

引用格式:

张若彤, 梅宇宇, 杜羿甫, 杨中侠, 李志文. 瓜实蝇种内竞争模式及其数学模型[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2026, 52(1): 89–96.

ZHANG R T, MEI Y Y, DU Y F, YANG Z X, LI Z W. Intraspecific competition pattern in *Zeugodacus cucurbitae* and its mathematical modeling[J]. Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences), 2026, 52(1): 89–96.

投稿网址: <http://xb.hunau.edu.cn>



瓜实蝇种内竞争模式及其数学模型

张若彤¹, 梅宇宇², 杜羿甫³, 杨中侠³, 李志文^{2*}

(1. 湖南农业大学昆虫研究所, 湖南 长沙 410128;

2. 植物病虫害生物学与防控湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410128)

摘要: 为明确瓜实蝇(*Zeugodacus cucurbitae*)的种内竞争模式及其阈值密度, 以一串铃南瓜为寄主, 通过室内控制实验并结合Logistic II模型, 研究不同卵密度下幼虫的生长发育参数; 通过记录不同大小雌虫的日产卵量, 研究雌虫大小与繁殖力的相关性。结果表明, 瓜实蝇呈现典型的利用性竞争模式。Logistic II模型能较好地预测幼虫发育与种群密度的变化过程, 其大致分为4个阶段: 当种群密度 $x < 1.8030$ 粒/10 g果实时, 蛹体积与未成熟期死亡率均处于缓慢变化阶段; 当 $1.8030 \leq x < 71.0101$ 粒/10 g果实时, 蛹体积大幅下降(相较于缓慢变化阶段, 降幅达79.63%); 当 $71.0101 \leq x < 123.2499$ 粒/10 g果实时, 未成熟期死亡率急剧上升(相较于缓慢变化阶段, 增幅达58.14%); 当 $x \geq 123.2499$ 粒/10 g果实时, 各参数趋于稳定。瓜实蝇雌性比不受密度影响; 雌虫大小与繁殖力呈显著正相关, 体型更大的个体具有更长的产卵期、寿命以及更高的总产卵量。

关键词: 瓜实蝇; 种内竞争; 种群密度; Logistic II模型; 雌虫繁殖力

中图分类号: Q968

文献标志码: A

文章编号: 1007-1032(2026)01-0089-08

Intraspecific competition pattern in *Zeugodacus cucurbitae* and its mathematical modeling

ZHANG Routong¹, MEI Yuyu², DU Yifu³, YANG Zhongxia³, LI Zhiwen^{2*}

(1. Institute of Insect, Hunan Agricultural University, Changsha, Hunan 410128, China; 2. Hunan Provincial Key Laboratory for Biology and Control of Plant Diseases and Insect Pests, Changsha, Hunan 410128, China)

Abstract: Controlled laboratory trials were conducted using *Cucurbita moschata* as the host to ascertain the intraspecific competitive patterns and threshold density of *Zeugodacus cucurbitae*. Using Logistic II modeling, the growth and development parameters of larvae at varying egg densities were investigated. To explore the connection between female size and fecundity, the daily egg-laying output of female flies of varying sizes was monitored. The results showed that *Z. cucurbitae* exhibited a typical pattern of exploitative competition. The Logistic II model provided an accurate prediction of larval development and changes in population density, which could be roughly divided into four phases. When the population density(x) was less than 1.8030 eggs per 10 g fruit, pupal volume and immature mortality changed gradually. In the range of $1.8030 \leq x < 71.0101$ eggs per 10 g fruit, pupal volume declined significantly(experiencing 79.63% reduction compared to the gradual-change phase). When $71.0101 \leq x < 123.2499$ eggs per 10 g fruit, there was a sharp increase in the immature mortality(which rised by 58.14% in relation to the gradual-change phase). When x exceeded 123.2499 eggs per 10 g fruit, all parameters stabilized. *Z. cucurbitae* females were not influenced by density. There was a significant positive correlation between female body size and fecundity. Larger individuals exhibited longer egg-laying period, lifespans and higher total egg outputs.

Keywords: *Zeugodacus cucurbitae*; intraspecific competition; population density; Logistic II model; female fecundity

收稿日期: 2025-04-06

修回日期: 2025-12-24

基金项目: 湖南省现代农业发展专项项目(湘财农指(2021)42号、湘财农指(2022)67号); 湖南省重点研发计划项目(2024AQ2036)

作者简介: 张若彤(2001—), 女, 山西运城人, 硕士研究生, 主要从事昆虫生态、害虫防治等研究, zhangruotong200110@163.com; *通信作者, 李志文, 博士, 讲师, 主要从事昆虫生态、害虫防治等研究, lizhw809718@aliyun.com

竞争是塑造生态群落中生物分布、丰度和多样性的关键生物因素之一^[1]。在植食性昆虫中,种内竞争显著影响昆虫的种群动态和结构^[2-4]。种内竞争机制主要分为两类:一类是利用性竞争,表现为个体间间接争夺有限资源以满足自身发育需求,随着幼虫密度的增加,个体体型减小且发育时间延长,但死亡率保持稳定,直至存活幼虫数量达到阈值密度^[5-7];另一类是干扰性竞争,通过直接物理竞争或排他行为影响竞争者,表现为存活幼虫数量在密度增加时维持恒定^[5,8]。

