

锈赤扁谷盗非成熟发育阶段在 3 种谷物中的发育历期及预测模型研究

曾芳芳¹, 肖惠惠¹, 王殿轩^{1*}, 唐培安²

(1. 河南工业大学粮食和物资储备学院, 国家粮食产业(仓储害虫防控)技术创新中心, 粮食储运国家工程研究中心, 郑州 450001; 2. 江苏省现代粮食流通与安全协同创新中心, 南京 210023)

摘要 温度和食物是影响昆虫生长发育的两个重要因素。本文测定了 24、28℃ 和 32℃ 条件下锈赤扁谷盗 *Cryptolestes ferrugineus* (Stephens) 非成熟发育阶段(卵、幼虫和蛹)在全麦粉、玉米粉和糙米粉中的存活率和发育历期。研究结果显示, 试验温度范围内, 温度升高, 锈赤扁谷盗幼虫和整个非成熟发育阶段的存活率显著升高, 卵、幼虫、蛹及整个非成熟发育阶段的历期显著缩短。在 32℃ 时全麦粉中非成熟阶段总发育历期最短、存活率最高, 为 34.2 d 和 60.9%。用最小二乘法计算各阶段发育起点温度和有效积温, 结果显示, 3 种谷物对锈赤扁谷盗卵、幼虫、蛹及整个非成熟阶段的发育起点温度没有显著影响, 但对幼虫阶段有效积温有显著影响; 在全麦粉、玉米粉和糙米粉中锈赤扁谷盗整个非成熟发育阶段的发育起点温度分别为 (17.4 ± 0.3) (16.9 ± 1.6)℃ 和 (16.4 ± 0.7) ℃; 有效积温分别为 (773.4 ± 0.1) (888.0 ± 125.2) 日·度和 $(1\ 009.3 \pm 61.9)$ 日·度。最后, 根据不同温度下锈赤扁谷盗各发育阶段在 3 种谷物中的发育速率分别建立了发育速率预测模型。研究结果为锈赤扁谷盗在不同储粮环境中发生的短期精准预报提供了科学依据。

关键词 锈赤扁谷盗; 谷物; 发育历期; 发育起点温度; 有效积温; 预测模型

中图分类号: S 379.5 **文献标识码:** A **DOI:** 10.16688/j.zwbh.2022153

Developmental durations and prediction model of immature stage of the rusty grain beetle *Cryptolestes ferrugineus* (Stephens) in three kinds of grains

ZENG Fangfang¹, XIAO Huihui¹, WANG Dianxuan^{1*}, TANG Peian²

(1. School of Food and Strategic Reserves, National Grain Industry (Storage Insect Pest Control) Technology Innovation Center, Grain Storage and Logistics National Engineering Research Center, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China; 2. Jiangsu Collaborative Innovation Center of Modern Grain Circulation and Safety, Nanjing 210023, China)

Abstract Temperature and diet are two important factors affecting the development of stored-product pests. The survival rates and developmental durations of immature stage (egg, larva, and pupa) of *Cryptolestes ferrugineus* (Stephens) fed on whole wheat flour, corn flour and brown rice flour were examined at 24, 28℃ and 32℃. The results showed that the survival rate of larva and total immature stage significantly increased, and the developmental duration of egg, larva, pupa, and total immature stage of *C. ferrugineus* significantly shortened in the experimental temperature range. At 32℃, the total developmental duration of the immature stage in the whole wheat flour was the shortest (34.2 d), and the survival rate was the highest (60.9%). Then, the developmental threshold temperature and effective accumulative temperature for each developmental stages were calculated by least squares method. There were no significant differences in the developmental threshold temperature of egg, larva, pupa and the total immature stage in different cereals, but the effective accumulated

收稿日期: 2022-03-24 修订日期: 2022-05-11

基金项目: 河南工业大学青年骨干教师培育计划; 国家自然科学基金(32001914); 河南工业大学高层次人才科研启动基金(2018BS071)

* 通信作者 E-mail: wangdianxuan62@126.com

temperature of the larval stage was significantly varied; the developmental threshold temperature and degree-day accumulation were different in different grains for total immature stage: $(17.4 \pm 0.3)^{\circ}\text{C}$ and (773.4 ± 0.1) degree-days in whole wheat flour; $(16.9 \pm 1.6)^{\circ}\text{C}$ and (888.0 ± 125.2) degree-days in corn flour; and $(16.4 \pm 0.7)^{\circ}\text{C}$ and $(1\ 009.3 \pm 61.9)$ degree-days in brown rice flour, respectively. Finally, the development rate prediction models were established according to the development rate of each stage in three kinds of grains at different temperatures. The results provide a scientific basis for the short-term accurate prediction of the occurrence of the rusty grain beetle in different grain storage bins.

