

利用生命表分析不同种群密度下 扶桑绵粉蚧生长适应性*

罗正玉^{1,2**} 高莉萍¹ 杜嘉宜¹ 雷小涛¹ 王香萍^{1***} 张金平^{2***}

(1. 农林病虫害预警与调控湖北省工程技术中心, 长江大学农学院昆虫研究所, 荆州 434025;

2. 中国农业科学院植物保护研究所, 农业农村部-CABI 生物安全联合实验室, 北京 100193)

摘要 【目的】明确密度对扶桑绵粉蚧 *Phenacoccus solenopsis* Tinsley 种群增长的影响, 为大田防治该虫提供理论依据。【方法】本研究在温度 (26 ± 1) °C、RH 70% $\pm$ 10%、光周期 16L : 8D 条件下, 对单位面积内 (15 cm^2) 不同密度 (2、5、10、15 和 20 头) 下饲养的扶桑绵粉蚧的生长发育和繁殖进行研究。

【结果】不同密度对其发育历期、存活率、寿命、产卵量和种群增长均有影响; 饲养密度为 5 和 10 头时其发育历期分别为 (26.60 ± 0.57) d 和 (26.67 ± 0.45) d, 显著短于其他密度下的发育历期 ($P < 0.05$); 若虫密度为 2 头时, 单雌平均产卵量最高, 为 (100.56 ± 1.25) 粒, 若虫密度 5 头时, 单雌平均产卵量为 (61.29 ± 2.64) 粒; 若虫密度为 5 头时其存活率为 75%, 显著高于其他密度 ($P < 0.05$); 净增殖率 (R_0) 以若虫密度为 2 头时最大, R_0 为 31.425, 其次为密度为 5 头时, R_0 为 22.985, 且 R_0 值随若虫密度的增加而下降; 种群倍增时间 (t) 以若虫密度为 5 头时最小, t 为 5.635 d, 其次是若虫密度为 10 头时, t 为 5.682 d, 总的趋势为 t 值随若虫密度的增加呈现出先减小后增加。【结论】综合扶桑绵粉蚧若虫密度与其生长发育与繁殖的相关性结果, 表明若虫密度为 5 头/ 15 cm^2 时, 最适合其生长发育和繁殖, 密度过低或过高均对其种群产生不利的影响。研究结果表明若虫密度是影响扶桑绵粉蚧种群增长的重要因子之一, 可作为调查及防治该害虫的重要指标。

关键词 扶桑绵粉蚧; 适应性; 密度; 存活率; 产卵量; 寿命; 种群生命表

Effects of population density on the fitness of *Phenacoccus solenopsis*

LUO Zheng-Yu^{1,2**} GAO Li-Ping¹ DU Jia-Yi¹ LEI Xiao-Tao¹
WANG Xiang-Ping^{1***} ZHANG Jin-Ping^{2***}

(1. Hubei Engineering Technology Center for Forewarning and Management of Agricultural and Forestry Pests, Institute of Entomology, College of Agriculture, Yangtze University, Jingzhou 434025, China; 2. MARA-CABI Joint Laboratory for Bio-safety, Institute of Plant Protection, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100193, China)

Abstract 【Objectives】To clarify the effect of density on the population growth of *Phenacoccus solenopsis* to improve control of this pest. 【Methods】The development and reproduction of *P. solenopsis* kept at (26 ± 1) °C, a RH of 70% $\pm$ 10% and a photoperiod of 16L : 8D, was measured at different nymphal densities (2, 5, 10, 15, and 20 per 15 cm^2). 【Results】The developmental duration was significantly shorter, (26.60 ± 0.57) d and (26.67 ± 0.45) d, respectively, at nymphal densities of 5 or 10 per 15 cm^2 ($P < 0.05$). Female fecundity was highest [(100.56 $\pm$ 1.25) progeny per female] at a nymphal density of 2, followed by a nymphal density of 5 [(61.29 $\pm$ 2.64) progeny per female]. The survival rate at a nymphal density of 5 was 75%, which was significantly higher than the other treatments ($P < 0.05$). The net reproductive rate (R_0) was highest at a nymphal density of 2 (31.425), followed by that at a nymphal density of 5 (22.985). R_0 decreased with increasing nymph density. The

