

温度对栎黄枯叶蛾生长发育及繁殖的影响

刘永华^{1,2}, 阎雄飞², 温冬梅¹, 陆鹏飞¹, 宗世祥¹, 骆有庆^{1,*}

(1. 北京林业大学省部共建森林培育与森林保护教育部重点实验室, 北京 100083;

2. 榆林学院生命科学院, 陕西榆林 719000)

摘要:【目的】栎黄枯叶蛾 *Trabala vishnou gigantina* 是近年在沙棘 *Hippophae rhamnoides* 林中大面积暴发的一种食叶害虫, 以幼虫取食叶片, 导致沙棘长势衰弱甚至死亡。本研究旨在明确温度对栎黄枯叶蛾生长发育及繁殖的影响, 以便对其进行预测预报及采取防治措施。【方法】分别在 5 个恒温 (19, 22, 25, 28 和 31℃) 条件下研究了温度对栎黄枯叶蛾各虫态发育历期、取食量、交配率、产卵、寿命等的影响。【结果】在 19~31℃ 温度范围内, 随着温度升高, 各虫态发育历期逐渐缩短。卵、幼虫、蛹、产卵前期和全世代的发育起点温度分别为 9.24 ± 0.45 , 10.85 ± 0.87 , 14.56 ± 0.85 , 9.65 ± 0.54 和 10.48 ± 0.52 ℃, 有效积温分别为 341.22 ± 9.54 , $1\,285.64 \pm 17.65$, 445.35 ± 8.65 , 13.34 ± 1.25 和 $2\,085.35 \pm 25.84$ 日·度。幼虫总取食量和交配率与温度变化关系不大, 而成虫的产卵量在 22, 25 和 28℃ 下明显高于其他温度, 成虫寿命与温度呈负相关。【结论】22~28℃ 之间是栎黄枯叶蛾较为理想的生长发育和繁殖温度。研究结果为生产上合理防治该害虫提供了参考依据。

关键词: 栎黄枯叶蛾; 温度; 生长发育; 繁殖; 发育起点温度; 有效积温

中图分类号: Q968 文献标识码: A 文章编号: 0454-6296(2016)03-0309-07

Effects of temperature on the growth, development and reproduction of *Trabala vishnou gigantina* (Lepidoptera: Lasiocampidae)

LIU Yong-Hua^{1,2}, YAN Xiong-Fei², WEN Dong-Mei¹, LU Peng-Fei¹, ZONG Shi-Xiang¹, LUO You-Qing^{1,*} (1. Key Laboratory for Silviculture and Conservation of Ministry of Education, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2. College of Life Sciences, College of Yulin, Yulin, Shaanxi 719000, China)

Abstract: 【Aim】 *Trabala vishnou gigantina* has become a serious leaf-eating pest of *Hippophae rhamnoides* in recent years, which feeds leaves of host plants at the larval stage, causing poor growth or even death of host plants. This study aims to determine the effects of temperature on the growth, development and reproduction of *T. v. gigantina*, and thereby to provide a foundation for the forecasting and scientific management of this pest. 【Methods】 Under a series of temperature gradients (19, 22, 25, 28 and 31℃), the developmental duration, food consumption, mating rate, oviposition, longevity of *T. v. gigantina* was investigated. 【Results】 Within the constant temperature ranging from 19 to 31℃, the duration of various developmental stages of *T. v. gigantina* shortened as temperature rose gradually. The development threshold temperatures of egg, larva, pupa, pre-oviposition and one complete generation were 9.24 ± 0.45 , 10.85 ± 0.87 , 14.56 ± 0.85 , 9.65 ± 0.54 , 10.48 ± 0.52 ℃ and 341.22 ± 9.54 ℃, respectively, and their effective accumulated temperatures were $1\,285.64 \pm 17.65$, 445.35 ± 8.65 , 13.34 ± 1.25 , $2\,085.35 \pm 25.84$ degree·days, respectively. The food consumption and mating rate

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划项目(2012BAD19B07); 国家自然科学基金项目(31570643); 榆林市产学研项目(2014CXY-11-11)

作者简介: 刘永华, 男, 1978 年 4 月生, 山西阳泉人, 博士, 副教授, 研究方向为有害生物生态控制, E-mail: liuyonghua@126.com

* 通讯作者 Corresponding author, E-mail: youqingluo@126.com

收稿日期 Received: 2015-11-26; 接受日期 Accepted: 2016-02-04

were not affected significantly by temperature, and the number of eggs laid under temperatures of 22, 25 and 28°C was higher than that under the other temperatures. The adult longevity was negatively correlated with temperature. 【Conclusion】 The temperature range of 22–28°C is the most suitable for the growth, development and reproduction of *T. v. gigantea*. These findings provide valuable information for rational control of *T. v. gigantea*.

