

温度对白刺夜蛾生长发育及成虫寿命和繁殖的影响*

勾文山^{1**} 马维新² 刘宁云¹ 胡桂馨^{1***} 孙尧德^{2***}

(1. 甘肃农业大学草业学院, 国家林业和草原局高寒草地鼠害防控工程技术研究中心, 兰州 730070;

2. 民勤县草原工作站, 民勤 733399)

摘要 【目的】白刺夜蛾 *Leimetopon simyrides* 是荒漠植物白刺的重要害虫, 明确温度对白刺夜蛾生长发育、成虫寿命和繁殖的影响, 以期对白刺夜蛾的发生进行预测预报。【方法】设置 18、21、24、27、30 和 33 °C 6 个恒温梯度, 观测并记录白刺夜蛾各虫期的发育历期、存活率、成虫寿命、产卵量等生物学参数; 运用有效积温法则计算各虫期的发育起点温度和有效积温; 通过线性模型和 Logistic 模型对温度与各虫期发育速率之间的关系进行拟合。【结果】在 18–30 °C 范围内, 白刺夜蛾卵、各龄幼虫和蛹的发育历期均随着温度的升高而缩短; 在 33 °C 时, 卵、3 龄幼虫和 5 龄幼虫的发育历期有所延长; 成虫的寿命随温度的升高逐渐缩短。在 27 °C 时, 除 5 龄幼虫外, 卵和 1–4 龄幼虫的存活率均最高; 21 °C 下蛹的存活率 (97.50%) 最高, 其次为 24 °C 和 27 °C 的, 蛹的存活率分别为 95.97% 和 95.28%。在 18 °C 和 21 °C, 除去死亡蛹, 白刺夜蛾的蛹全部滞育; 在 24–30 °C 温度范围, 部分白刺夜蛾羽化, 27 °C 条件下成虫羽化率最高 (88.33%), 单雌产卵量也最高 (235.2 粒), 其次为 24 °C 和 30 °C 的, 但 30 °C 下羽化的成虫不产卵, 24 °C 下单雌产卵量为 86.3 粒。卵期、幼虫期、蛹期和全世代的发育起点温度分别为 13.01、10.71、13.45 和 14.60 °C, 有效积温分别为 112.36、272.15、167.28 和 475.96 日·度。相较于线性模型, Logistic 模型能够更好地拟合发育速率与温度之间的关系。【结论】白刺夜蛾生长发育和繁殖的最适宜温度范围为 24–27 °C。

关键词 白刺夜蛾; 温度; 生长发育; 繁殖; 发育起点温度; 有效积温

Effects of temperature on the growth, development, adult longevity and reproduction of *Leimetopon simyrides* (Lepidoptera: Noctuidae)

GOU Wen-Shan^{1**} MA Wei-Xin² LIU Ning-Yun¹ HU Gui-Xin^{1***} SUN Yao-De^{2***}

(1. College Paracultural of Gansu Agricultural University, Engineering and Technology Research Center for Alpine Rodent Pest Control National Forestry and Grassland Administration, Lanzhou 730070, China;

2. Minqin County Grassland Workstation, Minqin 733399, China)

Abstract 【Objectives】To explore the influence of temperature on the growth, development, adult longevity and reproduction of *Leimetopon simyrides*, an important leaf-feeding insect pest of *Nitraria* spp., and thereby improve the ability to predict the occurrence of this pest. 【Methods】The developmental duration, survival rate of different developmental stages, adult longevity and fecundity of *L. simyrides* were measured under constant temperatures of 18, 21, 24, 27, 30 and 33 °C. The developmental threshold temperature and effective accumulated temperature of each stage were determined using the effective accumulated temperature law, and the relationship between temperature and the development rate of each stage was modelled using linear and logistic models. 【Results】The developmental duration of eggs, larvae and pupae of *L. simyrides* decreased with increasing temperature within the range of 18–30 °C but exposure to 33 °C slightly increased the developmental

*资助项目 Supported projects: 国家自然科学基金项目 (31960350); 民勤县荒漠草原主要害虫调查与监测试点项目 (XZ20200610)

**第一作者 First author, E-mail: 1320361588@qq.com

***共同通讯作者 Co-corresponding authors, E-mail: huguixin@gsau.edu.cn; 381274787@qq.com

收稿日期 Received: 2021-11-25; 接受日期 Accepted: 2022-05-20

duration of eggs, 3rd and 5th instar larvae. The survival rate of eggs and the 1st to 4th instar stages were all highest at 27 °C, and the survival rate of pupae was highest (97.50%) at 21 °C and progressively lower at 24 °C and 27 °C. Live pupae entered diapause at 18 °C and 21 °C. Adults only emerged within the temperature range of 24-30 °C. The emergence rate was highest (88.33%) at 27 °C. The average number of eggs laid per female (235.2) was also highest at 27 °C and lowest at 24 °C. Females did not lay eggs at 30 °C. The threshold temperatures of eggs, larvae, pupae, and the entire generation, were 13.01, 10.71, 13.45 and 14.60 °C, respectively, and the corresponding effective accumulated temperatures were 112.36, 272.15, 167.28 and 475.96 degree-days, respectively. The relationship between developmental rate and temperature was a better fit to a logistic model than a linear model. **[Conclusion]** The optimum temperature range for *L. simyrides* growth, development and reproduction is 24-27 °C.