Key words *Cryptolestes ferrugineus*; grains; developmental duration; developmental threshold temperature; effective accumulative temperature; prediction model

害虫测报是对害虫进行科学防控的基础,明确害虫不同生长阶段的发育历期在害虫预测预报中具有重要作用^[1]。温度是影响昆虫生长发育的重要因素,温度与昆虫增长速率的关系模型可用来解释温度对其发育速率的影响^[2]。而研究昆虫卵、幼虫、蛹、成虫等生长阶段的发育历期,计算有效积温并构建不同发育阶段的预测模型,可根据温度对该虫的下一发育阶段或下一代的发生时期进行预测^[3]。目前国内大多数储粮仓房仍为常温仓,在害虫易发的夏季,仓房温度一般在 $24 \sim 32^{\circ}\text{C}$ ^[4]。由于食物的选择范围有限,食物类型可能是影响仓储害虫生长发育的另一重要因素^[5]。目前,小麦、玉米和稻谷为我国 3 大主要储粮,玉米和小麦以原粮储存为主,稻谷的储存形式部分向糙米转变^[6]。明确储粮害虫在仓储温度条件下及储藏粮食中的生长发育对于掌握储粮害虫的发生规律并制定科学有效的防治策略具有重要意义。

锈赤扁谷盗 *Cryptolestes ferrugineus* (Stephens) 是一种世界性的常见害虫,也是我国重要的储粮害虫,其成虫和幼虫均可受害破碎粮食、豆类、油料等。当此害虫种群密度较大时易引起储粮发热霉变,影响粮食安全储藏,造成经济和粮食质量损失^[7]。已知温度会显著影响其生长发育^[8],但食物不同所导致的生长发育的差异还未见报道。基于此,本文研究了在 24 、 28 、 32°C 下锈赤扁谷盗非成熟阶段(卵、幼虫、蛹)分别在全麦粉、玉米粉和糙米粉中的存活率与发育历期,构建卵、幼虫、蛹基于温度的发育预测模型,以期对锈赤扁谷盗的发生、发展进行预测预报,为该害虫的科学防控提供参考。

1 材料与方法

1.1 供试昆虫

试验所用锈赤扁谷盗采自河南省新乡市某粮

库,在河南工业大学储藏物昆虫研究室,用 500 mL 的透明玻璃培养瓶(高 12.5 cm,直径 7.4 cm),于 $(28 \pm 1)^{\circ}\text{C}$ 、相对湿度 $(75 \pm 5)\%$ 和全黑暗环境条件下以标准饲料(全麦粉:燕麦:酵母:碎麦 = 5:3:1:1,质量比)饲养。试验前将羽化 2 周的约 500 头锈赤扁谷盗成虫转移至 200 g 全麦粉中,24 h 后将成虫和全麦粉过筛转出,得到 1 日龄的卵,取健康卵粒作为试虫。

1.2 试验方法

将供试卵放入 48 孔板中,每孔 1 粒卵,孔内放入约 1 g 全麦粉、玉米粉或糙米粉后置于培养箱中(型号:SHF-350,上海精宏试验设备有限公司),分别在恒定温度 24 、 28°C 和 32°C ,相对湿度 $(70 \pm 5)\%$,全黑暗条件下培养观察。每天用体式显微镜观察 2 次,并记录孵化、蜕皮、化蛹、羽化及存活情况。每处理重复 3 次,每重复统计 25 粒卵,最后计算各阶段(卵、幼虫、蛹及整个非成熟阶段)的存活率与发育历期。

1.3 数据统计分析

对存活率进行数据统计分析时,先将百分数进行反正弦平方根转换,再采用 SPSS 20.0 统计软件对不同处理间的存活率和发育历期进行温度和食物的双因素方差分析,Bonferroni 法多重比较。

在计算卵、幼虫、蛹和整个非成熟阶段的发育起点温度(C)和有效积温(K)时将不同温度下发育历期(N)换算成发育速率($V=1/N$),采用最小二乘法分别计算^[9]统计,计算公式为:

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

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

$$T' = C + KV,$$

$$\bar{V} = \frac{\sum V}{n},$$

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

$$S_K = \sqrt{\frac{\sum(T-T')^2}{(n-2)\sum(V-\bar{V})^2}}$$

式中, N 为发育历期; K 为有效积温; T 为环境温度; T' 为理论日均温度; V 为发育速度; C 为发育起点温度; S_K 为有效积温 K 的标准误差; S_C 为发育起点温度 C 的标准误差; n 为试验温度组数。

使用一元线性回归法建立不同温度下锈赤扁谷盗非成熟发育阶段的发育速率的预测模型($V=a+bT$, a 、 b 为模型参数, V 为各发育阶段的发育速率, T 为温度), 通过 F 检验确定线性模型的拟合效果。