*资助项目 Supported projects: 长江大学优秀青年教师基金资助项目 (201305); 湿地生态与农业利用教育部工程中心开放基金项目 (201403)

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

***共同通讯作者 Co-corresponding authors, E-mail: wang.xiang.ping@126.com; j.zhang@cabi.org

收稿日期 Received: 2022-08-04; 接受日期 Accepted: 2023-04-09

population doubling time (t) was shortest at a nymphal density of 5 (5.635 d), followed by a nymphal density of 10 (105.682 d). The t value was first negatively, then positively, correlated with nymphal density. **[Conclusion]** Nymphal density affects the population growth of *P. solenopsis*. A density of 5 nymphs / 15 cm² was the most suitable for the growth, development and reproduction of this species; lower or higher densities were less suitable. These findings are useful for further research on control methods for *P. solenopsis*.

Key words *Phenacoccus solenopsis*; fitness; density; survival rate; fecundity; longevity; population life table

扶桑绵粉蚧 *Phenacoccus solenopsis* Tinsley 属半翅目 Hemiptera 粉蚧科 Pseudococcidae 绵粉蚧属 *Phenacoccus*, 是一种重要的入侵性农林害虫, 对新的寄主植物和不同地理环境的适应性极强。体型小、行为隐蔽、繁殖能力强、扩散速度快等特点促使其成功入侵到世界各地(武三安和张润志, 2009; 朱艺勇等, 2011), 并造成严重危害(王艳平等, 2009)。该虫于 1898 年首次在美国新墨西哥州被报道发现(Tinsley, 1898; Fuchs *et al.*, 1991), 随后迅速扩散到世界各地, 目前除了南极洲外均有其分布的报道(Akintola and Ande, 2008; 武三安和张润志, 2009; Ricupero *et al.*, 2021)。我国自 2008 年首次在广东报道发现扶桑绵粉蚧以来(马骏等, 2009), 该虫迅速扩散至全国各地, 目前广泛分布于台湾、云南、重庆等 17 个省(直辖市、自治区)的大部分地区, 局部分散于四川、甘肃、北京等 11 个省区的部分地区(陈华燕等, 2011; 王玉生, 2019)。

扶桑绵粉蚧生长发育历经卵、若虫(共 3 龄, 雄虫 3 龄为蛹期)和成虫 3 个虫态。以雌成虫和若虫吸食植物汁液对植物嫩枝、叶片、叶柄等幼嫩部位造成危害, 直接导致植株长势衰弱、生长缓慢或是停止, 严重时使植物失水干枯。该虫还会分泌蜜露诱发煤污病, 影响植物正常呼吸功能和光合作用, 间接影响植物生长(王艳平等, 2009; Waqas *et al.*, 2021)。在适宜的条件下即温度 25-32.5 °C, 相对湿度 45%-75%, 该虫一年可发生 12-15 代(Chen *et al.*, 2015), 世代重叠发生, 严重为害(Huang *et al.*, 2013)。该虫为多食性害虫, 喜食锦葵科 Malvaceae、菊科 Asteraceae 和茄科 Solanaceae 等植物(张莉丽等, 2016), 可对 200 余种经济作物造成危害。其中, 对棉花 *Gossypium* spp.、茄子 *Solanum*

melongena、玉米 *Zea mays*、南瓜 *Cucurbita moschata* 和烟草 *Nicotiana tabacum* 等作物为害最为严重(黄芳等, 2011; 马彩亮等, 2016)。据文献记载, 该虫在印度古吉拉特邦州(71.2° E, 22.3° N)部分地区一年内对当地棉花产量造成减产 40%-50%(Nagrare *et al.*, 2009); 2008-2009 年, 该虫导致印度和巴基斯坦棉花产量分别减少 112 万吨和 48 万吨(Hodgson *et al.*, 2008; Wang *et al.*, 2010); 适生区预测表明, 该虫在我国具有广泛的潜在分布区域(Wei *et al.*, 2017), 其适生区约占我国陆地面积的 91.4%(樊婷婷, 2018), 一旦该虫在国内爆发, 将会造成巨大的经济损失。