Key words: *Trabala vishnou gigantea*; temperature; growth and development; reproduction; developmental threshold temperature; effective accumulated temperature

沙棘 *Hippophae rhamnoides* 是我国三北地区绿化荒山荒坡、营造水土保持林最有潜力和前途的树种。近 20 年来,我国平均每年营造沙棘人工林 8 万 hm^2 , 目前我国的沙棘林面积已达 220 万 hm^2 , 占全球的 93% (李根前等, 2004)。陕西吴起县为全国沙棘第一县, 沙棘种植面积已达 12.53 万 hm^2 。

栎黄枯叶蛾 *Trabala vishnou gigantea* Yang 属鳞翅目 (Lepidoptera) 枯叶蛾科 (Lasiolepididae), 又名大黄枯叶蛾、黄绿枯叶蛾, 为栗黄枯叶蛾 *Trabala vishnou* Lefebure 的亚种, 主要分布于我国陕西、宁夏、青海、内蒙、甘肃、河南、山西、河北等地, 危害栎类、板栗、核桃、苹果、海棠、沙棘等植物 (同长寿, 1966; 萧刚柔, 1992; 刘友樵和武春生, 2006)。2008 年以来, 栎黄枯叶蛾在陕西吴起沙棘人工林中大面积暴发, 此后为害面积和危害程度逐年加大, 目前受害面积已经超过 1.5 万 hm^2 , 幼虫取食叶片, 往往将受害区内的树叶全部吃光, 造成树势下降甚至死亡, 严重影响到了沙棘的生态价值和经济效益 (刘永华等, 2013b)。

在自然界各种环境因子中, 温度是影响昆虫发育、繁殖、存活和种群动态的最重要的气象因子 (石保坤等, 2014)。昆虫的生命活动只有在一定的温度范围内才能进行, 这个范围被称为昆虫的适宜温区或有效温区 (Campbell *et al.*, 1974)。在有效温区内, 发育起点温度和有效积温是昆虫个体及种群的基本生物学参数, 可以衡量昆虫对环境温度的适应性, 实践中可用来推测某种昆虫的地理分布界限、某地区某种昆虫的发生世代数, 另外在人工饲养或保存昆虫时, 可作为控制温度或发育历期的重要参考条件, 同时发育起点温度还是构建害虫种群系统模型的重要参数 (唐业忠等, 1993)。目前对该虫的危害特性和生活习性 (刘永华等, 2013b, 2014), 羽化及生殖行为 (刘永华等, 2013a), 以及卵和蛹的空间分布 (章一巧等, 2012, 2013) 等进行了报道, 而关于温度对其生长发育影响的研究尚未见报道。

本文通过研究不同恒温条件下栎黄枯叶蛾生长

发育状况, 得出了该虫的发育起点温度和有效积温, 明确了温度对栎黄枯叶蛾取食、交配、产卵和寿命的影响, 为了解栎黄枯叶蛾的发生发展规律, 开展有效治理和预测预报提供了科学依据。

1 材料和方法

1.1 供试昆虫

供试幼虫采自陕西吴起县人工沙棘林地, 带回实验室置于人工气候箱 (RXZ 智能型, 宁波江南仪器厂) 中饲养。人工气候箱条件设置为光照周期 14L: 10D、温度 $25 \pm 1^\circ\text{C}$ 、相对湿度 $80\% \pm 5\%$ 。将新鲜的沙棘叶片采回后, 放入塑料瓶 (高 20 cm, 直径 10 cm) 内饲养幼虫, 瓶口覆盖纱布, 每瓶放入 10 头幼虫, 共 10 瓶, 每天定时更换新鲜叶片。幼虫化蛹后, 每天定时观察, 记录羽化情况, 将同日羽化的成虫雌雄配对后置于养虫笼内, 任其自由交配产卵。

1.2 试虫处理

在不同的人工气候箱中分别设置 19, 22, 25, 28 和 31°C 共 5 个温度梯度 (温度波动范围 $\pm 1^\circ\text{C}$)。

1.3 卵发育历期观察

成虫产卵后, 将初产卵用 1% 次氯酸钠溶液浸泡 10 min, 再用蒸馏水进行漂洗, 晾干后置于湿纱布上, 放入塑料瓶内, 每处理 100 粒卵, 重复 3 次, 分别置于 5 个温度处理的人工气候箱中进行孵化。每日观察 3 次, 记录卵的孵化情况, 计算卵历期。