2 结果与分析

2.1 不同温度和食物条件下锈赤扁谷盗非成熟发育阶段的存活率

锈赤扁谷盗卵、幼虫和蛹在不同温度处理下在 3 种谷物中的存活率如表 1 所示。双因素方差分析表明, 温度对锈赤扁谷盗卵的存活率存在显著影响($F_{2,18}=5.708, P=0.012$), 糙米粉中卵在 32℃ 条件下的存活率显著高于 24℃ 下, 但 24℃ 和 28℃ 之间以及 28℃ 和 32℃ 之间卵存活率无显著差异; 玉米粉和全麦粉中卵在不同温度条件下的存活率差异不显著。食物对卵的存活率没有显著影响($F_{2,18}=3.233, P=0.063$), 且温度和食物之间不存在交互作用($F_{4,18}=0.864, P=0.504$)。

温度和食物均显著影响幼虫存活率(温度: $F_{2,18}=206.583, P<0.001$; 食物: $F_{2,18}=27.528, P<0.001$)。在 24℃ 和 28℃ 条件下, 取食全麦粉的幼虫存活率显著高于取食玉米粉和糙米粉, 取食玉米粉和糙

米粉的幼虫存活率差异不显著; 在 32℃ 条件下, 取食全麦粉和玉米粉的幼虫存活率差异不显著, 但都显著高于取食糙米粉的幼虫存活率。温度和食物两个因素之间不存在交互作用($F_{4,18}=2.569, P=0.073$)。

温度和食物均显著影响蛹的存活率(温度: $F_{2,18}=10.876, P=0.001$; 食物: $F_{2,18}=11.269, P=0.001$)。24℃ 条件下, 3 种谷物处理的蛹存活率无显著差异; 28℃ 条件下, 玉米粉和全麦粉处理的蛹存活率显著高于糙米粉; 32℃ 条件下, 全麦粉处理的蛹存活率显著高于糙米粉和玉米粉。温度和食物之间不存在交互作用($F_{4,18}=2.051, P=0.130$)。

温度和食物均显著影响锈赤扁谷盗整个非成熟发育阶段的存活率(温度: $F_{2,18}=211.239, P<0.001$; 食物: $F_{2,18}=46.266, P<0.001$)。不同温度下, 取食不同谷物的锈赤扁谷盗整个非成熟发育阶段存活率存在显著差异, 全麦粉中最高, 玉米粉中次之, 糙米粉中最低; 且存活率均随温度的上升显著升高。温度和食物之间不存在交互作用($F_{4,18}=1.789, P=0.175$)。

总的来看, 糙米粉中锈赤扁谷盗非成熟阶段的存活率最低, 其中又以幼虫的存活率最低, 在 24、28℃ 和 32℃ 下, 幼虫的平均存活率分别为 47.0%、57.7% 和 65.7%; 其次是蛹, 对应温度下的平均存活率分别为 77.3%、76.0% 和 83.7%; 卵的存活率最高, 对应温度下的平均存活率分别为 95.0%、96.3% 和 98.3%。在 32℃ 条件下取食全麦粉的试虫的卵、幼虫、蛹及整个非成熟发育阶段存活率最高, 平均存活率分别为 99.3%、70.0%、88.0% 和 60.9%。

表 1 锈赤扁谷盗在不同谷物和温度下的存活率¹⁾

Table 1 Survival rates of *Cryptolestes ferrugineus* at different temperatures fed on different grains

温度/℃ Temperature	谷物 Grain	存活率/% Survival rate			
		卵 Egg	幼虫 Larva	蛹 Pupa	整个非成熟发育阶段 Total immature stage
24	糙米粉	(95.0±1.2)aB	(47.0±2.0)bC	(77.3±1.9)aB	(34.7±0.8)cC
	玉米粉	(97.3±0.9)aA	(47.7±1.3)bC	(83.0±1.5)aA	(38.2±1.2)bC
	全麦粉	(96.3±0.3)aA	(54.0±0.6)aC	(80.7±3.0)aB	(41.8±1.2)aC
28	糙米粉	(96.3±0.7)aAB	(57.7±1.5)bB	(76.0±1.0)bB	(42.2±1.2)cB
	玉米粉	(98.0±1.0)aA	(59.3±0.9)bB	(83.7±0.3)aA	(48.9±1.2)bB
	全麦粉	(98.7±0.9)aA	(66.7±0.9)aB	(83.3±0.7)aAB	(54.7±0.8)aB
32	糙米粉	(98.3±0.7)aA	(65.7±0.9)bA	(83.7±0.3)bA	(53.8±0.9)cA
	玉米粉	(98.3±0.7)aA	(69.3±0.7)aA	(84.3±0.3)bA	(57.3±0.8)bA
	全麦粉	(99.3±0.3)aA	(70.0±0.6)aA	(88.0±1.7)aA	(60.9±1.7)aA

1) 表中数据为平均值±标准误。整个非成熟发育阶段的存活率为卵、幼虫和蛹存活率的乘积。不同小写字母和大写字母分别表示在相同温度下不同谷物间和相同谷物中不同温度间存活率差异显著(Bonferroni, $P<0.05$)。

The data presented in the table are mean±SE. The survival rate of the total immature stage is the product of the survival rates of eggs, larvae, and pupae. Different lowercase and capital letters indicate significant differences of survival rate among different grains at the same temperature and among different temperatures in the same grain, respectively (Bonferroni, $P<0.05$).

