

不同温度下韭菜迟眼蕈蚊年龄—阶段两性实验种群生命表的构建

杨玉婷^{1,2}, 梁 玲^{1,2}, 史彩华^{1,2}, 谢 文², 张友军^{2*}

(1. 长江大学, 荆州 434025; 2. 中国农业科学院蔬菜花卉研究所, 北京 100081)

摘要 为了明确温度对韭菜迟眼蕈蚊生长发育和繁殖的影响, 本文利用年龄—阶段两性种群生命表研究了该虫北京种群在 4 种温度(15、20、25 和 30℃)下的发育历期、存活率、繁殖力以及其他的种群参数。结果表明, 韭菜迟眼蕈蚊各虫态发育历期以及产卵前期均随温度升高而缩短。在 25℃ 条件下的单雌产卵量为 85.34 粒, 显著高于其他 3 个温度。内禀增长率(r)和周限增长率(λ)随温度的升高而升高, 平均世代周期(T)则出现相反的趋势, 在 25℃ 下净增殖率(R_0)最大, 为 45.77。韭菜迟眼蕈蚊在 15~30℃ 范围内都能完成生长发育和繁殖, 但 25℃ 下种群存活率高、繁殖力大、世代周期较短, 更适合种群暴发。

关键词 韭菜迟眼蕈蚊; 温度; 年龄—阶段两性生命表; 发育历期; 种群参数

中图分类号: S 436.44 **文献标识码:** A **DOI:** 10.16688/j.zwbh.2018149

Age-stage, two-sex life table of laboratory populations of *Bradysia odoriphaga* Yang et Zhang under different temperatures

YANG Yuting^{1,2}, LIANG Ling^{1,2}, SHI Caihua^{1,2}, XIE Wen², ZHANG Youjun²

(1. Yangtze University, Jingzhou 434025, China; 2. Institute of Vegetables and Flowers, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract In order to understand the effects of temperature on *Bradysia odoriphaga* Yang et Zhang, the age-stage two-sex life table was used to obtain the developmental duration, survival rate, fecundity and population parameters of Beijing population under four different temperatures (15, 20, 25 and 30℃). The results showed that the developmental duration and pre-oviposition duration of *B. odoriphaga* decreased with increasing temperature. The average number of eggs laid per female at 25℃ was 85.34, significantly higher than at the other three temperatures. The intrinsic rate of increase (r) and the finite rate of increase (λ) increased with increasing temperature; however, the mean generation time (T) had a different trend. The highest net reproductive value (R_0) occurred at 25℃ (45.77), significantly different from those at the other temperatures. These results indicated that *B. odoriphaga* was able to develop, survive and reproduce successfully across the entire temperature range from 15℃ to 30℃; however, under the condition of 25℃, with higher survival rate and fecundity and shorter generation, it was the most suitable temperature for the population growth of *B. odoriphaga*.

Key words *Bradysia odoriphaga*; temperature; age-stage two-sex life table; developmental duration; population parameter

韭菜迟眼蕈蚊 *Bradysia odoriphaga* Yang et Zhang, 属双翅目 Diptera, 眼蕈蚊科 Sciaridae, 幼虫俗称“韭蛆”^[1]。该虫是我国特有的蔬菜地下害虫, 可为害 7 科 30 多种植物, 尤喜取食韭菜^[2]。韭蛆钻蛀取食韭菜鳞茎部位, 致使韭菜地下部分腐烂, 地上

部分萎蔫, 严重时造成田块缺苗断垄甚至绝收。防治韭蛆, 传统的方法是利用化学农药灌根处理, 由此引起的“毒韭菜”事件屡有发生。针对这种情况, 中国农业科学院蔬菜花卉研究所的张友军团队研发出了“日晒高温覆膜法”防控韭蛆的技术, 防效高达

100%，该技术是利用高温杀死韭蛆。那么，温度是如何影响韭蛆生物学特性的呢？

温度是自然界中影响昆虫的繁衍、发生和分布的重要的非生物环境因子^[3-5]。梅增霞等^[6]组建了韭菜迟眼蕈蚊在不同温度下的传统的实验种群生命表，发现 20~25℃ 是其最适生长温度。Li 等^[2]研究发现山东地区韭菜迟眼蕈蚊种群在 25℃ 条件下有最大的内禀增长率、净增殖率。史彩华等^[7]调查发现北京地区露地韭菜田块韭蛆的主要为害高峰期在春秋两季，认为其可能与温度有关。罗茵等^[8]研究表明高温胁迫会影响韭菜迟眼蕈蚊各虫态存活，并对存活个体后续发育繁殖有明显的抑制作用。这些结果表明韭蛆的生长发育与温度息息相关。

生命表是一种有效的工具，可以帮助获得各种条件下昆虫详细的生命参数，例如昆虫种群生长发育、繁殖、存活以及种群动态的预测^[9-10]。然而，传统生命表的研究忽略了雄虫在繁殖后代过程中的价值、个体发育速率的差异和世代重叠的现象^[11-12]。年龄-阶段两性种群生命表是传统生命表的延伸，其弥补了传统生命表以平均发育历期为计算依据忽略雄性个体对种群贡献的不足^[13-14]，并已被广泛应用于斜纹夜蛾 *Spodoptera litura*^[15]、西花蓟马 *Frankliniella occidentalis*^[16]、果蝇^[17]和蚊子^[18]等昆虫的研究。本文以北京顺义地区韭蛆为实验种群，利用年龄-阶段两性种群生命表分析 15、20、25 和 30℃ 温度下韭蛆发育历期、存活率和成虫繁殖力等参数，明确不同温度对韭蛆种群动态的影响，以期为该虫的预测预报和防治提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 供试昆虫

