



温度对短额负蝗生长发育与繁殖力的影响

李文博^{1,2}, 陈欢欢¹, 夏 焯², 吴 雪², 田鑫月², 李新畅³, 史树森²

(1. 曲靖师范学院 生物资源与食品工程学院, 云南 曲靖 655011; 2. 吉林农业大学 植物保护学院/农业农村部大豆病虫害防控重点实验室, 吉林 长春 130118; 3. 承德市农林科学院, 河北 承德 067055)

摘 要:为探究温度对短额负蝗(*Atractomorpha sinensis*)种群生长发育和繁殖的影响,以大豆叶片为食物,在恒温 16, 20, 24, 28 和 32 ℃,相对湿度 70%,光周期 16L:8D 条件下,系统饲养观测短额负蝗(广东广州种群)各虫态的发育历期、发育速率、存活率等,根据逻辑斯蒂模型和拉格朗日中值定理推算其种群生长发育适宜温区和最适温度,并通过组建实验种群生命表分析其种群内禀增长率等生态学指标。结果表明:短额负蝗广州种群各虫态的发育历期随温度的升高而缩短,发育速率加快,24 ℃下若虫期存活率最高,为 64.01%,其种群生长发育较适宜温区为 16.14~35.02 ℃,最适温度为 25.58 ℃。在试验温度下,短额负蝗种群单雌平均产卵量在 28 ℃时最高,为 62.00 粒·雌虫⁻¹;20 ℃时最低,为 40.00 粒·雌虫⁻¹,16 ℃时不能完成个体发育。24 ℃最接近其种群世代最适环境温度,其内禀增长率(r_m)、净增值率(R_0)及种群趋势指数(I)均最高。

关键词:短额负蝗;环境温度;发育历期;繁殖力;生命表

Effects of Temperature on Development and Fecundity of *Atractomorpha sinensis* (Orthoptera: Pyrgomorphidae)

LI Wenbo^{1,2}, CHEN Huanhuan¹, XIA Ye², WU Xue², TIAN Xinyue², LI Xinchang³, SHI Shusen²

(1. College of Biological Resource and Food Engineering, Qujing Normal University, Qujing 655011, China; 2. College of Plant Protection/Key Laboratory of Soybean Disease and Pest Control (Ministry of Agriculture and Rural Affairs), Jilin Agricultural University, Changchun 130118, China; 3. Chengde Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Chengde 067055, China)

Abstract: To explore the effects of temperature on the growth and fecundity of *Atractomorpha sinensis* population. By using soybean leaves as the food source, we observed the growth and development process of various developmental stages of population of *A. sinensis* from Guangzhou, Guangdong (GZ) under the conditions of different constant temperatures (16, 20, 24, 28 and 32 ℃), RH70% and a photoperiod of 16L:8D, evaluated the variations in the developmental duration, developmental rates and survival rates. According to the logistic model and Lagrange mean value theorem, the suitable temperature range and optimum temperature for the growth and development of the population were calculated, and the ecological indexes such as the Intrinsic rate of increase of the population were analyzed by establishing the life table of the experimental population. The results showed that the developmental duration of each stage of *A. sinensis* population was shortened with the increase of temperature, and the developmental rates were accelerated. The survival rate of nymph stage was the highest at 24 ℃, which was 64.01%. The suitable temperature zones for the growth and development of *A. sinensis* was 16.14-35.02 ℃, and the optimal temperature was 25.58 ℃. Under the experimental temperature, the average fecundity of single female of *A. sinensis* population was the highest at 28 ℃, which was 62.00 eggs/female, the lowest value was 40.00 eggs/female at 20 ℃, and population could not complete their generation at 16 ℃. 24 ℃ was the closest to the optimal ambient temperature of its population generation, and its intrinsic growth rate (r_m), net reproduction rate (R_0) and population trend index (I) were the highest.

Keywords: *Atractomorpha sinensis*; environmental temperature; developmental duration; fecundity; life table

短额负蝗(*Atractomorpha sinensis*)属直翅目(Orthoptera)锥头蝗科(Pyrgomorphidae)负蝗属(*Atractomorpha*)昆虫^[1],它是造成中亚与东南亚经济作物产量损失常见的食叶类害虫,广布中国、印度、越南、缅甸、日本、印度尼西亚等国农林牧区^[2-5]。自陈茂才^[6]于 20 世纪 60 年代报道我国江西省发现短额负蝗为害农作物以来,历经半个多世纪,短额负蝗已扩散至河北、山东、山西、陕西、河

南、江苏、安徽、浙江、广东、江西、贵州、四川、云南等地。该害虫以若虫、成虫取食包括大豆、棉花、白菜、油菜、甘薯、花生、苜蓿、甜菜等 200 余种双子叶类农作物叶片,严重时将叶片食光,对农牧业生产影响较大^[4,7]。2000—2003 年连续 4 年间,鲁北地区紫花苜蓿田短额负蝗的密度超过 20 头·m⁻²,确定为当地优势蝗种^[7];2019 年 Tadashi 等^[5]报道该害虫已成为日本佐世保、冲绳、伊势原市等地茄瓜

