple range test). * indicates that the difference in silk length, return time of spinning thanatosis and duration of landing thanatosis under different impact frequency are significant (*P*<0.05, independent samples *t*-test), ** indicates that the differences in silk length, return time of spinning thanatosis and duration of landing thanatosis under different impact times are extremely significant (*P*<0.01, independent samples *t*-test). The same for Table 7.

表 4 外力撞击次数对丝棉木金星尺蛾蛹重的影响

Table 4 Effects of force impacts on pupae weight of *Calospilos suspecta*

试验处理（次数×天数） Treatments (frequency×days)	蛹重量（g）Pupae weight (g)		独立样本 *t* 检验 Independent samples *t*-test
	♀	♂	
1×4	0.119±0.017 (9) abc	0.092±0.012 (15) ab	*P* < 0.001
2×4	0.117±0.025 (16) ab	0.101±0.015 (14) bc	*P* < 0.001
3×4	0.127±0.022 (21) bc	0.089±0.018 (10) a	*P* < 0.001
4×4	0.133±0.020 (15) c	0.102±0.011 (19) c	*P* < 0.001
对照 CK	0.102±0.019 (14) a	0.088±0.007 (16) a	*P* < 0.001
F 值 *F*-value	$F_{4, 69} = 4.393^{**}$	$F_{4, 70} = 4.453^{**}$	

表中数据为平均值±标准差，括号内的数据为样本数，同列数据后不同小写字母表示不同撞击次数间雌、雄蛹的重量差异显著（*P*<0.05，Duncan 氏多重比较）。* 表示不同撞击次数下雌、雄蛹的重量差异显著（*P*<0.05，独立样本 *t* 检验），** 表示不同撞击次数下雌、雄蛹的重量差异极显著（*P*<0.01，独立样本 *t* 检验）。同一撞击次数处理下的雌、雄蛹之间的重量差异极显著（*P*<0.001，独立样本 *t* 检验）。表 8 同。

Data in the table are mean±SD. The data in parentheses represents the number of samples, and different lowercase letters after data in the same column indicate significant differences in weight female and male pupae different impact frequencies. (*P*<0.05, Duncan's multiple range test). * indicates significant difference in weight female and male pupae different impact frequencies (*P*<0.05, independent samples *t*-test), ** indicates extremely significant difference in weight female and male pupae different impact frequencies (*P*<0.001, independent samples *t*-test). Under the same impact frequency treatment, extremely significantly different in weight between female and male pupae (*P*<0.01, independent samples *t*-test). The same for Table 8.

表 5　外力撞击天数对丝棉木金星尺蛾吐丝假死发生率、坠地假死发生率和总假死发生率的影响

Table 5　Effects of trial days of force impact on frequency of spinning thanatosis, landing thanatosis and total thanatosis in *Calospilos suspecta*

试验处理（次数×天数） Treatments (frequency×days)	吐丝假死发生率（%） Frequency of spinning thanatosis (%)	坠地假死发生率（%） Frequency of landing thanatosis (%)	总假死发生率（%） Frequency of total thanatosis (%)
1×1	40.00 (12) *	6.67 (2) *	46.67 (14)
1×2	41.67 (25) *	13.33 (8) *	55.00 (33)
1×3	38.33 (46) *	8.33 (10) *	46.67 (56)
1×4	42.50 (51) *	25.00 (30) *	67.50 (81)

表 6　不同外力撞击天数下假死发生率卡方检验（*df* = 1）

Table 6　Chi-square test of frequency of thanatosis under different trial days of force impact (*df* = 1)

假死发生率分析 Analysis of frequency of thanatosis	试验处理（次数×天数） Treatments (frequency×days)	1×1	1×2	1×3
吐丝假死发生率分析 Analysis of frequency of spinning thanatosis	1×2	$\chi^2 = 0.023$, $P = 0.880$		
	1×3	$\chi^2 = 1.112$, $P = 0.292$	$\chi^2 = 1.288$, $P = 0.256$	
	1×4	$\chi^2 = 2.506$, $P = 0.113$	$\chi^2 = 3241$, $P = 0.072$	$\chi^2 = 0.559$, $P = 0.455$
坠地假死发生率分析 Analysis of frequency of landing thanatosis	1×2	$\chi^2 = 0.900$, $P = 0.343$		
	1×3	$\chi^2 = 0.494$, $P = 0.482$	$\chi^2 = 0.168$, $P = 0.682$	
	1×4	$\chi^2 = 4.807$, $P = 0.028$	$\chi^2 = 3.269$, $P = 0.071$	$\chi^2 = 6.434$, $P = 0.011$
总假死发生率分析 Analysis of frequency of total thanatosis	1×2	$\chi^2 = 0.557$, $P = 0.456$		
	1×3	$\chi^2 = 2.240$, $P = 0.134$	$\chi^2 = 0.778$, $P = 0.378$	
	1×4	$\chi^2 = 0.539$, $P = 0.463$	$\chi^2 = 0.017$, $P = 0.895$	$\chi^2 = 1.552$, $P = 0.213$