实蝇科昆虫的幼虫在封闭的果实内发育^[9-10],这种受限环境使其难以逃避竞争或寻找质量更高的斑块,从而增加幼虫参与竞争交互的概率^[7,11]。竞争的强度不仅影响幼虫的生长发育,还可通过影响营养摄取间接影响成虫的繁殖潜力^[7,12-15]。研究表明,瓜实蝇(*Zeugodacus cucurbitae*)、南亚实蝇(*Z. tau*)、桔小实蝇(*Bactrocera dorsalis*(Hendel))、番石榴实蝇(*B. correcta*(Bezzi))和油橄榄果实蝇 *B. oleae*在高密度条件下,成虫生物量、发育历期、蛹质量及存活率均显著降低^[16-18]。DESOUHANT等^[19]发现椰子象甲幼虫数量与个体大小呈负相关,而幼虫大小直接关联成虫大小和雌虫繁殖力。NUFIO等^[20]对核桃实蝇(*Rhagoletis juglandis*)的研究进一步证实,单果内幼虫数量增加会导致后代存活率和蛹质量下降,而蛹大小是成虫体型及繁殖力的关键预测指标^[21-22]。此外,李志文^[23]指出,小果油茶的体积限制油茶象(*Curculio styracis*)幼虫的生长发育,幼虫质量随果实体积的增大而显著提升。

瓜实蝇(*Zeugodacus cucurbitae*)属双翅目(Diptera)实蝇科(Tephritidae)瓣果实蝇属(*Zeugodacus*),又称瓜蛆、针蜂等,是重要的世界性检疫害虫^[24-26]。1913年,印度学者首次报道瓜实蝇^[27];1985年,我国首次从香港入境的白瓜中截获该物种。目前,该物种已在我国南部和中部多省定殖并造成严重危害^[28-30]。其寄主范围广泛,可危害130余种植物,尤以葫芦科植物为主^[31-33]。在田间,该虫主要以幼虫为害,雌虫通过产卵器将卵产于鲜嫩瓜果内,幼虫孵化后在果实内部取食,导致瓜果腐烂、脱落^[34-35]。由于其寄主范围广、繁殖力强、世代重叠严重,田间防治难度大,严重时可使农作物大量减产甚至绝收^[29-31]。

在研究方法上,周昌清等^[16]主要采用线性模型对瓜实蝇在种内竞争中的死亡率和虫体质量进行

定量分析。在此基础上,本研究进行以下改进:首先,对死亡率与蛹体积数据进行联合分析,进而探讨雌虫体型大小与繁殖力的关系,全面评估种内竞争对瓜实蝇生活史的影响,并推测其竞争策略;其次,为准确量化瓜实蝇幼虫对不同种群密度的响应模式,确定未成熟期(幼虫+蛹)死亡率和蛹体积发育的阈值,本研究引入数学模型进行拟合分析。鉴于昆虫体质量的生长通常遵循S形曲线,本研究选取Richards、von Bertalanffy、Gompertz、Logistic I及Logistic II 5种常用模型^[36-39]。瓜实蝇幼虫的蛹体积和死亡率随种群密度的变化呈现出明显的阈值特征,与Logistic II方程的特征高度吻合。因此,本研究采用这5种模型进行拟合分析,并通过残差平方和(SSE)、赤池信息准则(AIC)值评估各模型的拟合优度,确定最优数学模型。

本研究采用室内试验与数学模型相结合的方法,定性、定量地分析瓜实蝇在南瓜中的种内竞争对后代适合度的影响,旨在:1) 阐明单果内卵密度对幼虫适合度的影响机制;2) 揭示雌虫体型大小与繁殖力的相关性;3) 建立未成熟期死亡率及蛹体积与种群密度的最优预测模型;4) 确定瓜实蝇幼虫发育的阈值密度。

1 材料与方法

1.1 供试虫源和寄主

供试瓜实蝇来源于本课题组自建的室内稳定种群。饲养条件如下:温度为(26±1)℃,相对湿度为(70±10)%,光照14 h/黑暗10 h。供试寄主选用新鲜、无机械损伤、无病虫害、未施药的嫩南瓜(一串铃),采自湖南省长沙市望城区光明村混合菜园。用于诱集产卵的黄瓜采购于湖南省长沙市汇邻里联华超市,使用前经清水浸泡2 h以上,以减少农药残留。

1.2 种群密度对幼虫生长发育的影响

参考文献[16],本研究设置16个卵密度梯度(5~150粒/10 g果实),当密度达到10粒/10 g果实时,以10粒卵为增量(5, 10, 20, ..., 150粒/10 g果实),每组处理重复3次。

具体操作方法如下:早上8:30将黄瓜片(1.5 cm×2.0 cm×5.0 mm)置于养虫笼(60 cm×60 cm×60 cm)中诱集产卵,3 h后取出,用毛笔将卵按预设密度接入横向切开的南瓜中,用保鲜膜包裹切口。30 h后挑