昆虫种群密度是影响昆虫生长发育的重要因素之一(Klomp, 1964), 特别是对于一些迁飞性害虫, 幼虫密度可以影响其行为、代谢等各个方面。据文献报道, 幼虫密度较高时, 草地螟 *Loxostege sticticalis* 具有较高的消化酶活性, 取食量也较大, 但是对食物的利用率较低(孔海龙等, 2012); 此外, 高密度下生长发育的二点委夜蛾 *Athetis lepigone* 幼虫到成虫期时其繁殖能力有所下降(李艳等, 2014); 另外 Hill 和 Hirai (1986) 研究表明具有群居习性昆虫的生长发育、食物利用率以及飞行能力和繁殖力均受虫口密度的影响。

扶桑绵粉蚧通常多头聚集在同一植物上进行取食为害, 是一种群集性的害虫。目前, 国内关于其研究多为寄主植物对其生长发育和繁殖能力的影响, 但关于若虫密度对扶桑绵粉蚧的生长发育和繁殖能力的影响尚无报道。据黄芳等(2011)报道扶桑绵粉蚧在 3 种主要寄主植物上的平均存活率由高到低依次为棉花、茄子和番茄, 其中以棉花为寄主植物的雌成虫存活时间、

产卵量等生物学指标最优;另据覃武等(2021)研究报道,扶桑绵粉蚧取食棉花后其体内的可溶性蛋白质和可溶性糖含量最高,这进一步证实扶桑绵粉蚧以棉花为适宜寄主,可以作为寄主植物测定不同种群密度对其生长发育的影响。因此,本研究以棉花作为寄主植物研究扶桑绵粉蚧若虫种群密度对其种群生长发育及繁殖能力的影响,并分析了扶桑绵粉蚧种群净增殖率(R_0)、周限增长率(r_m)、种群倍增时间(t)等生命表参数,为进一步预测扶桑绵粉蚧种群发生和科学防控提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试虫源

扶桑绵粉蚧雌成虫采自武汉市蔬菜科学园(114°28'36" E, 30°42'35.51" N)温室的棉花植株上。将其带回实验室并饲养于养虫室内,饲喂叶片选用镜检去除其他虫源的棉花嫩叶,每1-2 d更换1次新鲜叶片,连续饲养3代以上供试。试验时选取同日龄的初孵若虫(孵化12 h以内)作为供试虫源。

1.2 试验设计及观察指标

仿照柳乙君等(2009)的试验方法并加以改良。首先,在一次性塑料杯(上口直径75 mm,下口直径52 mm)底部打一圆孔(直径为1-2 mm),然后将镜检确保无其他昆虫的新鲜棉花叶片(面积约为15 cm²)插入一次性塑料杯底部的圆孔内,并在茎秆与杯底圆孔接触处缠有少量脱脂棉(防止扶桑绵粉蚧爬出溺死以及杯内水汽过大),最后将杯子置于装有适量清水的培养皿中,使叶柄被水浸没但杯底不与水面接触。接虫后迅速用纱布(60目)和橡皮筋将塑料杯口封住。

试验共设5个若虫密度处理,分别为2、5、10、15和20头,每个密度重复数分别为60、24、12、8和6。试验处理自卵孵化后12 h以内开始,饲养温度为(26±1)℃,光周期14 L:10 D,相对湿度70%±10%,每1-2 d更换1次相同面积的新鲜叶片。

每日观察若虫的发育和死亡情况,并记录当

日的龄期和死亡若虫数;待成虫羽化后继续饲养,当其开始产卵时每隔24 h将成虫转移到新的叶片上,参照戴长庚等(2016)方法记录每日产卵量及存活情况。根据不同若虫密度下扶桑绵粉蚧各发育阶段的存活率、雌虫产卵量等生物学指标,按照吴坤君等(1978)方法组建不同若虫密度扶桑绵粉蚧特定年龄种群生命表,并计算相关参数。