1.4 幼虫、蛹和成虫发育历期观察

待卵孵化后, 将初孵幼虫单头置于塑料瓶内, 每日定时更换新鲜叶片, 每处理 30 瓶, 设 3 个重复, 放入 5 个温度梯度下的人工气候箱中进行饲养。每天分 3 次定时观察幼虫蜕皮情况, 定时称量食物、粪便及虫体的重量, 直到幼虫老熟, 最后计算各龄幼虫的取食量。幼虫化蛹后, 记录蛹的历期。羽化后, 记录各温度下成虫的发育历期和寿命。

1.5 温度对交配、产卵的影响

将同日一经羽化的成虫, 1 雌 1 雄置于上端蒙

以纱布的透明塑料杯内,然后放入 5 个不同温度的人工气候箱中。每处理 10 瓶,重复 3 次,从暗期(18:00 – 次日 6:00)开始每隔 30 min 记录一次交配对数数和交配时间,连续观察 3 d。观察记录成虫的产卵量、产卵持续时间等,直至成虫死亡。

1.6 数据分析

通过 Microsoft Excel 2010 和 DPS 13.5 对实验数据进行分析。栎黄枯叶蛾在不同温度条件下的发育历期、取食量、产卵和寿命等数据进行方差分析(ANOVA),并利用 Duncan 氏新复极差法比较其差异显著性。

在进行幼虫的取食量试验时,设置空白对照,以确定沙棘叶片失水而产生的重量变化。假定叶片均匀失水,称量空白对照叶片试验开始重量和试验结束后的重量,将所得数据代入下面公式,校正试验中的取食量:

校正取食量 = $W - L + (aW + bL)/2$ 。

式中 L 为试验结束后的叶片重量, W 为试验开始时的叶片重量; a = (对照叶片最初重量 – 对照叶片最后重量) / 对照叶片最初重量; b = (对照叶片最初重量 – 对照叶片最后重量) / 对照叶片最后重量。日均取食量 = Σ 每头幼虫单日取食量 / 幼虫头数。

发育起点温度和有效积温计算公式(张孝羲, 2002)为:

$K = N(T - C)$, 令: $V = 1/N$, 则: $T = C + KV$ 。

根据下列公式,应用最小二乘法得出各虫态的发育起点温度(C)和有效积温(K):

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

其中, N 为发育历期, K 为有效积温, T 为处理温度, C 为发育起点温度, n 为试验温度组数。

2 结果

2.1 温度对栎黄枯叶蛾各虫态发育历期的影响

由表 1 可以看出,温度对栎黄枯叶蛾各虫态的发育历期有明显影响。在 19 ~ 31℃ 温度范围内,温度与各虫态的发育历期呈现负相关,即随着环境温度升高,发育历期缩短。在同一温度条件下,栎黄枯叶蛾各虫态的发育历期明显不同,幼虫期发育历期最长,蛹期和卵期次之,产卵前期最短。

表 1 不同温度下栎黄枯叶蛾的发育历期

Table 1 Developmental duration of *Trabala vishnou gigantina* at different temperatures

温度(℃) Temperature	卵期(d) Egg duration	幼虫期(d) Larval duration	蛹期(d) Pupal duration	产卵前期(d) Pre-oviposition duration	世代历期(d) Generation duration
19	24.56 ± 2.37 a	82.64 ± 6.36 a	30.65 ± 4.46 a	2.53 ± 0.67 a	138.65 ± 8.78 a
22	21.23 ± 0.93 b	76.34 ± 5.69 b	27.35 ± 3.45 b	1.45 ± 0.48 b	124.34 ± 6.73 b
25	18.36 ± 1.85 c	72.57 ± 5.45 c	24.54 ± 3.12 c	1.03 ± 0.23 c	115.86 ± 6.54 c
28	16.25 ± 1.46 d	67.48 ± 4.43 d	21.28 ± 2.69 d	0.98 ± 0.18 c	106.45 ± 7.24 d
31	13.58 ± 0.68 e	54.47 ± 4.14 e	18.63 ± 2.15 e	0.76 ± 0.25 d	86.47 ± 6.35 e

表中数字为平均值 ± 标准误,同一列数据后不同小写字母表示 Duncan 氏多重比较差异显著($P < 0.05$)。Data in the table are mean ± SE, and different letters following the data in the same column mean significant difference by Duncan's multiple range test ($P < 0.05$)。