收稿日期:2023-03-19

基金项目:云南省教育厅科学研究基金项目(2023J1038);财政部和农业农村部:国家现代农业产业技术体系(CARS-04)。

第一作者:李文博(1989—),男,博士,讲师,主要从事昆虫生态与害虫综合治理。E-mail:619162463@qq.com。

通讯作者:史树森(1963—),男,教授,博导,主要从事农业害虫综合治理与昆虫资源利用研究。E-mail:sss-63@263.net。

种植园区的主要害虫,有逐年扩大趋势。近年,短额负蝗在我国大豆产区发生加剧,造成大豆减产较重,已成为重要的食叶害虫^[4]。

昆虫是变温动物,环境温度通过影响昆虫发育历期、发育起点温度、有效积温、繁殖力等在内的生物学参数来调控其生长发育过程,从而决定其种群数量的消长与地理分布^[8-9]。昆虫只有在适温区间才能维持种群正常发育与繁衍^[10]。构建种群生命表能综合解析在环境因子影响下的目标害虫发育与繁殖情况,预测害虫种群发生动态情况^[11]。有关短额负蝗生态学方面研究较少。韩凤英^[12]在不同室温条件下测算得出太原种群卵的发育起点温度与有效积温分为 4.47℃和 641.10 d·℃;李文博等^[13-14]于室内恒温条件下分别观测了短额负蝗延安种群和济南种群的世代发育起点温度分别为 10.51 和 10.58℃,有效积温分别为 1 430.98 和 1 447.95 d·℃,并明确了温度过低或过高均对以上地理种群的繁殖与增长产生抑制作用。可见,不同地理种群间的发育起点温度和有效积温存在一定差异。过去百年间,我国蝗灾暴发多生于气候温暖年份^[15],短额负蝗分布广,栖息地类型多样,地理纬度海拔跨度较大,全球气候变暖对其生物学特性会造成怎样影响?种群分布区域是否扩大?这些问题有待研究阐明。因此,本研究在不同恒温条件下系统观测了短额负蝗广州地理种群各虫态发育历期及存活率,推算其发育起点温度和有效积温,并通过组建实验种群生命表分析其内禀增长率等生态学参数,为预测该害虫田间种群动态及科学防控提供生态学依据。

1 材料与方法

1.1 材料

1.1.1 供试虫源 试验成虫于 2018 年采自广州市农业科学院大豆田(23°07'54.30"N,113°15'32.48"E,海拔 18 m),在吉林农业大学昆虫生物学研究室建立实验种群,寄主选用盆栽大豆饲喂(吉农 38)。试验开始前,将采集虫源于室温条件的昆虫饲养笼内(50 cm 高×50 cm 直径)饲养至少 1 代,笼内虫口平均密度为 200 头·笼⁻¹。

1.1.2 仪器与器具 RXZ 型人工智能气候箱(宁波江南仪器厂,温度波动范围±1℃)、体视显微镜(OLYMPUS-SZ61);塑料离心管(50 mL)、聚苯乙烯养虫罐(10 cm×15 cm)、培养皿等。

1.2 试验设计

根据供试虫源所处地理环境和温差范围,本研究设置 16,20,24,28 和 32℃共 5 个恒温处理,相对

湿度 70%±5%、光周期 16L:8D。将灭菌后的营养土与细沙按 5:1 混匀配成产卵基质,均匀铺于聚苯乙烯养虫罐底层,基质层厚度不小于 5 cm。选取养虫笼内初羽化健康亲代雌雄成虫配对(1:1),并移至预先放有豆叶的养虫罐内,分别置于 5 个温度的气候箱内,观察雌雄交尾及产卵情况,在雌成虫开始产卵当天移出雌雄成虫,记录产卵时间及卵块孵化情况,直至未有若虫孵出,挖出卵囊记录未孵化卵粒数量,统计孵化率,每个温度处理 3 次重复,每个重复处理至少 40 粒卵。

将不同温度处理下的初孵蝗蛹分别置于放有新鲜豆叶的 50 mL 离心管中单头饲养。为确保管内空气流通,用昆虫针将离心管管壁扎 70 个孔,每天观察记录若虫蜕皮及死亡情况。待成虫羽化后,每个处理组内取同一天羽化的雌雄成虫配对并转移到新的养虫罐,各温度至少配对 10 对,每天更换新鲜大豆叶。定时观察(8:00 和 20:00)单头雌性成虫产卵量与成虫寿命,如果雄虫先于雌虫死亡,要及时替换健康雄虫。

孵化的卵粒数/雌虫产的总粒数为卵的孵化率;雌成虫羽化至开始产卵经历的时间为产卵前期;雌成虫开始产卵至最后一次产卵经历的时间为产卵期;从卵开始经若虫到成虫羽化性成熟并产下一代卵的过程为全世代。

1.3 方法

1.3.1 短额负蝗各虫态发育历期计算 将不同温度处理下的短额负蝗各虫态发育历期计算公式如下:

$$D = (n_1d_1 + n_2d_2 + \cdots + n_id_i) / (n_1 + n_2 + \cdots + n_i) \quad (1)$$

式中: D 为某温度下各虫态的发育历期; n_i 为第 i 次观察到的各虫态的个数; d_i 为第 i 次观察时各虫态的发育历期^[16]。

1.3.2 短额负蝗各虫态发育速率与温度关系拟合

运用 DPS 13.5 软件建立线性与逻辑斯蒂方程表示温度(T)与发育速率(V)间的关系。方程模型中 a 、 b 为参数, K 为发育速率的上限估计值,采用三点法进行估算^[17]。

