

温度对大蜡螟生长发育和繁殖的影响

罗丽林¹ 杨广明¹ 龙立炎² 王兴红¹ 黄振兴¹ 乙天慈³ 罗雪丹³ 刘 曼^{1*}

(1. 贵州省生物研究所, 贵阳 550009; 2. 台江县农业农村局, 贵州 凯里 556300;

3. 贵州大学昆虫研究所, 贵阳 550025)

摘要: 为预测大蜡螟 *Galleria mellonella* 的发生期并为其田间有效防控提供参考依据, 采用室内人工恒温饲养方法, 测定 27、29、31、33、35℃ 五个温度下大蜡螟幼虫龄期、各虫态存活率和发育历期及成虫寿命和繁殖力, 对其发育速率与温度进行回归分析, 计算各虫态发育起点温度和有效积温。结果显示, 27~35℃ 范围内, 大蜡螟能正常发育, 但低温会使幼虫龄期减少, 29~35℃ 下大蜡螟有 7~10 龄幼虫, 而 27℃ 下, 大蜡螟仅有 6~8 龄幼虫。温度显著影响各虫态存活率, 低龄尤其 1 龄幼虫受温度的影响较大, 27~33℃ 下其存活率低于 26.06%, 当温度为 35℃ 时其存活率高达 87.27%。世代及各虫态的发育历期均与温度呈负相关, 卵期、幼虫期、蛹期及世代发育历期均在 35℃ 降至最小值, 分别为 5.00、25.90、7.05 和 37.95 d。各虫态发育速率与温度符合二次回归模型。由直接最优法计算得到大蜡螟卵、幼虫、蛹及世代的发育起点温度分别为 13.11、13.69、19.83 和 13.19℃, 有效积温依次为 100.32、514.09、95.13 和 789.87 日·度。雌雄成虫的寿命和雌成虫产卵历期均随温度升高而缩短, 温度对单雌产卵量无显著影响, 但 35℃ 下单雌日均产卵量最高, 为 342.59 粒。表明温度是影响大蜡螟生长发育和繁殖的关键因素, 35℃ 是大蜡螟生长发育和繁殖的最适温度。

关键词: 大蜡螟; 温度; 生长发育; 繁殖

Effects of temperature on the development and reproduction of the greater wax moth, *Galleria mellonella*

Luo Lilin¹ Yang Guangming¹ Long Liyan² Wang Xinghong¹ Huang Zhenxing¹ Yi Tianci³
Luo Xuedan³ Liu Man^{1*}

(1. Guizhou Institute of Biology, Guiyang 550009, Guizhou Province, China; 2. Agricultural and Rural Bureau of Taijiang County, Kaili 556300, Guizhou Province, China; 3. Institute of Entomology, Guizhou University, Guiyang 550025, Guizhou Province, China)

Abstract: In order to provide a basic reference for future population dynamic prediction and integrated control of greater wax moth *Galleria mellonella*, its larval instars, survival, developmental duration, lifespan and fecundity were measured at five different temperatures (27, 29, 31, 33 and 35℃) in the laboratory. Based on regression analysis and direct optimization, the developmental threshold temperature and effective accumulated temperature of different developmental stages were also calculated. The results showed that the pest could complete its life cycle under the temperature from 27℃ to 35℃. Low temperature led to early pupation; a maximum of eight larval instars occurred at 27℃, and ten instars occurred under the temperature of 29–35℃. In addition, the temperature had significant effects on the survival rate of *G. mellonella*. The survival rate of early instars, especially the 1st instar, was greatly

基金项目: 贵州省科技计划项目(黔科合支撑[2019]2292号), 贵州省农业攻关项目(黔科合NY[2013]3040号), 贵州省生物研究所科技计划项目(黔生所字[2021]09号)

* 通信作者 (Author for correspondence), E-mail: freemyself516@hotmail.com

收稿日期: 2020-08-19

affected by temperature. Under the temperature of 27–33°C, it was less than 26.06%, while it was the highest at 35°C (87.27%). The generation time and the developmental durations of different stages were negatively correlated with temperature. The developmental durations of egg, larva, pupa and the generation time of *G. mellonella* were the shortest at 35°C (5.00, 25.90, 7.05 and 37.95 d, respectively). The relationship between the developmental rate of *G. mellonella* and temperature conformed to the regression quadratic model. Based on the direct optimization method, the developmental threshold temperature of egg, larva, pupa, and the generation time of *G. mellonella* was 13.11, 13.69, 19.83 and 13.19°C, respectively, and the effective accumulated temperature was 100.32, 514.09, 95.13, and 789.87 degree-days, respectively. The longevity of female and male adults and the oviposition period shortened with increasing temperature, while temperature had no significant effect on the number of eggs laid per female. Nevertheless, the average daily number of eggs laid per female was the highest (342.59 eggs per female) at 35°C. The results indicated that temperature was the key factor affecting the development and reproduction of *G. mellonella*, and the optimum temperature for development and reproduction was 35°C.

Key words: *Galleria mellonella*; temperature; growth and development; reproduction

大蜡螟 *Galleria mellonella* 隶属于鳞翅目螟蛾科蜡螟亚科蜡螟属, 又名巢虫、绵虫、隧道虫, 是一种对蜜蜂有毁灭性为害的世界性害虫。该虫主要以幼虫蛀食蜜蜂巢脾, 侵害蜂群, 对蜜蜂幼虫和蛹均产生为害, 造成子脾出现大量“白头蛹”, 当为害轻时, 子脾受损, 群势减弱, 产蜜量减少; 当为害严重时, 整群蜂巢脾被毁, 成蜂无法安身, 最终导致蜂群飞逃(杨爽等, 2016)。

目前, 国内外关于大蜡螟的研究多集中在生理生化及分子水平上(Svensson et al., 2014; 杨爽等, 2019; Lou et al., 2020), 且更多的是其作为模式昆虫用于昆虫生理学(Kwadha et al., 2019)、生物学(Kwadha et al., 2017)、行为学(Lizana et al., 2020)等及作为试验昆虫用于昆虫病原微生物(Chen et al., 2018)、病原线虫(丁晓帆, 2005)、抗菌免疫机制(Pérez-Reytor & García, 2018; Cutuli et al., 2019; Malmquist et al., 2019)等方面研究, 而关于其基础生物学的研究相对薄弱, 关于温度对大蜡螟生长发育的影响研究也仅是针对某个地区、某个特定温度、部分虫态。如胡福良和李英华(2000)报道大蜡螟的发生与外界温度关系密切, 在高纬度地区, 大蜡螟没有或很少发生, 而在广东、广西和云南等热带与亚热带地区发生相当严重; 徐祖荫等(1982)报道了自然变温条件下贵州省锦屏县大蜡螟的发育历期; Šmitanko et al. (1989)研究发现18°C低温下大蜡螟末龄幼虫期长达1年; 黄少康和王建鼎(2001)研究结果表明, 35°C下大蜡螟卵、幼虫、蛹、雌成虫和雄成虫的发育历期分别为8.6、49.4、10.8、5.5和9.2 d, 雌成虫