根据发育历期的数据,计算出栎黄枯叶蛾各虫态在不同恒温条件下的发育速率,利用线性回归方程拟合温度与各虫态发育速率的关系(表 2)。结果表明,栎黄枯叶蛾各虫态和全世代发育温度与发育速率存在较显著的相关性,在 19 ~ 31℃ 的温度范围内,各虫态以及全世代的发育速率都是随着温度的升高而加快。

2.2 栎黄枯叶蛾各虫态的发育起点温度和有效积温

表 3 为栎黄枯叶蛾各虫态的发育起点温度和有效积温。蛹的发育起点温度为 14.56 ± 0.85℃,高于其他虫态;幼虫发育的有效积温最高(1 285.64 ± 17.65 日·度)。各虫态发育起点温度的大小依次为

表 2 栎黄枯叶蛾发育速率与温度的线性关系

Table 2 Linear model of developmental rate and the temperature for *Trabala vishnou gigantina*

虫态 Developmental stage	回归方程 Regression equation	r
卵 Egg	$Y = 0.008X + 0.031, P = 0.0002$	0.992
幼虫 Larva	$Y = 0.001X + 0.010, P = 0.0046$	0.933
蛹 Pupa	$Y = 0.005X + 0.026, P = 0.0002$	0.992
产卵前期 Pre-oviposition	$Y = 0.217X + 0.227, P = 0.0012$	0.982
全世代 Whole generation	$Y = 0.001X + 0.006, P = 0.0024$	0.959

蛹期 > 幼虫期 > 产卵前期 > 卵期;各虫态有效积温的大小依次为幼虫期 > 蛹期 > 卵期 > 产卵前期。栎黄枯叶蛾全世代的发育起点温度为 10.48 ± 0.52℃,

有效积温为 2 085.35 日·度。

经过回归计算,栎黄枯叶蛾各虫态的发育温度与其发育历期相关性较为显著。这说明在 19 ~ 31℃ 的范围内,本研 究所得有效积温模型能够较为准确地模拟该虫各虫态的发育历期、发育速率和温度的关系。根据陕西吴起的气象资料(全年平均气温 7.8℃,≥10℃ 积温 2 883 日·度),可以推测栎黄枯叶蛾在陕西吴起的理论发生代数 为 1.38 代。

表 3 栎黄枯叶蛾各虫态的发育起点温度和有效积温

Table 3 Developmental threshold temperature and effective accumulative temperature of <i>Trabala vishnou gigantina</i>				
虫态 Developmental stage	发育起点温度(℃) Developmental threshold temperature	有效积温(日·度) Effective accumulative temperature (degree·day)	回归方程 Regression equation	<i>r</i>
卵 Egg	9.24 ±0.45	341.22	$T=9.24+341.22V, P=0.0051$	0.929
幼虫 Larva	10.85 ±0.87	1 285.64	$T=10.85+1\,285.64V, P=0.0085$	0.911
蛹 Pupa	14.56 ±0.85	445.35	$T=14.56+445.35V, P=0.0062$	0.923
产卵前期 Pre-oviposition	9.65 ±0.54	13.34	$T=9.65+13.34V, P=0.0042$	0.935
全世代 Whole generation	10.48 ±0.52	2 085.35	$T=10.48+2\,085.68V, P=0.0066$	0.922

2.3 温度对栎黄枯叶蛾幼虫取食量的影响

栎黄枯叶蛾幼虫不同龄期的总取食量变化规律见表 4。1 龄幼虫以卵壳为食,没有取食叶片,2 龄幼虫的取食量相对较小,3 龄幼虫取食量明显增加,4 龄幼虫开始大量取食。在 25℃ 下,3, 4, 5, 6 和 7 龄幼虫的取食总量分别是 2 龄幼虫取食总量的 2.86, 9.90, 30.08, 46.83 和 69.51 倍,3-7 龄幼

虫取食量占整个幼虫期取食量的 98.12%,其中 7 龄幼虫取食量占幼虫期取食总量的 40.89%,因此幼虫 3 龄之前是防治栎黄枯叶蛾的最佳时间。在 5 个温度梯度下,幼虫的取食总量分别为 22.77, 22.24, 21.16, 22.07 和 21.71 g,差异不显著($P>0.05$),可见随温度升高,幼虫总取食量变化不大。