2.2.2　外力撞击天数对幼虫吐丝长度和假死时间的影响　每天撞击 1 次时，不同撞击天数之间丝棉木金星尺蛾的吐丝长度、吐丝假死返回时间和坠地假死持续时间均无显著性差异（$P>0.05$），见表 7。撞击 3 d 处理组吐丝假死返回时间最长[（158.20±17.47）s]，撞击 2 d 处理组吐丝长度最长[（11.78±2.15）cm]。

2.2.3　外力撞击天数对蛹重的影响　每天撞击 1 次时，不同撞击天数处理后对丝棉木金星尺蛾雌、雄蛹重有显著影响（$P<0.05$），见表 8。除撞击 1 d 处理组外，其余处理组的雌蛹重量（2-4 d 撞击分别是 0.121±0.027）g、（0.124±0.016）g 和（0.119±0.017）g，均大于对照组[（0.102± 0.019）g]；而处理组雄蛹的重量仅在撞击 3 和 4 d 下大于对照组[（0.088±0.008）g]。各组雌蛹重量均显著大于雄蛹（$P<0.05$）。

表 7　外力撞击天数对丝棉木金星尺蛾吐丝长度、吐丝假死返回时间和坠地假死持续时间的影响

Table 7　Effects of trial days of force impact on silk length, return time of spinning thanatosis and duration of landing thanatosis in *Calospilos suspecta*

试验处理（次数×天数） Treatments (frequency×days)	吐丝长度（cm） Silk length (cm)	吐丝假死返回时间（s） Return time of spinning thanatosis (s)	坠地假死持续时间（s） Duration of landing thanatosis (s)
1×1	11.78±2.15 (12) a	147.76±34.64 (12) ab	10.25±3.02 (2) a
1×2	12.08±1.73 (25) a	95.20±14.31 (25) a	11.86±1.01 (8) a
1×3	14.50±1.30 (46) a	158.20±17.47 (46) b	10.46±1.14 (10) a
1×4	13.62±1.35 (51) a	133.13±16.93 (51) ab	11.69±0.59 (30) a
F 值 *F*-value	$F_{3, 130} = 0.544$	$F_{3, 130} = 1.749$	$F_{3, 46} = 0.48$

表 8 外力撞击天数对丝棉木金星尺蛾蛹重量的影响

Table 8 Effects of trial days of force impact on pupae weight of *Calospilos suspecta*

试验处理（次数×天数） Treatments (frequency×days)	蛹重量（g） Pupae weight (g)		独立样本 *t* 检验 Independent samples *t*-test
	♀	♂	
1×1	0.100±0.019 (10) a	0.077±0.009 (13) a	$P > 0.001$
1×2	0.121±0.027 (14) b	0.085±0.021 (13) ab	$P = 0.001$
1×3	0.124±0.016 (15) b	0.093±0.011 (14) b	$P < 0.001$
1×4	0.119±0.017 (9) bc	0.092±0.012 (15) b	$P < 0.001$
对照 CK	0.102±0.019 (14) ac	0.088±0.008 (16) b	$P < 0.001$
F 值 *F*-value	$F_{4, 57} = 3.963^{**}$	$F_{4, 66} = 3.327^{*}$	

* 表示不同撞击天数下雌、雄蛹的重量差异显著（$P<0.05$，独立样本 *t* 检验），** 表示不同撞击天数下雌、雄蛹的重量差异极显著（$P<0.01$，独立样本 *t* 检验）。

* indicates significant difference in weight female and male pupae different impact days ($P<0.05$, independent samples *t*-test), ** indicates extremely significant difference in weight female and male pupae different impact days ($P<0.01$, independent samples *t*-test).

3 结论与讨论

动物（包括昆虫）假死受多种因素影响，如性别、幼虫龄期、饥饿程度等内在因素，及温度、光照、机械刺激强度、背景颜色等外界因素（孟凡明和梁醒财, 2009; 涂小云等, 2012, 2013; 侯冬梅和涂小云, 2014; 李会娟等, 2021）。昆虫可以通过接收底物传播的震动来获取环境信息（Greenfield, 2002），同时震动可引发多种昆虫假死（Acheampong and Mitchell, 1997; Hill, 2008）。本研究测试了外力撞击大叶黄杨茎对其上的丝棉木金星尺蛾幼虫假死特征及后续蛹重的影响，结果表明，丝棉木金星尺蛾幼虫在每天撞击不同次数、连续撞击 4 d 处理下吐丝假死发生率有随撞击次数的增加而下降的趋势（表 1），这可能是幼虫对撞击枝条引起的震动这种非伤害性刺激习惯化的结果；本研究中吐丝假死返回时间实际上包含了吐丝假死持续时间和收丝时间，亦有随撞击次数的增加而缩短的趋势（表 3），假死持续时间随刺激次数增加而缩短的趋势也见于毛健夜蛾 *Brithys crini* 幼虫（朱敏等, 2016）。然而，坠地假死和每天撞击 1 次、持续 4 d 处理下的幼虫吐丝假死却无上述趋势，可得出同种昆虫的假死方式和外界刺激方式不同，假死特征可能不同。