出南瓜内未孵化的卵，并补入同一批孵化备用的幼虫，再次将切口包裹直至南瓜腐烂瘫软(约3 d)。随后将南瓜移至湿润细沙(含水量10%)上，观察到有幼虫钻入细沙(1~2 d)后等待7 d收集蛹，测量蛹长和蛹宽后将其置于湿润蛭石中，沙中残留幼虫记为死亡个体。分别记录羽化日期、羽化数量和性别。

1.3 幼虫发育与种群密度关系的数学模型

用5种S形曲线方程拟合蛹体积或未成熟期死亡率(y)与种群密度(x)的关系，拟合效果根据残差平方和、赤池信息准则值进行判断，其值越小，拟合效果越佳^[40-41]。

Richards模型方程为

$$y=A_1(1\pm ze^{-kx})^{-(1/n)} \quad (1)$$

von Bertalanffy模型方程为

$$y=A_1\left[1-\frac{1}{3}e^{-k(x-x_c)}\right]^3 \quad (2)$$

Gompertz模型方程为

$$y=A_1e^{-e^{-k(x-x_c)}} \quad (3)$$

Logistic I模型方程为

$$y=\frac{A_1}{1+e^{-k(x-x_c)}} \quad (4)$$

Logistic II模型方程为

$$y=\frac{A_1-A_2}{1+(x/x_0)^p}+A_2 \quad (5)$$

式中： y 为蛹体积或未成熟期死亡率； x 为种群密度； A_1 为潜在最大蛹体积或最小死亡率； A_2 为潜在最小蛹体积或最大死亡率； z 为积分参数； k 和 p 为与变化速率相关的参数； x_c 和 x_0 为拐点处种群密度； n 为曲线形状参数。

1.4 雌虫大小与繁殖力

每日8:30将黄瓜片(1.5 cm×2.0 cm×5.0 mm)置于养虫笼(60 cm×60 cm×60 cm)中诱集产卵，3 h后取出并放入不同大小的南瓜内饲养，4 d后将南瓜移至湿润细沙(含水量10%)上化蛹。自第5天起，每日18:00收集蛹，持续3 d，选取第6天收集的蛹，分别称量质量和分组。实验设置10个蛹质量组(0.012~0.022 g，组间跨度为0.001 g，如第1组质量为[0.012, 0.013) g，其余以此类推)。每组选取50~100个蛹。若蛹数不足则补充前、后两天收集的蛹，并单独记录收蛹日期。

将分级后的蛹分别置于养虫笼(30 cm×30 cm×

30 cm)中羽化，喂食饲料(白糖与酵母质量比为1:1)和水。观察到成虫交配后，用昆虫夹取60对交配成虫，单独置于养虫盒中。每日8:00提供3 mm厚黄瓜片以供产卵，19:00取出黄瓜片并清查产卵量。雌虫死亡后补充同日羽化的雄虫。待雌虫自然死亡后，立即测量头宽、中胸长、股节长、胫节长及基中室长度(精度为0.01 mm)。试验过程中将非正常死亡的雌虫个体数据予以剔除。

1.5 数据统计与分析

蛹体积按椭球体积公式计算：

$$V=\frac{4}{3}\pi cd^2=\frac{1}{6}\pi LW^2 \quad (6)$$

式中： V 为椭球体积(蛹体积)； c 为椭球长半轴； d 为椭球短半轴； L 为蛹长； W 为蛹宽。

采用Excel 2021、SPSS 26.0和Origin 2022进行数据分析与作图。用One-way ANOVA(Duncan)法分析种群密度对瓜实蝇蛹体积、未成熟期死亡率和雌性比的影响，用独立线性回归拟合雌虫大小与繁殖力的相关性。