平均产卵量为725.2粒, 平均产卵期为4.3 d; 赵军(2010)报道了30°C下大蜡螟卵、幼虫、蛹的发育历期、雌雄成虫的寿命及雌成虫的产卵量和产卵历期; Kumar et al. (2010)研究了25、30、35和40°C下大蜡螟幼虫和蛹的发育历期, 表明40°C不适宜其幼虫生长发育; 另外, 张廷伟等(2020)较系统地研究了24、28和31°C不同温度对大蜡螟各虫态生长发育和繁殖的影响, 表明各虫态的发育历期、成虫寿命、产卵前期和产卵期均随温度升高而缩短, 24°C下雌成虫产卵量最高, 为2 781.50粒, 但未见大蜡螟全虫态的发育起点温度和有效积温等基础生态学的研究报告。有效积温和发育起点温度等行为特征参数能够反映昆虫对环境温度的适应性, 可用来推测昆虫的地理分布和发生世代数(唐业忠等, 1993), 为适时防治害虫提供依据。

为预测大蜡螟的发生期并为其田间防控提供参考依据, 根据大蜡螟的自然生长环境, 室内设置27、29、31、33、35°C五个温度梯度, 测定这5个温度下大蜡螟幼虫龄期、各虫态存活率和发育历期及成虫寿命和繁殖力, 对其发育速率与温度进行回归分析, 采用直接回归法和直接最优法2种方法计算其发育起点温度和有效积温, 并构建其发育历期的预测模型, 以为大蜡螟的预测、预报及有效防治提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 材料

供试虫源: 于贵州省息烽县温泉镇中华蜜蜂

Apis cerana 养殖场采集大蜡螟,于本实验室长期用人工饲料续代饲养10代以上以建立稳定的试验种群。选取同批次健康、活力好的雌雄成虫,放入直径10 cm、高20 cm养虫罐内交尾,养虫罐顶部放置1层纱布供其产卵,待其产卵后,收集新鲜卵块备用。人工饲料购于天津惠裕德生物科技有限公司。

仪器:RQZ-380C智能人工气候箱,杭州琦胜电子科技有限公司。

1.2 方法

1.2.1 温度对大蜡螟幼虫龄期的影响

待卵孵化后,用细毛笔将初孵幼虫挑出,转入装有人工饲料、直径为3.5 cm的小型塑料培养皿中单头饲养,用1层封口膜将培养皿封口防止初孵幼虫逃逸,并依次编号,分别置于温度为27、29、31、33和35℃、相对湿度均为60%、全黑暗的人工气候箱中培养,5龄后移入直径为9 cm的塑料培养皿中继续饲养。每个温度处理100头初孵幼虫,重复3次。每天17:00时观察1次,记录幼虫的蜕皮情况,蜕皮后用细毛笔移除头壳记为2龄幼虫,以此类推,幼虫化蛹后终止记录,统计不同龄期幼虫化蛹数量和总化蛹数量,计算不同龄期幼虫的比例,某龄期幼虫的比例=该龄幼虫化蛹数量/总化蛹数量×100%。

1.2.2 温度对大蜡螟各虫态存活率的影响

挑选饱满的大蜡螟初产卵粒放入直径为9 cm的塑料培养皿中,分别置于温度为27、29、31、33和35℃、相对湿度均为60%、全黑暗的人工气候箱中饲养,每个温度处理120粒卵,重复3次。卵孵化后,按1.2.1方法进行单头饲养,待化蛹后将所有蛹取出单头放入直径为9 cm的干净培养皿中,皿内放湿棉球保湿。每天17:00时观察1次,直至成虫羽化。记录卵孵化数量、各龄幼虫数量、化蛹数量、成虫数量,计算各虫态的存活率,存活率=进入下一发育阶段的虫量/该发育阶段虫量×100%,其中,整个幼虫期的存活率=化蛹数量/1龄幼虫数量×100%,全世代的存活率=羽化成虫数量/总卵粒数量×100%。

1.2.3 温度对大蜡螟各虫态发育历期的影响

挑选饱满的大蜡螟初产卵粒放入直径为9 cm的塑料培养皿中,分别置于温度为27、29、31、33和35℃、相对湿度均为60%、全黑暗的人工气候箱中饲养,每个温度处理240粒卵,重复3次。卵孵化后按1.2.1方法进行单头饲养,每天17:00时观察1次,直至成虫羽化。记录卵孵化时间、幼虫蜕皮及化蛹时间、成虫羽化时间,统计各虫态的发育历期,其中,全世代发育历期为卵历期、幼虫期和蛹历期之和。

1.2.4 大蜡螟各虫态发育速率与温度的关系

将不同温度下大蜡螟各虫态发育历期进行加权平均,各权重均为1,计算各虫态的平均发育历期 $\bar{D}$,再将其转化为相应温度下的平均发育速率 $\bar{V}$, $\bar{V}=1/\bar{D}$,分别采用线性回归模型和二次回归模型进行拟合,得到大蜡螟不同虫态世代发育速率 V 与温度 T 之间的预测模型,采用SPSS 21.0统计软件建立回归方程并进行回归分析,分别在 $P<0.05$ 和 $P<0.01$ 水平上显示回归模型的相关显著性,得出最优的拟合模型。

1.2.5 大蜡螟各虫态发育起点温度和有效积温

发育起点温度 C 和有效积温 K 的计算采用直线回归法(丁岩钦,1994;张孝羲,2002)和直接最优法(李典谟和王莽莽,1986)。直线回归法计算公式为 $C = \frac{\sum V^2 \sum T - \sum V \sum VT}{n \sum V^2 - (\sum V)^2}$, $K = \frac{n \sum VT - \sum V \sum T}{n \sum V^2 - (\sum V)^2}$, n 为试验温度组数, $n=5$ 。直接最优法计算公式为 $C =$

$$\frac{\sum_{i=1}^n D_i^2 T_i - \bar{D} \sum_{i=1}^n D_i T_i}{\sum_{i=1}^n D_i^2 - n \bar{D}^2}, K = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [D_i (T_i - C)], \text{式中 } D$$

为发育历期; i 为温度处理。

为比较直线回归法和直接最优法2种计算方法所得结果的优劣,采用方差 S^2 计算2种方法各发育阶段发育起点温度 C 的变异系数 CV , $K_i = D_i (T_i - C)$, $\bar{K} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n K_i$, $S^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\bar{K} - K_i)^2$, $CV = \frac{\sqrt{S^2}}{\bar{K}}$,式中 T_i 为温度; D_i 为温度 T_i 下的发育历期; K_i 为不同温度处理对应的有效积温。