1.3.3 发育最适温度与适宜温区计算 昆虫种群最适发育温度是 Logistic 曲线方程上斜率最大点的横坐标,拐点 $C(a/b, 0.5k)$ 斜率最大,则 $T_{mid} = a/b$ 为发育最适温度。根据拉格朗日中值的定理计算最适温区中的最高温度(T_{max})和最低温度(T_{min})理论值,计算方程如下所示^[18-19]。

线性方程: $V = a + bT \quad (2)$

逻辑斯蒂方程: $V = \frac{k}{1 + e^{a+bT}} \quad (3)$

其中 a 、 b 和 k 是模型参数。

$$T_{max} = \frac{a - \ln (S - \sqrt{S^2 - 1})}{b}$$

(4)

$$T_{min} = \frac{a - \ln (S + \sqrt{S^2 - 1})}{b}$$

(5)

$$S = \frac{[(a + 1) + e^a(a - 1)]}{e^a - 1}$$

(6)

$$T_{mid} = \frac{T_{max} + T_{min}}{2} = \frac{a}{b}$$

(7)

其中 a 和 b 同上述 Logistic 模型。

1.3.4 组建实验种群生命表 参考 Cui 等^[20]的方法组建实验种群生命表。

净增值率 $R_0 = \sum l_x m_x$

(8)

世代周期 $T = \sum l_x m_x x / R_0$

(9)

瞬时增长率 $r = \ln R_0 / T$

(10)

周限增长率 $\lambda = \exp(r_m)$

(11)

式中: x 表示以天(d)为单位的时间间隔; l_x 表示任一个体在 x 期间的存活率 (age specific survival); m_x 表示在 x 期间平均每雌产卵数 (age specific fertility)。

存活率 = 进入下虫态 (或龄期) 虫数/当虫态 (或龄期) 虫数

(12)

雌性成虫比例 = 雌成虫数量/成虫总数量

(13)

单雌平均产卵量 = F_1 代卵粒总数/雌成虫总数

(14)

种群趋势指数 $I = \frac{N_{n+1}}{N_n} = S_E \times SL_1 \times SL_2 \times \cdots \times S_A \times P_{\varphi} \times F$

(15)

式中: N_{n+1} 为下一代产虫数; N_n 为当代起始虫数; S_E 、 $SL_1 \cdots S_A$ 分别表示卵、各龄若虫、成虫的存活率; P_{φ} 指雌性成虫比例; F 指平均单雌产卵量。当 $I > 1$ 时, 表明下一代种群数量将会增加, 种群趋于兴盛; 当 $I < 1$ 时, 表明下一代种群数量将会减少, 种群趋于消亡; 当 $I = 1$ 时, 表明下一代种群数量不变, 种群维持现状。

1.4 数据分析

采用 DPS 13.5 统计分析软件进行单因素方差分析 (one-way ANOVA) 并结合 Tukey's HSD 法检验分析短额负蝗各虫态发育历期、产卵期、繁殖力等与温度间关系。

2 结果与分析

2.1 温度对短额负蝗发育历期的影响

短额负蝗各虫态发育历期结果如表 1 所示。在 16 ~ 32 ℃ 条件下, 短额负蝗各虫态发育历期与温度关系表现为随着温度升高, 卵、若虫、成虫逐渐缩短且各处理间均差异显著 (卵期: $F_{4,495} = 77\ 289.436$, $P < 0.001$; 若虫期: $F_{3,202} = 1\ 873.813$, $P < 0.001$; 成虫: $F_{3,196} = 289.700$, $P < 0.001$)。然而 16 ℃ 条件下不能完成世代发育, 20 ℃ 世代历期最长, 分别是 24, 28 和 32 ℃ 的 1.91, 2.72 以及 3.82 倍。相比于 20 ℃, 32 ℃ 条件 1 ~ 5 龄蝗蛹的发育历期缩短了 11.03, 10.16, 7.04, 8.98 和 16.88 d。试验结果表明, 短额负蝗对温度变化有明显敏感性, 环境低温明显抑制短额负蝗的生长发育。

表 1 不同温度条件下短额负蝗各虫态的发育历期

Table 1 Developmental duration of *Atractomorpha sinensis* at different temperatures

单位: d

发育阶段 Developmental stage	温度 Temperature				
	16 ℃	20 ℃	24 ℃	28 ℃	32 ℃
卵期 Egg	66.30 ± 0.13 a	59.10 ± 0.03 b	23.19 ± 0.13 c	17.30 ± 0.05 d	14.15 ± 0.04 e
1 龄 1 st instar	25.00 ± 0.31 a	14.10 ± 0.19 b	6.21 ± 0.09 c	3.79 ± 0.09 d	3.07 ± 0.08 e
2 龄 2 nd instar	24.00 ± 0.34 a	14.00 ± 0.28 b	6.43 ± 0.11 c	5.71 ± 0.15 d	3.84 ± 0.12 e
3 龄 3 rd instar	25.07 ± 0.66 a	12.00 ± 0.32 b	5.70 ± 0.14 c	5.40 ± 0.14 c	4.96 ± 0.16 d
4 龄 4 th instar	28.00 ± 0.71 a	13.02 ± 0.35 b	5.88 ± 0.13 c	5.12 ± 0.09 c	4.04 ± 0.12 d
5 龄 5 th instar	-	22.00 ± 0.67 a	10.02 ± 0.34 b	7.30 ± 0.29 c	5.12 ± 0.26 d
若虫期 Nymph	-	74.68 ± 0.98 a	34.18 ± 0.41 b	27.28 ± 0.31 c	21.02 ± 0.32 d
成虫期 Adult	-	54.00 ± 1.23 a	41.00 ± 1.10 b	24.32 ± 0.90 c	14.00 ± 0.68 d
世代 Generation	-	188.00 ± 1.91 a	98.68 ± 1.33 b	69.00 ± 1.06 c	49.20 ± 0.36 d

注: 表中数据为平均值 ± 标准误, 同行数据后标有不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$, Turkey's s)。表 4 和表 5 相同。
Note: Data are mean ± SE, and followed by different lowercase letters in the same row indicate significantly different at 0.05 level by Tukey's HSD test. The same in table 4 and 5.