2 结果与分析

2.1 种群密度对幼虫生长发育的影响

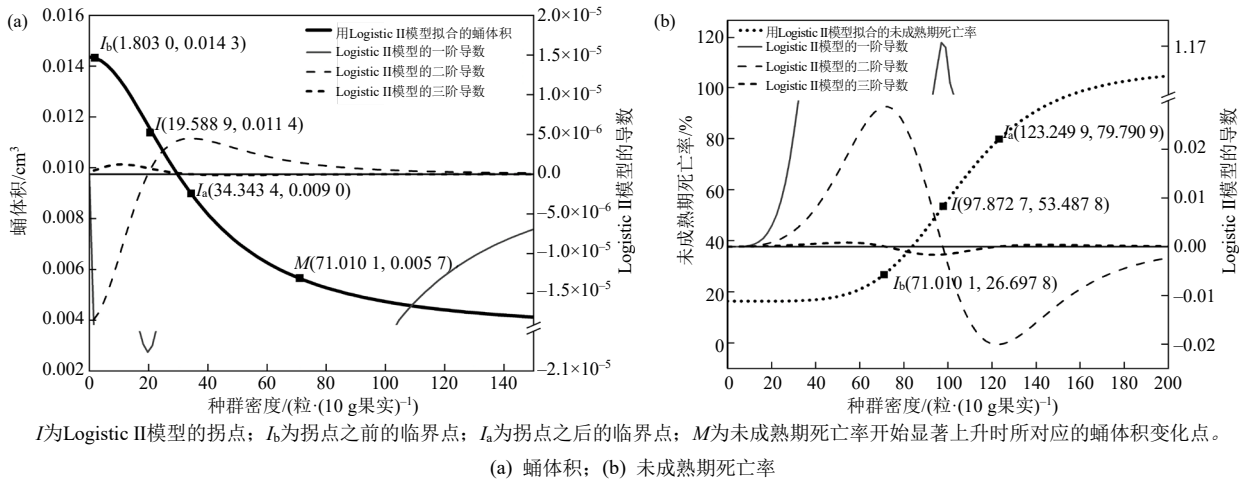
由图1可见，随着种群密度的增加，蛹体积呈递减趋势，未成熟期死亡率逐渐上升。采用5种模型(Richards、von Bertalanffy、Gompertz、Logistic I和Logistic II)分析种群密度对幼虫发育的影响，结果显示，Richards和von Bertalanffy模型未收敛；Gompertz模型仅对死亡率与种群密度的关系收敛；而Logistic I和Logistic II模型则表现出较好的拟合效果($P<0.0001$)，其参数值见表1。进一步比较发现，Logistic II模型的AIC值最低，蛹体积和未成熟期死亡率的AIC值分别为-245.436 0和70.109 5(表1)，表明其是描述幼虫发育与种群密度关系的最优模型。

通过计算Logistic II模型的二阶导数和三阶导数寻找生长曲线拐点，结果见图1。由图1可见，当二阶导数为零时，一阶导数达到极值，此时蛹体积或未成熟期死亡率随种群密度的变化速率最大，对应模型拐点(I)的坐标；当三阶导数为零时，二阶导数达到极值，表明一阶导数变化最为剧烈，其对应的点(I_b 和 I_a)为模型的关键临界点，据此可将模型分为3个阶段，即缓慢变化阶段(I_b 之前)、快速变化阶

段(I_b 和 I_a 之间)和渐进变化阶段(I_a 之后)。

模型预测结果(图1)表明,当种群密度(x)低于1.803 0 粒/10 g果实时,蛹体积(V)处于缓慢降低阶段($V \geq 0.014 3 \text{ cm}^3$),体积减少量($A_1 - V$)占其弹性范围($A_1 - A_2$)的0.93%。当 $1.803 0 \leq x < 71.010 1$ 粒/10 g果实时,蛹体积随着种群密度增加而急剧减少($0.005 7 \leq V < 0.014 3 \text{ cm}^3$),减少量占弹性范围的79.63%。当 $x \geq 71.010 1$ 粒/10 g果实时,蛹体积的减少量

($V < 0.005 7 \text{ cm}^3$)占弹性范围的19.44%。当 $x < 71.010 1$ 粒/10 g果实时,未成熟期死亡率(m)处于缓慢上升阶段($m < 26.697 8\%$),死亡率增加量($m - A_1$)只占弹性范围的11.35%。未成熟期死亡率在 $71.010 1 \leq x < 123.249 9$ 粒/10 g果实区间内快速上升($m < 79.790 9\%$),其增加量占其弹性范围的58.14%。当 $x \geq 123.249 9$ 粒/10 g果实时,未成熟期死亡率处于渐进变化阶段($m \geq 79.790 9\%$),其增加量占弹性范围的30.51%。



I为Logistic II模型的拐点; I_b 为拐点之前的临界点; I_a 为拐点之后的临界点; M为未成熟期死亡率开始显著上升时所对应的蛹体积变化点。(a) 蛹体积; (b) 未成熟期死亡率

图1 种群密度对蛹体积和未成熟期死亡率的影响及模型拟合

Fig. 1 Effects of population density on pupal volume and mortality in the immature stage and the model fitting

表1 未成熟期死亡率及蛹体积与种群密度的关系及拟合效果

Table 1 The relationship between mortality in the immature stage and pupal volume and population density and the fitting effect

参数	模型	A_1	A_2	$x_c(x_0)$	$k(p)$	残差平方和	AIC值	R^2_{adj}	P
未成熟期死亡率	Logistic I		156.481 0	126.370 6	0.023 8	1 003.649 5	72.221 0	0.919 7	<0.000 1
	Logistic II	16.330 2	107.657 7	105.250 7	5.201 5	776.216 6	70.109 5	0.932 7	<0.000 1
蛹体积	Logistic I		37.981 5	-721.085 2	-0.011 0	<0.000 1	-219.025 9	0.918 3	<0.000 1
	Logistic II	0.014 4	0.003 6	34.485 2	1.986 9	<0.000 1	-245.436 0	0.985 0	<0.000 1

注: A_1 为潜在最大蛹体积(cm^3)或最小死亡率(%); A_2 为潜在最小蛹体积(cm^3)或最大死亡率(%); x_c 、 x_0 为拐点处种群密度(粒·(10 g果实) $^{-1}$); R^2_{adj} 表示调整后的决定系数,用于评估回归模型的拟合优度,其值越大,模型拟合效果越好; P表示概率。