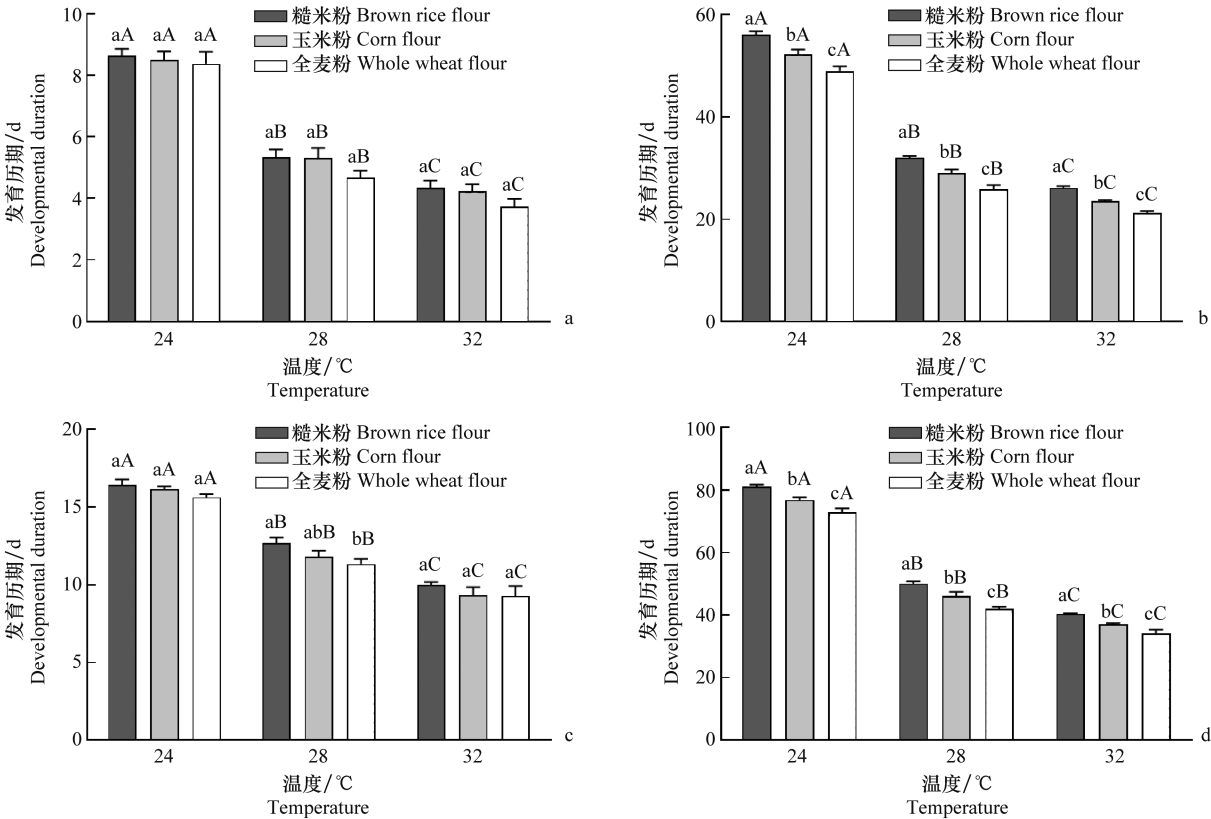
2.2 不同温度和食物条件下锈赤扁谷盗非成熟阶段的发育历期

统计分析结果显示:温度显著影响锈赤扁谷盗卵的发育历期,而食物不影响卵的发育历期(温度: $F_{2,18}=209.876$, $P=0.000$;食物: $F_{2,18}=2.992$, $P=0.076$)。在相同温度下,不同谷物中卵的发育历期无显著差异;随着温度的升高,不同谷物中卵的发育历期均显著缩短。在 32℃ 条件下卵的发育历期为 3.7~4.3 d,而在 24℃ 条件下卵的发育历期为 8.4~8.6 d(图 1a),时间缩短了近一半。

温度和食物对锈赤扁谷盗幼虫的发育历期均存在显著影响(温度: $F_{2,18}=1\,622.947$, $P<0.001$;食物: $F_{2,18}=62.827$, $P<0.001$)。随着温度升高,幼虫发育历期显著缩短。32℃ 条件下,取食糙米粉、玉