1.3 数据的统计分析

不同密度饲养条件下的扶桑绵粉蚧试验所得数据采用平均值±标准误来表示,使用ANOVA单因素方差分析方法分析不同若虫密度下扶桑绵粉蚧发育历期、存活率、雌虫寿命及其产卵量,多重比较均采用LSD法。统计分析采用DPS软件系统提供的软件包相关软件进行分析,数据拟合与作图均采用Origin 2019软件。计算其种群生命表参数净增殖率 $R_0 = \sum l_x m_x$,平均世代周期 $T = \sum x l_x m_x / \sum l_x m_x$,内禀增长率 $r_m = \ln R_0 / T$,周限增长率 $\lambda = e^{r_m}$,种群倍增时间 $t = \ln 2 / r_m$ (式中, x 为不同发育历期的时间间隔, l_x 、 m_x 分别表示在 x 期间其个体的存活率、平均单雌产卵量)。

2 结果与分析

2.1 若虫密度对发育历期的影响

若虫密度对扶桑绵粉蚧发育历期具有显著影响($P<0.05$),在种群密度为5头时,若虫总的发育历期最短为(26.60±0.57) d,其次为密度为10头时,为(26.67±0.45) d,二者均显著短于密度为20头时的发育历期(30.59±0.36) d。1龄若虫各饲养密度的发育历期除2头与20头有显著差异外($P<0.05$),其余密度之间均无显著差异($P>0.05$);2龄若虫各饲养密度之间的发育历期无显著差异($P>0.05$);3龄若虫各饲养密度的发育历期除15头和20头与其余密度之间有显著差异外($P<0.05$),其余密度之间无显著差异($P>0.05$)(表1)。1龄若虫饲养密度与发育历期的拟合函数为 $y = -4.91313x^3 +$

$0.018\,65x^2 - 0.154\,9x + 8.469\,24$ ($R^2=0.984$) ; 2 龄若虫饲养密度与发育历期的拟合函数为 $y = 0.1x^3 - 0.933\,3x^2 + 2.590\,8x + 6.982\,14$ ($R^2=0.972$) ; 3 龄若虫饲养密度与发育历期的拟合函数为 $y = -0.003\,79x^3 + 0.140\,44x^2 - 1.275\,42x + 12.320\,89$ ($R^2=0.995$) ; 不同密度总发育历期的拟合函数为 $y = -0.269\,66x^3 + 2.787\,38x^2 - 7.552\,62x + 32.403\,79$ ($R^2 = 0.988$) , 3 次函数模型对不同密度的扶桑绵粉蚧发育历期拟合度很高, R^2 值均大于 0.972, 对 3 龄若虫的拟合度最高 ($R^2 = 0.995$) (图 1)。

表 1 若虫密度对扶桑绵粉蚧生长发育的影响				
Table 1 Development duration of <i>Phenacoccus solenopsis</i> influenced by nymphal density				
若虫密度 (头/15 cm ²) Nymphal density (ind./15 cm ²)	发育历期 (d) Developmental duration (d)			
	1 龄 1st instar	2 龄 2nd instar	3 龄 3rd instar	总发育历期 Total
2	8.25 ± 0.25 ab	8.63 ± 1.28 a	10.25 ± 0.32 b	27.13 ± 0.62 bc
5	8.05 ± 0.36 b	9.44 ± 0.70 a	9.11 ± 0.65 b	26.60 ± 0.57 c
10	8.35 ± 0.17 ab	8.64 ± 0.71 a	9.68 ± 0.46 b	26.67 ± 0.45 c
15	8.65 ± 0.35 ab	9.10 ± 0.61 a	12.10 ± 0.91 a	29.85 ± 0.62 ab
20	8.91 ± 0.25 a	9.00 ± 0.47 a	12.68 ± 0.35 a	30.59 ± 0.36 a

表中所列数据为平均值 ± 标准误, 同一列数字后标有不同字母表示显著差异 ($P < 0.05$, 单因素方差分析检验)。下表同。
The data listed in the table are mean ±SE, and followed by different letters in the same column indicate significant differences ($P < 0.05$, One-way ANOVA test). The same as below.