表 4 不同温度下栎黄枯叶蛾不同龄期的总取食量

Table 4 Food consumption of <i>Trabala vishnou gigantina</i> larvae at different temperatures						
温度(℃) Temperature	取食量 Food consumption (g)					
	2 龄幼虫 2nd instar larva	3 龄幼虫 3rd instar larva	4 龄幼虫 4th instar larva	5 龄幼虫 5th instar larva	6 龄幼虫 6th instar larva	7 龄幼虫 7th instar larva
19	0.2238 ±0.38 a	0.4551 ±0.16 a	2.678 ±0.34 a	4.238 ±1.12 a	5.452 ±0.78 d	9.723 ±2.68 a
22	0.1540 ±0.36 b	0.3264 ±0.05 bc	2.643 ±0.57 a	3.965 ±1.35 b	5.915 ±1.02 b	9.234 ±1.54 b
25	0.1245 ±0.08 bc	0.3562 ±0.12 b	2.426 ±0.82 abc	3.762 ±1.05 bc	5.837 ±1.64 bc	8.654 ±2.57 d
28	0.1136 ±0.09 c	0.3336 ±0.04 b	2.451 ±0.56 ab	3.831 ±1.33 bc	6.563 ±1.23 a	8.782 ±1.54 c
31	0.1958 ±0.28 ab	0.4138 ±0.11 ab	2.512 ±0.71 ab	3.679 ±1.45 c	5.783 ±0.85 c	9.123 ±2.13 bc

2.4 不同温度下栎黄枯叶蛾成虫的交配率

不同温度下栎黄枯叶蛾成虫的交配率和交配高峰期见图 1。结果表明,温度变化对栎黄枯叶蛾成虫的交配活动有着明显的影响。交配最早出现于黑暗后 6 h,黑暗后 8-9 h 交配率最高。随温度的下降,交配高峰期显著提前($P<0.05$),交配率则无显著变化($P>0.05$)。在 25, 28 和 31℃ 下,成虫交配高峰期都出现在 3:00-4:00,交配率分别为 45.52%, 48.34% 和 60.67%。在 19 和 22℃ 下,交尾高峰期提前到 2:00-3:00,交配率分别为 56.58% 和 45.41%。

2.5 温度对栎黄枯叶蛾产卵和寿命的影响

表 5 为温度对栎黄枯叶蛾产卵和寿命的影响。

在本试验所设置的温度范围内,31℃ 下成虫产卵期最短,19℃ 下产卵期最长。22, 25 和 28℃ 下成虫的产卵量分别为 282.53 ±50.45, 297.38 ±45.54 和 289.41 ±50.52 粒,明显高于其他温度($P<0.05$)。22~31℃ 范围内,成虫均能全部产卵,而在 19℃ 下,成虫活动性差,产卵率最低,仅有 85% 成虫可以产卵。

栎黄枯叶蛾雌雄成虫的寿命随着温度的升高而逐渐缩短,19℃ 下成虫平均寿命最长,达到 11.89 d。而 31℃ 下成虫平均寿命最短,仅为 5.89 d。雌成虫平均寿命在 19℃ 下最长,达到 13.23 d;雄成虫平均寿命在 22℃ 下最长,达到 11.12 d。在同一温度下,雌虫寿命略长于雄虫。

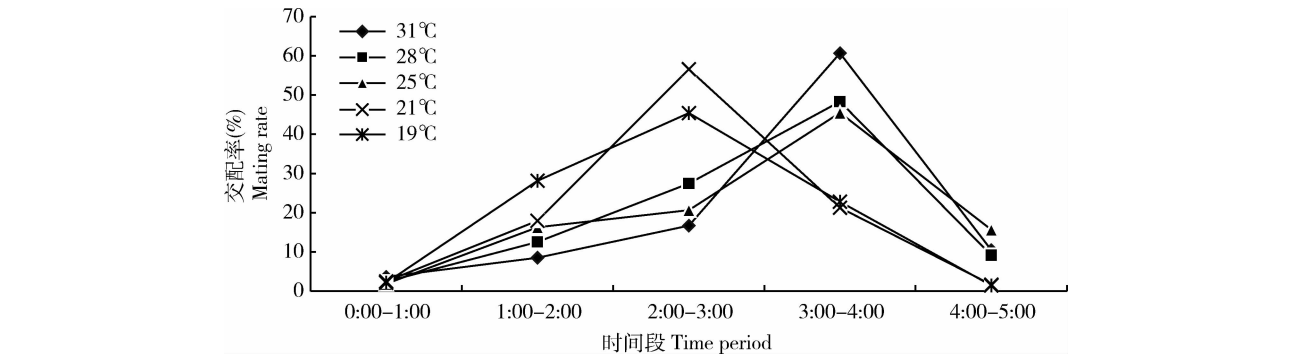


图 1 不同温度下栎黄枯叶蛾成虫交配率和交配高峰期

Fig. 1 Mating rate and the peak period of mating of adult *Trabala vishnou gigantina* at different temperatures