试验虫源韭菜迟眼蕈蚊采自北京市顺义区中国农业科学院蔬菜花卉研究所农场，将幼虫带回实验室后用韭菜（‘平韭 5 号’）于人工气候培养箱（MLR-352H-PC）中进行继代饲养，温度为 25℃，相对湿度为 70%±2%，光周期为 L//D=14 h//10 h。实验室继代饲养 5 代后所产卵块为供试卵块，采用滤纸保湿培养皿法饲喂，食料为自种韭菜（未施任何农药）。

1.2 试验方法

试验设定 15、20、25 和 30℃ 共 4 个温度，均在恒温培养箱（MLR-352H-PC）中进行，相对湿度为 70%±2%，光周期为 L//D=14 h//10 h。取供试

卵块 10 粒于塑料培养皿（6 cm×3 cm）（青岛金典）中，放入不同温度的培养箱，每个温度处理重复 11 次（11 皿）。每天上午 9:00 观察并记录每个温度处理下卵的孵化、各个虫态的发育情况和虫数。将同一温度下羽化后的成虫配对放入养虫笼（60 cm×50 cm×50 cm）中，每个温度处理下至少有 30 对成虫配对，观察并记录雌雄成虫的寿命以及产卵量，直至所有成虫全部死亡。如果试验过程中雄虫比雌虫寿命短，则选取相同温度条件下的一头活雄虫补充，尽量使每头雌虫都有雄虫与之交配。

1.3 年龄-阶段两性种群生命表的构建

根据年龄-阶段两性种群生命表原理统计原始数据^[19]，计算发育阶段的发育历期、产卵量、成虫寿命、幼虫存活率、化蛹率及卵到成虫的概率。由每日记录的群体存活数和繁殖数来计算年龄-阶段特征存活率(S_{xj})即个体由卵发育到年龄 x 阶段 j 的概率；雌虫年龄-阶段特征繁殖力(f_x)表示雌成虫在年龄 x 的产卵量；种群年龄-特征存活率(l_x)表示从卵发育到年龄 x 的存活率；种群年龄-阶段特征繁殖力(m_x)表示种群在年龄 x 的平均产卵量；种群年龄-特征存活率(l_x)与种群年龄-阶段特征繁殖力(m_x)的乘积为种群年龄-阶段特征繁殖值($l_x m_x$)。通过 TWOSEX-MSChart 2016 程序计算原始数据和生命表参数^[20]。

R_0 的计算方法如下：

$$R_0 = \sum_{x=0}^{\infty} l_x m_x$$

按文献^[21]计算内禀增长率 r_m ，公式如下：

$$\sum_{x=0}^{\infty} e^{-r_m(x+1)} l_x m_x = 1$$

周限增长率 λ 和平均世代历期 T 的计算公式如下：

$$\lambda = e^{r_m}$$

$$T = \frac{\ln R_0}{r_m}$$

1.4 数据分析

试验所有的数据均采用 SPSS(SPSS Inc., Chicago, USA)数据处理系统进行分析。不同温度条件下生命表参数、发育历期、产卵量、幼虫存活率、化蛹率、卵到成虫的概率进行单因素方差分析，平均数采用 Tukey's HSD 法进行差异显著性检验。Sigma Plot 10.0 绘制韭菜迟眼蕈蚊的存活率、繁殖力、预期寿命、繁殖值和种群动态预测曲线。

2 结果与分析

2.1 不同温度下韭菜迟眼蕈蚊各虫态的发育历期

韭菜迟眼蕈蚊的卵期、幼虫期、蛹期、成虫前期和产卵前期均随着温度的升高而缩短,15℃条件下,韭菜迟眼蕈蚊各虫态的发育历期最长。成虫前期存

活率在 25℃时最高,为 97.3%,在 30℃时最低,为 91.8%。雌成虫寿命也随着温度的升高逐渐缩短,但雄虫则不同,在 25℃的条件下雄虫的寿命最长。在 25℃条件下单雌平均产卵量为 85.34 粒,显著高于其他温度,30℃和 20℃的单雌产卵量显著高于 15℃(表 1)。

