

# 嗜虫书虱种群增长模型的研究\*

王争艳\*\* 何梦婷 鲁玉杰\*\*\*

(河南工业大学粮油食品学院, 郑州 450001)

**摘 要** 【目的】构建嗜虫书虱 *Liposcelis entomophila* (Enderlein) 在不同环境条件下的种群增长模型, 为粮库书虱种群预测预报提供基础数据和理论模型。【方法】通过构建嗜虫书虱实验种群生命表, 分析温度、湿度、食物破碎率和种群初始密度对嗜虫书虱种群数量动态的影响, 验证种群的指数增长模型, 并拟合温湿度与内禀增长率的函数关系。【结果】在温度 26-34℃, 湿度 65%-85%, 食物破碎率 4%-12% 的条件下, 温度和湿度对发育历期有显著影响, 三者对种群数量趋势指数、净增殖率、内禀增长率的影响均不显著。三者对种群增长影响的主次顺序为: 温度 > 湿度和食物破碎率。嗜虫书虱种群增长的最适条件为温度 34℃、相对湿度 85%、食物破碎率 12%。当种群初始密度为 0.26-1.04 头/cm<sup>2</sup> 时, 嗜虫书虱种群数量呈指数增长。【结论】在 22-34℃, 相对湿度 65%-85% 的环境中, 嗜虫书虱种群数量动态与温度和湿度的关系可以拟合为  $N_t = N_0 \exp[(0.00296T + 0.02167RH - 0.0372)t]$ 。

**关键词** 储粮书虱; 温度; 相对湿度; 食物破碎率; 种群初始密度; 生命表; 种群增长模型

## A population growth model for *Liposcelis entomophila* (Enderlein) (Psocoptera: Liposcelidae)

WANG Zheng-Yan\*\* HE Meng-Ting LU Yu-Jie\*\*\*

(School of Food Science and Technology, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract** [Objectives] To provide basic data and theoretical models for the population forecasting of stored grain psocids. [Methods] Population growth models of *Liposcelis entomophila* (Enderlein) were built under different environmental conditions. On the basis of age-stage life tables of *L. entomophila* constructed in the laboratory, the effects of temperature, relative humidity, food breakage level and initial population number on population dynamics were evaluated. Exponential growth models of *L. entomophila* population were validated and the functional relationship between temperature, humidity and intrinsic rate of increase was modelled. [Results] Within a temperature range of 26-34°C, relative humidity of 65%-85% and a food breakage level of 4%-12%, temperature and relative humidity had significant effects on the developmental duration of *L. entomophila*, but not on the population trend index, net reproduction, or the intrinsic rate of increase. Temperature was the most important factor in the population growth of *L. entomophila*, followed by relative humidity and food breakage level. The optimum conditions for population growth are 34°C, 85% relative humidity and 12% food breakage. With an initial population density of 0.26-1.04 adults/cm<sup>2</sup>, an exponential growth model can be used to describe population growth. [Conclusion] Within a temperature range of 22-34°C and a relative humidity of 65%-85%, the relationship between temperature, humidity and population dynamics of *L. entomophila* can be expressed as  $N_t = N_0 \exp[(0.00296T + 0.02167RH - 0.0372)t]$ .

**Key words** stored grain psocids; temperature; relative humidity; food breakage level; initial population density; life table; population growth model

\*资助项目 Supported projects: 国家自然科学基金项目 (31601890); 河南省科技公关项目 (202102110059); 河南工业大学河南省省属高校基本科研业务费专项资金 (2016XTCX01)

\*\*第一作者 First author, E-mail: zywangedu@163.com

\*\*\*通讯作者 Corresponding author, E-mail: luyujie1971@163.com

收稿日期 Received: 2019-04-10; 接受日期 Accepted: 2019-08-14

嗜虫书虱 *Liposcelis entomophila* (Enderlein) 是我国粮库中最常见的书虱。相对于其取食带来的直接损失,人们更关注其给粮食及其制品带来的卫生问题。储粮书虱通常发生在水分含量高、有霉菌污染的储藏物中,且食性复杂。书虱对种子粮危害严重,常取食其胚芽部分 (Gautam *et al.*, 2013)。温度适宜时,在 9 个月的储藏期内可吃掉 80% 的小麦胚芽。书虱大量发生时严重污染粮食,若不及时处理将会使原粮遭受巨大的损失 (Nayak *et al.*, 2014)。近年,在我国目前广泛采用的“双低”(低氧、低药剂)和“三低”(低氧、低药剂、低温)储粮中,书虱普遍发生,已上升为气调和药剂熏蒸储粮生态环境中的优势种群 (程伟霞等, 2003; Nayak and Collins, 2008)。

种群数量动态影响因子的研究可以为害虫种群动态的预测预报和防治策略的制定提供理论依据。应用生命表方法研究各种环境因素对昆虫生长、存活和繁殖的影响,可以用于评价环境因子对昆虫种群数量动态的影响 (刘家莉等, 2009; 岳健等, 2009; 李定旭等, 2010; 吴浩等, 2017)。利用种群数量趋势指数组建以作用因子为组配的生命表,可以综合分析各类因子如天敌、药剂防治对种群数量发生的作用程度 (张孝羲, 2002)。研究表明,环境温度、相对湿度、食物的含水量对储粮害虫的种群增长具有显著的影响 (Mashaya, 2000; Throne and Flinn, 2013; 王森和王小奇, 2015)。对于粉食性的书虱,食物的种类及其质量对其生长发育也有一定的影响 (Athanassiou *et al.*, 2010)。因此,进一步明确环境因素对书虱种群增长的影响对于种群预测预报和生态防治策略的制定均具有重要的意义。