Key words *Leiomatopon simyrides*; temperature; growth development; reproduction; developmental threshold temperature; effective accumulated temperature

白刺属蒺藜科白刺属, 是一种旱生或超旱生灌木, 主要分布于我国的柴达木、塔里木、阿拉善和河西走廊等地, 在石羊河下游干旱荒漠区分布最广、面积最大(赵多明等, 2010)。白刺具有耐干旱、耐高温、耐严寒、耐盐碱、耐贫瘠和抗风沙等特性(王彦阁等, 2007); 白刺耐沙埋, 沙埋后能迅速长出不定根, 进而扩展枝叶、积沙成丘, 形成固定和半固定的白刺灌丛沙包, 对于防止流沙入侵绿洲、保持绿洲环境的稳定具有很大的作用(张金鑫等, 2012)。民勤县地处河西走廊东部, 石羊河最下游, 东、西、北三面连接腾格里沙漠和巴丹吉林沙漠, 是我国重要的生态保护功能区域, 其生态屏障功能对于石羊河下游地区, 甚至全国的生态安全都具有重要作用(何俊林等, 2008; 孟敏, 2011)。

近年来, 随着石羊河下游生态环境的逐步恶化, 白刺种群受到有害生物的危害日益加剧。在永昌县和武威市民勤县境内大面积的荒漠草原上, 白刺夜蛾 *Leiomatopon simyrides* 时常严重发生, 白刺受害严重(王珏等, 1999)。白刺夜蛾是荒漠草原专食白刺的暴发性害虫, 繁殖速度快, 种群密度大(吴栋国等, 2002)。成虫多产卵于白刺叶片背面, 1龄和2龄幼虫集中在嫩梢取食危害, 3龄后开始分散到白刺的其他部位或附近其他白刺植株上, 暴食白刺叶片, 严重时可将整丛白刺的叶片吃光, 只剩枝条(陈善科等, 2000)。在荒漠草原上, 若遇到长时间干旱少雨的气候, 这种过度取食可致使白刺丧失再生长能力而枯死, 加剧了荒漠草原的沙漠化。

不同昆虫的发育起点温度和完成某个虫期以及整个世代的有效积温都有所不同(罗礼智和李光博, 1993; 黄芊等, 2018; 何莉梅等, 2019; Plessis *et al.*, 2020; 赵晨宇等, 2020), 利用昆虫的发育起点温度和有效积温对其在某一地区的发生期和发生世代进行预测, 从而做到及时防治, 减少害虫造成的损失(赵姝荣等, 2008; 袁盛勇等, 2015)。关于白刺夜蛾的研究报道很少, 仅王珏等(1999)在室温条件研究其发育起点温度和有效积温, 但该研究忽略了低温对昆虫停育的影响, 从而高估了昆虫的发育起点温度。因此, 本试验在恒温条件下, 设置不同温度梯度, 利用白刺饲喂白刺夜蛾, 观察记录其各虫期的生长发育和成虫的寿命与繁殖力, 准确计算其发育起点温度和有效积温, 为白刺毛虫的预测预报提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料

供试植物: 唐古特白刺 *Nitraria tangutorum*。

供试昆虫: 白刺夜蛾卵采自甘肃省武威市民勤县红沙岗镇荒漠草原(2021年5月5日), 在养虫箱(27±0.1)°C条件下饲养一代后, 获得的虫卵用于试验。

1.2 试验方法

1.2.1 白刺夜蛾卵的发育历期和孵化率 试验设置 18、21、24、27、30 和 33 °C 6 个恒温梯

度,光周期为 14 L : 10 D,湿度为 35%±5%的饲养条件,将带有白刺夜蛾初产卵块的枝条置于食品级透明塑料罐罐底(直径×高=6.5 cm×6.5 cm),枝条下端裹湿润棉球保湿,置于养虫箱(YCX-250 型,上海跃进医疗器械有限公司)中待其孵化。每天定时观察并记录孵化的幼虫数,并在棉球上滴蒸馏水,保持白刺叶片的鲜活,直至卵全部孵化。每个温度下设置 3 个重复,每个重复卵量 50-100 个,记录初产时间及孵化时间。

1.2.2 白刺夜蛾幼虫的发育历期和成活率 试验剪取长短适宜的新鲜白刺枝条,置于透明养虫罐底部(直径×高=6.5 cm×6.5 cm),枝条下端裹湿润棉球保持白刺叶片鲜活。用小毛笔将初孵白刺夜蛾幼虫移至白刺叶片上,每罐 10 头,每个温度 5 个重复,标记罐号。每天早上 9:00-11:00 定时观察记录幼虫的脱皮、存活状况,并及时滴水保鲜,及时更换新鲜白刺,清理粪便。幼虫进入 4 龄后,移入透明的塑料养虫罐(直径×高=10 cm×15 cm)中继续饲喂,每罐 5 头,直至幼虫老熟。

1.2.3 蛹的发育历期及羽化率 试验在透明的塑料养虫罐(直径×高=8 cm×15 cm)中,装入 3 cm 深的干净沙子,滴加纯净水使沙土湿度达到 10%,此后保持自然状态,标记罐号。移入同号罐内不再取食的老熟幼虫,待幼虫完全入土后,开始记录蛹的发育历期。在沙面上化蛹者,其吐丝时开始记录。每天定时观察,记录各罐中蛹的羽化时间。

1.2.4 白刺夜蛾成虫寿命和繁殖力 试验在各温度下,将初羽化的成虫接入养虫罐(直径=10 cm,高=20 cm)中,每罐雌雄虫各 1 只。罐中放置插有新鲜白刺的小沙罐(6.5 cm×6.5 cm),小沙罐中装入湿沙,每天早晨 9:00 观察雌成虫产卵情况及存活情况。

1.3 数据分析

利用 SPSS24.0 软件和 Excel 对试验数据进行处理,采用单因素方差分析不同虫期的参数随着温度变化的差异显著性,运用 Duncan's 新复极差法进行多重比较分析。