表 5 温度对栎黄枯叶蛾成虫产卵和寿命的影响

Table 5 Effect of temperature on oviposition and longevity of *Trabala vishnou gigantina* adults

温度(℃) Temperature	产卵期(d) Oviposition period	平均产卵量(粒) Number of eggs laid	产卵率(%) Oviposition rate	平均寿命 Average longevity (d)		
				♂	♀	全部 Total
19	7.25 ± 2.25 a	48.45 ± 15.34 c	85	10.56 ± 2.45 ab	13.23 ± 3.04 a	11.89 ± 2.85 a
22	6.89 ± 1.57 a	282.53 ± 50.45 a	100	11.12 ± 2.35 a	12.25 ± 2.47 ab	11.69 ± 2.42 a
25	4.56 ± 1.24 ab	297.38 ± 45.54 a	100	9.85 ± 2.16 b	11.05 ± 1.05 b	10.45 ± 1.96 ab
28	3.15 ± 0.76 b	289.41 ± 50.52 a	100	6.16 ± 1.58 c	6.58 ± 2.12 c	6.33 ± 1.86 b
31	2.25 ± 0.35 bc	150.46 ± 56.43 b	100	5.35 ± 1.24 cd	6.42 ± 1.84 c	5.89 ± 1.58 c

3 讨论

温度对昆虫生长发育和繁殖具有重要的影响,在适宜的温度范围内,随着温度的升高昆虫的发育速率也逐渐加快(李建荣等,1994)。本研究结果表明,栎黄枯叶蛾的生长发育受温度影响极大,在19~31℃范围内,各虫态的发育历期与温度呈现负相关,即随着环境温度升高,发育历期缩短,发育速率加快。这与许多鳞翅目昆虫的研究是一致的,如金银花尺蠖 *Heterolocha jinyinhuaephaga* (向玉勇等,2011)、豆天蛾 *Clanis bilineata tsingtauca*(冯雨艳等,2014)、马尾松毛虫 *Dendrolimus punctata*(黄小娟等,2014)、大造桥虫 *Ascotis selenaria* (史树森等,2015)、白眉野草螟 *Agriphila aeneociliella* (张云慧等,2015)等。实验中我们也注意到,在31℃恒温下有部分幼虫死亡,说明高温不利于幼虫的存活。

本研究采用直线回归法对栎黄枯叶蛾的发育起点温度和有效积温进行了研究,根据有效积温法则(年发生世代数=某地一年的有效积温总和/某虫完成一代所需有效积温),结合陕西吴起的气象资料预测该虫在当地一年的理论代数为1.38代,而据2011-2014年的实际调查,该虫一年发生1代,二者基本吻合。

此外,温度虽然对栎黄枯叶蛾交配率影响不大,但温度降低使交配高峰期提前,这与枣粘虫 *Ancylics sativa* (韩桂彪等,2000)、甜菜夜蛾 *Spodoptera exigua* (王玄晟等,2004)、大猿叶虫 *Colaphellus bowringi* (匡先钜等,2010)等鳞翅目昆虫研究结果类似,在研究利用信息素进行田间诱蛾时应加以考虑。温度对栎黄枯叶蛾成虫寿命和繁殖也有很大影响,在19℃下,雌成虫的产卵量显著减少,活动性减弱,对于繁殖后代不利,但平均寿命明显延长;在31℃下,雌成虫的产卵量较低,成虫寿命也显著缩短,表明该温度不适合成虫生存;而22~28℃范围是成虫较为理想的生长和繁殖温度。

本研究结果对栎黄枯叶蛾的预测预报具有重要的指导意义。在实际工作中,可根据本文所得发育起点温度和有效积温对各虫态的发育历期进行预测,进而预报发生期,以便适时采取防治措施。本研究中栎黄枯叶蛾发育起点温度和有效积温是通过室内恒温条件研究所得,而昆虫的发育速率通常在一定的变温条件下比恒温条件下快,温度适应范围更广(Mironidis and Savopoulou-Soultani, 2008),加之本试验结果是通过线性回归拟合而成,因此与野外自然条件下的实际情况可能存在某些偏差。实际应用时,须与当地实际情况相结合,才能发挥最佳效果。

参考文献 (References)