表 1 韭菜迟眼蕈蚊各虫态在不同温度条件下的发育历期、成虫前期、成虫寿命和产卵量¹⁾

参数 Parameter	15℃	20℃	25℃	30℃
卵期/d Egg	(8.02±0.12)a	(3.45±0.05)b	(3.34±0.05)b	(3.12±0.06)c
幼虫期/d Larva	(24.89±0.20)a	(23.26±0.17)b	(23.42±0.16)b	(18.31±0.15)c
蛹期/d Pupa	(7.75±0.11)a	(4.13±0.08)b	(3.63±0.07)c	(3.57±0.07)c
成虫前期/d Pre-adult	(40.62±0.20)a	(30.82±0.18)b	(30.31±0.16)b	(24.88±0.14)c
成虫前期存活率/% Pre-adult survival rate	(91.80±2.60)c	(94.50±2.10)b	(97.30±1.50)a	(92.70±2.50)c
产卵前期/d Pre-oviposition period	(5.13±0.49)a	(3.33±0.14)b	(2.04±0.11)c	(1.89±0.10)c
总产卵前期/d Total pre-oviposition period	(45.76±0.48)a	(34.04±0.28)b	(32.61±0.23)c	(26.60±0.18)d
雌虫寿命/d Female adult life span	(6.08±0.48)a	(4.41±0.14)b	(3.03±0.11)c	(2.85±0.10)c
雄虫寿命/d Male adult life span	(3.29±0.17)b	(4.04±0.16)a	(3.31±0.16)b	(3.62±0.17)b
生命周期/d Life span	(44.51±0.40)a	(34.95±0.20)b	(33.54±0.17)c	(28.19±0.19)d
繁殖力 Fecundity (eggs per female)	(49.96±3.74)c	(65.30±3.88)b	(85.34±3.38)a	(72.61±3.63)b

1) 表中数据为平均值±标准误。同一行中不同字母代表在 5%水平上的显著性,使用 Tukey's HSD 检验。
Data in the table are represented as mean±SE. Different letters in the same row indicate significant difference among temperatures using Tukey's HSD test at 5% significance level.

2.2 不同温度对韭菜迟眼蕈蚊种群存活率和繁殖力的影响

特定年龄-阶段特征存活率(S_{xj})曲线表示虫体从卵孵化开始可以存活到年龄 x 阶段 j 的概率。韭

菜迟眼蕈蚊在不同温度下的存活曲线发生重叠,说明韭菜迟眼蕈蚊个体间存在世代重叠的现象。每个温度下韭菜迟眼蕈蚊的卵均能孵化。幼虫、蛹的发育历期均在 15℃下最长(图 1)。

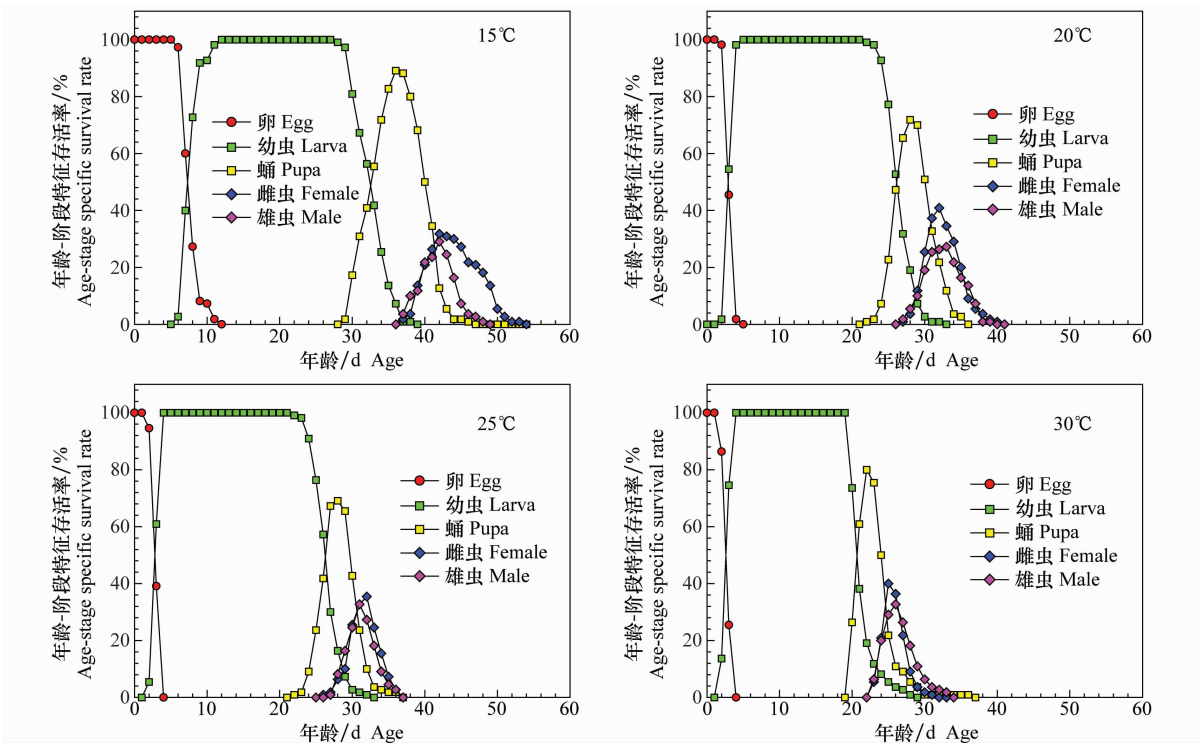


图 1 不同温度下韭菜迟眼蕈蚊年龄-阶段特征存活率(S_{xj})

Fig. 1 Age-stage specific survival rate (S_{xj}) of *Bradysia odoriphaga* at different temperatures