粮库通常根据嗜虫书虱而非蛀食性主要储粮害虫 (如谷蠹和玉米象) 的发生数量来判断是否采取防治手段 (Phillips and Throne, 2010)。因此,本文通过研究温度、湿度和食物破碎率对嗜虫书虱种群增长的影响 (Dong *et al.*, 2007), 探讨嗜虫书虱种群数量增长模型, 以期对书虱种群数量动态的预测预报和生态防治提供理论依据。此外,不同于大田环境,储粮环境的温湿度

通常较为稳定 (刘兴龙等, 2011)。尤其是在南方高温高湿地区,嗜虫书虱可以常年持续增长。因此,进一步拟合温湿度与内禀增长率的函数关系,可提高种群增长模型在种群数量预测预报中的应用价值。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试虫源

嗜虫书虱品系采自广东湛江,用过 100 目筛的人工饲料(全麦粉:酵母粉:脱脂奶粉 = 10:1:1)饲养嗜虫书虱 10 代以上。饲养条件:温度 ( $30 \pm 2$ )、相对湿度  $75\% \pm 2\%$ 。

### 1.2 环境因素对嗜虫书虱种群发育的影响

选取温度 (A)、相对湿度 (B)、食物破碎率 (C) 3 个因素进行正交设计来评价环境因素对嗜虫书虱种群增长的影响。每个因素取 3 个水平,采用  $L_9(3^3)$  正交表,共设置 9 个环境组合 (表 1)。利用培养箱设置 3 个温度, 26、30、34; 在干燥器中分别放入溴化钠、碘化钾和氯化钠的过饱和溶液将相对湿度调整为 65%、75%和 85%; 将过 100 目筛的人工饲料 (全麦粉:酵母粉:脱脂奶粉 = 10:1:1) 与完整的小麦粒按照不同的质量比进行混合,制备破碎率为 4%、8%和 12%的食物。

表 1 正交试验中的环境因素及其水平  
Table 1 Environmental factors and their levels in the orthogonal experimental design

| 正交组合<br>Orthogonal<br>combination | 温度 (A)<br>Temperature<br>( ) | 相对湿度 (B)<br>Relative<br>humidity (%) | 食物破碎率 (C)<br>Food breakage<br>level (%) |
|-----------------------------------|------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------------|
| 1                                 | 26(A <sub>1</sub> )          | 65(B <sub>1</sub> )                  | 12(C <sub>1</sub> )                     |
| 2                                 | 26(A <sub>1</sub> )          | 75(B <sub>2</sub> )                  | 8(C <sub>2</sub> )                      |
| 3                                 | 26(A <sub>1</sub> )          | 85(B <sub>3</sub> )                  | 4(C <sub>3</sub> )                      |
| 4                                 | 30(A <sub>2</sub> )          | 65(B <sub>1</sub> )                  | 8(C <sub>2</sub> )                      |
| 5                                 | 30(A <sub>2</sub> )          | 75(B <sub>2</sub> )                  | 4(C <sub>3</sub> )                      |
| 6                                 | 30(A <sub>2</sub> )          | 85(B <sub>3</sub> )                  | 12(C <sub>1</sub> )                     |
| 7                                 | 34(A <sub>3</sub> )          | 65(B <sub>1</sub> )                  | 4(C <sub>3</sub> )                      |
| 8                                 | 34(A <sub>3</sub> )          | 75(B <sub>2</sub> )                  | 12(C <sub>1</sub> )                     |
| 9                                 | 34(A <sub>3</sub> )          | 85(B <sub>3</sub> )                  | 8(C <sub>2</sub> )                      |

将单对 7-10 日龄的嗜虫书虱雌雄成虫放入细胞培养板的一个小孔（直径 2 cm，高 2.2 cm）内。待其产卵后，将成虫转出，保留一粒卵，加入不同破碎率的饲料，放置在不同的环境组合下饲养。观察至成虫羽化结束实验。记录书虱的发育历期。每个环境组合重复 18 次。

将 50 头 3-7 日龄的嗜虫书虱成虫（雌雄比 1:1）放置在具盖的养虫盒（直径 7 cm，高 3.5 cm）内。为保证养虫盒与外界进行充分的水汽交换，将盒盖中部掏空，粘贴快速滤纸。在盒内加入不同破碎率的饲料，放置在不同的环境组合下，观察至  $F_1$  代开始产卵时结束实验。记录各虫期书虱的数量，计算各虫态的存活率、种群数量趋势指数（ $I$ ）、净增殖率（ $R_0$ ）、内禀增长率（ $r_m$ ）和周限增长率（ $\lambda$ ）（张孝羲，2002）。每个处理重复 3 次。

如果  $I$  大于 1，则初步判定嗜虫书虱种群数量作指数增长（张孝羲，2002；李定旭等，2010）。在指数增长模型中， $r_m$  代表了一定生物和非生物的环境条件作用下，种群所固有的内在增长能力。在符合种群数量指数增长的种群中， $r_m$  应与种群初始密度无关（张孝羲，2002）。

### 1.3 嗜虫书虱种群数量增长模型的构建

**1.3.1 不同种群初始密度下嗜虫书虱的种群增长动态** 在 1.2 所描述的养虫盒内放入不同数量（10、20、30、40、50 和 60 头）3-7 日龄的嗜虫书虱成虫（雌雄比 1:1），使虫口密度为 0.26-1.56 头/cm<sup>2</sup>。置于 1.1 的条件下饲养。试验过程中，记录饲养 40、50 和 60 d 后嗜虫书虱的数量。每个处理重复 3 次。

**1.3.2 不同环境下嗜虫书虱的种群增长动态** 在 1.2 所描述的养虫盒内放入 10 头 3-7 日龄嗜虫书虱成虫（雌雄比 1:1），加入人工饲料（全麦粉：酵母粉：脱脂奶粉 = 10:1:1）。在 12 个温湿度组合下温度（22、26、30 和 34℃）× 相对湿度（65%、75% 和 85%），记录饲养 30、40、50 和 60 d 嗜虫书虱的数量。每个处理重复 3 次。