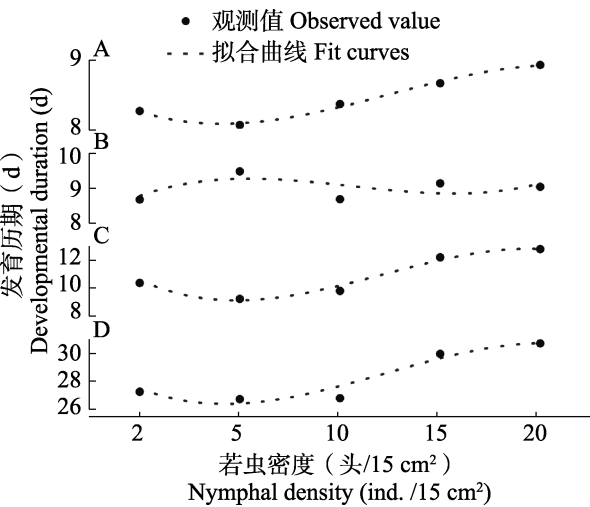


图 1 扶桑绵粉蚧不同若虫密度的发育历期变化趋势
Fig. 1 Trends in developmental duration of *Phenacoccus solenopsis* with different nymphal densities
A: 1 龄若虫; B: 2 龄若虫; C: 3 龄若虫;
D: 若虫总发育历期。
A: 1st nymph; B: 2nd nymph; C: 3rd nymph;
D: Total developmental duration.

2.2 若虫密度对扶桑绵粉蚧若虫存活率的影响

密度对扶桑绵粉蚧若虫期存活率具有显著

影响 ($P < 0.05$, 图 2)。密度为 5 头时的存活率最高, 为 75%, 显著高于其他 4 个密度的存活率 ($P < 0.05$); 当饲养密度大于 5 头时, 若虫存活率随着密度的增加显著降低 ($P < 0.05$); 饲养密度为 20 头时其存活率为 61.5%, 与饲养密度为 2

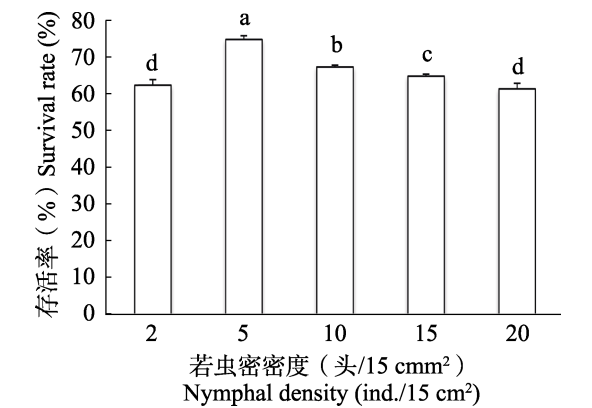


图 2 若虫密度对扶桑绵粉蚧若虫存活率的影响
Fig. 2 Survival rate of *Phenacoccus solenopsis* influenced by nymphal density
图中数据为平均值 ± 标准误, 柱上不同字母表示显著差异 ($P < 0.05$, 单因素方差分析检验)。
Data are mean ± SE. Histograms with different letters indicate significant differences at 0.05 level by one-way ANOVA test.