- Campbell A, Frazer BD, Gilbert N, Gutierrez AP, Mackauer M, 1974. Temperature requirements of some aphids and their parasites. *J. Appl. Ecol.*, 11(2): 431–438.
- Feng YY, Ma GC, Jin QA, Lü BQ, Peng ZQ, Jin T, Wen HB, 2014. Effect of temperature on developmental duration and feeding amount of *Clanis bilineata tsingtauca*. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 35(12): 2442–2444. [冯雨艳, 马光昌, 金启安, 吕宝乾, 彭正强, 金涛, 温海波, 2014. 温度对豆天蛾发育历期及取食量的影响. *热带作物学报*, 35(12): 2442–2444]
- Han GB, Du JW, Li J, 2000. Mating behavioral ecology of *Ancylis sativa* adult. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 11(1): 99–102. [韩桂彪, 杜家纬, 李捷, 2000. 枣粘虫交配行为生态学研究. *应用生态学报*, 11(1): 99–102]
- Huang XJ, Zhou YJ, Song Z, Chen J, Bai LQ, Hu JF, 2014. Effect of rearing temperature on larval development and reproductive capacity of *Dendrolimus punctata punctata*. *Forest Pest and Disease*, 33(3): 14–17. [黄小娟, 周玉江, 宋舟, 陈杰, 白丽群, 胡加付, 2014. 温度对马尾松毛虫发育进度及繁殖能力的影响. *中国森林病虫*, 33(3): 14–17]
- Kuang XJ, Xu J, Sun XH, Huang F, Xue FS, 2010. Effect of temperature on mating behavior of *Colaphellus bowringi* Baly. *Journal of Environmental Entomology*, 32(3): 307–311. [匡先钜, 徐婧, 孙兴华, 黄芳, 薛芳森, 2010. 温度对大猿叶虫交配行为的影响. *环境昆虫学报*, 32(3): 307–311]
- Li GQ, Zhao FX, Li XZ, 2004. Density and biomass dynamics of *Hippophae rhamnoides* L. subsp. *sinensis* population in Mu Us Sandland. *Scientia Silvae Sinicae*, 40(1): 180–184. [李根前, 赵粉侠, 李秀寨, 2004. 毛乌素沙地中国沙棘种群数量动态研究. *林业科学*, 40(1): 180–184]
- Li JR, Zhu WB, Li LS, Wei Y, 1994. Experimental population ecological study of *Adoxophyes cyrtosema* Meyrick. *Chinese Journal of Ecology*, 13(3): 17–20. [李建荣, 朱文炳, 李隆术, 韦宇, 1994. 柑桔褐带卷蛾实验种群生态学研究. *生态学杂志*, 13(3): 17–20]
- Liu YH, Yan XF, Zhang YQ, Qi LZ, Lu PF, Zong SX, Luo YQ, 2013a. The eclosion and reproduction of *Trabala vishnou gigantina* (Lepidoptera: Lasiocampidae). *Chinese Journal of Applied Entomology*, 50(5): 1253–1259. [刘永华, 阎雄飞, 章一巧, 齐连珍, 陆鹏飞, 宗世祥, 骆有庆, 2013a. 栎黄枯叶蛾羽化及生殖行为研究. *应用昆虫学报*, 50(5): 1253–1259]
- Liu YH, Zhang YQ, Yan XF, Zheng YG, Lu PF, Zong SX, Luo YQ, 2014. Determination of the larval instars of *Trabala vishnou gigantina* Yang (Lepidoptera: Lasiocampidae). *Chinese Journal of Applied Entomology*, 51(5): 1343–1349. [刘永华, 章一巧, 阎雄飞, 郑永贵, 陆鹏飞, 宗世祥, 骆有庆, 2014. 栎黄枯叶蛾幼虫龄数的确定. *应用昆虫学报*, 51(5): 1343–1349]
- Liu YH, Zhang YQ, Yan XF, Zong DL, Zong SX, Luo YQ, 2013b. Damage of *Trabala vishnou gigantina* (Lepidoptera: Lasiocampidae) to the sea-buckthorn forest and its biological characteristic. *Plant Protection*, 3(2): 147–151. [刘永华, 章一巧, 阎雄飞, 宗德禄, 宗世祥, 骆有庆, 2013b. 栎黄枯叶蛾对沙棘林的危害及生物学特性. *植物保护*, 3(2): 147–151]
- Liu YJ, Wu CS, 2006. Fauna Sinica. Insecta, Vol. 47. Lepidoptera: Lasiocampidae. Science Press, Beijing. 338–339. [刘友樵, 武春生, 2006. 中国动物志. 昆虫纲, 第47卷: 鳞翅目枯叶蛾科. 北京: 科学出版社. 338–339]