多重比较分析结果(图2)显示,在 $1.803 0 \leq x < 71.010 1$ 粒/10 g果实的8个处理间, V 仅在 $x=5$ 粒/10 g果实和 $x=10$ 粒/10 g果实处理间无显著差异($P > 0.05$),其余处理间均依次递减且差异显著($P < 0.05$);未成熟期死亡率在各处理间均无显著差异($P > 0.05$)。在 $x \geq 71.010 1$ 粒/10 g果实的8个处理间, V 整体呈S形缓慢下降趋势;在 $71.010 1 \leq x < 123.249 9$ 粒/10 g果实的5个处理间,未成熟期死亡率仅在 $x=100$ 粒/10 g果实时出现下降,其余密度下均呈上升趋势;在 $x \geq 123.249 9$ 粒/10 g果实的3个处理间,未成熟期死亡率均无显著差异($P > 0.05$)。



小写字母表示不同种群密度下的未成熟期死亡率或蛹体积差异有统计学意义($P < 0.05$)。

图2 不同种群密度对瓜实蝇的未成熟期死亡率和蛹体积的影响

Fig. 2 Effects of different population densities on mortality and volume of pupa of *Z. cucurbitae* in the immature stage

不同种群密度对瓜实蝇的雌虫比的影响见图3。由图3可见：不同种群密度下，瓜实蝇雌虫比在

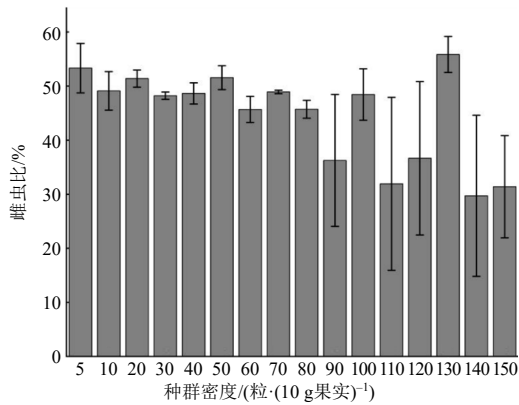


图3 不同种群密度对瓜实蝇的雌虫比的影响

Fig. 3 Effects of different population densities on the sex ratio of *Z. cucurbitae*

(29.71±14.91)%~(55.85±3.33)%之间波动，无明显单调变化趋势。多重比较分析结果亦表明，各种群密度下的雌虫比均无显著差异($P>0.05$)。

2.2 雌虫大小与繁殖力

瓜实蝇雌虫繁殖力参数见表2。由表2可见，瓜实蝇雌虫的平均产卵前期为(14.46±0.79) d；实际产卵天数为(39.60±3.21) d；寿命为(87.72±5.31) d；第一窝卵量为(28.13±3.19)粒；总产卵量为(901.08±82.69)粒；日均产卵量为(22.47±0.45)粒。

表2 瓜实蝇雌虫繁殖力

Table 2 Fecundity of female *Z. cucurbitae*

参数	产卵前期/d	实际产卵天数/d	寿命/d	第一窝卵量/粒	总产卵量/粒	日均产卵量/粒
平均值±标准差	14.46±0.79	39.60±3.21	87.72±5.31	28.13±3.19	901.08±82.69	22.47±0.45
95%置信区间上限	16.08	46.10	98.95	34.43	1 056.29	23.38
95%置信区间下限	13.05	77.77	77.77	22.26	747.65	21.65
最低值	10	3	19	1	28	1
最高值	36	82	186	89	2 009	120

注：雌虫样本量为39头。

采用独立线性回归法分析雌虫大小对繁殖力的影响，结果见表3。由表3可见，与日期相关的3个繁殖力参数中，实际产卵天数与3个雌虫大小指标(头宽、股节长和基中室长)均呈显著正相关($P<0.05$)，雌虫寿命与其中的2个指标(头宽和基中室长)亦呈显

著或极显著正相关关系，而产卵前期与雌虫大小指标无显著相关性($P>0.05$)。在产卵量相关的3个繁殖力参数中，仅总产卵量与雌虫大小指标(头宽、股节长和基中室长)呈显著或极显著的线性正相关，第一窝卵量及日均产卵量则均未表现出显著相关性。

表3 雌虫大小对繁殖力的影响

Table 3 The effects of female size on fecundity

雌虫大小指标	繁殖力参数	a	b	R ² _{adj}	F	P
头宽	产卵前期	9.20	2.67	-0.024 6	0.087 9	0.768 5
	实际产卵天数	-126.83	84.59	0.113 1	5.844 0	0.020 7*
	寿命	-214.08	153.40	0.151 7	7.795 3	0.008 2**
	第一窝卵量	-24.58	26.79	-0.011 9	0.553 4	0.461 6
	总产卵量	-3 535.87	2 255.19	0.132 3	6.794 6	0.013 1*
	日均产卵量	-1.68	11.99	-0.002 0	0.926 9	0.341 9
股节长	产卵前期	14.81	-0.17	-0.027 0	0.000 5	0.982 0
	实际产卵天数	-85.38	63.00	0.080 3	4.319 6	0.044 7*
	寿命	-85.28	87.22	0.052 8	3.117 9	0.085 7
	第一窝卵量	33.60	-2.76	-0.026 8	0.008 0	0.929 3
	总产卵量	-2 313.27	1 620.47	0.086 6	4.604 3	0.038 5*
	日均产卵量	11.03	5.48	-0.020 0	0.263 0	0.611 1