### 1.4 数据统计分析

假定 1.3.1 和 1.3.2 中嗜虫书虱的种群增长模型为指数增长模型（张孝羲，2002）：

$$N_t = N_0 e^{r_m t},$$

将该式对数转化为：

$$\ln N_t = \ln N_0 + r_m t.$$

根据上述两个实验设计绘制直线回归方程，求  $N_0$ ， $r_m$  值。根据相关系数  $R$  在  $P=0.05$  的显著水平（ $R_{0.05(1)}=0.997$ ， $R_{0.05(2)}=0.950$ ）判定回归直线拟合度的高低，从而判定种群增长模型是否符合世代重叠的连续增长模型。

利用双因素或单因素 ANOVA 和 Tukey 检验分析不同温湿度下嗜虫书虱发育历期的差异显著性以及特定时间不同环境中嗜虫书虱种群数量的差异显著性。利用双因素 ANOVA 比较分析种群初始密度和观察时间对种群数量的交互作用。如果不存在交互作用，则认为不同种群初始密度下种群增长模型中的  $r_m$  值无显著差异（ $P>0.05$ ）。利用 SPSS 22.0 进行数据分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 温湿度和食物破碎率对嗜虫书虱种群发育参数的影响

环境组合对嗜虫书虱各阶段的发育历期影响显著（ $P<0.05$ ）（表 2）。其中，对若虫发育历期的影响最大。正交试验方差分析进一步表明，温度（ $F=15.62$ ； $df=2, 4$ ； $P=0.012$ ）和湿度（ $F=6.24$ ； $df=2, 4$ ； $P=0.059$ ）对世代历期的影响较为显著，而食物破碎率的影响不显著（ $F=0.49$ ； $df=2, 4$ ； $P=0.643$ ）。

环境组合对种群数量趋势指数（ $I$ ）、世代周期（ $T$ ）、种群净增殖率（ $R_0$ ）和内禀增长率（ $r_m$ ）的影响趋势不一致（表 3）。正交试验方差分析进一步表明，温度、湿度和食物破碎率对  $I$  值、 $R_0$  值和  $r_m$  值影响均不显著（ $P>0.05$ ）。 $I$ 、 $T$  和  $R_0$  共同决定了种群增长速率，而  $r_m$  才是判断种群增长的综合指标。因此，仍采用正交试验极差分析各环境因素影响种群发育的主次顺序（表 4）。3 个环境因素影响  $I$  值的主次顺序为：湿度 > 温度和食物破碎率；影响  $T$  值的主次顺序为：温度 > 湿度 > 食物破碎率；影响  $R_0$  值的主次顺序为：温度 > 食物破碎率 > 湿度；影响  $r_m$  值的主次顺序为：温度 > 食物破碎率和湿度。34℃、相对

表 2 正交实验组合下嗜虫书虱的发育历期

Table 2 The developmental duration of *Liposcelis entomophila* under orthogonal experiment conditions

| 正交组合<br>Orthogonal combination               | 卵期 (d)<br>Egg period | 若虫期 (d)<br>Nymph period | 产卵前期 (d)<br>Preoviposition period | 世代周期 (d)<br>Generation period |
|----------------------------------------------|----------------------|-------------------------|-----------------------------------|-------------------------------|
| A <sub>1</sub> B <sub>1</sub> C <sub>1</sub> | 10.2±0.3 a           | 24.1±0.3 ab             | 6.1±0.2 a                         | 40.4±0.5 a                    |
| A <sub>1</sub> B <sub>2</sub> C <sub>2</sub> | 8.1±0.2 b            | 25.5±0.5 a              | 5.9±0.2 a                         | 39.5±0.5 ab                   |
| A <sub>1</sub> B <sub>3</sub> C <sub>3</sub> | 7.0±0.4 cd           | 23.2±0.6 bc             | 5.8±0.2 a                         | 36.0±0.8 cd                   |
| A <sub>2</sub> B <sub>1</sub> C <sub>2</sub> | 7.2±0.4 c            | 24.5±0.6 ab             | 5.2±0.2 b                         | 36.9±0.9 bc                   |
| A <sub>2</sub> B <sub>2</sub> C <sub>3</sub> | 6.7±0.2 cde          | 19.3±0.5 d              | 4.8±0.2 bc                        | 30.8±0.7 ef                   |
| A <sub>2</sub> B <sub>3</sub> C <sub>1</sub> | 6.3±0.2 de           | 19.9±0.3 d              | 4.7±0.2 c                         | 30.8±0.4 efg                  |
| A <sub>3</sub> B <sub>1</sub> C <sub>3</sub> | 6.4±0.2 de           | 22.2±0.6 c              | 4.8±0.2 bc                        | 33.4±0.5 de                   |
| A <sub>3</sub> B <sub>2</sub> C <sub>1</sub> | 6.1±0.2 e            | 18.4±0.5 de             | 4.8±0.2 bc                        | 29.2±0.6 fg                   |
| A <sub>3</sub> B <sub>3</sub> C <sub>2</sub> | 5.9±0.2 e            | 17.3±0.5 e              | 4.7±0.2 c                         | 27.9±0.6 g                    |

表中数据为平均值±标准误; 同列数据后标有相同字母表示差异不显著 (双因素 ANOVA 和 Tukey 检验,  $P > 0.05$ )。大写字母代表环境因素, 详情见表 1。下表同。

Data (mean±SE) in the same column followed by the identical letters are not significantly different (Two-way ANOVA, Tukey test,  $P > 0.05$ ).

Capital letters stand for environmental factors, and more details are in Table 1. The same below.