1.2.6 温度对大蜡螟成虫寿命和繁殖的影响

于35℃下选择同天羽化、活力强的雌雄成虫,单头放入直径10 cm、高20 cm的养虫罐内,不做任何处理,分别置于温度为27、29、31、33和35℃、相对湿度均为60%、全黑暗的人工气候箱中饲养,每天17:00时观察并记录其存活数量和寿命,每个温度分别处理雌雄成虫各20头。

另按上述方法选取一批雌雄成虫,将其配对后单对放入直径10 cm、高20 cm的养虫罐内,瓶口覆盖1层纱布,将其分别置于温度为27、29、31、33和35℃、相对湿度均为60%、全黑暗的人工气候箱中饲养。每个温度处理20对成虫。每天17:00时观察并记录养虫罐内卵的数量,直至雌成虫死亡(雄成虫死亡后及时补充雄成虫),记录单雌日产卵量、单雌产卵量、单雌日均产卵量、产卵高峰期及产卵期。

1.3 数据分析

采用 Excel 2007 和 SPSS 21.0 软件对数据进行统计分析。首先利用 K-S 方法对数据进行正态分布检验,然后用单因素方差分析中最小显著差数 (least significant difference, LSD) 法对试验数据进行差异显著性检验。

2 结果与分析

2.1 温度对大蜡螟幼虫龄期的影响

温度会影响大蜡螟幼虫蜕皮次数,低温条件下,幼虫龄期减少。29~35℃ 下大蜡螟有 7~10 龄幼虫,而 27℃ 下,大蜡螟仅有 6~8 龄幼虫(表 1)。低温还会导致大蜡螟幼虫提前化蛹,27℃ 下 5% 的幼虫发育至 6 龄即可化蛹,60% 的幼虫进入 7 龄后化蛹;随温度升高,幼虫均进入 7 龄才开始化蛹,但 29、33 和 35℃ 下,8 龄幼虫所占比例分别为 60%、60% 和 55%

(表 1)。

2.2 温度对大蜡螟各虫态存活率的影响

温度对大蜡螟各虫态存活率均有影响,低温不利于大蜡螟的存活(表 2)。27℃ 下大蜡螟卵的孵化率显著低于其他 4 个温度下卵的孵化率($P<0.05$),但其他 4 个温度下大蜡螟卵的孵化率之间差异不显著;大蜡螟整个幼虫期的存活率均随温度的升高而升高,27~33℃ 下整个幼虫期的存活率均较低,仅为 4.62%~12.43%,35℃ 下整个幼虫期的存活率显著提高至 62.43% ($P<0.05$);大蜡螟低龄幼虫尤其 1 龄幼虫对温度的变化最敏感,27~33℃ 下其存活率均低于 26.06%,而 35℃ 下其存活率高达 87.27% ($P<0.05$);大蜡螟蛹对温度的适应能力最强,27~35℃ 范围内其存活率均在 88.12% 以上,且 5 个温度下存活率无显著差异;从大蜡螟全世代的存活率来看,27℃ 时最低,为 3.23%,35℃ 时最高,为 55.55%(表 2)。

表 1 温度对大蜡螟幼虫龄期的影响
Table 1 Effects of temperature on larval instars of *Galleria mellonella*

温度 Temperature/℃	不同龄期幼虫的比例 Proportion of different larvae instars/%				
	6 龄幼虫 6th instar	7 龄幼虫 7th instar	8 龄幼虫 8th instar	9 龄幼虫 9th instar	10 龄幼虫 10th instar
27	5	60	35	—	—
29	—	30	60	5	5
31	—	45	35	15	5
33	—	5	60	20	15
35	—	25	55	15	5

—: 无幼虫化蛹。—: No larvae pupate.

表 2 不同温度下大蜡螟各虫态的存活率
Table 2 Survival rates of *Galleria mellonella* at different stages under different temperatures

发育阶段 Developmental stage	存活率 Survival rate/%				
	27℃	29℃	31℃	33℃	35℃
卵 Egg	79.00±2.08 b	88.33±1.74 a	87.92±1.10 a	89.44±2.42 a	88.89±2.78 a
1 龄幼虫 1st instar	18.37±0.34 b	24.81±1.84 b	21.36±1.65 b	26.06±2.97 b	87.27±3.64 a
2 龄幼虫 2nd instar	74.73±4.04 a	69.35±6.39 a	71.15±4.13 a	68.97±4.81 a	85.83±3.00 a
3 龄幼虫 3rd instar	75.95±5.29 a	72.99±11.98 a	81.23±4.91 a	80.09±3.85 a	91.07±4.49 a
4 龄幼虫 4th instar	77.45±4.36 ab	68.49±6.87 b	89.63±5.79 a	86.57±1.67 ab	96.30±3.70 a
5 龄幼虫 5th instar	87.26±4.37 a	92.13±3.96 a	91.07±4.49 a	100.00±0.00 a	95.83±4.17 a
6 龄幼虫 6th instar	85.05±2.51 a	92.59±7.41 a	95.24±4.76 a	100.00±0.00 a	100.00±0.00 a
7 龄幼虫 7th instar	88.89±6.41 a	91.67±8.33 a	100.00±0.00 a	100.00±0.00 a	100.00±0.00 a
8 龄幼虫 8th instar	87.74±1.24 b	100.00±0.00 a	100.00±0.00 a	100.00±0.00 a	100.00±0.00 a
9 龄幼虫 9th instar	—	100.00±0.00 a	100.00±0.00 a	100.00±0.00 a	100.00±0.00 a
10 龄幼虫 10th instar	—	100.00±0.00 a	100.00±0.00 a	100.00±0.00 a	100.00±0.00 a
整个幼虫期 Whole larval stage	4.62±0.45 d	6.29±0.25 cd	9.50±1.05 bc	12.43±1.59 b	62.43±1.21 a
蛹 Pupa	88.12±8.53 a	100.00±0.00 a	100.00±0.00 a	100.00±0.00 a	100.00±0.00 a
世代 Generation time	3.23±0.50 c	5.55±0.28 bc	8.33±0.83 bc	11.11±1.47 b	55.55±2.78 a

表中数据为平均数±标准误。同行不同小写字母表示经 LSD 法检验在 $P<0.05$ 水平差异显著。—: 无此虫态。Data are mean±SE. Different lowercase letters in the same row indicate significant difference at $P<0.05$ level by LSD test. —: No such instars observed.