表3(续)

雌虫大小指标	繁殖力参数	a	b	R^2_{adj}	F	P
基中室长	产卵前期	8.10	2.67	-0.023 5	0.127 9	0.722 6
	实际产卵天数	-140.32	75.59	0.135 3	6.947 0	0.012 2*
	寿命	-162.06	104.95	0.094 4	4.959 6	0.032 1*
	第一窝卵量	-28.37	23.74	-0.009 8	0.631 9	0.431 8
	总产卵量	-3 925.56	2 028.00	0.160 0	8.235 5	0.006 8**
	日均产卵量	-10.78	13.73	0.021 0	1.805 4	0.187 2

注: 方程模型为 $s=a+bf$, s 为雌虫大小指标, f 为繁殖力参数, a 和 b 为方程参数; F 为用于检验模型整体显著性的统计量; *和**分别表示显著相关($P<0.05$)和极显著相关($P<0.01$)。

3 讨论

3.1 Logistic II模型与幼虫响应方式

实蝇科昆虫作为内寄生性昆虫,其幼虫发育完全依赖于成虫产卵选择的寄主质量^[2,9-10]。种群密度是决定种内竞争强度的关键因素,密度越高,资源限制越明显,种内竞争越激烈^[18]。尽管前人研究已探讨不同密度下幼虫死亡率和蛹体积的变化规律,但对其动态时序关系及生物学意义仍缺乏系统阐释^[16,18,20]。本研究通过室内试验结合Logistic II模型分析发现,当 $x<1.803 0$ 粒/10 g果实时,瓜实蝇处于最宜密度范围,生长发育未受资源限制;当 $1.803 0 \leq x < 71.010 1$ 粒/10 g果实时,蛹体积随密度增加显著下降(图1和图2),反映食物资源对虫体发育的限制作用。值得注意的是,在 $x=5$ 粒/10 g果实与 $x=10$ 粒/10 g果实这2个种群密度下,蛹体积无显著差异(图2),可能是因为当 $x=20$ 粒/10 g果实时,蛹体积下降幅度过大导致模型拟合偏差。当 $34.343 4 \leq x < 71.010 1$ 粒/10 g果实时,尽管未成熟期死亡率缓慢降低,但幼虫通过减少摄食量维持存活,表明蛹体积未达潜在阈值;当 $x \geq 71.010 1$ 粒/10 g果实时,蛹体积趋于稳定,未成熟期死亡率显著上升;当 $x \geq 123.249 9$ 粒/10 g果实时,未成熟期死亡率与蛹质量均不再受种群密度的限制(图1)。这一结果揭示了幼虫通过资源分配调节应对竞争的生存策略^[42]。

3.2 种内竞争与成虫适合度

当瓜实蝇种群密度在5~150粒/10 g果实范围内时,雌性比维持在29.71%~55.85%,与种群密度无显著相关性。这一结果与文献^[16]中的结果一致,即当瓜实蝇种群密度为1~100粒/10 g果实时,雌性比为23.06%~53.42%。上述结果表明瓜实蝇种群密度变化不会影响羽化成虫的性比。

本研究还发现,雌虫大小与其繁殖力呈显著正相关(表3),具体表现为体型较大的个体有更长的寿命、更长的产卵天数和更高的总产卵量,但其与单日产卵量无关。这一现象与文献^[43-45]中的结论相符,即雌虫体型增大可提升潜在生殖力。NUFIO等^[20]的研究则表明,体型更大的雌虫主要通过增加单次产卵量来提高总繁殖力,这一差异可能与二者生境不同有关,瓜实蝇可通过延长自身的产卵期加剧田间种群的世代重叠,更利于种群繁衍,使得防治难度提升。

3.3 竞争模式对种群稳定的影响

AIKIO等^[46]研究指出,种群的稳定性与其种内竞争类型密切相关。在食物资源匮乏的条件下,采取干扰性竞争策略的种群可能面临崩溃风险,而采用利用性竞争策略的种群则能够维持部分个体存活。本研究发现,瓜实蝇在面临资源竞争时,首先表现为蛹体积下降,只有当密度超过特定阈值(71.010 1粒/10 g果实)后,未成熟期死亡率才开始显著上升。这种竞争策略使得瓜实蝇在密度低于71.010 1粒/10 g果实时,虽然个体适合度(表现为蛹体积减小)受到影响,但种群数量得以维持;而当密度超过该阈值后,死亡率急剧上升,导致种群数量下降。前人研究发现幼虫期对食物资源的摄取量决定雌虫大小^[18],而本研究结果显示,雌虫体型越大繁殖力越强(表3)。依据密度自我调节假说^[47],瓜实蝇通过调节个体适合度以维持种群稳定,其关键阈值为71.010 1粒/10 g果实,超过此密度后种群的持续繁衍将受到威胁,证实瓜实蝇采用利用性竞争策略。