米粉和全麦粉的幼虫平均发育历期分别为 26.1、23.5 d 和 21.2 d,与 28℃ 条件下相比缩短了 5.9、5.6 d 和 4.7 d,和 24℃ 条件下相比缩短了 29.9、28.6 d 和 27.8 d。在相同温度下,幼虫均表现为取食糙米粉的发育历期最长,取食全麦粉的发育历期最短;在 24℃ 条件下两者发育历期相差最大,为 7.0 d(图 1b)。

温度和食物对锈赤扁谷盗蛹的发育历期均存在显著影响(温度: $F_{2,18}=222.123$, $P=0.000$;食物: $F_{2,18}=4.732$, $P=0.022$)。随着温度的升高,不同谷物中的蛹发育历期均显著缩短。28℃ 条件下,全麦粉中蛹的发育历期显著低于糙米粉,玉米粉、糙米粉中蛹的发育历期无显著差异;在其他温度条件下,不同谷物中蛹的发育历期无显著差异(图 1c)。



a: 卵; b: 幼虫; c: 蛹; d: 整个非成熟发育阶段。图中数据为平均值±标准误。不同小写字母和大写字母分别表示在相同温度下不同谷物间和相同谷物中不同温度间发育历期差异显著(Bonferroni, $P<0.05$)。
a: Egg; b: Larva; c: Pupa; d: Total immature stage. The data presented in the chart are mean ± SE. Different lowercase and capital letters indicate significant differences of developmental durations among different grains at the same temperature and among different temperatures in the same grain, respectively (Bonferroni, $P<0.05$).

图 1 锈赤扁谷盗非成熟阶段在不同温度、不同谷物中的发育历期
Fig. 1 Developmental durations of the immature stage of *Cryptolestes ferrugineus* in different grains at different temperatures

在卵、幼虫、蛹的发育过程中,温度与食物对其发育历期均不存在交互作用(卵: $F_{4,18}=0.258$, $P=0.901$;幼虫: $F_{4,18}=0.700$, $P=0.602$;蛹: $F_{4,18}=$

0.310, $P=0.867$)。对整个非成熟阶段进行综合分析可知,温度和食物都对锈赤扁谷盗非成熟阶段总发育历期存在显

著影响(温度: $F_{2,18}=1\,806.766$, $P<0.001$; 食物: $F_{2,18}=58.246$, $P<0.001$)。随着温度的升高,不同谷物处理下总发育历期均显著缩短;在相同温度下,总发育历期表现为取食全麦粉的试虫最短,在 24、28℃和 32℃条件下分别为 73.0、41.9 d 和 34.2 d;取食糙米粉的总发育历期最长,在 24、28℃和 32℃条件下分别为 81.1、50.1 d 和 40.5 d(图 1d)。温度与食物之间也不存在交互作用($F_{4,18}=0.436$, $P=0.781$)。

2.3 锈赤扁谷盗非成熟发育阶段的发育起点温度
和有效积温及温度模型预测

3 种谷物中锈赤扁谷盗非成熟发育阶段的发育起点温度和有效积温如表 2 所示。在整个非成熟发育阶段,蛹的发育起点温度最低,幼虫的最高;对有

效积温来说,也是幼虫最大。3 种不同谷物对同一发育阶段的发育起点温度没有显著影响(卵: $F_{2,6}=0.465\,8$, $P=0.649$;幼虫: $F_{2,6}=0.846$, $P=0.475$;蛹: $F_{2,6}=0.751$, $P=0.512$;整个非成熟阶段: $F_{2,6}=0.239$, $P=0.795$),但对幼虫阶段的有效积温有显著影响($F_{2,6}=9.039$, $P=0.016$),取食糙米粉的幼虫所需有效积温比取食全麦粉的幼虫所需有效积温的平均值高 94.2 日·度。

应用线性模型拟合锈赤扁谷盗非成熟发育阶段的发育速率(V)与温度(T)的关系,模型参数如表 3 所示,锈赤扁谷盗非成熟发育阶段的发育速率与温度显著相关($P<0.05$),表明在 24~32℃范围内可以根据温度使用线性回归模型预测锈赤扁谷盗卵、幼虫和蛹及整个非成熟发育阶段的发育历期。