2.3 温度对大蜡螟各虫态发育历期的影响

在27~35℃范围内大蜡螟均可完成全世代,温度对大蜡螟各虫态的发育历期有显著影响(表3)。27℃下大蜡螟卵发育历期最长,达7.00 d,35℃下大蜡螟卵发育历期最短,仅为5.00 d($P<0.05$);27℃下大蜡螟整个幼虫期发育历期最长,为35.00 d,35℃下整个幼虫期发育历期最短,仅25.90 d,29、31和

33℃下整个幼虫期发育历期分别为30.85、30.90和30.55 d,三者之间差异不显著,但均与27℃和35℃下整个幼虫期发育历期差异显著($P<0.05$);大蜡螟蛹发育历期随温度的升高而逐渐缩短,27℃下大蜡螟蛹期长达12.70 d,35℃下仅为7.05 d;27℃下大蜡螟整个世代发育历期为54.70 d,35℃下仅需37.95 d,两者之间差异显著($P<0.05$)。

表3 不同温度下大蜡螟各虫态的发育历期

Table 3 Developmental durations of *Galleria mellonella* at different stages under different temperatures

发育阶段 Developmental stage	发育历期 Developmental duration/d				
	27℃	29℃	31℃	33℃	35℃
卵 Egg	7.00±0.00 a	6.45±0.11 b	5.25±0.12 c	5.00±0.00 c	5.00±0.00 c
1龄幼虫 1st instar	5.45±0.25 a	4.00±0.10 bc	4.90±0.27 ab	4.25±0.46 bc	3.75±0.20 c
2龄幼虫 2nd instar	4.75±0.43 a	3.65±0.11 bc	4.25±0.31 ab	3.20±0.27 cd	2.60±0.21 d
3龄幼虫 3rd instar	4.70±0.33 a	3.95±0.09 b	3.80±0.25 b	3.55±0.21 b	1.95±0.09 c
4龄幼虫 4th instar	4.70±0.32 a	4.10±0.25 a	4.60±0.40 a	4.05±0.31 a	2.05±0.05 b
5龄幼虫 5th instar	4.35±0.26 a	4.00±0.32 a	3.70±0.33 a	3.55±0.25 a	2.60±0.11 b
6龄幼虫 6th instar	4.05±0.22 a	3.55±0.29 a	3.20±0.17 a	3.20±0.22 a	3.40±0.24 a
7龄幼虫 7th instar	5.89±0.43 a	3.95±0.27 b	3.75±0.24 b	3.35±0.25 b	4.15±0.28 b
8龄幼虫 8th instar	4.00±1.00 ab	4.50±0.17 ab	3.55±0.28 b	3.31±0.17 b	5.27±0.60 a
9龄幼虫 9th instar	—	3.50±0.50 ab	3.00±0.71 b	4.86±0.96 ab	5.50±1.50 a
10龄幼虫 10th instar	—	3.00	3.00	3.67±0.33	7.00
整个幼虫期 Whole larval stage	35.00±0.82 a	30.85±0.69 b	30.90±0.93 b	30.55±1.53 b	25.90±0.60 c
蛹 Pupa	12.70±0.19 a	9.75±0.33 b	8.80±0.20 b	7.40±0.21 c	7.05±0.59 c
世代 Generation time	54.70±0.83 a	47.05±0.70 b	44.95±0.97 bc	42.95±1.51 c	37.95±0.89 d

表中数据为平均数±标准误。同行不同小写字母表示经LSD法检验在 $P<0.05$ 水平差异显著。—: 无此虫态。Data are mean±SE. Different lowercase letters in the same row significant difference at $P<0.05$ level by LSD test. —: No such instars observed.

2.4 大蜡螟各虫态发育速率与温度的关系

在线性回归分析中,大蜡螟卵、整个幼虫期、蛹、世代及2龄和5龄幼虫的发育速率与温度显著相关($P<0.05$ 或 $P<0.01$)。在二次回归分析中,大蜡螟卵、整个幼虫期、蛹、世代及2~7龄和10龄幼虫的发育速率与温度显著相关($P<0.05$ 或 $P<0.01$)。此外,大蜡螟各虫态(龄)二次回归模型的相关系数 r 均大于线性回归模型,表明在27~35℃范围内二次回归模型能更好地拟合两者之间的关系(表4)。

2.5 大蜡螟各虫态发育起点温度和有效积温

大蜡螟各虫态发育起点温度和有效积温各不相同,不同方法计算所得同一虫态的发育起点温度和有效积温亦不相同(表5)。从2种计算方法的变异系数来看,直接最优法有7个发育阶段的变异系数均小于直线回归法,而直线回归法有5个发育阶段的变异系数均小于直接最优法,故直接最优法更优。在直接最优法计算结果中,大蜡螟各虫态中卵的发育起点温度最低,为13.11℃,世代的发育起点

温度次之,为13.19℃,整个幼虫期和蛹的发育起点温度较高,为13.69℃和19.83℃;大蜡螟完成1个世代所需的有效积温为789.87日·度,蛹发育所需有效积温最低,为95.13日·度,占全世代所需有效积温的12.04%;整个幼虫期所需有效积温最高,为514.09日·度,占全世代所需有效积温的65.09%;卵发育所需有效积温为100.32日·度。在整个幼虫阶段中,完成4龄幼虫发育所需有效积温最低,为20.24日·度,3龄、2龄、6龄、5龄、7龄和8龄次之,所需有效积温分别为24.42、26.33、26.93、29.69、34.08和35.81日·度,1龄所需有效积温最高,达39.75日·度(表5)。

2.6 温度对大蜡螟成虫寿命和繁殖的影响

27℃下大蜡螟雌雄成虫寿命最长,分别为20.30 d和24.10 d,35℃下雌雄成虫寿命最短,分别为7.20 d和12.00 d,均显著低于其27℃下的寿命($P<0.05$)。此外,各温度下雌成虫寿命均短于雄成虫寿命,且29℃下雌成虫寿命比雄成虫寿命短5.20 d(表6)。

表4 不同发育阶段大蜡螟发育速率与温度的回归模型

Table 4 Regression models between developmental rates of *Galleria mellonella* and temperatures at different stages