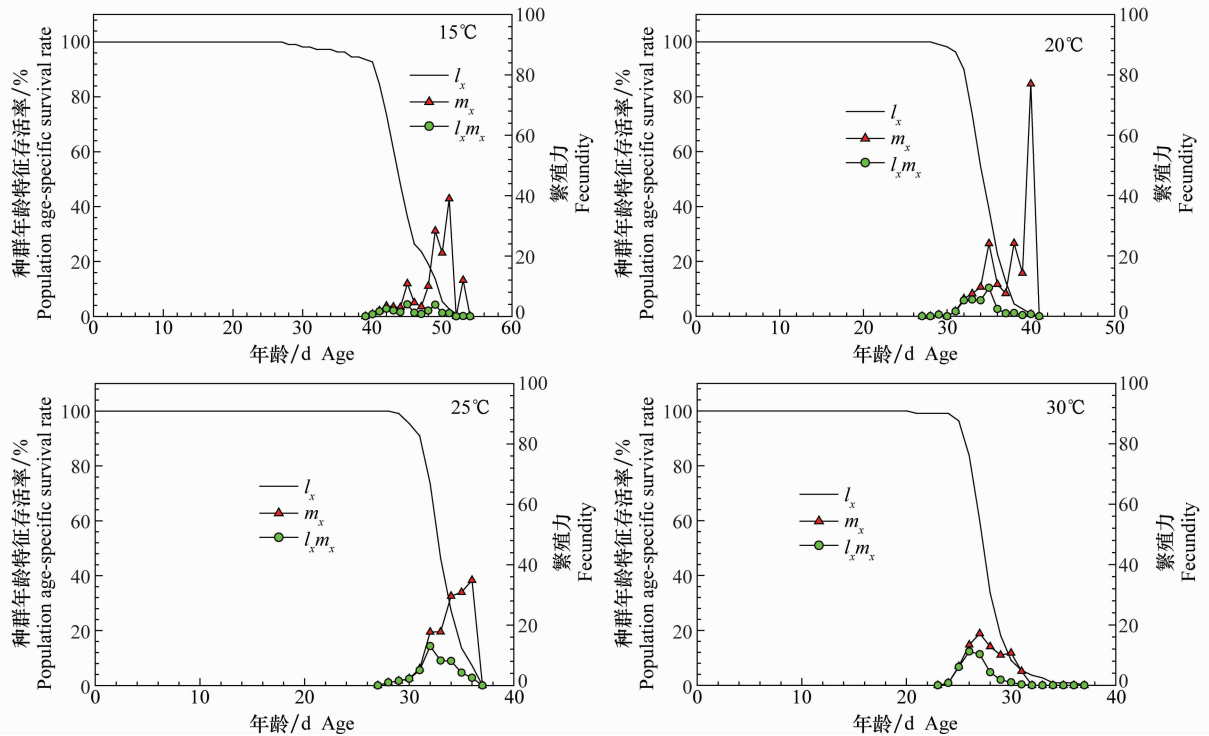


图 2 不同温度条件下韭菜迟眼蕈蚊的种群年龄-特征存活率和繁殖力

Fig. 2 Population age-specific survival rate and fecundity of *Bradysia odoriphaga* at different temperatures