表 2 锈赤扁谷盗非成熟发育阶段的发育起点温度及有效积温

Table 2 Developmental threshold temperature and effective accumulative temperature of <i>Cryptolestes ferrugineus</i> at immature stages			
发育阶段 Developmental stage	谷物 Grain	发育起点温度/℃ Developmental threshold temperature	有效积温/日·度 Effective accumulative temperature
卵 Egg	糙米粉	16.8±1.4	62.8±7.3
	玉米粉	17.0±1.4	60.5±7.3
	全麦粉	18.4±1.3	47.3±5.8
幼虫 Larva	糙米粉	17.0±0.8	377.9±27.1
	玉米粉	17.4±0.2	330.3±0.3
	全麦粉	18.0±0.3	283.7±0.4
蛹 Pupa	糙米粉	12.1±1.1	199.0±12.9
	玉米粉	14.5±1.6	159.5±17.9
	全麦粉	14.2±1.8	159.1±19.8
整个非成熟发育阶段 Total immature stage	糙米粉	16.4±0.7	1 009.3±61.9
	玉米粉	16.9±1.6	888.0±125.2
	全麦粉	17.4±0.3	773.4±0.1

表 3 不同谷物中锈赤扁谷盗非成熟发育阶段的发育速率与温度关系的数学模型参数¹⁾

Table 3 Mathematical model parameters describing the relationships between developmental rate of <i>Cryptolestes ferrugineus</i> at immature stages and temperature in different grains				
谷物 Grain	发育阶段 Developmental stage	线性模型 Linear model		
		模型参数 a Model parameter a	模型参数 b Model parameter b	决定系数(R ²) Coefficient of determination
糙米粉 Brown rice flour	卵	−0.015	0.228	0.913 *
	幼虫	0.042	0.003	0.965 *
	蛹	−0.057	0.005	0.972 *
	整个非成熟发育阶段	−0.016	0.001	0.974 *
玉米粉 Corn flour	卵	−0.238	0.015	0.908 *
	幼虫	−0.050	0.003	0.964 *
	蛹	−0.076	0.006	0.915 *
	整个非成熟发育阶段	−0.018	0.001	0.971 *
全麦粉 Whole wheat flour	卵	−0.326	0.019	0.893 *
	幼虫	−0.058	0.003	0.948 *
	蛹	−0.070	0.006	0.891 *
	整个非成熟发育阶段	−0.021	0.001	0.953 *

1) “*”表示线性模型经过 F 测验后模型拟合效果达到显著水平($P<0.05$)。
“*” indicates a significant fitting effect of the linear model by F-test ($P<0.05$).

3 结论与讨论

温度和食物是影响昆虫生长发育的两个重要因素。本文结果显示,温度和谷物种类都会影响锈赤扁谷盗非成熟发育阶段的存活率和发育历期,但两因素之间不存在交互作用。在 24~32℃ 范围内,锈赤扁谷盗非成熟阶段发育历期随温度升高而明显缩短,幼虫和整个非成熟发育阶段存活率随着温度升高显著增加,在 32℃ 时卵、幼虫、蛹及整个非成熟发育阶段存活率最高,这与 15~32℃ 条件下在全麦粉中的研究结果类似^[10]。全麦粉中的锈赤扁谷盗在 24、28℃ 和 32℃ 时整个非成熟阶段的总发育历期平均为 73.0、41.9 d 和 34.2 d(图 1d),要低于源丽枫^[10]在相同条件下测得的 126.7、81.1 d 和 49.3 d,这可能与试虫地理品系以及食物不同有关。

食物为昆虫生存提供必需的能源物质,谷物种类不同,其所包含的营养物质以及微量元素不同等都可能引起昆虫生长发育的差异,从而显著影响昆虫的发育历期和存活率^[11-17]。在 33℃,相对湿度 65% 下,谷斑皮蠹 *Trogoderma granarium* 幼虫和蛹在大麦中的发育历期比在核桃中缩短了近 30 d,存活率升高了 20%^[11];比较麦蛾 *Sitotroga cerealella* 在大麦、玉米、黑麦、高粱、黑小麦和小麦中的发育历期,结果显示取食小麦和黑小麦的麦蛾幼虫和蛹的发育历期最短,取食高粱的最长^[17]。本研究结果显示,谷物不同对锈赤扁谷盗整个非成熟阶段的发育历期影响显著,其中对幼虫的影响最大,在 24℃ 时,在全麦粉中幼虫的发育历期比在糙米粉中缩短近 7.0 d,原因是幼虫是非成熟阶段的唯一取食阶段,其发育历期与营养条件密切相关。在 24、28℃ 和 32℃ 条件下全麦粉中蛹的发育历期比糙米粉中均缩短约 1 d,虽然蛹期不取食,但生长发育会受到幼虫期营养摄入的影响,卵期不取食,因而谷物种类不影响卵的发育历期。从结果中还可以看出,锈赤扁谷盗卵、幼虫和蛹在全麦粉中的存活率最高,发育历期最短,这可能与之前饲养时主要采用全麦粉,试虫对其适应性较强有关。值得关注的是,在 24℃ 和 28℃ 时,玉米粉和糙米粉饲养的幼虫存活率无显著差异,且显著低于全麦粉饲养的幼虫存活率,当温度升高到 32℃ 时,玉米粉饲养的幼虫存活率显