表 3 正交组合下嗜虫书虱的种群发育参数和估计量

Table 3 Population developmental parameters and estimators of *Liposcelis entomophila* under orthogonal experiment conditions

| 指标 Index                                   | 正交组合 Orthogonal combinations                 |                                              |                                              |                                              |                                              |                                              |                                              |                                              |                                              |
|--------------------------------------------|----------------------------------------------|----------------------------------------------|----------------------------------------------|----------------------------------------------|----------------------------------------------|----------------------------------------------|----------------------------------------------|----------------------------------------------|----------------------------------------------|
|                                            | A <sub>1</sub> B <sub>1</sub> C <sub>1</sub> | A <sub>1</sub> B <sub>2</sub> C <sub>2</sub> | A <sub>1</sub> B <sub>3</sub> C <sub>3</sub> | A <sub>2</sub> B <sub>1</sub> C <sub>2</sub> | A <sub>2</sub> B <sub>2</sub> C <sub>3</sub> | A <sub>2</sub> B <sub>3</sub> C <sub>1</sub> | A <sub>3</sub> B <sub>1</sub> C <sub>3</sub> | A <sub>3</sub> B <sub>2</sub> C <sub>1</sub> | A <sub>3</sub> B <sub>3</sub> C <sub>2</sub> |
| 产卵数 Eggs                                   | 30.9                                         | 13.7                                         | 10.4                                         | 34.9                                         | 35.2                                         | 36.8                                         | 26.1                                         | 31.8                                         | 32.6                                         |
| 1 龄若虫 1st instar                           | 23.1                                         | 10.5                                         | 8.1                                          | 17.7                                         | 29.1                                         | 29.9                                         | 16.2                                         | 25.2                                         | 26.1                                         |
| 2 龄若虫 2nd instar                           | 17.9                                         | 7.2                                          | 6.0                                          | 14.3                                         | 24.6                                         | 24.1                                         | 12.8                                         | 20.0                                         | 21.8                                         |
| 3 龄若虫 3rd instar                           | 14.5                                         | 5.9                                          | 4.8                                          | 12.2                                         | 21.6                                         | 20.0                                         | 10.2                                         | 15.3                                         | 18.0                                         |
| 成虫 Adults                                  | 11.7                                         | 4.2                                          | 3.4                                          | 10.5                                         | 17.7                                         | 15.9                                         | 6.7                                          | 9.9                                          | 14.3                                         |
| 成虫存活数 Alive adults                         | 46.5                                         | 34.9                                         | 37.2                                         | 36.6                                         | 51.3                                         | 34.6                                         | 34.7                                         | 43.0                                         | 48.8                                         |
| 雌虫数量 Females                               | 23.3                                         | 17.5                                         | 18.6                                         | 18.3                                         | 25.6                                         | 17.3                                         | 17.4                                         | 21.5                                         | 24.4                                         |
| 孵化率 (%) Hatching rate                      | 74.8                                         | 76.5                                         | 77.6                                         | 50.8                                         | 82.6                                         | 81.3                                         | 62.6                                         | 79.2                                         | 80.0                                         |
| 若虫存活率 (%)<br>Nymphs survival rate          | 55.1                                         | 43.1                                         | 26.7                                         | 61.5                                         | 63.7                                         | 54.2                                         | 37.8                                         | 42.8                                         | 55.1                                         |
| 种群数量趋势指数 $I$<br>Population trend index     | 0.93                                         | 0.70                                         | 0.74                                         | 0.73                                         | 1.03                                         | 0.69                                         | 0.69                                         | 0.86                                         | 0.98                                         |
| 世代周期 $T$ (d)<br>Generation period          | 40.4                                         | 39.5                                         | 36.0                                         | 36.9                                         | 30.8                                         | 30.8                                         | 33.4                                         | 29.2                                         | 27.9                                         |
| 净增殖率 $R_0$<br>Net reproduction             | 15.445                                       | 6.860                                        | 5.220                                        | 17.445                                       | 17.585                                       | 18.415                                       | 13.030                                       | 15.890                                       | 16.305                                       |
| 内禀增长率 $r_m$<br>Intrinsic rate of increase  | 0.067 8                                      | 0.048 8                                      | 0.045 9                                      | 0.077 5                                      | 0.093 1                                      | 0.094 5                                      | 0.076 8                                      | 0.094 6                                      | 0.099 9                                      |
| 周限增长率 $\lambda$<br>Finite rate of increase | 1.070 2                                      | 1.050 0                                      | 1.047 0                                      | 1.080 6                                      | 1.097 6                                      | 1.099 1                                      | 1.079 8                                      | 1.099 2                                      | 1.105 1                                      |

表 4 种群发育参数和估计量的正交试验极差分析

Table 4 Range analysis of population developmental parameters and estimators from the orthogonal experiment