本研究结果表明，无论是不同次数还是不同天数的撞击，丝棉木金星尺蛾幼虫吐丝假死发生率均显著高于坠地假死发生率（表 1，表 5），这种现象可能与该幼虫具吐丝习性有关，也可能是长期进化的结果。坠地假死的幼虫直接坠落地面，受冲击力大，虫体易受伤，且坠地后在地面上虫体更容易被天敌捕食或被人们捕捉，而吐丝假死借助于丝线悬于空中，既可避免坠地受伤，又可借助丝线悬在树枝间，降低被发现、被捕食的概率。

每天撞击 1 次、连续 4 d 试验结果表明，丝棉木金星尺蛾幼虫吐丝长度无显著性差异，但有增长的趋势（表 7），这可能与随着试验时间逐渐增加（1-4 d），幼虫取食后体重增加有关，这与舞毒蛾 *Lymantria dispar* 幼虫取食时间越长、吐丝长度越长的结果一致（王志娟, 2020）。但每天撞击由 1 次增至 4 次、连续 4 d 试验结果表明，幼虫吐丝长度有缩短的趋势（表 3），可能与本研究中每天 2-4 次撞击是前后相继的 2-4 次撞击有关，频繁撞击可能使幼虫吐丝所需相关物质准备不足或收回的丝不能立即重复使用。

幼虫受撞击刺激后，所化蛹重量并未随撞击次数增多、试验时间延长而降低，反之，经历撞击试验后幼虫所化蛹重多数情况下重于对照组（表 4，表 8），原因可能是外力撞击使丝棉木

金星尺蛾幼虫 5-羟色胺系统短时间内过度激活，随后导致 5-羟色胺的耗竭，5-羟色胺对摄食的抑制作用被削弱，这种过度应激导致 5-羟色胺耗竭已在其他动物得到证实（Kaehler *et al*., 2000; 王飞凤等, 2023）。但外力撞击是否影响丝棉木金星尺蛾幼虫体内 5-羟色胺代谢则有待进一步开展相关研究。

综上所述，外力撞击大叶黄杨茎对其上的丝棉木金星尺蛾幼虫假死有影响，但因撞击次数和天数不同而异，不同处理组丝棉木金星尺蛾幼虫吐丝假死发生率显著大于坠地假死；幼虫受撞击后所化蛹的重量大多增加，故外力撞击诱导幼虫假死后，对其后续生长发育是有一定的影响。此外，在外力撞击诱导丝棉木金星尺蛾幼虫试验中发现，采取适当的撞击频数，可增加幼虫假死发生率，从而为有效进行害虫的人工防治提供参考。以 3 N 外力撞击大叶黄杨茎为例，随着不间断撞击次数的增加，幼虫假死发生率有下降的趋势，反之，随着撞击天数的撞击，幼虫假死发生率有上升的趋势。但本研究仅在连续撞击不同次数和撞击不同天数下进行探究，缺乏间隔不同时间进行多次撞击试验做系统的评估。因此，未来研究将进一步评估不同间隔时间下诱导幼虫假死发生的影响，以期能更高效率的做到人工防治害虫。

参考文献 (References)

Acheampong S, Mitchell BK, 1997. Quiescence in the Colorado potato beetle *Leptinotarsa decemlineata*. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 82(1): 83–89.

Cao YR, Lin QQ, Chen WM, Zhang JX, Dong F, Yu X, Tu XY, 2018. Preliminary study on thanatosis of *Calospilos suspecta* larvae. *Biological Disaster Science*, 41(1): 48–51. [曹亚汝, 林青青, 陈文美, 张晶霞, 董芳, 余鑫, 涂小云, 2018. 丝棉木金星尺蛾幼虫假死行为初步研究. 生物灾害科学, 41(1): 48–51.]

Greenfield MD, 2002. Signalers and Receivers: Mechanisms and Evolution of Arthropod Communication. New York: Oxford University Press. 127–149.

Guo SJ, Li SM, Chen Q, Zhuo XN, Duan HG, 2007. Study on the occurrence and control of *Calospilos suspecta* Warren in Luohe city. *Henan Agricultural Science*, 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.]