1.3.1 白刺夜蛾各虫期发育起点温度和发育历期的计算 根据观察记录的结果,得出不同温度下各虫期发育历期,利用最小二乘法计算发育起点温度和有效积温(张孝羲,2002),计算公式如下:

$$N = \frac{K}{T - C},$$

$$V = \frac{1}{N},$$

$$C = \frac{\sum V^2 \sum T - \sum V \sum VT}{n \sum V^2 - (\sum V)^2},$$

$$K = \frac{n \sum VT - \sum V \sum T}{n \sum V^2 - (\sum V)^2},$$

$$S_c = \sqrt{\frac{\sum (T - T')^2}{n - 2} \left[\frac{1}{n} + \frac{\bar{V}^2}{\sum (V - \bar{V})^2} \right]}.$$

式中 C 为发育起点温度, K 为有效积温常数, V 为发育速, N 为发育历期, T 为日均温平均值, n 为试验温度组数, $\bar{V}$ 为平均发育速率, T' 为理论温度值。 S_k 为 K 的标准误差, S_c 为 C 的标准误差。

1.3.2 白刺夜蛾各虫期发育速率与温度之间的拟合模型 白刺夜蛾各虫期的发育速率与温度之间的关系利用线性模型和进行 Logistic 模型(王如松等,1982)拟合据 R^2 判断拟合程度,各模型计算公式如下:

线性模型: $V = a + bT$,

Logistic 模型: $V = \frac{K}{1 + e^{a-bT}}$ 。

其中 K 为发育速率的上限估计值, a , b 为参数, T 为试验温度,试验温度为 T 时的发育速率。

2 结果与分析

2.1 不同温度下白刺夜蛾各虫期的发育历期

由表 1 可以看出,在 18-30 °C 范围内,白刺夜蛾卵和 1-5 龄幼虫的发育历期随温度的上升而缩短;在 33 °C 下,卵、3 龄幼虫和 5 龄幼虫的发育历期稍长于 30 °C,但差异不显著($P > 0.05$)。在 24-30 °C,白刺夜蛾的蛹均能正常羽化,且各温度间的发育历期差异显著($P < 0.05$); 30 °C

表 1 不同温度条件下白刺夜蛾各虫期的发育历期
Table 1 Developmental duration of *Leiometopon simyrides* under different temperatures

发育阶段 Developmental stages	发育历期 (d) Developmental duration (d)					
	18 °C	21 °C	24 °C	27 °C	30 °C	33 °C
卵 Egg	26.75±0.25a	13.00±0.00b	9.66±0.33c	7.00±0.00d	6.40±0.24d	6.67±0.33d
1 龄幼虫 1st instar	7.48±0.35a	6.00±0.00b	5.25±0.17c	4.04±0.02d	3.69±0.25de	3.19±0.08e
2 龄幼虫 2nd instar	6.93±0.36a	4.24±0.19b	3.34±0.51c	2.98±0.02c	1.98±0.04d	1.43±0.24d
3 龄幼虫 3rd instar	7.60±0.47a	4.65±0.21b	3.57±0.26c	2.20±0.09d	1.28±0.15e	2.08±0.35de
4 龄幼虫 4th instar	8.21±0.12a	4.59±0.12b	4.33±0.44b	3.47±0.14c	3.21±0.17c	1.98±0.27d
5 龄幼虫 5th instar	9.00±0.43a	5.19±0.17b	5.09±0.70b	3.73±0.11c	3.00±0.00c	3.91±0.08c
幼虫总期 Total larval stage	39.21±1.08a	24.67±0.11b	21.57±0.66c	16.45±0.18d	13.85±0.18e	12.58±0.23e
蛹 Pupae	—	—	15.72±1.50a	12.49±0.37b	10.06±0.27c	—
产卵前期 Oviposition prophase	—	—	3.25±1.25a	2.43±0.19b	—	—
总发育历期 Total duration	—	—	50.61±0.11a	38.37±0.37b	—	—

表中数据均为平均值±标准误; 同行数据后标有不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$, Duncan's 多重比较检验)。—表示没有数据。表 2 和表 3 同。
Data are mean ± SE, and followed by different lowercase letters in the same line indicate significant differences ($P<0.05$, Duncan's multiple range test). — indicates no data. The same as table 2 and table 3.

条件下蛹的发育历期最短,为 10.06 d,但在 30 °C 条件下羽化的成虫不产卵; 在 18、21 和 33 °C, 白刺夜蛾的蛹未羽化。27 °C 条件下, 产卵前期和总发育历期显著低于 24 °C ($P<0.05$)。

2.2 不同温度条件下白刺夜蛾各虫期的存活率

不同温度下白刺夜蛾各发育阶段的存活率如表 2 所示, 卵的存活率在 27 °C 条件下最高, 在 18 °C 条件下存活率最低 (16.27%); 在 21 °C

和 27 °C 下, 1 龄幼虫存活率最高, 18 °C 条件下存活率最低; 2 龄幼虫在 24 °C 和 27 °C 存活率为 100%, 在 18 °C 条件下存活率最低; 在 21-30 °C, 3 龄幼虫全部存活, 在 18 °C 条件存活率下最低; 4 龄幼虫在 21-27 °C 条件下存活率均为 100%, 在 33 °C 条件下存活率最低; 5 龄幼虫在 24 °C 条件下存活率最高, 在 33 °C 条件下存活率最低; 在 21 °C 条件下蛹的存活率最高, 在 33 °C 条件下的蛹全部死亡。

表 2 不同温度条件下白刺夜蛾各虫期存活率
Table 2 Survival rate of *Leiometopon simyrides* under different temperatures