著高于糙米粉饲养的幼虫存活率,与全麦粉饲养的幼虫存活率无显著差异,推测可能是不同温度下锈赤扁谷盗幼虫体内消化酶的活性不同导致幼虫对不同谷物营养成分代谢存在差异^[18],还有待更进一步研究。

发育起点温度和有效积温是昆虫最基本的生物学特性,可用于预测其在某一地区的发生时间、发生世代以及各发育阶段的发育历期^[19-21],营养状况、地理差异等都可能对昆虫发育起点温度和有效积温产生影响^[22-24]。本研究计算并比较了锈赤扁谷盗非成熟发育阶段在 3 种谷物中的发育起点温度和有效积温。结果显示,蛹的发育起点温度最低,说明锈赤扁谷盗蛹对环境的适应能力更强;在不同谷物中生长的幼虫所需有效积温差异较大,这与幼虫期营养是影响害虫有效积温的主要因素有关^[22],即营养条件在锈赤扁谷盗幼虫的生长发育中起重要作用。

研究昆虫卵、幼虫、蛹和成虫及其世代的发育历期,构建不同发育阶段的预测模型,进而可根据温度对该虫的发生时期进行科学预测。王明洁等^[25]研究发现 15~38℃ 范围内锈赤扁谷盗未成熟阶段的发育预测模型整体呈 S 形曲线,在 24~32℃ 范围内符合直线回归方程,本文得到了类似的结果。但该研究缺少食物对锈赤扁谷盗生长发育的影响以及在不同谷物中锈赤扁谷盗发育速率与温度的关系,因此难以在特定储藏环境内对其进行准确的预测预报。本文研究了在 3 种不同谷物中,3 个仓房常见温度下锈赤扁谷盗非成熟发育阶段的发育进度,建立了各虫态的发育速率的预测模型,用于不同温度下锈赤扁谷盗非成熟发育阶段的发育速率预测,这为针对特定储藏物中锈赤扁谷盗的发生进行准确预测预报提供了必要的数据支撑。

参考文献

- [1] 刘万才,黄冲.我国农作物现代病虫测报建设进展[J].植物保护,2018,44(5):159-167.
- [2] 时培建,池本孝哉,戈峰.温度与昆虫生长发育关系模型的发展与应用[J].应用昆虫学报,2011,48(5):1149-1160.
- [3] 唐业忠,朱建国.发育起点温度的概念和应用问题[J].生态学杂志,1993,12(6):70-72.
- [4] 代永,周晓军,渠琛玲,等.高大平房仓仓顶隔热改造效果分析[J].仓储与物流,2019,44(2):88-89.