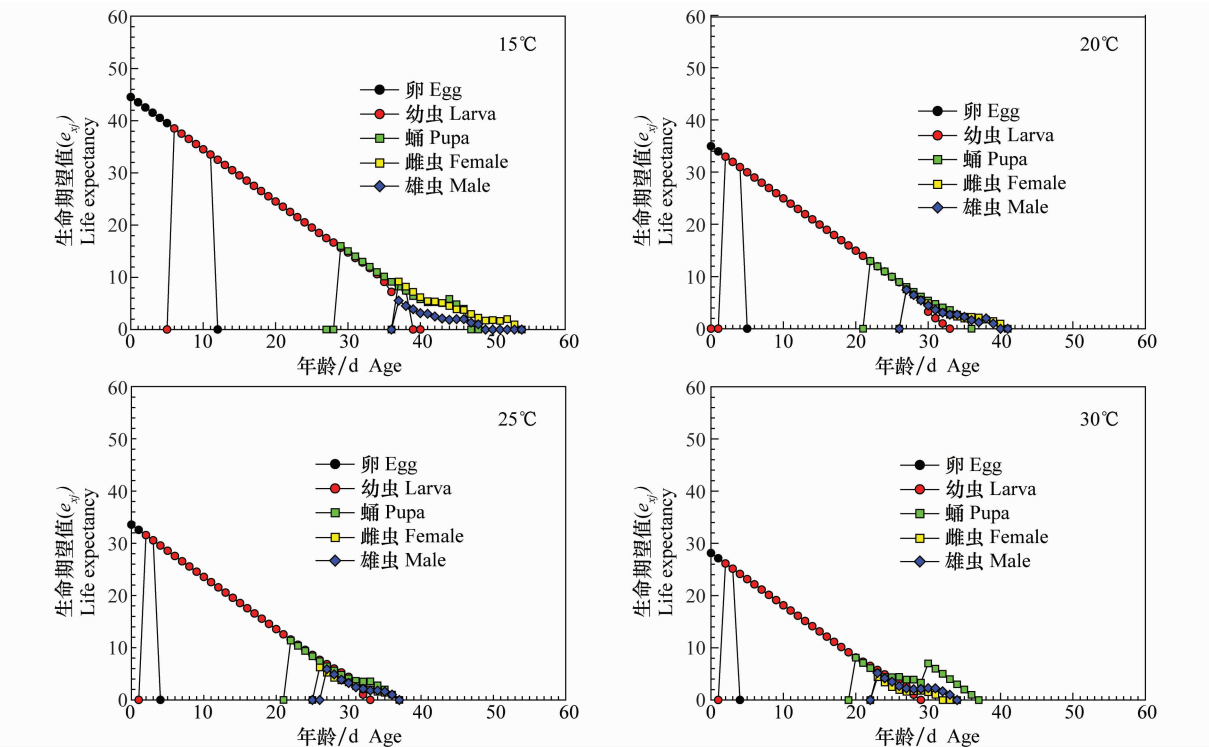


图 3 不同温度下韭菜迟眼蕈蚊的年龄-阶段特征生命期望值 (e_{xj})

Fig. 3 Age-stage specific life expectancy (e_{xj}) of *Bradysia odoriphaga* at different temperatures

图 2 显示了温度对韭菜迟眼蕈蚊年龄-阶段存活率(l_x),整个种群年龄-阶段特征繁殖力(m_x),年
龄-特征繁殖值($l_x m_x$)的影响。年龄-阶段存活率(l_x)曲线是年龄-阶段特征存活率(S_{xj})曲线的简化

形式,将不同虫态之间的存活情况简化到一起,从而忽略了个体之间的差异。不同温度条件下,年龄-阶段存活率(l_x)曲线在发育前期平稳下降,表明这一阶段的虫体的死亡率较低。年龄-阶段寿命期望值(e_{xj})是估计个体在 x 年龄和 j 阶段预期能够存活的

时间(图 3)。不同温度下,韭蛆寿命期望随年龄的增加逐渐下降;在 15℃时,年龄-阶段寿命期望值高于其他温度;不同温度下,韭蛆各虫态的年龄-阶段生殖价值(v_{xj})随着年龄增加而增加,成虫期达到最大值(图 4)。

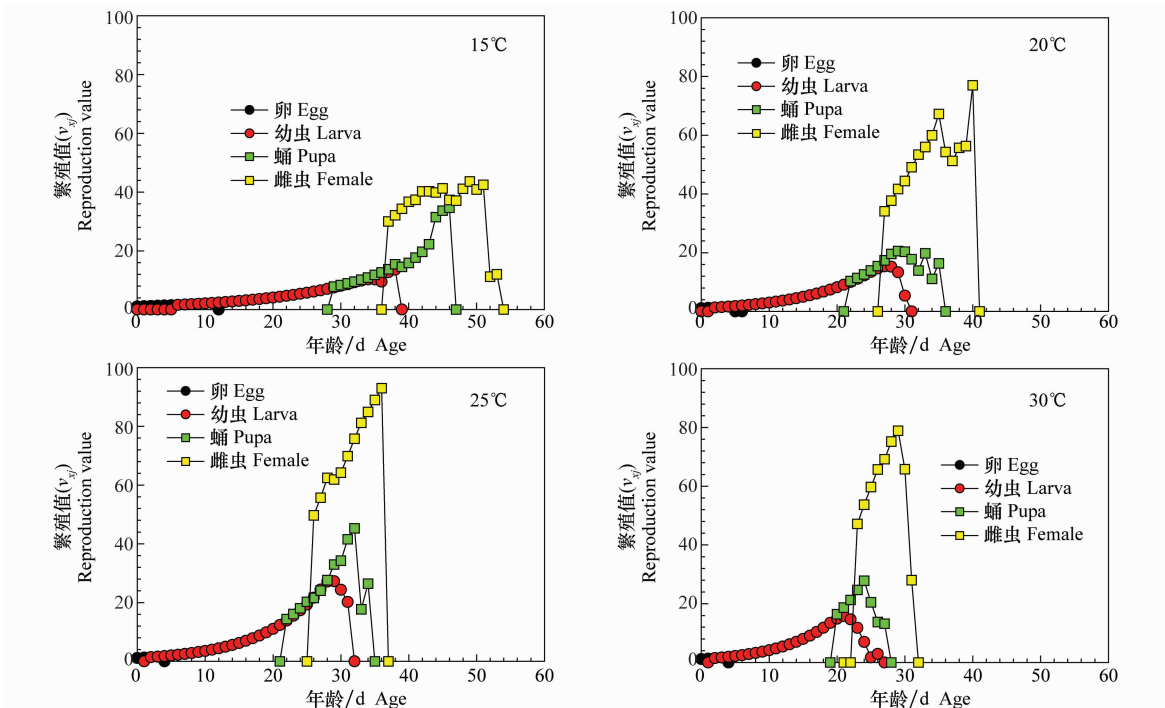


图 4 不同温度下韭菜迟眼蕈蚊的年龄-阶段特征生殖能力 (v_{xj})

Fig. 4 Age-stage specific reproductive value (v_{xj}) of *Bradysia odoriphaga* at different temperatures