| 极差<br>Range                  | 种群数量趋势指数 ( $I$ )<br>Population trend index |      |      | 世代周期 $T$ (d)<br>Generation period |       |       | 净增殖率 $R_0$<br>Net reproduction |        |        | 内禀增长率 $r_m$<br>Intrinsic rate of increase |         |         |
|------------------------------|--------------------------------------------|------|------|-----------------------------------|-------|-------|--------------------------------|--------|--------|-------------------------------------------|---------|---------|
|                              | A                                          | B    | C    | A                                 | B     | C     | A                              | B      | C      | A                                         | B       | C       |
|                              |                                            |      |      |                                   |       |       |                                |        |        |                                           |         |         |
| K1                           | 2.37                                       | 2.36 | 2.48 | 115.9                             | 110.7 | 100.4 | 27.525                         | 45.92  | 49.75  | 0.162 5                                   | 0.222 1 | 0.256 9 |
| K2                           | 2.45                                       | 2.58 | 2.41 | 98.5                              | 99.5  | 104.3 | 53.445                         | 40.335 | 40.610 | 0.265 1                                   | 0.236 5 | 0.226 2 |
| K3                           | 2.53                                       | 2.41 | 2.46 | 90.5                              | 94.7  | 100.2 | 45.225                         | 39.940 | 35.835 | 0.271 3                                   | 0.240 3 | 0.215 8 |
| k1                           | 0.79                                       | 0.78 | 0.83 | 38.6                              | 36.9  | 33.5  | 9.175                          | 15.307 | 16.583 | 0.054 2                                   | 0.074 0 | 0.085 6 |
| k2                           | 0.82                                       | 0.86 | 0.80 | 32.8                              | 33.2  | 34.8  | 17.815                         | 13.445 | 13.537 | 0.088 4                                   | 0.078 8 | 0.075 4 |
| k3                           | 0.84                                       | 0.80 | 0.82 | 30.2                              | 31.6  | 33.4  | 15.075                         | 13.313 | 11.945 | 0.090 4                                   | 0.080 1 | 0.071 9 |
| 极差 $R$                       | 0.05                                       | 0.08 | 0.03 | 8.4                               | 5.3   | 1.4   | 8.640                          | 1.994  | 4.638  | 0.035 2                                   | 0.006 1 | 0.013 7 |
| 主次顺序<br>Influencing<br>order | B>A>C                                      |      |      | A>B>C                             |       |       | A>C>B                          |        |        | A>C>B                                     |         |         |
| 最佳水平<br>Optimal<br>level     | 34 , 75%                                   |      |      | 34 , 85%                          |       |       | 30 , 65%, 12%                  |        |        | 34 , 85%, 12%                             |         |         |

湿度 85%和食物破碎率 12%时  $r_m$  值最大(表 4)。在所设定的环境条件下,温度是影响种群增长最主要的因素,其对  $T$  值、 $R_0$  值和  $r_m$  值的影响较大,而食物破碎率不是嗜虫书虱群发育的主要影响因素。

此外,在 9 种环境组合下,嗜虫书虱种群的周限增长率均大于 1(表 3),表明嗜虫书虱种群将作指数增长。因此,进一步对种群指数增长模型进行验证。

## 2.2 嗜虫书虱种群增长模型

不同初始虫口密度的嗜虫书虱种群数量均随着时间推移逐渐增加,并且种群的初始数量对种群数量有显著影响 ( $P < 0.05$ )。但只有种群初始数量为 10-40 头(虫口密度为 0.26-1.04 头/cm<sup>2</sup>)时,回归方程  $\ln N_t = \ln N_0 + r_m t$  的相关系数  $R$  显著 ( $R > R_{0.05(1)}$ ,  $P < 0.05$ ),说明种群数量动态符合指数增长模型(表 5)。

表 5 不同种群初始密度下嗜虫书虱种群数量动态及种群增长模型

Table 5 The population dynamics and population growth model of *Liposcelis entomophila* with different population initial density

| 种群初始数量 (头)<br>[虫口密度 (头/cm <sup>2</sup> )]<br>Initial population number [density] | 特定时间的种群数量<br>Population number in specific time |               |               | 种群增长模型 ( $\ln N_t = \ln N_0 + r_m t$ )<br>Population growth model |             |        |
|----------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|---------------|---------------|-------------------------------------------------------------------|-------------|--------|
|                                                                                  | 40 d                                            | 50 d          | 60 d          | $\ln N_0$                                                         | $r_m$       | $R$    |
|                                                                                  |                                                 |               |               |                                                                   |             |        |
| 10[0.26]                                                                         | 27.0±2.1 b                                      | 37.7±3.8 b    | 48.2±4.1 b    | 2.00±0.05                                                         | 0.032±0.001 | 0.999* |
| 20[0.52]                                                                         | 156.7±46.3 a                                    | 222.7±71.4 a  | 328.7±96.9 a  | 3.04±0.11                                                         | 0.047±0.002 | 0.997* |
| 30[0.78]                                                                         | 108.7±48.9 ab                                   | 143.3±63.9 ab | 196.0±71.1 ab | 3.41±0.02                                                         | 0.031±0.000 | 1.000* |
| 40[1.04]                                                                         | 133.3±58.1 ab                                   | 181.0±79.5 ab | 221.7±90.9 ab | 3.70±0.05                                                         | 0.029±0.001 | 0.998* |
| 50[1.30]                                                                         | 74.0±21.8 ab                                    | 90.7±27.0 ab  | 113.3±31.8 ab | 3.88±0.09                                                         | 0.013±0.002 | 0.978  |
| 60[1.56]                                                                         | 54.0±19.3 b                                     | 66.0±19.3 b   | 82.0±21.4 b   | 4.03±0.17                                                         | 0.004±0.004 | 0.567  |

表中数据为平均值±标准误;同列数据后标有相同字母的表示差异不显著(单因素 ANOVA 和 Tukey 检验,  $P > 0.05$ )。

\* 表示回归方程  $\ln N_t = \ln N_0 + r_m t$  的相关系数  $R$  显著 ( $P < 0.05$ )。表 6 同。

Data (mean ± SE) in the same column followed by the identical letters are not significantly different (One-way ANOVA, Tukey test,  $P > 0.05$ ).

\* indicates correlation coefficient ( $R$ ) of the regression equations ( $\ln N_t = \ln N_0 + r_m t$ ) is significant ( $P < 0.05$ ). The same as table 6.