2.2 温度对短额负蝗各发育阶段发育速率的影响

短额负蝗各虫态发育速率随着温度的升高而加快,世代完成时间随之减短。根据决定系数可知,线性模型与逻辑斯蒂模型都可以很好地表达温

度与发育速率间的关系,而卵期、若虫期、成虫期和世代 Logistic 模型的 R^2 值均略高于线性模型,说明逻辑斯蒂曲线模型的拟合度最好(表2)。

表2 短额负蝗不同发育阶段的温度(T)和发育速率(V)的回归函数

Table 2 Regression function based on temperature (T) and developmental rate (V) of *Atractomorpha sinensis* at different stages

发育阶段 Developmental stage	线性模型 Linear regression	R^2	逻辑斯蒂模型 Logistic regression	R^2
卵期 Egg	$V = 0.0085T - 0.0317$	0.9419 *	$V = 0.0825/[1 + e^{(5.6064 - 0.2315 T)}]$	0.9747 *
若虫期 Nymph	$V = 0.0056T - 0.0338$	0.9748 *	$V = 0.0534/[1 + e^{(6.0691 - 0.2529 T)}]$	0.9813 *
成虫期 Adult	$V = 0.0067T - 0.0895$	0.9516 *	$V = 0.1177/[1 + e^{(5.3890 - 0.1760 T)}]$	0.9894 *
世代 Generation	$V = 0.0020T - 0.0675$	0.9644 *	$V = 0.0312/[1 + e^{(5.1049 - 0.1770 T)}]$	0.9928 *

注: * 表示发育速率和温度关系相关性达显著水平($P < 0.05$)。
Note: * indicates that the relationship between development rates and temperature was significant ($P < 0.05$).

2.3 发育最适温度和适宜温区

根据逻辑斯蒂方程中 a、b 参数推算出短额负蝗卵、若虫、成虫的发育最适温度分别是 24.27、26.65 和 30.62 ℃,若虫和成虫的适宜温区最高与最低温

度相近,其中若虫和成虫发育最高温度分别为 37.09 和 37.95 ℃,若虫和成虫发育最低温度分别为 16.22 和 18.29 ℃。种群世代的最适理论温度为 25.58 ℃(表3)。

表3 短额负蝗各虫态的适宜发育温度

Table 3 The optimum temperature for development for various developmental stages of *Atractomorpha sinensis*

单位:℃

发育阶段 Developmental stage	最适温度 The optimum temperature	发育最高温度 The highest temperature for development	发育最低温度 The lowest temperature for development
卵期 Egg	24.27	33.89	14.66
若虫期 Nymph	26.65	37.09	16.22
成虫期 Adult	30.62	37.95	18.29
世代 Generation	25.58	35.02	16.14

2.4 温度对短额负蝗各虫态的存活率影响

不同温度下短额负蝗各虫态(龄期)存活率如表4所示。卵对温度适应范围最广,除 16 与 20 ℃外,其他温度处理的卵的存活率均达到了 95% 及以上。32 ℃下卵的孵化率最高,较 16 ℃存活率高出 17.43%,低温明显抑制卵的存活率。24 ℃下 1 龄

和 4 龄蝗蛹存活率显著高于其他温度(1 龄, $F_{4,10} = 131.618, P < 0.01$; 4 龄, $F_{4,10} = 20.190, P < 0.01$), 2 龄、3 龄蝗蛹的存活率分别在 28 和 32 ℃下最高。就整个若虫期存活率而言,24 ℃时存活率最高,为 64.01%,而 20 ℃下存活率最低,仅有 40.97%。可见,24 ℃较利于短额负蝗广州种群生长发育。

表4 不同温度下短额负蝗卵的孵化率与和若虫期存活率

Table 4 Hatching rates and nymphal stage survival rates stages of *Atractomorpha sinensis* eggs at different temperatures

单位:%

发育阶段 Developmental stage	温度 Temperature				
	16 ℃	20 ℃	24 ℃	28 ℃	32 ℃
卵 Egg	78.72 ± 5.65 b	85.80 ± 0.79 ab	95.00 ± 2.71 a	95.70 ± 4.30 a	96.15 ± 0.90 a
1 龄 1 st instar	52.00 ± 0.47 c	69.02 ± 0.68 b	79.98 ± 1.19 a	76.98 ± 1.22 a	69.02 ± 0.68 b
2 龄 2 nd instar	51.96 ± 0.98 d	71.02 ± 1.45 c	87.54 ± 0.92 ab	90.96 ± 1.04 a	84.06 ± 1.45 b
3 龄 3 rd instar	51.85 ± 7.41 b	87.75 ± 0.25 a	90.03 ± 1.27 a	88.64 ± 2.66 a	91.49 ± 4.45 a
4 龄 4 th instar	38.89 ± 11.11 b	95.24 ± 2.38 a	95.24 ± 0.00 a	91.98 ± 1.51 a	94.32 ± 0.21 a
5 龄 5 th instar	0.00 ± 0.00 c	100.00 ± 0.00 a	100.00 ± 0.00 a	92.98 ± 3.51 b	100.00 ± 0.00 a
若虫期 Nymph	0.00 ± 0.00 d	40.97 ± 1.58 c	64.01 ± 0.60 a	52.97 ± 1.45 b	48.97 ± 1.49 b