2.3 不同温度对韭菜迟眼蕈蚊种群参数的影响

净增殖率 R_0 在 25℃的时候为 45.77,显著高于其他温度。平均世代周期 T 随温度升高而显著降低,依次为 46.29、34.92、33.46 和 27.51 d,内禀增长率 r_m 随温度的升高而升高,分别为 0.067 0、0.100 3、

0.114 2 和 0.129 9 d^{-1} ,周限增长率也出现同样的趋势,分别为 1.069、1.106、1.121 和 1.139 d^{-1} 。因此,说明如果没有其他因素的影响,韭菜迟眼蕈蚊种群在 30℃将会以 0.129 9 的指数增长速率在 1 个世代周期 27.51 d 内每天增长 1.138 7 倍(表 2)。

表 2 韭菜迟眼蕈蚊在不同温度条件下的世代周期、净增殖率、内禀增长率和周限增长率¹⁾

Table 2 Generation time (T), net reproductive rate (R_0), intrinsic rate of natural increase (r_m), and finite rate of increase (λ) of *Bradysia odoriphaga* under different temperatures

温度/℃ Temperature	世代周期(T)/d Mean generation time	净增殖率(R_0) Net reproductive rate	内禀增长率(r_m)/ d^{-1} Intrinsic rate of increase	周限增长率(λ) Finite rate of increase
15	(46.29±0.50)a	(22.25±2.90)c	(0.067 0±0.003 0)d	(1.069±0.003 2)d
20	(34.92±0.28)b	(33.24±3.69)b	(0.100 3±0.003 3)c	(1.106±0.003 6)c
25	(33.46±0.25)c	(45.77±4.44)a	(0.114 2±0.003 0)b	(1.121±0.004 0)b
30	(27.51±0.19)d	(35.65±3.89)b	(0.129 9±0.004 1)a	(1.139±0.004 6)a

1) 表中数据为平均值±标准误。同一列中不同字母代表在 5%水平上的显著性,使用 Tukey's HSD 检验。
Data in the table are represented as mean±SE. Different letters in the same column indicate significant difference among temperatures using Tukey's HSD test at 5% significance level.

2.4 不同温度下韭菜迟眼蕈蚊种群动态的预测

通过 100 d 的种群动态的预测,结果表明韭菜迟眼蕈蚊在 4 个温度梯度下的种群发生趋势明显不同,30℃

条件下第 4 代开始产卵且第 5 代出现,25℃条件下第 4 代处于卵至幼虫的孵化期,20℃条件下第 3 代进入成虫期,15℃条件下第 2 代开始产卵且第 3 代出现(图 5)。

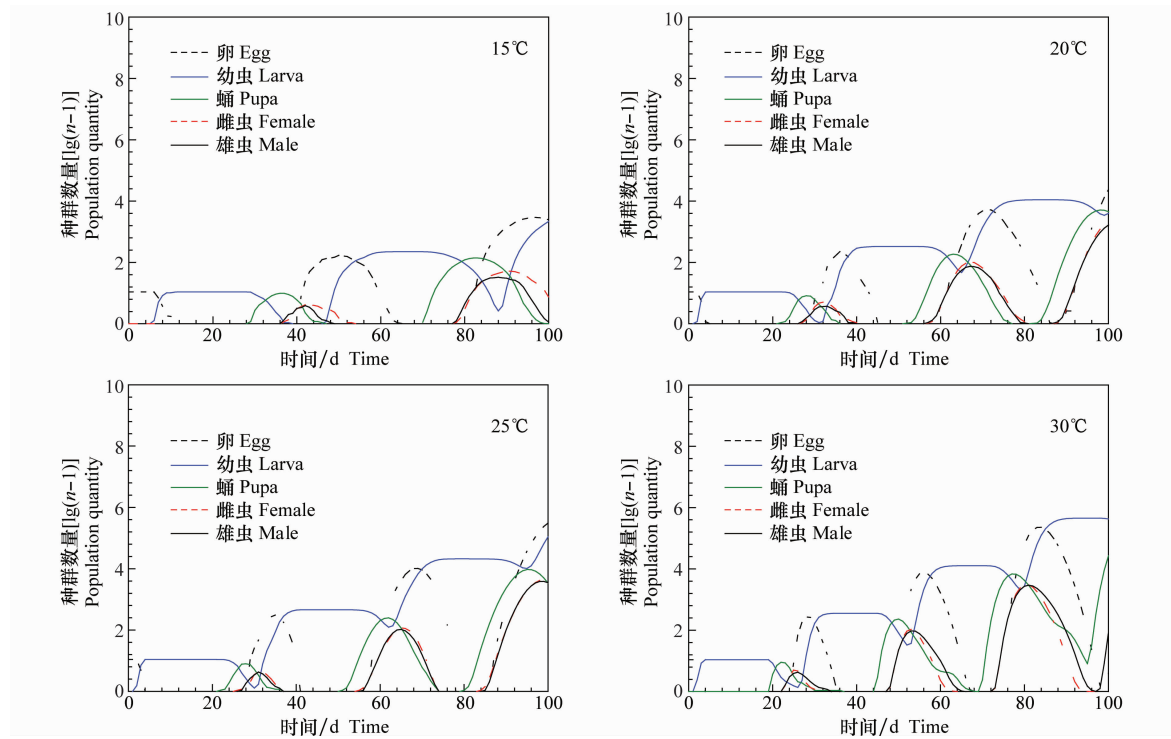


图 5 不同温度下韭菜迟眼蕈蚊种群动态的预测

Fig. 5 The population dynamics of *Bradysia odoriphaga* over the next 100 days as affected by temperature