头的存活率 62.5% 无显著差异 ($P > 0.05$), 由此可见密度过高或过低对扶桑绵粉蚧若虫期存活不利。

2.3 密度对成虫产卵量和寿命的影响

观察记录的雌成虫产卵量和其存活情况, 结果显示在密度为 2-15 头时, 产卵量随着密度的增加而降低。饲养密度为 2 头时扶桑绵粉蚧每雌平均产卵量为 (100.56 ± 1.25) 粒, 显著高于其他饲养密度组别 ($P < 0.05$); 密度为 15 头时其平均产卵量最低为 (32.19 ± 1.14) 粒; 而当密度为 20 头时其产卵量又有所增加, 为 (42.43 ± 1.21) 粒, 与密度为 10 头时的产卵量 (41.26 ± 2.32) 粒之间无显著差异。若虫密度显著影响雌成虫寿命 ($P < 0.05$)。雌成虫在密度条件为 10 头时寿命最长, 为 (30.73 ± 2.60) d, 与密度为 5 头时无显著差异, 但显著长于其他 3 个密度的寿命 ($P < 0.05$); 其余 3 个饲养密度对成虫的寿命没有显著影响 (表 2)。

表 2 若虫密度对扶桑绵粉蚧雌虫产卵量和寿命的影响
Table 2 Number of oviposition and longevity of female *Phenacoccus solenopsis* influenced by nymphal density

密度 (头/15 cm ²) Densities (ind./15 cm ²)	单雌平均产卵量 (粒) Number of oviposition per female (grain)	雌成虫寿命 (d) Longevity of female adults (d)
2	100.56 ± 1.25 a	23.75 ± 0.92 b
5	61.29 ± 2.64 b	27.31 ± 3.02 ab
10	41.26 ± 2.32 c	30.73 ± 2.60 a
15	32.19 ± 1.14 d	24.22 ± 1.56 b
20	42.43 ± 1.21 c	23.88 ± 1.86 b

2.4 不同密度下扶桑绵粉蚧实验种群生命表

根据扶桑绵粉蚧不同若虫密度下各发育阶段存活率和成虫繁殖力数据构建扶桑绵粉蚧实验种群特定年龄生命表 (表 3)。各龄期若虫存活率均为密度为 10 头时最高, 密度与存活率之间无明显线性关系; 成虫存活率在密度为 5 头时最高, 为 75.0%, 较高密度下 (10、15 和 20 头) 其存活率随密度的增加而下降; 单雌平均产卵量

以密度为 2 头时最高, 为 100.56 粒, 其余密度下, 随密度的增加其产卵量明显呈下降趋势。饲养密度对扶桑绵粉蚧的种群生殖力参数有影响。随着若虫密度的增加净增殖率 (R_0) 减小, 若虫密度为 2 头时, 其 R_0 最大为 31.425, 高若虫密度下 (10、15 和 20) 其 R_0 变化趋势较为平缓; 平均世代周期 (T) 以饲养密度为 2 头时最长, 5 头次之, 其余密度之间相差不大, 若虫密度为 15 头时, 平均世代周期最短, 为 10.46 d; 内禀增长率 (r_m)、周限增长率 (λ) 最大值均为饲养密度为 5 头时的组别, 其余组别相差不大; 种群倍增时间 (t) 以饲养密度为 5 头时为最小值, 为 5.635 d, 其次为 2 头, 为 5.728 d。

3 讨论

根据昆虫种群数量动态变化的影响因素, 生态学者将其分为密度制约因素、非密度制约因素和逆密度制约因素 (Williams *et al.*, 2002)。种群密度是影响昆虫生长发育的重要因素之一, 不同昆虫受密度的影响也不同 (戴长庚等, 2016; 李宗锴等, 2017; 余春等, 2021)。本研究表明, 扶桑绵粉蚧发育历期、存活率、雌成虫繁殖能力及寿命等都会随若虫密度的不同而产生显著差异。一定的若虫密度对扶桑绵粉蚧生长发育有利, 但密度过低或过高均对其产生不利的影响, 这与周蕊和陈力 (2006) 测定不同幼虫密度条件下洋虫 *Palembus dermestoides* 和黄粉虫 *Tenebrio molitor* 对其发育历期结果相似, 即不适宜的幼虫密度会对其产生不利影响。当扶桑绵粉蚧若虫饲养密度为 5-10 头时其发育历期最短, 且显著低于其他密度 ($P < 0.05$); 当若虫密度为 20 头时, 其发育历期最长为 (30.59 ± 0.36) d; 密度过低或过高时, 若虫的发育历期均延长, 发育速率减缓, 这可能是由于在一定密度范围内随着密度的增加, 其蜜露分泌量增多, 产生的媒污污染叶片, 导致其发育速率减慢。若虫密度对扶桑绵粉蚧存活率也存在显著影响, 饲养密度为 5 头时存活率最高, 10 头次之, 均显著高于其他密度, 饲养密度为 2 头和 20 头的组别之间存活率差异不显著。