2.5 温度对短额负蝗繁殖力的影响

2.5.1 成虫产卵前期、产卵期及产卵量 温度对短额负蝗繁殖力结果如表 5 所示,产卵前期、产卵期随着温度升高而逐渐缩短,产卵前期在 20 ℃ 下最长,为 23.40 d,是 32 ℃ 下最短产卵前期的 3.90 倍。雌虫产卵期在 20 ~ 24 ℃ 间无差异,但显著差异于其他

温度处理($F_{3,36} = 72.396, P < 0.001$)。28 ℃ 条件下短额负蝗单雌产卵量最高,为 62.00 粒·雌虫⁻¹,20 ℃ 时产卵量最低,为 40.00 粒·雌虫⁻¹。不同温度处理间的单雌个体最高产卵量与最低产卵量之间也存在较大差异。由此可见,24 ~ 28 ℃ 是利于短额负蝗种群繁衍的温度范围。

表 5 不同温度下短额负蝗成虫产卵前期、产卵期和单雌产卵量

Table 5 Preoviposition, oviposition duration and fecundity of <i>Atractomorpha sinensis</i> at different temperatures					
温度 Temperature/℃	单雌最高产卵量 Maximum eggs laid per female	单雌最低产卵量 Minimum eggs laid per female	单雌平均产卵量 Number of eggs laid per female	产卵前期 Preoviposition/d	产卵期 Oviposition duration/d
16	-	-	-	-	-
20	56	24	40.00 ± 1.37 d	23.40 ± 1.16 a	30.60 ± 1.15 a
24	74	43	56.00 ± 1.25 b	15.00 ± 0.26 b	26.70 ± 1.25 a
28	80	52	62.00 ± 1.12 a	10.00 ± 0.42 c	16.70 ± 0.63 b
32	60	39	49.00 ± 1.08 c	6.00 ± 0.37 d	11.00 ± 1.10 c

2.5.2 不同温度下短额负蝗实验种群生命表 不同温度处理下各虫态存活率、雌性比和单雌平均产卵数均为实际观测值,初始卵数按 100 粒计算。基于以上参数组建特定年龄生命表(表 6)。除 16 ℃ 外,其他温度处理条件下均能完成个体发育。在 20 ~ 32 ℃ 范围内的种群趋势指数(I)随着温度升高呈先升再降的趋势。 I 值均大于 1,表明在试验温度条件下,种群数量发生趋势均持续增长。其中,24 ℃ 时的 I 值最高,为 60.28,即在 24 ℃ 条件下,种群经过一个世代在理论数量是上一代的 60.28 倍。结果表明 24 ℃ 是短额负蝗种群生长发育较适宜的温度。

短额负蝗实验种群特定年龄生命表如表 7 所示,短额负蝗(广州种群)在 16 ℃ 条件下不能完成个体发育,其种群平均世代历期在 20 ℃ 时最长(100.81 d),在 32 ℃ 时最短(42.06 d),二者相差 2.40 倍。各温度下 λ 值均大于 1,说明种群在试验温度范围内呈几何增长。然而与其他温度相比,短额负蝗种群的内禀增长率($r_m = 0.0788$)和周限增长率($\lambda = 1.1255$)在 24 ℃ 时升至最高,28 ℃ 时开始下降。净增值率的最高值($R_0 = 68.56$)和最低值($R_0 = 19.00$)却分别在 24 和 32 ℃ 下计算得到。

表 6 不同温度下短额负蝗种实验种群特定年龄生命表分析

Table 6 Analysis of age-specific life table of experimental population of <i>Atractomorpha sinensis</i> at different temperatures					
单位:%					
发育阶段 Developmental stages	温度 Temperature				
	16 ℃	20 ℃	24 ℃	28 ℃	32 ℃
卵 Egg	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
1 龄 1 st instar	78.72	85.80	95.00	95.70	96.15
2 龄 2 nd instar	51.92	71.01	87.50	90.91	84.06
3 龄 3 rd instar	51.85	87.76	90.00	88.57	91.38
4 龄 4 th instar	30.71	95.35	95.24	91.94	94.34
5 龄 5 th instar	-	100.00	100.00	92.98	100.00
成虫 Adult	-	92.68	100.00	100.00	98.00
雌性比 Female ratio	-	0.61	0.47	0.43	0.38
单雌产卵量 Number of eggs laid per female	-	76.45	180.00	160.13	80.00
预计下一代产卵量 Number of eggs expected in the following generation	-	2494.17	6027.75	4535.58	2075.80
种群趋势指数 Population trend index	-	24.94	60.28	45.36	20.76

表 7 不同温度下短额负蝗实验种群主要生态学参数

Table 7 Main ecological parameters of experimental population of *Atractomorpha sinensis* at different temperatures