发育阶段 Developmental stages	存活率 (%) Survival rate (%)					
	18 °C	21 °C	24 °C	27 °C	30 °C	33 °C
卵 Egg	16.27±6.71c	58.28±5.66b	53.22±2.58b	94.03±3.92a	72.84±11.91b	21.63±13.56c
1 龄幼虫 1st instar larva	56.00±13.64b	98.00±2.00a	93.89±3.09a	98.00±2.00a	95.78±2.59a	81.78±6.57a
2 龄幼虫 2nd instar larva	85.33±6.46b	93.56±4.39ab	100.00±0.00a	100.00±0.00a	98.00±2.00a	97.50±2.50a
3 龄幼虫 3rd instar larva	95.00±5.00a	100.00±0.00a	100.00±0.00a	100.00±0.00a	100.00±0.00a	97.50±2.50a
4 龄幼虫 4th instar larva	95.00±5.00ab	100.00±0.00a	100.00±0.00a	100.00±0.00a	97.78±2.22a	85.84±5.95b
5 龄幼虫 5th instar larva	95.00±5.00a	92.00±8.00a	96.67±3.33a	94.00±4.00a	91.00±4.58a	78.21±7.28a
蛹 Pupae	87.50±7.98a	97.50±2.50a	95.97±4.03a	95.28±2.90a	38.89±4.97b	0.00±0.00c

2.3 不同温度下白刺夜蛾蛹的羽化率和成虫雌雄性比

如图 1 所示, 白刺夜蛾蛹在 27 °C 下羽化率最高, 为 88.33%, 其次是 30 °C 和 24 °C, 但在 30 °C 下除了羽化蛹, 其余蛹全部死亡; 18、21 和 33 °C 条件下的蛹均未见羽化 (33 °C 条件下的蛹全部死亡) (图 1: A)。27 °C 下, 雌虫占比

最高 (51.57%), 其次为 24 °C (50.00%), 30 °C 下雌虫占比最低 (45%), 三者之间差异不显著 ($P>0.05$) (图 1: B)。在 21 °C 下, 蛹的滞育率最高 (97.5%), 其次是 18 °C, 蛹的滞育率为 87.5% (图 1: C)。在 33 °C 下, 蛹全部死亡, 其次是 30 °C, 死亡率为 61.11%, 21 °C 下蛹死亡率最低 (2.5%), 三者之间差异显著 ($P<0.05$) (图 1: D)。

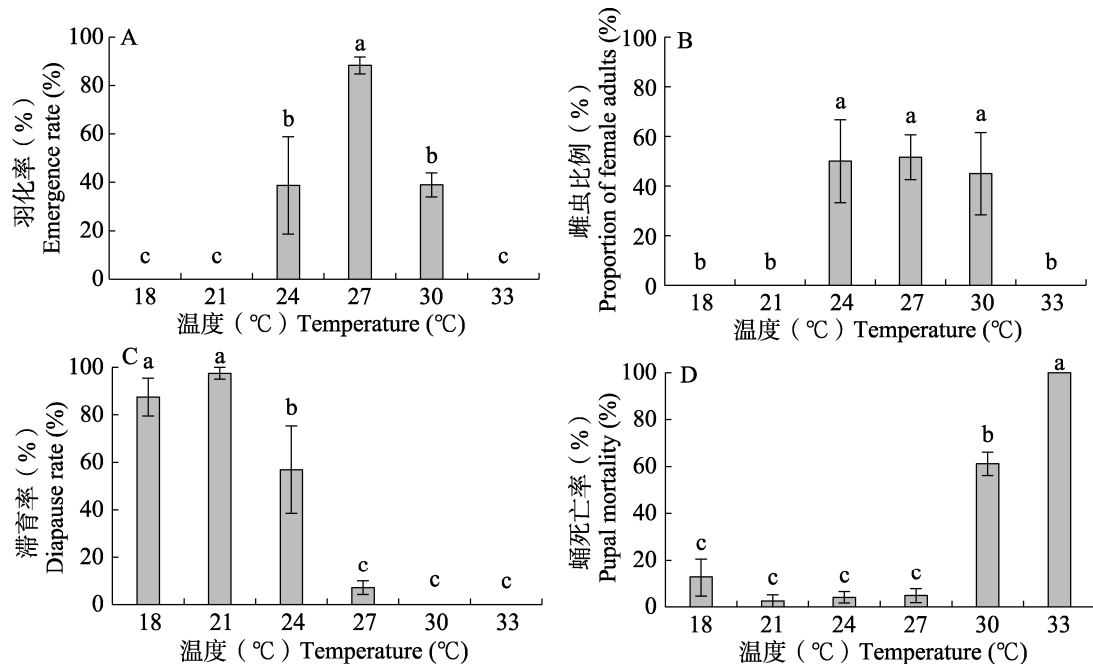


图 1 不同温度条件下白刺夜蛾蛹的生命参数和成虫性比

Fig. 1 The pupae life parameters and adult sex ratio of *Leiomotopon simyrides* under different temperatures

A. 羽化率; B. 雌虫比例; C. 滞育率; D. 蛹死亡率。柱上标有不同小写字母表示

不同温度下的不同参数差异显著 ($P<0.05$, Duncan's 多重比较检验)。

A. Emergence rate; B. Proportion of female adults; C. Diapause rate; D. Pupal mortality. Histograms with different lowercase letters indicates significantly different under different temperatures ($P<0.05$, Duncan's multiple range test).