发育阶段 Developmental stage	线性回归 Linear regression		二次回归 Quadratic regression	
	线性回归模型		二次回归模型	
	Linear regression model	F	Regression quadratic model	F
卵 Egg	$V=-0.076+0.008T(r=0.931)$	19.509*	$V=-1.122\ 2+0.076\ 3T-0.001\ 1T^2(r=0.977)$	20.888*
1龄幼虫 1st instar	$V=-0.042+0.009T(r=0.803)$	5.465	$V=-0.101\ 2+0.013\ 0T-0.000\ 1T^2(r=0.804)$	1.823
2龄幼虫 2nd instar	$V=-0.468+0.025T(r=0.930)$	19.311*	$V=2.084\ 7-0.140\ 7T+0.002\ 6T^2(r=0.959)$	11.446*
3龄幼虫 3rd instar	$V=-0.687+0.033T(r=0.828)$	6.529	$V=6.928\ 6-0.462\ 9T+0.008\ 0T^2(r=0.957)$	10.917*
4龄幼虫 4th instar	$V=-0.505+0.026T(r=0.772)$	4.424	$V=6.829\ 4-0.451\ 1T+0.007\ 7T^2(r=0.942)$	7.864*
5龄幼虫 5th instar	$V=-0.234+0.017T(r=0.932)$	19.763*	$V=1.331\ 9-0.084\ 5T+0.001\ 6T^2(r=0.955)$	10.338*
6龄幼虫 6th instar	$V=0.107+0.007T(r=0.703)$	2.936	$V=-2.538\ 9+0.178\ 7T-0.002\ 8T^2(r=0.994)$	86.595*
7龄幼虫 7th instar	$V=-0.075+0.011T(r=0.621)$	1.881	$V=-5.291\ 3+0.350\ 4T-0.005\ 5T^2(r=0.958)$	11.084*
8龄幼虫 8th instar	$V=0.162+0.004T(r=0.366)$	0.465	$V=0.619\ 8-0.025\ 7T+0.000\ 5T^2(r=0.381)$	0.169
9龄幼虫 9th instar	$V=-0.760+0.033T(r=0.616)$	1.833	$V=-13.341\ 6+0.851\ 7T-0.013\ 2T^2(r=0.846)$	2.507
10龄幼虫 10th instar	$V=-0.136+0.011T(r=0.250)$	0.200	$V=-16.927\ 6+1.103\ 8T-0.017\ 6T^2(r=0.954)$	10.057*
整个幼虫期 Whole larval stage	$V=-0.002+0.001T(r=0.907)$	13.921*	$V=0.133\ 8-0.007\ 7T+0.000\ 1T^2(r=0.945)$	8.416*
蛹 Pupa	$V=-0.155+0.009T(r=0.992)$	181.500**	$V=-0.359\ 3+0.022\ 1T-0.000\ 2T^2(r=0.993)$	75.961*
世代 Generation time	$V=-0.010+0.001T(r=0.907)$	13.902*	$V=0.185\ 3-0.011\ 7T+0.000\ 2T^2(r=0.995)$	105.324**

V: 发育速率; T: 温度; r: 相关系数。*、**分别表示温度与发育速率在P<0.05或P<0.01水平显著相关。V: Developmental rate; T: temperature; r: correlation coefficient. *, **: Significant correlation between temperature and developmental rate at P<0.05 or P<0.01 level, respectively.

表5 大蜡螟各虫态的发育起点温度和有效积温

Table 5 Threshold and effective accumulative temperatures of *Galleria mellonella* at different developmental stages

发育阶段 Developmental stage	直线回归法 Linear regression method			直接最优法 Direct optimization method		
	发育起点温度	有效积温/(日·度)	变异系数	发育起点温度	有效积温/(日·度)	变异系数
	Developmental threshold temperature/℃	Effective accumulated temperature/(day-degree)	Coefficient of variance/%	Developmental threshold temperature/℃	Effective accumulated temperature/(day-degree)	Coefficient of variance/%
卵 Egg	13.03	100.77	7.90	13.11	100.32	7.92
1龄幼虫 1st instar	20.98	39.72	22.42	20.96	39.75	24.11
2龄幼虫 2nd instar	23.69	25.92	41.95	23.50	26.33	36.30
3龄幼虫 3rd instar	23.86	22.50	28.34	23.31	24.42	27.56
4龄幼虫 4th instar	24.95	19.75	45.37	24.79	20.24	49.27
5龄幼虫 5th instar	21.83	30.00	38.06	21.91	29.69	38.80
6龄幼虫 6th instar	23.64	23.58	41.29	22.58	26.93	32.80
7龄幼虫 7th instar	23.21	29.24	63.17	21.87	34.08	30.01
8龄幼虫 8th instar	24.74	29.55	42.19	23.67	35.81	29.69
9龄幼虫 9th instar	—	—	—	—	—	—
10龄幼虫 10th instar	—	—	—	—	—	—
整个幼虫期 Whole larval stage	13.24	528.04	12.41	13.69	514.09	13.60
蛹 Pupa	20.44	90.00	12.98	19.83	95.13	11.05
世代 Generation time	13.19	789.81	10.12	13.19	789.87	11.41

27~35℃下大蜡螟成功交配后即可产卵,温度对其单雌产卵量的影响不显著,但35℃下大蜡螟的单雌日均产卵量最高,达342.59粒,27℃下最低,为221.91粒,前者比后者显著多120.68粒($P<0.05$);大蜡螟的产卵历期随温度升高而缩短,27℃下产卵历期最长,为8.70 d,35℃下产卵历期最短,为6.55 d,显著低于前者($P<0.05$),但29~33℃下产卵历期之间无显著差异(表6)。

表6 温度对大蜡螟成虫寿命和繁殖的影响

Table 6 Effects of temperatures on adult longevity and reproduction of <i>Galleria mellonella</i>					
温度 Temperature/℃	雌成虫寿命 Female adult longevity/d	雄成虫寿命 Male adult longevity/d	产卵历期 Oviposition period/d	单雌产卵量 Fecundity per female	单雌日均产卵量 Daily fecundity per female
27	20.30±0.75 a	24.10±0.53 a	8.70±0.48 a	1 916.55±134.14 a	221.91±11.72 b
29	11.00±0.77 b	16.20±0.94 b	7.75±0.49 ab	2 146.95±132.81 a	311.95±24.08 a
31	9.65±0.70 b	12.55±0.76 c	7.35±0.29 ab	2 146.70±158.28 a	286.37±28.67 a
33	9.70±0.37 b	13.10±1.27 c	7.25±0.39 ab	2 161.75±138.08 a	295.39±15.37 a
35	7.20±0.60 c	12.00±1.19 c	6.55±0.32 b	2 213.35±127.12 a	342.59±17.42 a

表中数据为平均数±标准误。同列不同小写字母表示经LSD法检验在 $P<0.05$ 水平差异显著。Data are mean±SE. Different lowercase letters in the same column indicate significant difference at $P<0.05$ level by LSD test.

27~35℃下大蜡螟雌成虫的产卵高峰期均出现在产卵的前3 d,其中第1天单雌日产卵量最大,分别为644.35、683.45、579.20、691.45和636.45粒,但各温度下雌成虫单雌日产卵量之间差异不显著,直至产卵第3天,27℃下雌成虫的单雌日产卵量显著

低于其他4个温度($P<0.05$),仅为265.50粒,其余4个温度下的单雌日均产卵量均在400.00粒以上,自产卵第4天至产卵最后1 d,各温度下的单雌日均产卵量之间均无显著差异(图1)。