3 讨论

在自然界中,昆虫是种群数量最大的生物类群,昆虫的生长发育容易受到环境因子的影响。昆虫属于变温动物,其个体的新陈代谢、种群生长发育和繁殖以及昆虫种群发生的趋势均能被温度所影响,因此,昆虫活动与温度密不可分^[22-23]。本研究通过构建 4 个温度(15、20、25℃和 30℃)下韭菜迟眼蕈蚊年龄-阶段两性种群生命表,结果表明温度对其生长发育的影响表现为韭菜迟眼蕈蚊的发育历期和成虫前期随着温度的上升出现缩短的趋势,与 Li 等^[2]和徐蕾等^[6]的研究结果一致。温度越高,昆虫体内的代谢速率越快,从而在一定程度上缩短了昆虫发育时间^[24-26],这可能是温度影响韭菜迟眼蕈蚊发育速率的原因。单雌产卵量在 25℃最高,其次是 20℃和 30℃,在 15℃下产卵量最低。说明温度对韭菜迟眼蕈蚊的产卵有显著影响,这与史彩华等^[7]调查北京地区露地韭菜田中韭菜迟眼蕈蚊在春秋两季幼虫数量急剧上升,而在夏季和冬季幼虫数量下降的结果一致^[7]。此外,韭菜迟眼蕈蚊未来种群动态的预测表明虽然在 30℃条件下韭菜迟眼蕈蚊发生发展的速率快于其他三个温度,但是由于种群世代数增长太快导致后代的存活率明显降低。尽管韭菜迟眼蕈

蚊在低温(15℃)和高温(30℃)条件下,能够完成整个世代,但是成虫的寿命和产卵量较低,表明该条件不利于后代种群的增长。因此,认为 25℃是韭菜迟眼蕈蚊生长发育和繁殖的最适温度。

昆虫种群参数净增殖率、内禀增长率、周限增长率和世代周期均是预测昆虫种群未来动态的重要参数。内禀增长率是衡量昆虫种群在特定的环境条件下的消长趋势;周限增长率是在特定环境中昆虫种群内平均每一个个体能产生的后代数^[27]。本文研究发现韭菜迟眼蕈蚊的周限增长率和内禀增长率均随着温度的升高而逐渐增大,而世代周期随着温度的升高逐渐缩短。这一结果与 Li 等^[2]研究山东种群的结果一致,但山东种群的净增殖率在 25℃条件下最大,其次是 20℃,而本研究中净增殖率在 25℃条件下最大,其次是 30℃,这可能是由于不同地理位置种群生活史不一样造成的。虽然在 30℃的条件下,韭菜迟眼蕈蚊种群参数较高,但在昆虫生命表研究的过程中不能只根据部分生命参数去衡量一个种群未来的潜能,需要考虑整个种群的发育历期、繁殖力以及后代的存活率情况。因此,笔者认为 25℃条件适合韭菜迟眼蕈蚊种群的增长与扩繁。综上所述,温度对韭菜迟眼蕈蚊的生长发育和繁殖以及种群参数均有影响。在自然环境中昆虫的生长发育会

受到各种小气候的影响,例如昼夜温差、湿度变化和寄主植物的生长条件等。温度、湿度、光周期和寄主植物营养等因素对韭菜迟眼蕈蚊生长发育和繁殖的综合影响有待进一步的研究。