2.4 不同温度下白刺夜蛾成虫寿命和单雌产卵量

如表 3 所示, 在 24 °C 条件下成虫寿命最长, 在 30 °C 条件下成虫寿命最短; 从产卵量来看, 30 条件下白刺夜蛾的蛹虽然能够正常羽化, 但成虫不产卵; 在 27 °C 条件下白刺夜蛾单雌产卵量最高。在 18、21 和 33 °C, 无羽化的白刺夜蛾成虫。

2.5 白刺夜蛾的发育起点温度和有效积温

白刺夜蛾各虫期的发育起点温度和有效积温如表 4 所示, 白刺夜蛾卵期、幼虫期 (1-5 龄)、

蛹期和整个世代的发育起点温度分别为 13.01、10.71、13.45 和 14.60 °C, 有效积温分别为 112.36、272.15、167.28 和 475.96 日·度。

2.6 刺夜蛾各虫期发育速率与温度的拟合

利用线性模型和 Logistic 模型拟合白刺夜蛾各虫期发育速率与温度的关系, 各模型如表 5 所示, 通过比较决定系数 R^2 发现, 在各个虫期, Logistic 模型相较于线性模型能够更好地拟合发育速率与温度之间的关系, 同时除蛹期外, 各个虫期的发育速率与温度均能较好拟合。

表 3 不同温度下白刺夜蛾成虫寿命和产卵量
Table 3 Adult longevity and fecundity of *Leiometopon simyrides* under different temperatures

温度 (°C) Temperature (°C)	雌虫寿命 (d) Female longevity (d)	雄虫寿命 (d) Male longevity (d)	单雌产卵量 (粒) Number of eggs laid per female
18	—	—	—
21	—	—	—
24	8.13±3.88a	8.09±2.41a	86.33±25.05b
27	6.01±0.53ab	5.76±0.29ab	235.23±44.96a
30	3.00±0.41b	4.48±0.38b	—
33	—	—	—

表 4 白刺夜蛾各虫期的发育起点温度和有效积温
Table 4 Developmental threshold temperature and effective accumulated temperature of *Leiometopon simyrides*

发育阶段 Developmental stages	发育起点温度 (°C) Developmental threshold temperature (°C)	有效积温 (日·度) Effective accumulated temperature (degree-days)	发育历期预测式 Prediction formula of developmental duration
卵 Egg	13.01±0.14	112.36±1.16	$N=(112.36\pm1.16)/(T-13.01)$
1 龄幼虫 1st instar	7.46±0.18	81.83±0.80	$N=(81.83\pm0.80)/(T-7.46)$
2 龄幼虫 2nd instar	15.55±0.11	26.90±0.27	$N=(26.90\pm0.27)/(T-15.55)$
3 龄幼虫 3rd instar	17.79±0.10	19.74±0.23	$N=(19.74\pm0.23)/(T-17.79)$
4 龄幼虫 4th instar	14.12±0.13	40.74±0.43	$N=(40.74\pm0.43)/(T-14.12)$
5 龄幼虫 5th instar	8.15±0.20	80.42±0.88	$N=(80.42\pm0.88)/(T-8.15)$
幼虫期 Larval stage	10.71±0.13	272.15±2.67	$N=(272.15\pm2.67)/(T-10.71)$
蛹 Pupae	13.45±0.56	167.28±6.84	$N=(167.28\pm6.84)/(T-13.45)$
产卵前期 Oviposition prophase	15.11±0.85	28.89±2.35	$N=(28.89\pm2.35)/(T-15.11)$
世代 Total generation	14.60±0.90	475.96±38.86	$N=(475.96\pm38.86)/(T-14.60)$

表 5 白刺夜蛾各虫期发育
Table 5 Forecast models of developmental rate of *Leiometopon simyrides* under different temperatures

发育阶段 Developmental stages	线性模型 Linear model		Logistic 模型 Logistic model	
	方程 Equation	决定系数 (R ²) Determination coefficient (R ²)	方程 Equation	决定系数 (R ²) Determination coefficient (R ²)
卵 Egg	$V = 0.008T - 0.103$	0.885	$V = 0.162 / (1 + e^{7.256 - 0.337T})$	0.964
幼虫期 Larva stage	$V = 0.004T - 0.037$	0.981	$V = 0.097 / (1 + e^{3.903 - 0.164T})$	0.983
蛹 Pupae	$V = 0.006T - 0.083$	0.839	$V = 0.413 / (1 + e^{3.906 - 0.092T})$	0.856
世代 Total generation	$V = 0.002T - 0.030$	0.983	$V = 0.076 / (1 + e^{4.129 - 0.129T})$	0.986

3 结论与讨论

温度是影响昆虫生长发育的重要环境因素。在适宜温度区间内,随着温度的升高,昆虫的发

育速率加快,温度过高或过低均能限制昆虫的生长发育(潘飞等,2014)。尚小丽等(2013)对紫斑谷螟 *Pyralis farinalis* 研究发现,在 19-31 °C 范围内,随温度的上升,其各虫期发育历期逐渐

缩短,在低温条件下存活率较低。在本研究 18-30 °C 范围,随着温度的上升,白刺夜蛾各虫期的发育历期缩短;在 33 °C,卵、3 龄和 5 龄幼虫的发育历期有所延长;低温对白刺夜蛾卵和 1 龄幼虫的存活率影响较大,18 °C 下卵和 1 龄幼虫的存活率最低。罗妹等(2018)的研究表明,在 16 °C 低温条件下,亚洲玉米螟 *Ostrinia furnacalis* 幼虫的存活率较低且出现滞育现象;孟佳等(2021)发现,在 11-21 °C 范围内,小黑瓢虫 *Delphastus catalinae* 滞育率随温度的降低而上升。本研究中,较低温度条件下(18 °C 和 21 °C),除死蛹外,白刺夜蛾的蛹全部滞育,而高温条件下(33 °C)蛹全部死亡。陈福寿等(2014)的研究表明,在 15-22 °C 范围内,半闭弯尾姬蜂 *Diadegma semiclausum* 羽化率随温度上升而增加,超过最适温度 22 °C 后,其羽化率逐渐下降。本研究中,在 24-30 °C 温度范围,38% 以上的蛹羽化,27 °C 条件下羽化率最高(88.33%),雌成虫的占比也最高。同时,在 30 °C 下,羽化的雌成虫不能产卵,这与景军等(2014)的研究结果一致,在高温条件下雌成虫均不产卵。本研究中,白刺夜蛾生长发育和繁殖的最适温区为 24-27 °C。