温度 Temperature/℃	净增值率(R_0) Net reproductive rate	平均世代周期 Mean generation time/d	内禀增长率(r_m) Intrinsic growth rate	周限增长率(λ) Weekly growth rate
16	-	-	-	-
20	42.26	100.81	0.0566	1.0588
24	68.56	65.36	0.0788	1.1225
28	52.98	49.51	0.0707	1.0794
32	19.00	42.06	0.0610	1.0651

3 讨论

全球气候变化是国内外最受关注的热点问题,气候格局决定着昆虫种群的分布格局及生长发育^[21]。蝗虫是农牧业生产中分布最广、危害最重的害虫类群之一,全世界除南极外各大洲均有分布。气候变暖提高越冬存活率,促使其发育速率加快,虫源基数增加,蝗蝻发生期提前,危害时间延长等^[15]。前人阐明环境温度对许多蝗种包括意大利蝗(*Calliptamus italicus*)、西伯利亚蝗(*Gomphocerus sibiricus*)、白纹雏蝗(*Chorthippus albonemus*)等生物学生态学特性影响已有许多报道^[22-24]。例如魏淑花等^[25]研究短星翅蝗(*Calliptamus abbreviatus*)对温度适应性时发现,18℃时1~5龄蝗蝻的发育历期是33℃的2.91~4.59倍。本试验也得到类似结果,除16℃外,短额负蝗(广州种群)在其他温度均能完成世代发育,各发育阶段的历期随温度升高而缩短,相比于32℃时世代历期(49.20±0.36 d),20℃时世代历期(188.00±1.91 d)是其3.82倍,符合变温动物发育与环境温度间关系^[26]。另外,本试验根据温度与短额负蝗发育速率间关系结果推算其各虫态发育最适温区范围为24.27~30.62℃,世代发育的最适温度为25.58℃。线性日度模型虽然能在适温区内较好地拟合发育速率与环境温度间的正相关,但缺少高温区和低温区的发育速率随着温度的升高或降低而趋向于平缓的特征,Logistic模型恰好补充了该缺陷^[27]。昆虫各虫态对环境温度的耐受响应也可用其存活率来体现。若虫期在24℃下的存活率较高于其他温度,20和32℃下存活率相近,16℃条件下短额负蝗只发育到4龄蝗蝻,表明高低温都不利于其生长发育。

卵是昆虫种群繁衍必经的生命阶段,雌虫繁殖

力的强弱是评价昆虫种群增长,实现世代延续的关键因素,其强弱也受环境温度的调控,如遇低温或高温都会干扰雌虫性腺发育,抑制卵子成熟,产卵基数也随之减少^[28]。本研究结果表明雌成虫繁殖力随温度增加呈现先升后降趋势,28℃条件下雌平均产卵量最高(62.00粒·雌虫⁻¹),20℃时最低(40.00粒·雌虫⁻¹)。预测害虫种群未发生动态与制定科学防控前提是准确推算其种群生命表参数^[29]。组建生命表是研究环境因子下害虫种群生态学与害虫治理策略制定的关键所在,有助于解析种群数量动态,预测未来增长趋势,确定防治最佳时机和靶标害虫的生长发育、存活和繁殖力等参数^[30]。而特定年龄与特定时间两种生命表常用于阐述环境因子与害虫种群数量间变化关系,其中种群趋势指数(*I*)、净增值率(R_0)、内禀增长率(r_m)、周限增长率(λ)、平均世代周期(*T*)等是评价种群发生动态(如生存、发育和繁殖率)重要的生命表参数^[31]。内禀增长率(r_m)反映特定条件下种群增长潜力,该值越大,则该昆虫种群发展越快,净增值率(R_0)是种群每个个体一生所产的后代总数^[32]。试验结果表明内禀增长率(r_m)、净增值率(R_0)及种群趋势指数(*I*)均在24℃条件下最高,意味着此温度下种群繁殖力及下一代种群增长数量较强于其他温度,该温度在各处理温度中最接近世代最适温度25.58℃。

4 结论

本研究在恒温下短额负蝗的生长发育对温度响应,通过构建发育速率随着温度变化的数学模型与种群生命表分析。研究结果表明,24℃是短额负蝗广州种群生长发育最适的环境温度,高低温均不利于其种群繁殖。所得短额负蝗种群生物学生态

学特征指标,可为该虫田间预测预报提供重要参考。然而昆虫种群动态与生长发育不仅受环境温度干扰,诸如寄主、光照、农药和降水^[33-36]等非生物和生物因子也会影响蝗虫种群的发生动态。因此,今后有必要结合这些因素进一步研究加以修正,以便更系统、全面揭示其种群发生动态与空间分布。

参考文献

[1] 夏凯龄. 中国动物志,昆虫纲,第4卷. 直翅目,蝗总科,癞蝗科,瘤锥蝗科,锥头蝗科[M]. 北京:科学出版社. 1994: 291-292. (XIA K L. Fauna Sinica, Insecta, Vol. 4. Orthoptera: Acridoidae: Pamphagidae, Chrotogonidae, Pyrgomorphidae[M]. Beijing: Science Press, 1994:291-292.)

[2] HAMASAKI R T , VALENZUELA H R , TSUDA D M , et al. Fresh basil production guidelines for Hawai'i[M]. Institute of Tropical Agriculture and Human Resources, 1994:3.