Hou DM, Tu XY, 2014. Preliminary study on thanatosis of *Ochyromera ligustri*. *Biological Disaster Science*, 37(1): 56–59. [侯冬梅, 涂小云, 2014. 女贞粗腿象甲假死行为的初步研究. 生物灾害科学, 37(1): 56–59.]

Hill PSM, 2008. Vibrational Communication in Animals. Cambridge: Harvard University Press. 119–139.

Kaehler ST, Singewald N, Sinner C, Thurnher C, Philippu A, 2000. Conditioned fear and inescapable shock modify the release of serotonin in the locus coeruleus. *Brain Research*, 859(2): 249–254.

Li HJ, Yang KL, Wang Q, Wen JB, 2021. Research history and current situations of feigning death in insects. *Journal of Environmental Entomology*, 43(1): 79–92. [李会娟, 杨开朗, 王倩, 温俊宝, 2021. 昆虫假死行为研究进展. 环境昆虫学报, 43(1): 79–92.]

Li XW, Liu FJ, Shao SR, Su L, Jin LM, Lou YG, Sun XL, 2017. Research progress and prospect of green control techniques of *Ectropis obliqua*. *Journal of Tea Science*, 37(4): 325–331. [李喜旺, 刘丰静, 邵胜荣, 苏亮, 金李孟, 娄永根, 孙晓玲, 2017. 茶尺蠖绿色防控技术研究现状及展望. 茶叶科学, 37(4): 325–331.]

Liu ZF, 1992. The occurrence and control of *Calospilos suspecta* Warren. *Entomological Knowledge*, 29(1): 36. [刘志芬, 1992. 丝棉木金星尺蛾的发生及防治. 昆虫知识, 29(1): 36.]

Meng FM, Liang XC, 2009. Research history and current situations of feigning death in insects. *Chinese Bulletin of Entomology*, 46(6): 985–991. [孟凡明, 梁醒财, 2009. 昆虫假死行为研究历史及现状. 昆虫知识, 46(6): 985–991.]

Riessen HP, 1992. Cost-benefit model for the induction of an antipredator defense. *American Naturalist*, 140(2): 349–362.

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, Wang GH, Chen YS, Hu ZL, 2013. Thanatosis of larvae of *Brithys crini* Fabricius. *Journal of Fujian Normal University* (*Natural Science Edition*), 29(5): 112–116. [涂小云, 王国红, 陈元生, 胡章龙, 2013. 毛健夜蛾幼虫假死行为. 福建师范大学学报(自然科学版), 29(5): 112–116.]

Wang FF, Qin P, Liu JL, Qiu BL, Lei CL, Sang W, 2023. The roles

of biogenic amines in regulation of insect behaviors. *Journal of Plant Protection*, 50(3): 578–592. [王飞凤, 秦鹏, 刘家莉, 邱宝利, 雷朝亮, 桑文, 2023. 生物胺在昆虫行为调控中的作用. 植物保护学报, 50(3): 578–592.]

Wang ZJ, 2020. Dispersal ability of Asian gypsy moth (*Lymantria dispar asiatic*a). Master dissertation. Beijing: Beijing Forestry University. [王志娟, 2020. 亚洲舞毒蛾的扩散能力研究. 硕士学位论文. 北京: 北京林业大学.]

Yang DF, Hu GZ, Gu JR, Zhang Q, Zhou XW, Deng JH, Ma JY, 2007. Biological characteristics and control technology of *Calospilos suspecta* Warren. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 35(6): 91–92. [杨代凤, 胡桂珍, 顾俊荣, 张青, 周新伟, 邓金花, 马锦义, 2007. 丝棉木金星尺蠖的生物学特性及防治技术. 江苏农业科学, 35(6): 91–92.]

Zhou GY, Song GT, Li H, 2007. Present situation and countermeasures to control *Camellia* oliefera pest and disease. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 27(6): 179–182. [周国英, 宋光桃, 李河, 2007. 油茶病虫害防治现状及应对措施. 中南林业科技大学学报, 27(6): 179–182.]

Zheng JX, Liang GH, Zheng YS, 2012. Current infesting situation, reasons and controlling strategies of pests and diseases attacking *Tripterygium wilfordii*. *Subtropical Agriculture Research*, 8(1): 31–36. [郑俊仙, 梁光红, 郑郁善, 2012. 雷公藤叶部病虫害的发生现状、成因及对策. 亚热带农业研究, 8(1): 31–36.]

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.]

Zhang YJ, 1979. A preliminary study on *Calospilos suspecta* Warren. *Journal of Northwest University* (*Natural Science Edition*), 9(2): 86–93. [张英俊, 1979. 丝棉木金星尺蛾的初步研究. 西北大学学报(自然科学版), 9(2): 86–93.]