对符合指数增长的种群（虫口密度为 0.26-1.04 头/cm<sup>2</sup>），进一步分析其种群指数增长回归方程  $\ln N_t = \ln N_0 + r_m t$  中的  $r_m$  与种群密度的相关性。利用双因素 ANOVA 比较分析种群初始密度和观察时间对种群数量的交互作用，发现两者不存在交互作用，所以 4 个回归方程中的  $r_m$  无显著差异（ $F = 0.091$ ； $df = 3, 19$ ； $P > 0.05$ ）。因此，选取 0.26 头/cm<sup>2</sup> 的种群初始密度用于建立不同温湿度组合下种群的指数增长模型。

在 12 种温湿度组合中，种群初始虫口密度为 0.26 头/cm<sup>2</sup> 的嗜虫书虱的种群数量均随着时间推移逐渐增加，回归方程  $\ln N_t = \ln N_0 + r_m t$  的相关系数  $R$  显著（ $R > R_{0.05(2)}$ ， $P < 0.05$ ），说明种群数量动态符合指数增长（表 6）。

进一步将  $r_m$  值与温度（ $T$ ）、相对湿度（ $RH$ ）的函数关系拟合为（数据预处理中 34，相对湿度 85% 条件下测定的  $r_m$  值异常，线性回归时剔除该组数据）：

$$r_m = 0.002\ 96T + 0.021\ 67RH - 0.037\ 2$$

该方程的相关系数  $R(0.966) > R_{0.01(9)}(0.735)$ ，说明  $r_m$  与  $T$  和  $RH$  极显著相关。将回归方程代入种群指数增长模型中，可得嗜虫书虱种群增长与温湿度相关的增长模型：

$$N_t = N_0 \text{EXP}[(0.002\ 96T + 0.021\ 67RH - 0.037\ 2)t]$$

根据上述种群增长模型可以计算在特定温度（ $T$ ）和湿度（ $RH$ ）下，通过监测到的初始虫口数量（ $N_0$ ），得到嗜虫书虱在不同时间（ $t$ ）时的种群数量。

表 6 不同温湿度下嗜虫书虱的种群数量动态及种群增长模型  
Table 6 The population dynamic and the population growth model of *Liposcelis entomophila* under the conditions of different temperature and humidity

| 实验组合<br>Experimental combinations |                       | 特定时间的种群数量（头）<br>Population number in specific time |             |             |              | 种群增长模型 $\ln N_t = \ln N_0 + r_m t$<br>Population growth model |             |        |
|-----------------------------------|-----------------------|----------------------------------------------------|-------------|-------------|--------------|---------------------------------------------------------------|-------------|--------|
| 相对湿度<br>Relative humidity (%)     | 温度<br>Temperature ( ) | 30 d                                               | 40 d        | 50 d        | 60 d         | $\ln N_0$                                                     | $r_m$       | $R$    |
| 65                                | 22                    | 28.3±2.0 h                                         | 41.0±2.6 g  | 63.7±3.5 j  | 116.3±4.3 h  | 2.22±0.11                                                     | 0.040±0.003 | 0.992* |
|                                   | 26                    | 60.4±2.3 e                                         | 101.3±1.8 d | 184.7±5.2 f | 325.0±14.4 f | 2.32±0.03                                                     | 0.058±0.001 | 1.000* |
|                                   | 30                    | 76.3±1.5 d                                         | 131.3±9.3 c | 265.3±2.6 c | 464.3±18.5 c | 2.34±0.05                                                     | 0.064±0.001 | 0.999* |
|                                   | 34                    | 26.7±1.8 h                                         | 41.7±1.5 g  | 71.0±4.4 ij | 123.0±7.2 h  | 2.19±0.13                                                     | 0.041±0.003 | 0.991* |
| 75                                | 22                    | 42.3±1.5 g                                         | 53.0±2.6 fg | 71.0±9.8 ij | 140.3±3.5 gh | 2.34±0.13                                                     | 0.042±0.003 | 0.991* |
|                                   | 26                    | 80.0±2.3 d                                         | 112.0±4.5 d | 205.7±4.9 e | 361.0±6.6 e  | 2.39±0.13                                                     | 0.059±0.003 | 0.996* |
|                                   | 30                    | 92.0±1.2 c                                         | 153.0±6.7 b | 286.7±3.8 b | 512.7±10.5 b | 2.39±0.10                                                     | 0.066±0.003 | 0.997* |
|                                   | 34                    | 51.0±5.1 f                                         | 62.7±4.8 f  | 86.0±5.9 hi | 142.7±4.8 gh | 2.40±0.15                                                     | 0.043±0.003 | 0.990* |
| 85                                | 22                    | 57.7±1.8 ef                                        | 67.3±3.8 f  | 98.0±5.2 gh | 164.3±2.9 g  | 2.42±0.17                                                     | 0.045±0.004 | 0.988* |
|                                   | 26                    | 104.0±2.6 b                                        | 133.7±2.8 c | 228.0±4.6 d | 431.7±3.8 d  | 2.45±0.20                                                     | 0.062±0.005 | 0.990* |
|                                   | 30                    | 116.7±1.8 a                                        | 188.0±7.8 a | 319.7±4.7 a | 585.3±20.5 a | 2.46±0.19                                                     | 0.068±0.005 | 0.993* |
|                                   | 34                    | 64.0±6.1 e                                         | 82.3±4.8 e  | 104.7±4.8 g | 169.7±7.3 g  | 2.47±0.21                                                     | 0.046±0.005 | 0.984* |

3 讨论

影响书虱种群增长的生态因子包括环境因素和生物种间作用（Nayak *et al.*, 2014）。在温度、湿度、食物破碎率三种因素中，对种群增长影响最为显著的为温度。在适宜温区内，随着温度的升高，嗜虫书虱各阶段的发育历期均显著缩短，种群的内禀增长率也增大，这与 Wang 等人

（2010）的研究结果一致。但随着温度的升高，嗜虫书虱成虫的寿命会大大缩短，这可能是高温下嗜虫书虱净增殖率较低的原因。相对湿度的变化对嗜虫书虱种群增长也有显著的影响。随着环境湿度的升高，嗜虫书虱的发育历期缩短，种群增长加快，这与前人的研究结果一致（Rees and Walker, 1990）。但在相对湿度 65% 时种群的净增殖率最大。这可能由于书虱喜在食物碎屑中产