应用发育起点温度和有效积温来预测害虫在某地区的发生期和发生代数,可有效且经济地防治害虫(张国安,2012)。秦厚国等(2006)通过有效积温预测法对斜纹夜蛾 *Spodoptera litura* 的发生期进行预测预报,发现预测结果与田间情况基本相符;黄芊等(2020)利用有效积温法则预测草地贪夜蛾 *Spodoptera frugiperda* 在广西的发生代数,为科学经济防治草地贪夜蛾提供了可参考数据。本研究中,利用有效积温法则得出白刺夜蛾的卵期、幼虫期、蛹期和全世代的发育起点温度分别为 13.01、10.71、13.45 和 14.60 °C,有效积温分别为 112.36、272.15、167.28 和 475.96 日·度。根据民勤县 2020 和 2021 年气象数据,适于白刺夜蛾整个世代有效积温为 1 450.56 日·度和 1 575.37 日·度,由此推测白刺夜蛾在甘肃民勤一年发生的理论代数为 3 代,这与吴栋国等(2002)的调查相符合。而王珏等

(1999)在自然变温条件下的白刺夜蛾卵期、幼虫期和蛹期发育起点温度分别为 13.2、17.5 和 17.5 °C,有效积温分别为 115.4、161.1 和 111.7 日·度,这可能是恒温与自然变温条件存在温度变化的差异(张孝羲,2002)。吴栋国等(2002)在金昌市和民勤县的北部荒漠草原上调查发现,白刺夜蛾越冬蛹在 4 月中旬开始羽化,根据历年气象数据,4 月上、中、下旬民勤的平均温度分别约为 11.63、12.52 和 16.03 °C,上中旬与下旬之间温度变化幅度较大。本研究中,蛹期的发育起点温度为(13.45±0.56)°C,与民勤县 4 月中旬的平均温度基本一致,而王珏等(1999)在自然变温条件下观察计算的蛹的发育起点温度较高(17.5 °C),与当地越冬代蛹的羽化时间不符。说明在自然条件下的温度变化幅度太窄,使计算结果与实际温度变化存在差距。

本研究通过 Logistic 模型和线性模型对白刺夜蛾不同发育阶段发育速率与温度之间的关系进行拟合,发现 Logistic 模型能够更好地拟合发育速率与温度之间的关系。根据白刺夜蛾的发育起点温度和有效积温,结合当地气象数据预测第一代白刺夜蛾的发生时间,及时防治和控制第 1 代的种群数量,从而减少第 2 代和第 3 代的虫口基数,减轻白刺夜蛾幼虫对白刺的危害。

高温和低温胁迫不利于昆虫的存活,同时也抑制昆虫寄主植物的生长发育,昆虫通过滞育等方式应对这些不利因素,实现种群延续(徐卫华,1999;郭建青等,2013;张晓燕等,2015)。荒漠气候极其不稳定,生物因此进化出相适应的生存对策(陈新燕等,2015;杨旭,2018),本研究中白刺夜蛾是荒漠草原的典型昆虫,以滞育的方式应对不良环境,这也与吴栋国等(2002)的研究结果一致。在本试验中,即使在适温条件下,白刺夜蛾的蛹也只有部分正常羽化,进一步证明了荒漠气候条件下昆虫为了延续其种群的应对策略。在本研究试验结束后,持续观察各温度下滞育蛹的变化,并剥茧统计蛹的存活率,后发现 21 °C 和 24 °C 下的蛹滞育 120 d 后,有极少数的蛹羽化,可能是剥茧扰动所致。另外,试验中 16、18 和 24 °C 下白刺夜蛾卵的存活率低,而 27 °C 下最高,可能是所用白刺夜蛾虫的卵是在

27℃下饲养获得的原因。本研究中的白刺夜蛾为第2代,第1代白刺夜蛾蛹的滞育情况以及引起白刺夜蛾蛹滞育的主要因子需要研究,以进一步揭示这种昆虫的适应荒漠恶劣环境的特性。

本研究的室内恒温培养与自然环境下白刺夜蛾的发育结果有一定差异。由于自然环境条件下的温度是时刻变化的,因此,还需要结合调查自然条件下白刺夜蛾的发生动态,更准确地对白刺夜蛾发生期进行预测预报。白刺夜蛾幼虫的发生量取决于成虫的发生量和产卵量,而对于成虫发生量的测报需要根据降雨量,尤其是关键月份的降雨量。这不仅需要逐年的气象数据,也需要进一步研究湿度对白刺夜蛾成虫繁殖力的影响。

参考文献 (References)