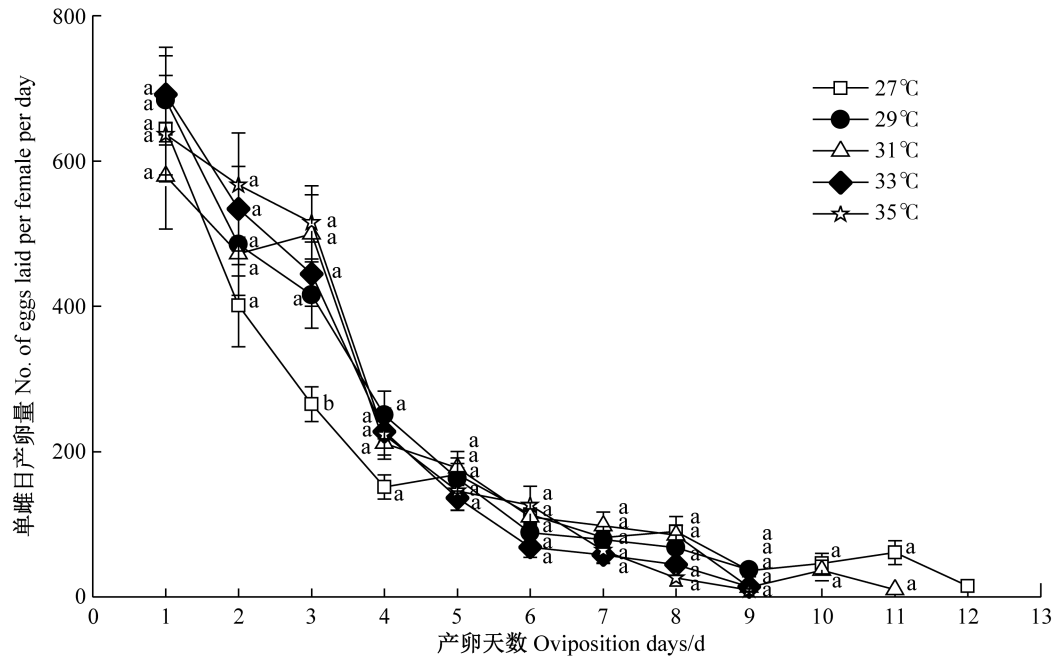


图1 不同温度下大蜡螟单雌日产卵量

Fig. 1 No. of eggs laid per female of *Galleria mellonella* per day under different temperatures

图中数据为平均数±标准误。同时间不同小写字母表示经LSD法检验在 $P<0.05$ 水平差异显著。Data are mean±SE. Different lowercase letters at the same time indicate significant difference at $P<0.05$ level by LSD test.

3 讨论

温度是影响昆虫生长、发育、繁殖、存活和种群动态的重要生态因子之一(Steigenga & Fischer,

2009;石保坤等,2014)。本研究结果显示,在27~35℃范围内大蜡螟均能正常发育,世代及各虫态的发育历期随温度升高而缩短,31℃下其卵、幼虫、蛹

和世代的发育历期分别为5.25、30.90、8.80和44.95 d。张廷伟等(2020)也得出类似的研究结果,且大蜡螟卵、幼虫、蛹和世代的发育历期分别为5.02、19.59、8.73和33.68 d,低于本研究结果。本研究结果表明在35℃下大蜡螟幼虫和蛹的发育历期分别为25.90 d和7.05 d,而Kumar et al.(2010)报道35℃下大蜡螟幼虫和蛹的发育历期分别为53.54 d和12.06 d,与本研究结果差异较大,究其原因可能是地理种群或饲料不同。另外,本研究结果表明35℃下大蜡螟各虫态的存活率均显著高于其他温度的存活率,且不同虫态对温度的耐受性差异不尽相同,大蜡螟幼虫尤其1龄幼虫对温度最敏感,27~33℃下存活率均低于26.06%;而在27~35℃范围内蛹的存活率均可达88.12%以上,说明蛹对温度变化不敏感,这种差异在桃蛀螟 *Dichocrocis punctiferalis* (杜艳丽等, 2012)、沙蒿金叶甲 *Chrysolina aeruginosa* (魏淑花等, 2013)和甘蔗条螟 *Chilo sacchariphagus* 中也有报道(魏吉利等, 2019)。

昆虫蜕皮次数受温度的影响,且影响程度存在种间差异,如在一定温度范围内,随温度升高,斜纹夜蛾 *Spodoptera litura* 幼虫蜕皮次数逐渐减少(秦厚国等, 2002);在适宜条件下,黏虫 *Mythimna separata* 幼虫通常为6龄,但当温度升高到30℃以上后,7龄幼虫出现且所占比例增加(江幸福等, 1998);在不同温度下二点委夜蛾 *Athetis lepigone* 均有部分进入6龄,但随着温度升高进入6龄的个体数明显增多(曹美琳等, 2012);草地贪夜蛾 *S. frugiperda* 在15℃和20℃下会出现7龄幼虫,而在25~35℃下幼虫只有6龄(何莉梅等, 2019);在温度较低时双委夜蛾 *A. dissimilis* 存在7龄幼虫,温度高于25℃后只有6龄幼虫(郭婷婷等, 2016)。本研究发现不同温度下大蜡螟幼虫的蜕皮次数参差不齐,27℃下只有6~8龄幼虫,而31~35℃有7~10龄幼虫。在不同温度下大蜡螟幼虫表现出的蜕皮次数差异可能是其在长期进化过程中形成的独特的环境适应策略,也可能是因为温度过低引起大蜡螟幼虫体内激素水平变化,具体生理变化机制有待进一步研究。

昆虫发育起点温度、有效积温及温度与昆虫生长发育模型可用于推算和预测昆虫完成1个世代或某一虫态的发育历期及发生代数。本研究结果显示,二次回归模型能更好地反映发育速率和温度的关系,应优先使用二次回归模型对大蜡螟各虫态的发育速率进行预测。大蜡螟1~2龄幼虫体小,3龄以上幼虫体增大,食量增加,破坏力增强,因此,可根据

模型预测幼虫的发育期,进而把握最佳防治期。先采用直接最优法计算大蜡螟卵、幼虫、蛹和世代的发育起点温度和整个世代经历的有效积温,再结合贵州省年有效积温,可粗略推算贵州省大蜡螟的年发生代数。同时,还可用于指导田间适时防治,如贵州省每年12月—翌年2月的平均温度均低于13℃,此期间用高温小型喷火枪处理蜂箱四周和底部各拐角,以杀灭越冬卵及幼虫,达到有效降低虫源基数的目的,同时也不会对蜜蜂造成伤害。

本研究结果表明大蜡螟成虫寿命随温度升高而缩短,且同一温度下雄成虫寿命大于雌成虫寿命,这与张廷伟等(2020)的研究结果一致。许多鳞翅目昆虫,如苹果蠹蛾 *Cydia pomonella* (Blomefield & Giliomee, 2011)、小菜蛾 *Plutella xylostella* (潘飞等, 2012)、甘蔗条螟(魏吉利等, 2019)和栎黄枯叶蛾 *Trabala vishnou gigantina* (刘永华等, 2016)也有此特性,可能是成虫在低温下通过延长寿命可以获得更大的利益(骆丹等, 2017)。另外,张廷伟等(2020)研究发现大蜡螟成虫的产卵历期随温度升高而缩短,本研究也获得类似结果,不同的是,张廷伟等(2020)研究发现在补充营养的条件下大蜡螟成虫在24℃下产卵量最高,为2 781.50粒,而本研究结果显示不同温度下大蜡螟的产卵量无显著差异,原因可能有3个:一是地理种群差异大;二是其设置的温度范围和所用饲料不同;三是本试验的成虫均在相同温度下羽化,未补充营养,羽化后即可交配产卵,因此温度未能显著影响成虫的产卵量。