参考文献

- [1] 杨集昆,张学敏. 韭菜蛆的鉴定迟眼蕈蚊属二新种(双翅目:眼蕈蚊科)[J]. 北京大学学报, 1985, 11(2): 153-156.
- [2] LI Wenxiang, YANG Yuting, XIE Wen, et al. Effects of temperature on the age-stage, two-sex life table of *Bradysia odoriphaga* (Diptera: Sciaridae)[J]. Journal of Economic Entomology, 2015, 108(1): 126-134.
- [3] UMINA P A, WEEKS A R, Kearney M R, et al. A rapid shift in a classic clinal pattern in *Drosophila* reflecting climate change [J]. Science, 2005, 308(5722): 691-693.
- [4] BROUFAS G D, PAPPAS M L, KOVEOS D S. Effect of relative humidity on longevity, ovarian maturation, and egg production in the olive fruit fly (Diptera: Tephritidae) [J]. Annals of the Entomological Society of America, 2009, 102: 70-75.
- [5] FORSTER J A, HIRST G, WOODWARD G. Growth and development rates have different thermal responses [J]. The American Society of Naturalist, 2011, 178: 668-678.
- [6] 梅增霞,吴青君,张友军,等. 韭菜迟眼蕈蚊在不同温度下的实验种群生命表[J]. 昆虫学报, 2004, 47(2): 219-222.
- [7] 史彩华,杨玉婷,韩昊霖,等. 北京地区韭菜迟眼蕈蚊种群动态及越冬越冬场所调查研究[J]. 应用昆虫学报, 2016, 53(6): 1174-1183.
- [8] 罗茵,祝国栋,薛明,等. 高温胁迫对异迟眼蕈蚊与韭菜迟眼蕈蚊存活及生殖的影响[C]//陈万权. 绿色生态可持续发展与植物保护—中国植物保护学会第十二次全国会员代表大会暨学术年会. 北京:中国农业科学技术出版社, 2017: 152.
- [9] CHI H. Timing of control based on the stage structure of pest population: a simulation approach [J]. Journal of Environmental Entomology, 1990, 83: 1143-1150.
- [10] CHI H, HUANG Y S. Age-stage, two-sex life tables of *Aphidius gifuensis* (Ashmead) (Hymenoptera: Braconidae) and its host *Myzus persicae* (Sulzer) (Homoptera: Aphididae) with mathematical proof of the relationship between female fecundity and the net reproductive rate [J]. Environmental Entomology, 2006, 35: 10-21.
- [11] SOUTHWOOD T R E. The construction, description and analysis of age-specific life-tables [M]//SOUTHWOOD T R E. Ecological methods. Netherlands: Springer, 1978: 356-387.
- [12] 吴坤君,龚佩瑜,李秀珍,等. 粘虫的年龄-发育期结构生命表 [J]. 昆虫学报, 1994, 37(4): 426-434.
- [13] CHI H. Life-table analysis incorporating both sexes and variable development rates among individuals [J]. Environmental Entomology, 1988, 17: 26-34.
- [14] HUANG Y B, CHI H. Assessing the application of the jackknife and bootstrap techniques to the estimation of the variability of the net reproductive rate and gross reproductive rate: a case study in *Bactrocera cucurbitae* (Coquillett) (Diptera: Tephritidae) [J]. Journal of Agriculture and Forestry, 2012, 61: 37-45.
- [15] 郝强,黄倩,梁炜博,等. 不同温度下斜纹夜蛾的两性生命表 [J]. 昆虫学报, 2016, 59(6): 654-662.
- [16] ZHANG Tao, REITZ S R, WANG Haihong, et al. Sublethal effects of *Beauveria bassiana* (Ascomycota: Hypocreales) on life table parameters of *Frankliniella occidentalis* (Thysanoptera: Thripidae) [J]. Journal of Economic Entomology, 2015, 108(3): 975-985.
- [17] CHANG Cheng, HUANG Chunyen, DAI Shumei, et al. Genetically engineered ricin suppresses *Bactrocera dorsalis* (Diptera: Tephritidae) based on demographic analysis of group-reared life table [J]. Journal of Economic Entomology, 2016, 109(3): 987-992.
- [18] MAIMUSA H A, AHMAD A H, KASSIM N F, et al. Age-stage, two sex life table characteristics of *Aedes albopictus* and *Aedes aegypti* in Penang Island, Malaysia [J]. Journal of the American Mosquito Control Association, 2016, 32(1): 1-11.
- [19] CHI H, LIU H. Two new methods for the study of insect population ecology [J]. Bulletin of the Institute of Zoology, 1985, 24: 225-240.
- [20] CHI H. TIMING-MSChart: a computer program for the population projection based on the age-stage, two-sex life table [J/OL]. <http://140.120.197.173/Ecology/Download/TIMING-MSChart.rar>. 2016a.
- [21] GOODMAN D. Optimal life histories, optimal notation, and the value of reproductive value [J]. The American Naturalist, 1982, 119: 803-823.
- [22] HOFFMAN A A, SØRENSEN J G, LOESCHKEV. Adaptation of *Drosophila* to temperature extremes: bringing together quantitative and molecular approaches [J]. Journal of Thermal Biology, 2003, 28: 175-216.
- [23] CUI Xuhong, WAN Fanghao, XIE Ming, et al. Effects of heat shock on survival and reproduction of two whitefly species, *Trialeurodes vaporariorum* and *Bemisia tabaci* biotype B [J]. Journal of Insect Science, 2008, 8: 24.
- [24] ATLIHAN R, CHI H. Temperature-dependent development and demography of *Scymnus subvillosus* (Coleoptera: Coccinellidae) reared on *Hyalopectus pruni* (Homoptera: Aphididae) [J]. Journal of Economic Entomology, 2008, 101: 325-333.
- [25] QIU B, ZHOU Z S, LUO S P, et al. Effect of temperature on development, survival, and fecundity of *Microplitis manilae* (Hymenoptera: Braconidae) [J]. Environmental Entomology, 2012, 41: 657-664.
- [26] YU J Z, CHI H, CHEN B H. Comparison of the life tables and predation rates of *Harmonia dimidiata* (F.) (Coleoptera: Coccinellidae) fed on *Aphis gossypii* Glover (Homoptera: Aphididae) at different temperatures [J]. Biological Control, 2012, 64: 1-9.
- [27] FARHADI R, ALLAHYARI H, CHI H. Life table and predation capacity of *Hippodamia variegata* (Coleoptera: Coccinellidae) feeding on *Aphis fabae* (Homoptera: Aphididae) [J]. Biological Control, 2011, 59(2): 83-89.