- Chen FS, Wang Y, Zhang HM, Yang YX, Chen ZL, 2014. Effect of host and temperature on reproducing of *Diadegma semiclausum* Hellen. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 51(1): 53–59. [陈福寿, 王燕, 张红梅, 杨艳鲜, 陈宗麒, 2014. 寄主和温度对半闭弯尾姬蜂饲养的影响. *应用昆虫学报*, 51(1): 53–59.]
- Chen SK, Bao P, Yang HM, 2000. Damage of certain prominent insect pests on deserted grassland in Alshan and their control. *Pratacultural Science*, 17(3): 44–46, 50. [陈善科, 保平, 杨惠民, 2000. 阿拉善荒漠几种主要害虫对草地的危害及其防治. *草业科学*, 17(3): 44–46, 50.]
- Chen XY, Shi W, Ma DJ, Fan ZT, Wu W, 2015. Morphological and biological adaption of a desert walking stick-*Sceptrorhina bituberculatum*. *Journal of Environmental Entomology*, 37(2): 393–400. [陈新燕, 史雯, 马东建, 范兆田, 吴卫, 2015. 荒漠竹节虫的形态及生物学特性研究. *环境昆虫学报*, 37(2): 393–400.]
- 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.]
- He JL, Ji YH, Liu JP, 2008. Study on innovative mechanism of desertification control in Minqin, Gansu province. *Research on Development*, 2008(2): 39–42. [何俊林, 吉亚辉, 柳建平, 2008. 甘肃民勤沙漠化防治创新机制研究. *开发研究*, 2008(2): 39–42.]
- He LM, Ge SS, Chen YC, Wu QL, Jiang YY, Wu KM, 2019. The developmental threshold temperature, effective accumulated temperature and prediction model of fall armyworm, *Spodoptera frugiperda*. *Plant Protection*, 45(5): 18–26. [何莉梅, 葛世帅, 陈玉超, 吴秋琳, 姜玉英, 吴孔明, 2019. 草地贪夜蛾的发育起点温度、有效积温和发育历期预测模型. *植物保护*, 45(5): 18–26.]
- Huang Q, Jiang XB, Ling Y, Jiang T, Long D, Chen YC, Fu CQ, Wu BQ, Huang SS, Li C, Huang FK, Long LP, 2018. Developmental threshold temperature and effective accumulated temperature of *Leucania loreyi* (Duponchel) (Lepidoptera: Noctuidae). *Chinese Journal of Applied Entomology*, 55(5): 865–869. [黄芊, 蒋显斌, 凌炎, 蒋婷, 龙迪, 陈玉冲, 符诚强, 吴碧球, 黄所生, 李成, 黄凤宽, 龙丽萍, 2018. 劳氏粘虫发育起点温度和有效积温研究. *应用昆虫学报*, 55(5): 865–869.]
- Huang Q, Ling Y, Jiang T, Fu CQ, Zhong Y, Wu BQ, Huang SS, Li C, Huang FK, Long LP, 2020. Prediction of the generations of *Spodoptera frugiperda* in Guangxi by using the law of effective temperature. *Journal of Southern Agriculture*, 51(6): 1282–1286. [黄芊, 凌炎, 蒋婷, 符诚强, 钟勇, 吴碧球, 黄所生, 李成, 黄凤宽, 龙丽萍, 2020. 运用有效积温法则预测草地贪夜蛾在广西的发生世代数. *南方农业学报*, 51(6): 1282–1286.]
- Jing J, Su C, Fang Y, Li K, 2014. Effects of temperature on fecundity of nine lepidopteran species in Tiantong national forest park, Zhejiang province, China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 25(3): 819–824. [景军, 苏超, 方燕, 李恺, 2014. 温度对浙江天童国家森林公园 9 种鳞翅目昆虫繁殖力的影响. *应用生态学报*, 25(3): 819–824.]
- Luo LZ, LI GB, 1993. The threshold temperature, thermal constant and division of generation regions of beet webworm (*Loxostege sticticalis* L.) in China. *Acta Entomologica Sinica*, 36(3): 332–339. [罗礼智, 李光博, 1993. 草地螟的有效积温及其世代区的划分. *昆虫学报*, 36(3): 332–339.]
- Luo M, Chen JX, Zheng LX, Zhou XC, Wei HY, 2018. Effects of temperatures on the development, reproduction and calling behavior of *Ostrinia furnacalis* (Guenée). *Journal of Environmental Entomology*, 40(3): 579–586. [罗妹, 陈俊贤, 郑丽霞, 周小草, 魏洪义, 2018. 温度对亚洲玉米螟生长发育、繁殖和求偶行为的影响. *环境昆虫学报*, 40(3): 579–586.]
- Meng J, Huang J, 2021. Effect of temperature and photoperiod on diapause regulation of *Delphastus catalinae* (Horn). *Chinese Journal of Biological Control*, 37(5): 927–935. [孟佳, 黄建, 2021. 温度和光周期对小黑瓢虫滞育的调节作用. *中国生物防治学报*, 37(5): 927–935.]
- Meng M, 2011. Ecological vulnerability assessment and public understanding study on environmental change in Minqin oasis. Master dissertation. Lanzhou: Lanzhou University. [孟敏, 2011. 民勤绿洲生态脆弱性评价与环境变化公众理解研究. 硕士学位论文. 兰州: 兰州大学.]