[3] 姚世鸿. 贵州蝗虫的种类与分布[J]. 贵州师范大学学报(自然科学版),2005,23(1):6-13,123-126. (YAO S H. The kinds and distribution of locusts in Guizhou[J]. Journal of Guizhou Normal University (Natural Science Edition), 2005, 23(1):6-13,123-126.)

[4] 史树森. 大豆害虫综合防控理论与技术[M]. 长春:吉林出版集团有限责任公司,2013:145. (SHI S S. Principles and techniques of soybean pest comprehensive prevention and control [M]. Changchun: Jilin Publishing Group Co. , Ltd. , 2013: 145.)

[5] ISHIKAWA T, TAKAHATA K. Insect and mite pests of pepino (*Solanum muricatum* Ait.) in Japan [J]. Biodiversity Data Journal, 2019,7:e36453.

[6] 陈茂才. 负蝗的初步研究[J]. 昆虫知识,1965(3):153-156. (CHEN M C. A preliminary study on *Atractomorpha* [J]. Entomology Knowledge,1965(3):153-156.)

[7] 田方文. 紫花苜蓿田短额负蝗发生规律与防治[J]. 草业科学, 2005,22(3):79-81. (TIAN W F. The occurrence regulation and control of *Atractomorpha sinensis* in alfalfa field[J]. Pratacultural Science,2005,22(3):79-81.)

[8] AHN J J , CHOI K S , KOH S. Effects of temperature on the development, fecundity, and life table parameters of *Riptortus pedestris* (Hemiptera: Alydidae) [J]. Applied Entomology and Zoology,2019,54(1):63-74.

[9] 王文倩,郑亚强,陈斌,等. 基于年龄-阶段两性生命表的不同寄主对马铃薯块茎蛾生长发育和繁殖力的影响[J]. 植物保护学报,2020,47(3):488-496. (WANG W Q, ZHENG Y Q, CHEN B, et al. Effects of different host plants on the growth, development and fecundity of potato tuber moth *Phthorimaea operculella* based on the age-stage two-sex life table[J]. Journal of Plant Protection,2020,47(3):488-496.)

[10] PEUELAS J, SARDANS J, ESTIARTE M, et al. Evidence of

current impact of climate change on life: A walk from genes to the biosphere [J]. Global Change Biology, 2013, 19(8): 2303-2338.

[11] HUANG Z , REN S , MUSA P D. Effects of temperature on development, survival, longevity, and fecundity of the *Bemisia tabaci* Gennadius (Homoptera: Aleyrodidae) predator, *Axinoscymnus cardilobus* (Coleoptera: Coccinellidae) [J]. Biological Control,2008,46:209-215.

[12] 韩凤英. 短额负蝗卵发育起点温度和有效积温的研究[J]. 山西大学学报(自然科学版),1999,22(4):380-382. (HAN F Y. The threshold of development and accumulating day-degrees to complete development for the egg of *Atractomorpha sinensis* I. Bol. under natural temperature [J]. Journal of Shanxi University (Natural Science Edition), 1999,22(4):380-382.)

[13] 李文博,高宇,崔娟,等. 温度对短额负蝗生长发育及种群趋势的影响[J]. 中国油料作物学报,2020,42(1):127-133. (LI W B, GAO Y, CUI J, et al. Effects of temperature on growth and population trend of *Atractomorpha sinensis* (I. Bolivar) [J]. Chinese Journal of Oil Crop Science,2020,42(1):127-133.)

[14] LI W B, GAO Y, CUI J, et al. Effects of temperature on the development and fecundity of *Atractomorpha sinensis* (Orthoptera: Pyrgomorphidae) [J]. Journal of Economic Entomology, 2020, 113(5):2530-2539.

[15] 李爽. 雌雄意大利蝗耐高温差异及其生理生化响应对策研究[D]. 乌鲁木齐:新疆师范大学,2016. (LI S. Differences in heat tolerance and physio-biochemical mechanisms between female and male *Calliptamus italicus* adults (Orthoptera: Acrididae)[D]. Urumqi: Xinjiang Normal University,2016.)

[16] 周卓,段景攀,韩丽,等. 温度对不同发育时期落叶松尺蠖(*Erannis ankeraria*)影响[J]. 生态学杂志,2021,40(7):2194-2200. (ZHOU Z, DUAN J P, HAN L, et al. Effects of temperature on *Erannis ankeraria* at the different developmental stages[J]. Chinese Journal of Ecology,2021,40(7):2194-2200.)

[17] 宋米霞,刘长仲,刘爱萍,等. 温度对六斑平颜蚜蝇种群生长发育及繁殖的影响[J]. 环境昆虫学报,2020,42(6):1432-1438. (SONG M X, LIU C Z, LIU A P, et al. Effects of different temperatures on the growth, development and reproduction of *Eumerus seximaculatus* [J]. Journal of Environmental Entomology, 2020, 42(6):1432-1438.)

[18] 盛祥耀. 高等数学(上)[M]. 北京:高等教育出版社,2007:106-107. (SHENG X Y. Advanced mathematics (Part 1)[M]. Beijing:Higher Education Press,2007:106-107.)