4 结论

本研究中,Logistic II模型拟合结果表明,单个果实内的种群密度对瓜实蝇幼虫的发育存在显著

限制作用,并存在明确的密度阈值(71.010 1 粒/10 g 果实)。这种限制是由单个幼虫可取食的食物资源短缺造成的,致使幼虫不能发育至潜在大小。同时,雌虫大小与其繁殖力呈显著正相关。以上结果表明,种内竞争会降低后代存活率和蛹质量,最终影响雌虫适合度。

参考文献:

- [1] KAPLAN I, DENNO R F. Interspecific interactions in phytophagous insects revisited: a quantitative assessment of competition theory[J]. *Ecology Letters*, 2007, 10(10): 977–994.
- [2] 公欣桐, 陈飞, 高欢欢, 等. 两种果蝇成虫与幼虫期的竞争及其对二者共存的影响[J]. *生物多样性*, 2023, 31(8): 24–34.
- [3] 马文玲, 杨灯海, 范恒喆, 等. 草地贪夜蛾与东方黏虫的种内及种间斗争行为为差异研究[J]. *植物保护*, 2024, 50(5): 158–170.
- [4] KLOMP H. Intraspecific competition and the regulation of insect numbers[J]. *Annual Review of Entomology*, 1964, 9: 17–40.
- [5] HASSELL M P. Density-dependence in single-species populations[J]. *Journal of Animal Ecology*, 1975, 44(1): 283.
- [6] PETERS T M, BARBOSA P. Influence of population density on size, fecundity, and developmental rate of insects in culture[J]. *Annual Review of Entomology*, 1977, 22: 431–450.
- [7] GOURLEY S A, LIU R, LOU Y. Intra-specific competition and insect larval development: a model with time-dependent delay[J]. *Proceedings of the Royal Society of Edinburgh: Section A Mathematics*, 2017, 147(2): 353–369.
- [8] DENNO R F. Interspecific interactions in phytophagous insects: competition reexamined and resurrected[J]. *Annual Review of Entomology*, 1995, 40: 297–331.
- [9] LEATHER S R. Size, reproductive potential and fecundity in insects: things aren't as simple as they seem[J]. *Oikos*, 1988, 51(3): 386.
- [10] 梁俊强. 具条实蝇的发生规律及综合防治[J]. *河南农业*, 2023(22): 45.
- [11] LIENDO M C, DEVESCOVI F, BOCA T, et al. Patterns of resource distribution among conspecific larvae in two fruit fly species: *Anastrepha fraterculus* and *Ceratitidis capitata*(Diptera: Tephritidae)[J]. *Agricultural and Forest Entomology*, 2016, 18(4): 349–356.
- [12] QUIRING D T, MCNEIL J N. Intraspecific competition between different aged larvae of *Agromyza frontella* (Rondani) (Diptera: Agromyzidae): advantages of an oviposition-detering pheromone[J]. *Canadian Journal of Zoology*, 1984, 62(11): 2192–2196.
- [13] SZASZ M, EVANS K G, JULIANO S A. Hatching asynchrony affects intraspecific competition among larval mosquitoes[J]. *Ecological Entomology*, 2024, 49(6): 905–915.
- [14] 杨永棒. 基于资源利用及行为干扰的橘小实蝇和南亚实蝇种间竞争[D]. 福州: 福建农林大学, 2023.
- [15] AGNEW P, HIDE M, SIDOBRE C, et al. A minimalist approach to the effects of density-dependent competition on insect life-history traits[J]. *Ecological Entomology*, 2002, 27(4): 396–402.
- [16] 周昌清, 梅流柱. 瓜实蝇和南瓜实蝇的种内竞争[J]. *中山大学学报(自然科学版)*, 1999(2): 60–64.
- [17] BURRACK H J, FORNELL A M, CONNELL J H, et al. Intraspecific larval competition in the olive fruit fly (Diptera: Tephritidae)[J]. *Environmental Entomology*, 2009, 38(5): 1400–1410.
- [18] 刘慧, 陈泽铭, 侯柏华, 等. 桔小实蝇和番石榴实蝇幼虫取食阶段的种内竞争[J]. *环境昆虫学报*, 2015, 37(6): 1163–1169.
- [19] DESOUHANT E, DEBOUZIE D, PLOYE H, et al. Clutch size manipulations in the chestnut weevil, *Curculio elephas*: fitness of oviposition strategies[J]. *Oecologia*, 2000, 122(4): 493–499.
- [20] NUFIO C R, PAPA J D R. Superparasitism of larval hosts by the walnut fly, *Rhagoletis juglandis*, and its implications for female and offspring performance[J]. *Oecologia*, 2004, 141(3): 460–467.
- [21] MESSINA F J, KEMP J L, DICKINSON J A. Plasticity in the egg-spacing behavior of a seed beetle: effects of host deprivation and seed patchiness (Coleoptera: Bruchidae)[J]. *Journal of Insect Behavior*, 1992, 5(5): 609–621.
- [22] HONĚK A, HONEK A. Intraspecific variation in body size and fecundity in insects: a general relationship[J]. *Oikos*, 1993, 66(3): 483.
- [23] 李志文. 油茶象适应性产卵策略及生态机制[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2022.
- [24] 涂华龙, 高旭渊, 于永浩, 等. 4种植物精油对瓜实蝇毒杀及驱避作用[J]. *植物保护*, 2024, 50(1): 177–182, 194.
- [25] 许佳丹, 王书平, 蒋费涛, 等. 我国口岸瓜实蝇监测样本的SSR分子标记分析[J]. *生物安全学报*, 2019, 28(4): 259–268.
- [26] 邓金奇, 朱小明, 韩鹏, 等. 我国瓜实蝇研究进展[J]. *植物检疫*, 2021, 35(4): 1–7.
- [27] DHILLON M K, SINGH R, NARESH J S, et al. The melon fruit fly, *Bactrocera cucurbitae*: a review of its biology and management[J]. *Journal of Insect Science*,