- Pan F, Chen JC, Xiao TB, Ji XC, Xie SH, 2014. Research advances on effect of variable temperature on growth, development and reproduction of insect. *Journal of Environmental Entomology*, 36(2): 240–246. [潘飞, 陈绵才, 肖彤斌, 吉训聪, 谢圣华, 2014. 变温对昆虫生长发育和繁殖影响的研究进展. 环境昆虫学报, 36(2): 240–246.]
- Plessis HD, Schlemmer ML, Vandenberg J, 2020. The effect of temperature on the development of *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae). *Insects*, 11(4): 228.
- Qin HG, Luo RH, Huang SJ, Ding J, Ye ZX, 2006. Study on the prediction of occurrence period of *Spodoptera litura*. *Entomological Journal of East China*, 15(1): 34–36. [秦厚国, 罗任华, 黄水金, 丁建, 叶正襄, 2006. 斜纹夜蛾发生期预测预报的探讨——有效积温预测法. 华东昆虫学报, 15(1): 34–36.]
- Shang XL, Yang MF, Zhang CR, Cai L, Feng YL, Qiu T, 2013. Effects of temperature on the growth and development of *Pyralis farinalis* (Lepidoptera: Pyralidae), one insect used for producing insect tea in China. *Acta Entomologica Sinica*, 56(6): 671–679. [尚小丽, 杨茂发, 张昌容, 蔡兰, 冯友丽, 邱婷, 2013. 温度对产虫茶昆虫紫斑谷螟生长发育的影响. 昆虫学报, 56(6): 671–679.]
- Wang J, Wang JM, Liang TJ, Zou JF, Chang M, Shi QM, Fang YC, 1999. A study on developmental threshold temperature and thermal constant of *Leiomotopon simyrides*. *Pratacultural Science*, 16(4): 62–65. [王珏, 王俊梅, 梁廷久, 邹继范, 常明, 史青茂, 方毅才, 1999. 白刺夜蛾发育起点温度与有效积温的研究. 草业科学, 16(4): 62–65.]
- Wang RS, Lan ZX, Ding YQ, 1982. Studies on mathematical models of the relationship between insect development and temperature. *Acta Ecologica Sinica*, 2(1): 47–57. [王如松, 兰仲雄, 丁岩钦, 1982. 昆虫发育速率与温度关系的数学模型研究. 生态学报, 2(1): 47–57.]
- Wang YC, Yang XH, Yu CT, Hu ZS, 2007. The actuality, ecological function and protective measures of genus *Nitraria*. *Research of Soil and Water Conservation*, 14(3): 74–79. [王彦阁, 杨晓晖, 于春堂, 胡哲森, 2007. 白刺属植物现状、生态功能及保护策略. 水土保持研究, 14(3): 74–79.]
- Wu DG, Wang JM, Li W, 2002. Study on biology and occurrence of *Leiomotopon simyrides*. *Pratacultural Science*, 19(6): 39–42. [吴栋国, 王俊梅, 李温, 2002. 草地白刺夜蛾生物学及发生规律的研究. 草业科学, 19(6): 39–42.]
- Xu WH, 1999. Research advance of insect diapause. *Acta Entomologica Sinica*, 42(1): 102–109. [徐卫华, 1999. 昆虫滞育的研究进展. 昆虫学报, 42(1): 102–109.]
- Yang X, 2018. Study on the reproductive biology of the desert plant *Peganum harmala*. Master dissertation. Xinjiang: Shihezi University. [杨旭, 2018. 荒漠植物骆驼蓬繁殖生物学的研究. 硕士学位论文. 新疆: 石河子大学.]
- Yuan SY, Kong Q, Shen DR, Zhang HR, Xue CL, He C, 2015. Threshold temperature and effective accumulated temperature for *Bactrocera tau* (Walker). *Plant Protection*, 41(5): 148–150. [袁盛勇, 孔琼, 沈登荣, 张宏瑞, 薛春丽, 何超, 2015. 南瓜实蝇的发育起点温度和有效积温. 植物保护, 41(5): 148–150.]
- Zhang GA, 2012. Insect Ecology and Pest Prediction. Beijing: Science Press. 202–203. [张国安, 2012. 昆虫生态学与害虫预测预报. 北京: 科学出版社. 202–203.]
- Zhang JX, Wu B, Zhu YJ, Lu Q, Li YH, 2012. Responses of *Nitraria tangutorum* branch morphology to increased rainfall in Minqin, Gansu province. *Journal of Desert Research*, 32(3): 709–716. [张金鑫, 吴波, 朱雅娟, 卢琦, 李永华, 2012. 民勤白刺枝条形态对人工增雨的响应. 中国沙漠, 32(3): 709–716.]
- Zhang XX, 2002. Insect Ecology and Forecast. Beijing: China Agriculture Press. 218–219. [张孝羲, 2002. 昆虫生态及预测预报. 北京: 中国农业出版社. 218–219.]
- Zhang XY, Zhai YF, Zhuang QY, Lin QC, Wu WH, Tao M, Yu Y, 2015. Research advance of insect diapause. *Shandong Agricultural Sciences*, 47(2): 143–148, 156. [张晓燕, 翟一凡, 庄乾营, 林清彩, 吴文虎, 陶玫, 于毅, 2015. 昆虫滞育研究进展. 山东农业科学, 47(2): 143–148, 156.]
- Zhao CY, Li XC, Cui J, Gao Y, Shi SS, 2020. Effects of fluctuating temperature on the growth, development and reproduction of *Mamestra brassicae* (Lepidoptera: Noctuidae). *Acta Entomologica Sinica*, 63(9): 1108–1116. [赵晨宇, 李新畅, 崔娟, 高宇, 史树森, 2020. 变温对甘蓝夜蛾生长发育和繁殖的影响. 昆虫学报, 63(9): 1108–1116.]
- Zhao DM, Li JJ, Ma CS, Zhang YJ, Zeng XD, 2010. Species and cultivation technique of *Nitraria tangutorum* seedling in Minqin Liangucheng national nature reserve. *Journal of Gansu Forestry Science and Technology*, 35(1): 80–82. [赵多明, 李进军, 马存世, 张有佳, 曾新德, 2010. 民勤连古城国家级自然保护区白刺种类及实生苗培育技术. 甘肃林业科技, 35(1): 80–82.]
- Zhao SR, Gao ZH, Bu SH, Liu MT, Lu XL, 2008. Determination of developmental threshold temperature of *Trogoder mavariabile*. *Journal of Northwest Forestry University*, 23(5): 130–132. [赵姝荣, 高智辉, 卜书海, 刘满堂, 鲁晓琳, 2008. 花斑皮蠹在自然变温下的发育起点温度和有效积温测定. 西北林学院学报, 23(5): 130–132.]