- Mironidis GK, Savopoulou-Soultani M, 2008. Development, survivorship and reproduction of *Helicoverpa armigera* (Lepidoptera: Noctuidae) under constant and alternating temperatures. *Environ. Entomol.*, 37(1): 16–28.
- Shi BK, Hu CX, Huang JL, Hou ML, 2014. Modeling the influence of temperature on development, survival and oviposition of the brown planthopper, *Nilaparvata lugens*. *Acta Ecologica Sinica*, 34(20): 5868–5874. [石保坤, 胡朝兴, 黄建利, 侯茂林, 2014. 温度对褐飞虱发育、存活和产卵影响的关系模型. *生态学报*, 34(20): 5868–5874]
- Shi SS, Cui J, Xu W, Zhang QL, Zhu SY, 2015. Effects of temperature on development and reproduction of *Ascotis selenaria*. *Chinese Journal of Oil Crop Sciences*, 37(5): 707–712. [史树森, 崔娟, 徐伟, 张青玲, 朱诗禹, 2015. 温度对大造桥虫生长发育和繁殖的影响. *中国油料作物学报*, 37(5): 707–712]
- Tang YZ, Zhu JG, Kuang RP, 1993. On the conception and application of the base temperature for development. *Chinese Journal of Ecology*, 12(6): 70–72. [唐业忠, 朱建国, 况荣平, 1993. 发育起点温度的概念和应用问题. *生态学杂志*, 12(6): 70–72]
- Tong CS, 1966. A preliminary study on *Trabala vishnou gigantina* Yang of life habit and control. *Chinese Bulletin of Entomology*, 10(2): 96–97. [同长寿, 1966. 栎黄枯叶蛾的生活习性与防治初步研究. *昆虫知识*, 10(2): 96–97]
- Wang HS, Xu HF, Cui F, Xu YY, Zhou Z, 2004. Effects of temperature on mating behavior and fecundity of beet armyworm *Spodoptera exigua* (Hübner). *Acta Ecologica Sinica*, 24(1): 162–166. [王站晟, 徐洪富, 崔峰, 许永玉, 周真, 2004. 温度对甜菜夜蛾生殖行为及生殖力的影响. *生态学报*, 24(1): 162–166]
- Xiang YY, Yin PF, Wang MY, Luo X, Zhang YC, 2011. Developmental threshold temperature and effective accumulative temperature of *Heterolocha jinyinhuaephaga*. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 48(1): 152–155. [向玉勇, 殷培峰, 汪美英, 罗侠, 张元昶, 2011. 金银花尺蠖发育起点温度和有效积温的研究. *应用昆虫学报*, 48(1): 152–155]
- Xiao GR, 1992. Forest Entomology in China. 2nd ed. China Forestry Press, Beijing. 981–983. [萧刚柔, 1992. 中国森林昆虫(第2版). 北京: 中国林业出版社. 981–983]
- Zhang XX, 2002. Insect Ecology and Forecast. 3rd ed. China Agriculture Press, Beijing. 218–219. [张孝羲, 2002. 昆虫生态及预测预报(第3版). 北京: 中国农业出版社. 218–219]
- Zhang YH, Peng H, Zhang Z, Li XR, Liu Y, Wang HY, Yuan GH, Cheng DF, 2015. Effects of temperature and food on the growth and development of larvae of *Agriphila aeneociliella* (Lepidoptera: Pyralidae). *Acta Entomologica Sinica*, 58(2): 169–174. [张云慧, 彭赫, 张智, 李祥瑞, 刘勇, 王海英, 原国辉, 程登发,

2015. 温度和食料对白眉野草螟幼虫生长发育的影响. 昆虫学报, 58(2): 169 – 174]

Zhang YQ, Liu YH, Zong SX, Lu PF, Qi LZ, Luo YQ, 2013. Spatial distribution of *Trabala vishnou gigantina* eggs with GS +. *Scientia Silvae Sinicae*, 49(10): 100 – 104. [章一巧, 刘永华, 宗世祥, 陆鹏飞, 齐连珍, 骆有庆, 2013. 基于 GS + 的大黄枯叶蛾卵的空间分布关系. 林业科学, 49(10): 100 – 104]

Zhang YQ, Zong SX, Liu YH, Wen JB, Yan ZW, Luo YQ, 2012. Spatial distribution of *Trabala vishnou gigantina* Yang pupae in Shaanxi Province, China. *Acta Ecologica Sinica*, 32(20): 6308 – 6317. [章一巧, 宗世祥, 刘永华, 温俊宝, 闫占文, 骆有庆, 2012. 陕西省栎黄枯叶蛾蛹的空间分布. 生态学报, 32(20): 6308 – 6317]

(责任编辑：赵利辉)