卵,而在高湿环境下,这些栖境更容易滋生微生物,导致书虱寿命和后代成活率降低(丁伟等, 2001)。

应用生命表方法,研究各种环境因素对昆虫生长、存活和繁殖的影响,可以评价环境因子对昆虫种群数量动态的影响(Dong *et al.*, 2007; 刘家莉等, 2009; 李定旭等, 2010)。利用种群数量趋势指数组建以作用因子为组配的生命表(王少山等, 2008),可以综合分析各类因子如天敌、药剂防治对种群数量发生的作用程度,可进而为化学防治和生物防治的时机的制定提供参考(张孝羲, 2002; Opit *et al.*, 2012)。但是种群数量趋势指数法不适用于分析对昆虫种群持续作用的因素(徐春婷等, 2003),如温度、湿度和食物情况的影响。因此,本文利用正交试验设计,先后结合正交试验方差分析和极差分析评价各种环境因素对种群生长发育的影响,证实温度是影响种群发育的最重要的参数(Lei *et al.*, 2012)。这为相关研究提供了一种研究思路。

对于世代重叠的昆虫,其连续性种群增长曲线有两种类型:在无限环境中的几何增长,在有限环境中的逻辑斯蒂增长。《粮油储藏技术规范》(GBT 29890-2013)规定书虱的防治阈值为 6-30 头/kg,而该发生密度不会引起嗜虫书虱的资源竞争(Dukic *et al.*, 2016),因此储粮环境中嗜虫书虱的种群增长模型符合指数增长模型: $N_t = N_0 \exp[(0.002\ 96T + 0.021\ 67RH - 0.037\ 2)t]$ 。储粮生产实践中,利用扞样法或诱捕法获得嗜虫书虱的初始虫口密度后(Opit *et al.*, 2009; Diaz-Montano *et al.*, 2015),结合粮情监测系统采集的仓内温湿度的数据,利用该种群增长模型可以预测特定时间( $t$ )时嗜虫书虱的种群数量,为粮库书虱种群发生动态提供参考(吕宗旺等, 2013)。模型的准确性和拟合程度可以通过实仓实验进行修正(句荣辉和沈佐锐, 2005; 张平平等, 2018)。

## 参考文献 (References)

- Athanassiou CG, Opit GP, Throne JE, 2010. Influence of commodity type, percentage of cracked kernels, and wheat class on population growth of stored-product psocids (Psocoptera: Liposcelidae). *Journal of Economic Entomology*, 103(3): 985–990.
- Cheng WX, Wang JJ, Zhao ZM, Ding W, 2003. The advance research of *Liposcelis bostrychophila* Badonnel and *L. entomophila* (Enderlein) (Psopotera: Liposcelididae). *Journal of Grain Storage*, 32(6): 3–7. [程伟霞, 王进军, 赵志模, 丁伟, 2003. 嗜卷书虱和嗜虫书虱的研究进展. 粮食储藏, 32(6): 3–7.]
- Diaz-Montano J, Campbell JF, Phillips TW, Throne J, 2015. Evaluation of potential attractants for six species of stored-product psocids (Psocoptera: Liposcelididae, Trogiidae). *Journal of Economic Entomology*, 108(3): 1398–1407.
- Ding W, Wang JJ, Zhao ZM, 2001. Study on the breeding conditions for the laboratory populations of booklouse (*Liposcelis*). *Journal of Southwest Agricultural University (Natural Science Edition)*, 3(4): 304–306. [丁伟, 王进军, 赵志模, 2001. 书虱实验种群饲养技术研究. 西南农业大学学报(自然科学版), 3(4): 304–306.]
- Dong P, Wang JJ, Jia FX, 2007. Development and reproduction of the psocid *Liposcelis tricolor* (Psocoptera: Liposcelididae) as a function of temperature. *Entomological Society of America*, 102(4): 1705–1713.
- Dukic N, Radonjic A, Levic J, Spasic R, Kljajic P, Andric G, 2016. The effects of population densities and diet on *Tribolium castaneum* (Herbst) life parameters. *Journal of Stored Products Research*, 69: 7–13.
- Gautam SG, Opit GP, Giles KL, Adam B, 2013. Weight loss and germination failure caused by psocids in different wheat varieties. *Journal of Economic Entomology*, 106(1): 491–498.
- Ju RH, Shen ZR, 2005. Review on insect population dynamics simulation models. *Acta Ecologica Sinica*, 25(10): 2709–2716. [句荣辉, 沈佐锐, 2005. 昆虫种群动态模拟模型. 生态学报, 25(10): 2709–2716.]
- Lei G, Guo YG, Zhu JG, Chen XM, Xu W, Shao KR, 2012. Sequential subspace optimization method for electromagnetic devices design with orthogonal design technique. *IEEE Transactions on Magnetics*, 48(2): 479–482.
- Li DX, Wang HW, Wang JY, Kang ZK, Dong JF, Shen ZR, 2010. Life tables of the laboratory population of the peach fruit borer, *Carposina sasakii* Matsumura at different temperatures. *Acta Entomologica Sinica*, 53(7): 773–779. [李定旭, 王红伟, 王佳阳, 康熙奎, 董钧锋, 沈佐锐, 2010. 桃小食心虫在不同温度下的实验种群生命表. 昆虫学报, 53(7): 773–779.]
- Liu JL, Yang B, Lu YY, Huang SS, 2009. An improvement on life table of experimental population: Example from *Cyrtorrhinus lividipennis* Reuter (Hemiptera: Miridae). *Acta Ecologica Sinica*, 29(6): 3206–3212. [刘家莉, 杨斌, 陆永跃, 黄寿山, 2009. 改进实验种群生命表编制的方法—以黑肩绿盔盲蝽为例. 生态学报, 29(6): 3206–3212.]