[19] 陈亚丽,阿地力·沙塔尔,喻峰,等. 榆黄毛毡叶甲的发育起点温度与有效积温的测定[J]. 应用昆虫学报,2016,53(1):185-190. (CHEN Y L, ADIL S, YU F, et al. Developmental threshold temperature and effective accumulated temperature of *Pyrrhalta maculicollis* (Mots.) [J]. Chinese Journal of Applied Entomology,2016,53(1):185-190.)

[20] CUI J, ZHU S Y, BI R, et al. Effect of temperature on the

development, survival, and fecundity of *Heliothis virescens* (Lepidoptera: Noctuidae) [J]. Journal of Economic Entomology, 2018, 111(4):1940-1946.

[21] KHAROUBA H M, LEWTHWAITE J M M, GURALNICK R, et al. Using insect natural history collections to study global change impacts: Challenges and opportunities [J]. Philosophical Transactions-Royal Society Biological sciences, 2019, 374(1763):20170405.

[22] REN J L, TU X B, GE J. Influence of temperature on the development, reproduction, and life table of *Calliptamus italicus* (L.) (Orthoptera: Acridoidea) [J]. Journal of Asia-Pacific Entomology, 2016, 3(19):203-207.

[23] 钱雪,王月莹,谢欢欢,等. 温度对西伯利亚蝗呼吸代谢关键酶活性的影响[J]. 昆虫学报,2017,60(5):499-504. (QIAN X, WANG Y Y, XIE H H, et al. Effects of temperature on the activities of key enzymes related to respiratory metabolism in adults of *Gomphoceris sibiricus* (Orthoptera: Acrididae) [J]. Acta Entomologica Sinica, 2017,60(5):499-504.)

[24] 魏淑花,吴秀芝,王颖,等. 白纹雏蝗抗寒特性和高温耐受力及其机制[J]. 植物保护学报,2021,48(1):172-178. (WEI S H, WU X Z, WANG Y, et al. Cold resistance, high temperature tolerance and resistance mechanism of grasshopper *Chorthippus albonemus* [J]. Journal of Plant Protection, 2021, 48(1):172-178.)

[25] 魏淑花,黄文广,张蓉,等. 短星翅蝗生物学与生态学特性研究[J]. 应用昆虫学报,2015,52(4):998-1005. (WEI S H, HUANG W G, ZHANG R, et al. Biological and ecological characteristics of *Calliptamus abbreviatus* Ikonnikov (Orthoptera: Catantopidae)[J]. Chinese Journal of Applied Entomology,2015, 52(4):998-1005.)

[26] 彩万志,庞雄飞,花保祯,等. 普通昆虫学[M]. 北京:中国农业大学出版社,2001:391-402. (CAI W Z, PANG X F, HUA B Z, et al. General entomology [M]. Beijing: China Agricultural University Press,2001:391-402.)

[27] 李迎洁,王梓英,张国豪,等. 温度对柑橘始叶螨实验种群生长发育繁殖的影响[J]. 生态学报,2014,34(4):862-868. (LI Y J, WANG Z Y, ZHANG G H, et al. Effects of different temperatures on the growth and development of *Eotetranychus kankitus* (Ehara) [J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(4):862-868.)

[28] EVANS R K, TOEWS M D, SIAL A A. Impact of short-and long-term heat stress on reproductive potential of *Drosophila suzukii* Matsumura (Diptera: Drosophilidae) [J]. Journal of Thermal Biology, 2018, 12(78):92-99.

[29] ZAMANI A A, TALEBI A A, FATHIPOUR Y, et al. Effect of temperature on biology and population growth parameters of *Aphis gossypii* Glover (Hom., Aphididae) on greenhouse cucumber[J]. Journal of Applied Entomology, 2006,130:453-460.

[30] CHI H. Life-table analysis incorporating both sexes and variable development rates among individuals [J]. Environmental Entomology, 1988,17:26-34.

[31] ULLAH M S, KAMIMURA T, GOTOH T. Effects of temperature on demographic parameters of *Bryobia praetiosa* (Acari: Tetranychidae) [J]. Journal of Economic Entomology, 2020, 13(1):211-221.

[32] 秦建洋,张蕾,程云霞,等. 不同温度下东方粘虫年龄-阶段两性实验种群生命表的构建[J]. 植物保护学报,2017,44(5):729-736. (QIN J Y, ZHANG L, CHENG Y X, et al. Age-stage two-sex life table for laboratory populations of oriental armyworm *Mythimna separata* (Walker) under different temperatures [J]. Journal of Plant Protection, 2017,44(5):729-736.)

[33] BRANSON D H. Influence of a large late summer precipitation event on food limitation and grasshopper population dynamics in a Northern Great Plains Grassland [J]. Environmental Entomology, 2008,37:686-695.

[34] CHEN G P, HAO S G, PANG B P, et al. Effect of photoperiod on the development, survival, eclosion and reproduction of 4th instar nymph of three grasshopper species in Inner Mongolia [J]. Chinese Bulletin of Entomology,2009,46:51-56.

[35] CUI B Y, HUANG X B, LI S, et al. Quercetin affects the growth and development of the grasshopper *Oedaleus asiaticus* (Orthoptera: Acrididae) [J]. Journal of Economic Entomology, 2019,112:1175-1182.

[36] HINKS C F O, OLFERT N D, WESTCOTT E M, et al. Preference and performance in grasshopper, *Melanoplus sanguinipes* (Orthoptera: Acrididae), feeding on kochia, oats, and wheat; Implications for population dynamics [J]. Journal of Economic Entomology, 1990,83:1338-1343.