本研究是在恒温恒湿的人工气候箱内进行试验,与自然条件存在一定的差异,且本试验仅研究了温度对大蜡螟生长发育的影响,而湿度、光照等许多环境因子同样会影响蛾类昆虫的生长发育和繁殖,此外,由于大蜡螟栖息环境的特殊性,蜜蜂也是影响其生长发育的重要因素。因此,在进行害虫田间预测预报时,如何综合考虑各种环境因子对蛾类昆虫生长发育和繁殖的联合作用尚需深入研究。

参 考 文 献 (References)

- Blomefield TL, Giliomee JH. 2011. Effect of temperature on the oviposition, longevity and mating of codling moth, *Cydia pomonella* (L.) (Lepidoptera: Tortricidae). *African Entomology*, 19(1): 42–60
- Cao ML, Tao B, Liu S, Dong JG, He YZ. 2012. Influence of temperature on experimental population of *Athetis lepigone* (Möschler). *Journal of Plant Protection*, 39(6): 531–535 (in Chinese) [曹美琳, 陶晔, 刘顺, 董金皋, 何运转. 2012. 温度对二点委夜蛾实验

- 种群的影响. 植物保护学报, 39(6): 531–535]
- Chen AH, Wang YL, Shao Y, Zhou QM, Chen SL, Wu YH, Chen HW, Liu EQ. 2018. Genes involved in *Beauveria bassiana* infection to *Galleria mellonella*. Archives of Microbiology, 200(4): 541–552
- Cutuli MA, Petronio Petronio G, Vergalito F, Magnifico I, Pietrangelo L, Venditti N, Di Marco R. 2019. *Galleria mellonella* as a consolidated *in vivo* model hosts: new developments in antibacterial strategies and novel drug testing. Virulence, 10(1): 527–541
- Ding XF. 2005. Nematodes and the hemolymph pathology of *Galleria mellonella* larvae infected with entomopathogenic nematodes. Master thesis. Nanjing: Nanjing Agricultural University (in Chinese) [丁晓帆. 2005. 几种昆虫病原线虫行为学及其侵染大蜡螟幼虫血淋巴病理学研究. 硕士学位论文. 南京: 南京农业大学]
- Ding YQ. 1994. Mathematical ecology of insects. Beijing: Science Press, pp. 318–332 (in Chinese) [丁岩钦. 1994. 昆虫数学生态学. 北京: 科学出版社, pp. 318–332]
- Du YL, Guo HM, Sun SL, Zhang MZ, Zhang AH, Wang JB, Qin L. 2012. Effects of temperature on the development and reproduction of the yellow peach moth, *Conogethes punctiferalis* (Lepidoptera: Pyralidae). Acta Entomologica Sinica, 55(5): 561–569 (in Chinese) [杜艳丽, 郭洪梅, 孙淑玲, 张民照, 张爱环, 王金宝, 秦岭. 2012. 温度对桃蛀螟生长发育和繁殖的影响. 昆虫学报, 55(5): 561–569]
- Guo TT, Men XY, Yu Y, Chen H, Zhou XH, Zhuang QY, Wang ZY, Li LL. 2016. Effects of temperature on the development and reproduction of *Aethis dissimilis* (Lepidoptera: Noctuidae). Acta Entomologica Sinica, 59(8): 865–870 (in Chinese) [郭婷婷, 门兴元, 于毅, 陈浩, 周仙红, 庄乾营, 王振营, 李丽莉. 2016. 温度对双委夜蛾实验种群生长发育及繁殖的影响. 昆虫学报, 59(8): 865–870]
- He LM, Ge SS, Chen YC, Wu QL, Jiang YY, Wu KM. 2019. The developmental threshold temperature, effective accumulated temperature and prediction model of developmental duration of fall armyworm, *Spodoptera frugiperda*. Plant Protection, 45(5): 18–26 (in Chinese) [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]
- Hu FL, Li YH. 2000. The biological and control methods on *Galleria mellonella* L. Apicultural Science and Technology, (1): 4–6 (in Chinese) [胡福良, 李英华. 2000. 大蜡螟的生物学特性和防治方法. 养蜂科技, (1): 4–6]
- Huang SK, Wang JD. 2001. Studies on the biology of the greater wax moth (*Galleria mellonella* L.). Apiculture of China, 52(5): 8–10 (in Chinese) [黄少康, 王建鼎. 2001. 大蜡螟的生物学研究. 中国养蜂, 52(5): 8–10]
- Jiang XF, Liu YQ, Luo LZ, Hu Y. 1998. Effects of high temperature on the immature stages of the oriental armyworm *Mythimna separata* Walker. Journal of Beijing Agricultural College, 13(2): 20–26 (in Chinese) [江幸福, 刘悦秋, 罗礼智, 胡毅. 1998. 高温对粘虫未成熟期生长发育的影响. 北京农学院学报, 13(2): 20–26]
- Kumar Y, Kumar K, Kaushik HD. 2010. Effect of temperature and relative humidity on larval and pupal development of greater wax moth, *Galleria mellonella* Linn. on two diets. Annals of Plant Protection Sciences, 18(1): 118–122
- Kwadha CA, Mutunga JM, Irungu J, Ongamo G, Ndegwa P, Raina S, Fombong AT. 2019. Decanal as a major component of larval aggregation pheromone of the greater wax moth, *Galleria mellonella*. Journal of Applied Entomology, 143(4): 417–429
- Kwadha CA, Ong'amo GO, Ndegwa PN, Raina SK, Fombong AT. 2017. The biology and control of the greater wax moth, *Galleria mellonella*. Insects, 8(2): 61
- Li DM, Wang MM. 1986. A study on fast estimation of developmental threshold temperature and effective accumulated temperature. Entomological Knowledge, 23(4): 184–187 (in Chinese) [李典谟, 王莽莽. 1986. 快速估计发育起点及有效积温的法研究. 昆虫知识, 23(4): 184–187]
- Liu YH, Yan XF, Wen DM, Lu PF, Zong SX, Luo YQ. 2016. Effects of temperature on the growth, development and reproduction of *Trabala vishnou gigantina* (Lepidoptera: Lasiocampidae). Acta Entomologica Sinica, 59(3): 309–315 (in Chinese) [刘永华, 阎雄飞, 温冬梅, 陆鹏飞, 宗世祥, 骆有庆. 2016. 温度对栎黄枯叶蛾生长发育及繁殖的影响. 昆虫学报, 59(3): 309–315]
- Lizana P, Machuca J, Larama G, Quiroz A, Mutis A, Venthur H. 2020. Mating-based regulation and ligand binding of an odorant-binding protein support the inverse sexual communication of the greater wax moth, *Galleria mellonella* (Lepidoptera: Pyralidae). Insect Molecular Biology, 29(3): 337–351
- Lou Y, Ekaterina P, Yang SS, Lu BY, Liu BF, Ren NQ, Corvini PFX, Xing DF. 2020. Biodegradation of polyethylene and polystyrene by greater wax moth larvae (*Galleria mellonella* L.) and the effect of co-diet supplementation on the core gut microbiome. Environmental Science & Technology, 54(5): 2821–2831
- Luo D, Xu CF, Yin LX, Zhang SY, Liu XP. 2017. Effects of ecological factors on mating and reproduction in moths. Journal of Environmental Entomology, 39(4): 963–973 (in Chinese) [骆丹, 徐川峰, 殷立新, 张诗语, 刘兴平. 2017. 生态因素对蛾类昆虫交配与生殖的影响. 环境昆虫学报, 39(4): 963–973]
- Malmquist JA, Rogan MR, McGillivray SM. 2019. *Galleria mellonella* as an infection model for *Bacillus anthracis* Sterne. Frontiers in Cellular and Infection Microbiology, 9: 360
- Pan F, He YR, Wang DS, Guo XL, Chen MC. 2012. Research advances on effect of temperature on growth, development and reproduction of the diamondback moth, *Plutella xylostella* (L.). Journal of Environmental Entomology, 34(1): 104–109 (in Chinese) [潘飞, 何余容, 王德森, 郭祥令, 陈绵才. 2012. 温度对小菜蛾生长发育和繁殖影响的研究进展. 环境昆虫学报, 34(1): 104–109]
- Pérez-Reytor D, García K. 2018. *Galleria mellonella*: a model of infection to discern novel mechanisms of pathogenesis of non-toxicogenic *Vibrio parahaemolyticus* strains. Virulence, 9(1): 22–24
- Qin HG, Ye ZX, Ding J, Huang SJ, Luo RH. 2002. Effect of tempera-