- [5] SULEHRIE M A Q. An investigation into different responses of a Pakistani biotype of *Callosobruchus maculatus* (Bruchidae: Coleoptera) to four new varieties of pulses from Pakistan [D]. London: University of Greenwich, 2000.
- [6] 单常尧, 曹阳, 姜彬, 等. 糙米与被锈赤扁谷盗侵染糙米挥发性化合物对比分析[J]. 食品科技, 2020, 45(11): 275–283.
- [7] 王效国, 宋瑞成. 浅谈锈赤扁谷盗的习性与防治[J]. 中国粮食经济, 2009(7): 40–41.
- [8] 郝广凯, 曾伶, 劳传忠, 等. 温度对锈赤扁谷盗生长发育及种群变动的影响[J]. 粮食储藏, 2015, 44(1): 1–5.
- [9] 张永科, 朱国渊, 龙继明, 等. 赤斑白条天牛卵发育历期和有效积温研究[J]. 中国森林病虫, 2021, 40(6): 15–17.
- [10] 源丽枫. 锈赤扁谷盗种群生态控制技术[D]. 广州: 华南农业大学, 2016.
- [11] NASERI B, BORZOU E. Life cycle and digestive physiology of *Trogoderma granarium* (Coleoptera: Dermestidae) on various wheat cultivars [J]. Annals of the Entomological Society of America, 2016, 109(6): 831–838.
- [12] FARDISI M, MASON L J, ILELEJI K E, et al. Effect of chemical and physical properties of dried distillers grains with solubles (DDGS) on *Tribolium castaneum* (Herbst) development [J]. Journal of Stored Products Research, 2019, 80: 57–64.
- [13] ARTHUR F H, HALE B A, STARKUS L A, et al. Development of *Tribolium castaneum* (Herbst) (Coleoptera: Tenebrionidae) on rice milling components and by-products: Effects of diet and temperature [J]. Journal of Stored Products Research, 2019, 80: 85–92.
- [14] 李得宇, 艾鹏鹏, 王军, 等. 不同寄主植物对桃蛀螟种群生长发育和繁殖的影响[C]//吴孔明. 创新驱动与现代植保——中国植物保护学会第十一次全国会员代表大会暨 2013 年学术年会论文集. 北京: 中国农业科技出版社, 2013.
- [15] 龙莹, 刘建萍, 伍绍龙, 等. 不同品种烟草对斜纹夜蛾幼虫生长和营养利用效率的影响[J]. 中国烟草学报, 2020, 26(3): 91–96.
- [16] 袁伊旻, 张雨桐, 孙静, 等. 不同寄主植物对南亚果实蝇发育的影响研究[J]. 农业与技术, 2021, 41(15): 23–26.
- [17] BORZOU E, NASERI B, NOURI-GANBALANI G. Effects of food quality on biology and physiological traits of *Sitotroga cerealella* (Lepidoptera: Gelechiidae) [J]. Journal of Economic Entomology, 2016, 110(1): 266–273.
- [18] 蒋丰泽, 郑灵燕, 郭技星, 等. 温度对昆虫繁殖力的影响及其生理生化机制[J]. 环境昆虫学报, 2015, 37(3): 653–663.
- [19] 何莉梅, 葛世帅, 陈玉超, 等. 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[J]. 植物保护, 2019, 45(5): 18–26.
- [20] 张树怀, 夏秀清, 苏红田, 等. 光肩星天牛发育起点温度和有效积温的研究[J]. 内蒙古农牧学院学报, 1995, 16(2): 45–49.
- [21] 李向永, 尹艳琼, 赵雪晴, 等. 云南不同菜区小菜蛾的产卵规律与发育起点温度[J]. 应用昆虫学报, 2011, 48(2): 254–259.
- [22] 吴孔明, 郭予元. 营养对棉铃虫发育积温的影响[J]. 植物保护, 1994, 20(4): 16–17.
- [23] 陈元生, 罗致迪, 钟平华. 棉铃虫发育起点温度和有效积温的地理变异[J]. 环境昆虫学报, 2017, 39(3): 573–579.
- [24] 刘婷, 金道超, 郭建军, 等. 腐食酪螨在不同温度和营养条件下生长发育的比较研究[J]. 昆虫学报, 2006, 49(4): 714–718.
- [25] 王明洁, 蔡婷婷, 鞠兴荣, 等. 不同氮气浓度、温度条件下锈赤扁谷盗未成熟阶段各虫态的发育[J]. 粮食储藏, 2015, 44(2): 1–6.

(责任编辑: 杨明丽)

(上接 120 页)

- [29] MOTOYAMA T, OHIRA T, KADOKURA K, et al. An Os-1 family histidine kinase from a filamentous fungus confers fungicide-sensitivity to yeast [J]. Current Genetics, 2005, 47(5): 298–306.
- [30] 张学江, 常威, 陈婷婷, 等. 1.5%啞菌酯·咯菌腈颗粒剂防治辣椒根腐田间药效试验[J]. 现代农业科技, 2020(23): 81–82.
- [31] 普继雄, 周宗山, 王娜, 等. 弥勒市葡萄灰霉病菌对 4 种杀菌剂的抗药性检测[J]. 果树学报, 2021, 38(7): 1147–1152.
- [32] 贡常委, 秦旻旻, 屈劲松, 等. 四川省草莓灰霉病菌对咯菌腈的抗性测定及其机制[J]. 中国农业科学, 2018, 51(22): 4277–4287.
- [33] 贾娇, 苏前富, 孟玲敏, 等. 抗咯菌腈禾谷镰刀菌的紫外诱导及其生物学特性[J]. 植物保护, 2016, 42(4): 43–47.
- [34] 李亚萌. 北京地区番茄灰霉病菌对咯菌腈的抗性风险评估[D]. 北京: 北京农学院, 2020.
- [35] 桑程巍. 设施栽培草莓灰葡萄孢(*Botrytis cinerea*)对咯菌腈抗药性检测及其生物学性质[D]. 南京: 南京农业大学, 2018.
- [36] 王秋月, 马冠华, 尹学伟, 等. 重庆地区辣椒疫霉对氟吡菌胺的敏感性及其抗性突变体的生物学性状[J]. 农药学报, 2019, 21(2): 165–174.
- [37] 管磊, 郭贝贝, 王晓坤, 等. 苯醚甲环唑等杀菌剂包衣种子防治花生冠腐病和根腐病[J]. 植物保护学报, 2016, 43(5): 842–849.
- [38] 徐建强, 平忠良, 马世闯, 等. 河南省小麦赤霉病菌对咯菌腈的敏感性[J]. 植物保护学报, 2018, 45(6): 1367–1373.
- [39] 韩絮. 玉米小斑病菌(*Bipolaris maydis*)对苯基吡咯类杀菌剂咯菌腈潜在抗药性风险评估[D]. 南京: 南京农业大学, 2017.

(责任编辑: 杨明丽)