表 3 不同若虫密度下扶桑绵粉蚧种群生命表及其参数
Table 3 Life table and its parameters of *Phenacoccus solenopsis* under five different densities

参数 Parameters	密度 (头/15 cm ²) Density (ind./15 cm ²)				
	2	5	10	15	20
起始若虫数 (1 龄若虫) Number of newly hatched larvae (1st instar)	120	120	120	120	120
2 龄若虫存活率 (%) Survival rate of 2nd instar (%)	75.0	90.0	96.0	88.0	85.5
3 龄若虫存活率 (%) Survival rate of 3rd instar (%)	65.6	81.0	82.5	71.9	68.4
成虫存活率 (%) Survival rate of adults (%)	62.5	75.0	67.5	65.0	61.5
卵孵化率 (%) Egg hatching rate (%)	92.31	92.31	92.31	92.31	92.31
估计雌虫数 (性比 1 : 1) Estimated number of females (sex ratio 1 : 1)	37.5	45.0	40.5	39.0	36.9
单雌平均产卵量 (粒) Average number of eggs laid per female (grain)	100.56	61.29	41.26	32.19	42.43
预计下一代产卵量 (粒) Expected next fecundity (grain)	3 771.00	2 758.05	1 671.03	1 255.41	1 565.67
净增殖率 R_0 (粒/头) Net reproductive rate (grain per ind.)	31.425	22.985	13.925	10.460	13.045
平均世代周期 T (d) Average generation cycle (d)	28.44	25.43	21.56	20.25	23.69
内禀增长率 r_m (d ⁻¹) Intrinsic rate of increase (d ⁻¹)	0.121	0.123	0.122	0.116	0.108
周限增长率 λ (d) Finite rate of increase (d)	1.129	1.131	1.130	1.123	1.114
种群倍增时间 t (d) Population doubling time (d)	5.728	5.635	5.682	5.975	6.418

在有限的空间和食物条件下,随着若虫密度的增加,可导致昆虫种间竞争加剧。一方面食物的相对缺乏导致其摄取营养不足,另一方面有限的空间造成了拥挤的生活环境,可能会因为不同个体之间的相互接触造成虫体表面的损伤,从而导致其死亡率增加。扶桑绵粉蚧各龄期在不同密度下的生长发育趋势与此相符,但是对于其总发育历期而言与此不符合,一方面可能是食物源充足 (叶片面积 15 cm²), 另一方面可能是本研究所用的虫源密度小,导致密度增加了但是未加剧种间竞争; 但密度对二化螟 *Chilo suppressalis* (Walker)种群增长影响的研究表明若虫密度增加导致单雌平均产卵量和雌虫寿命缩短,这与本研

究结果相同(孔海龙等, 2013; 戴长庚等, 2016)。总而言之,扶桑绵粉蚧的总发育历期与若虫密度的关系仍需要进一步研究。

作为研究不同生长条件对昆虫的生长发育影响的重要方法之一,生命表技术能够客观、全面描述种群的发展、存活和繁殖以及预测下一代发生趋势。综合扶桑绵粉蚧若虫密度与其生长发育与繁殖的关系构建种群生命表,结果表明,若虫密度为 5 头/15 cm² 时,其生命表参数相对较优,如内禀增长率 r_m 为 0.123、周限增长率 λ 为 1.131、种群倍增时间 t 为 5.635 等,这与 Guan 等 (2012) 报道不同温度下生命表的参数大致相同 (24 °C), 说明密度也是影响其种群增长的主