- ture on the development, survival and fecundity of *Spodoptera litura* Fabricius. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 10(3): 76–79 (in Chinese) [秦厚国, 叶正襄, 丁建, 黄水金, 罗任华. 2002. 温度对斜纹夜蛾发育、存活及繁殖的影响. 中国生态农业学报, 10(3): 76–79]
- 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 (in Chinese) [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]
- Śmietanko A, Wiśniewski JR, Cymborowski B. 1989. Effect of low rearing temperature on development of *Galleria mellonella* larvae and their sensitivity to juvenilizing treatment. Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Physiology, 92(2): 163–169
- Steigenga MJ, Fischer K. 2009. Fitness consequences of variation in developmental temperature in a butterfly. Journal of Thermal Biology, 34(5): 244–249
- Svensson GP, Gündüz EA, Sjöberg N, Hedenström E, Lassance JM, Wang HL, Löfstedt C, Anderbrant O. 2014. Identification, synthesis, and behavioral activity of 5, 11-dimethylpentacosane, a novel sex pheromone component of the greater wax moth, *Galleria mellonella* (L.). Journal of Chemical Ecology, 40(4): 387–395
- 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 (in Chinese) [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]
- Wei JL, Pan XH, Huang CH, Shang XK, Lin SH. 2019. Effects of temperature on the development and reproduction of spotted borer *Chilo sacchariphagus* (Lepidoptera: Pyralidae). Journal of Plant Protection, 46(6): 1277–1283 (in Chinese) [魏吉利, 潘雪红, 黄诚华, 商显坤, 林善海. 2019. 温度对甘蔗条螟生长发育和繁殖的影响. 植物保护学报, 46(6): 1277–1283]
- Wei SH, Zhu MM, Zhang R, Huang WG, Yu Z. 2013. Effects of temperature on the development and reproduction of *Chrysolina aeruginosa* (Coleoptera: Chrysomelidae). Acta Entomologica Sinica, 56(9): 1004–1009 (in Chinese) [魏淑花, 朱猛蒙, 张蓉, 黄文广, 于钊. 2013. 温度对沙蒿金叶甲生长发育和繁殖的影响. 昆虫学报, 56(9): 1004–1009]
- Xu ZY, Zhu TX, Song JZ. 1982. *Galleria mellonella* and control research. Apiculture of China, 33(5): 24–27, 20 (in Chinese) [徐祖荫, 朱同兴, 宋景昭. 1982. 大蜡螟及其防治研究. 中国养蜂, 33(5): 24–27, 20]
- Yang S, Zhang XW, Song WF, Miao CH, Zhao HT, Jiang YS. 2016. Review of the biological and control methods on *Galleria mellonella* L. Apiculture of China, 67(3): 33–37 (in Chinese) [杨爽, 张学文, 宋文菲, 苗春辉, 赵慧婷, 姜玉锁. 2016. 大蜡螟生物学特性及其防治研究概述. 中国蜂业, 67(3): 33–37]
- Yang S, Zhao HT, Xu K, Guo LN, Du YL, Li XY, Su WT, Feng YJ, Long DL, Jiang YS. 2019. Analysis of the antennal transcriptome and olfaction-related genes of the greater wax moth *Galleria mellonella* (Lepidoptera: Pyralidae). Chinese Journal of Applied Entomology, 56(6): 1279–1291 (in Chinese) [杨爽, 赵慧婷, 徐凯, 郭丽娜, 杜亚丽, 李新宇, 苏文婷, 冯宇佳, 龙登隆, 姜玉锁. 2019. 大蜡螟触角转录组及嗅觉相关基因分析. 应用昆虫学报, 56(6): 1279–1291]
- Zhang TW, Zhang DP, Qi FM, Hu QD, Zhang YX, Shi L, Liu CZ. 2020. Influence of temperature on the development and reproduction of *Galleria mellonella* L. Biotic Resources, 42(3): 349–353 (in Chinese) [张廷伟, 张东鹏, 漆富苗, 胡启迪, 张育霞, 史历, 刘长仲. 2020. 温度对大蜡螟生长发育和繁殖的影响. 生物资源, 42(3): 349–353]
- Zhang XX. 2002. Insect ecology and forecasting. Beijing: China Agriculture Press, pp. 218–220 (in Chinese) [张孝羲. 2002. 昆虫生态及预测预报. 北京: 中国农业出版社, pp. 218–220]
- Zhao J. 2010. Indoor artificial breeding techniques and biological observations of *Galleria mellonella*. Anhui Agricultural Science Bulletin, 16(10): 38–40, 119 (in Chinese) [赵军. 2010. 大蜡螟的室内人工饲养技术及生物学观察. 安徽农学通报, 16(10): 38–40, 119]

(责任编辑:张俊芳)