- 2005, 5: 40.
- [28] 陈海东, 周昌清, 杨平均, 等. 瓜实蝇、桔小实蝇、南瓜实蝇在广州地区的种群动态[J]. 植物保护学报, 1995, 22(4): 348–354.
- [29] 王奕婷, 白强, 陈红松, 等. 瓜实蝇和南亚果实蝇在我国的分布差异[J]. 环境昆虫学报, 2022, 44(5): 1170–1175.
- [30] 李震, 洪添胜, 文韬, 等. 基于物联网的果园实蝇监测系统的设计与实现[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2015, 41(1): 89–93.
- [31] 赵运杰, 杨艳丽, 张瑜, 等. 河南省内乡县3种瓜类寄主作物上瓜实蝇的种群动态[J]. 生物安全学报(中英文), 2024, 33(2): 204–208.
- [32] 王韵, 马梦, 李伟军, 等. 瓜实蝇蜕皮激素合成通路 Halloween基因鉴定及Shade的功能分析[J]. 植物保护学报, 2024, 51(2): 394–404.
- [33] 陈运康, 梅宇宇, 杨中侠, 等. 湖南瓜类实蝇的发生及其关键气象影响因子[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2022, 48(4): 443–448.
- [34] KOYAMA J, KAKINOHANA H, MIYATAKE T. Eradication of the melon fly, *Bactrocera cucurbitae*, in Japan: importance of behavior, ecology, genetics, and evolution[J]. Annual Review of Entomology, 2004, 49: 331–349.
- [35] 肖伏莲, 胡成. 瓜实蝇的综合防治[J]. 湖南农业, 2021(4): 20.
- [36] UEDA S. Theory of the growth of silkworm larvae and its application[J]. Japan Agricultural Research Quarterly, 1982, 15(3): 180–184.
- [37] 尹仁国. 菜粉蝶幼虫S型生长曲线及其拐点的初步研究[J]. 昆虫学报, 1989, 32(3): 380–381.
- [38] 徐亮, 孟宪民, 宿桂梅, 等. 应用动物生长曲线模型分析不同柞蚕品种幼虫的生长发育规律[J]. 蚕业科学, 2013, 39(3): 620–623.
- [39] LI Z W, YANG Z X, LI Y Z. Effects of fruit sizes of two camellia trees on the larval sizes of *Curculio styricis* (Roelofs, 1875): testing the endoparasitoid body size hypothesis[J]. Insects, 2022, 13(3): 246.
- [40] AKAIKE H. A new look at the statistical model identification[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1974, 19(6): 716–723.
- [41] AGGREY S E, ANKRA-BADU G A, MARKS H L. Effect of long-term divergent selection on growth characteristics in Japanese quail[J]. Poultry Science, 2003, 82(4): 538–542.
- [42] DUYCK P F, DAVID P, PAVOINE S, et al. Can host-range allow niche differentiation of invasive polyphagous fruit flies(Diptera: Tephritidae) in La Réunion?[J]. Ecological Entomology, 2008, 33(4): 439–452.
- [43] SIVINSKI J M, DODSON G. Sexual dimorphism in *Anastrepha suspensa*(Loew) and other tephritid fruit flies(Diptera: Tephritidae): possible roles of developmental rate, fecundity, and dispersal[J]. Journal of Insect Behavior, 1992, 5(4): 491–506.
- [44] KRAINACKER D A, CAREY J R, VARGAS R I. Size-specific survival and fecundity for laboratory strains of two tephritid(Diptera: Tephritidae) species: implications for mass rearing[J]. Journal of Economic Entomology, 1989, 82(1): 104–108.
- [45] HOLDITCH Z G, DIMARTINI C, TURCOTTE K, et al. Maternal body size affects sex allocation in a gregarious parasitoid[J]. Journal of Insect Science, 2024, 24(6): 10.
- [46] AIKIO S, VALOSAARI K R, RANTA E, et al. Invasion under a trade-off between density dependence and maximum growth rate[J]. Population Ecology, 2008, 50(3): 307–317.
- [47] SAMADDER A, CHATTOPADHYAY A, SAU A, et al. Interconnection between density-regulation and stability in competitive ecological network[J]. Theoretical Population Biology, 2024, 157: 33–46.

责任编辑: 伍锦花
英文编辑: 张承平