Athanassiou CG, Opit GP, Throne JE, 2010. Influence of commodity type, percentage of cracked kernels, and wheat class on population growth of stored-product psocids (Psocoptera: Liposcelidae).

- Liu XL, Li XM, Liu CL, Wang KQ, Xia JX, Yang F, Shao TY, Xu WJ, 2011. Population dynamics and spatial distribution pattern of *Aphis glycines* in Heilongjiang province. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 48(6): 1608–1612. [刘兴龙, 李新民, 刘春来, 王克勤, 王爽, 夏吉星, 杨帆, 邵天玉, 许伟钧, 2011. 黑龙江大豆蚜种群动态及田间空间分布研究. 应用昆虫学报, 48(6): 1608–1612.]
- Lv ZW, Wu JJ, Sun FY, Feng LM, He SJ, Li W, 2013. Research and design of modern grain depot system. *Journal of Henan University of Technology (Natural Science Edition)*, 34(5): 79–82. [吕宗旺, 吴建军, 孙福艳, 冯黎明, 贺松杰, 李伟, 2013. 现代智慧粮库系统的设计与研究. 河南工业大学学报(自然科学版), 34(5): 79–82.]
- Mashaya N, 2000. Influence of ambient temperature and relative humidity on changes in numbers of a natural population of *Liposcelis entomophila* (Enderlein) (Psocoptera: Liposcelididae). *Journal of Stored Products Research*, 37(1): 1–12.
- Nayak MK, Collins PJ, 2008. Influence of concentration, temperature and humidity on the toxicity of phosphine to the strongly phosphine-resistant psocid *Liposcelis bostrychophila* Badonnel (Psocoptera: Liposcelididae). *Pest Management Science*, 64(9): 971–976.
- Nayak MK, Collins PJ, Throne JE, Wang JJ, 2014. Biology and management of psocids infesting stored products. *Annual Review of Entomology*, 59: 279–297.
- Opit GP, Arthur FH, Throne JE, Payton ME, 2012. Susceptibility of stored-product psocids to aerosol insecticides. *Journal of Insect Science*, 12(1): 139.
- Opit GP, Throne JE, Flinn PW, 2009. Evaluation of five sampling methods for the psocids *Liposcelis entomophila* and *L. decolor* (Psocoptera: Liposcelididae) in steel bins containing wheat. *Journal of Economic Entomology*, 102(3): 1377–1382.
- Phillips TW, Throne JE, 2010. Biorational approaches to managing stored-product insects. *Annual Review of Entomology*, 55: 375–397.
- Rees DP, Walker AJ, 1990. The effect of temperature and relative humidity on population growth of three *Liposcelis* species (Psocoptera: Liposcelidae) infesting stored products in tropical countries. *Bulletin of Entomological Research*, 80(3): 353–358.
- Throne JE, Flinn PW, 2013. Distribution of psocids (Psocoptera) in temperature gradients in stored wheat. *Journal of Stored Products Research*, 55: 27–31.
- Wang JJ, Zhao ZM, Li LS, 2010. Studies on bionomics of *Liposcelis entomophila* (Psocoptera: Liposcelididae) infesting stored products. *Insect Science*, 5(2): 149–158.
- Wang M, Wang XQ, 2015. Influences of temperature on the development and life table parameters of a laboratory population of *Celypha flavipalpata* Herrich-Schaffer (Lepidoptera: Tortricidae). *Chinese Journal of Applied Entomology*, 52(3): 671–678. [王森, 王小奇, 2015. 温度对草小卷蛾发育的影响及其实验种群生命表. 应用昆虫学报, 52(3): 671–678.]
- Wang SS, Huang SS, Liang GW, Zeng L, 2008. The rearing and the laboratory population life table of litchi fruit borer (*Conopomorpha sinensis* Bradley). *Acta Ecologica Sinica*, 28(2): 836–841. [王少山, 黄寿山, 梁广文, 曾玲, 2008. 荔枝蒂蛀虫(*Conopomorpha sinensis* Bradley)的饲养及其实验种群生命表. 生态学报, 28(2): 836–841.]
- Wu H, Fang Y, Xie DS, Chen ZJ, Dou WJ, Zhang F, Chen GH, 2017. A preliminary *Drosophila suzukii* life table. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 54(5): 730–741. [吴浩, 方圆, 谢冬生, 陈正军, 窦文珺, 张峰, 陈国华, 2017. 斑翅果蝇自然种群生命表的初步研究. 应用昆虫学报, 54(5): 730–741.]
- Xu CT, Huang SS, Liu WH, Han SC, Chen QX, Li LY, 2003. Establishment and analysis of laboratory population life table of *Trichogramma dendrolimi* developed on *Antheraea pernyi* eggs. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 14(11): 1947–1950. [徐春婷, 黄寿山, 刘文惠, 韩诗畴, 陈巧贤, 李丽英, 2003. 柞蚕卵繁殖赤眼蜂实验种群生命表的编制与分析. 应用生态学报, 14(11): 1947–1950.]
- Yue J, He J, Zhang R, He HD, 2009. Life tables of laboratory population of *Hippodamia variegata* at different temperatures. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 46(6): 921–925. [岳健, 何嘉, 张蓉, 贺达汉, 2009. 不同温度下多异瓢虫实验种群生命表. 应用昆虫学报, 46(6): 921–925.]
- Zhang PP, Feng LZ, Li Y, Li Z, Zhao HY, 2018. Catastrophe model for pest population dynamics under meteorological influence. *Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition)*, 46(2): 113–120. [张平平, 冯露之, 李媛, 李祯, 赵惠燕, 2018. 气象因素影响下小麦蚜虫种群动态突变模型分析. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 46(2): 113–120.]
- Zhang XX, 2002. *Insect Ecology and Forecast*. Beijing: China Agriculture Press. 69–92. [张孝羲, 2002. 昆虫生态及预测预报. 北京: 中国农业出版社. 69–92.]