要因素。本研究结果表明当若虫密度为 5 头/15 cm² 时其为害风险最大; 低密度下种群增长较快, 密度过高显著不利于种群增长 ($P<0.05$)。若虫密度通过影响扶桑绵粉蚧若虫期的存活率以及雌成虫的生殖力, 进而影响其种群动态。扶桑绵粉蚧若虫存活率和成虫生殖力的变化趋势表明, 饲养密度为 2 头/15 cm² 条件下其繁殖能力强, 故而种群增长较快; 当种群密度到达一定程度时, 若虫存活率最高、成虫生殖力较高, 种群密度能迅速促进种群增长, 此时种群呈急速上升趋势。与此相反, 当密度上升到较高水平时, 若虫的存活率、成虫生殖力都下降, 种群数量急剧下降。因此, 扶桑绵粉蚧种群存在内在复杂调控机制以调节其种群数量, 深入探讨此种群调控机制对于生产上防控扶桑绵粉蚧具有一定意义。

参考文献 (References)

- Akintola AJ, Ande AT, 2008. First record of *Phenacoccus solenopsis* Tinsley (Hemiptera: Pseudococcidae) on *Hibiscus rosasinensis* in Nigeria. *Agricultural Journal*, 3(1): 1–3.
- Chen HS, Yang L, Huang LF, Wang WL, Hu Y, Jiang JJ, Zhou ZS, 2015. Temperature-and relative humidity-dependent life history traits of *Phenacoccus solenopsis* (Hemiptera: Pseudococcidae) on *Hibiscus rosasinensis* (Malvales: Malvaceae). *Environmental Entomology*, 44(4): 1230–1239.
- Chen HY, He LF, Zheng CH, Yi QH, Xu ZF, 2011. Survey on the natural enemies of mealybug, *Phenacoccus solenopsis* Tinsley (Hemiptera: Pseudococcidae) from Guangdong and Hainan, China. *Journal of Environmental Entomology*, 33(2): 269–272. [陈华燕, 何娜芬, 郑春红, 李盼, 易晴辉, 许再福, 2011. 广东和海南扶桑绵粉蚧的天敌调查. 环境昆虫学报, 33(2): 269–272.]
- Dai CG, Li HB, Zhang CR, Xue Y, Ni Y, Hu Y, 2016. Effects of high larval density stress on growth and development of *Chilo suppressalis* Walker (Lepidoptera: Pyralidae). *Journal of Plant Protection*, 43(5): 731–737. [戴长庚, 李鸿波, 张昌荣, 薛原, 倪源, 胡阳, 2016. 高幼虫密度胁迫对二化螟生长发育的影响. 植物保护学报, 43(5): 731–737.]
- Fan TT, 2018. Prediction of the potential suitable geographic distribution of seven Chinese forestry quarantine pests. Master dissertation. Taian: Shandong Agricultural University. [樊婷婷, 2018. 7 种中国林业检疫性害虫的适生区预测. 硕士学位论文. 泰安: 山东农业大学.]
- Fand BB, Tonnang HE, Kumar M, Kamble AL, Bal SK, 2014. A temperature-based phenology model for predicting development, survival and population growth potential of the mealybug, *Phenacoccus solenopsis* Tinsley (Hemiptera: Pseudococcidae). *Crop Protection*, 55: 98–108.
- Fuchs TW, Stewart JW, Minzenmayer R, Rose M, 1991. First record of *Phenacoccus solenopsis* Tinsley in cultivated cotton in the United States. *Southwestern Entomologist*, 16(3): 215–221.
- Guan X, Lu YY, Zeng L, Yang YZ, 2012. Life tables for the experimental population *Phenacoccus solenopsis* Tinsley at different temperatures. *Agricultural Science & Technology*, 13(4): 792–797, 814.
- He J, Dai Q, Qi Y, Wu Z, Fang Q, Su P, Huang MQ, Burgess JG, Ke C, Feng D, 2019. Aggregation pheromone for an invasive mussel consists of a precise combination of three common purines. *iScience*, 19: 691–702.
- Hill MG, Hirai K, 1986. Adult responses to larval rearing density in *Mythimna separata* and *Mythimna pallens* (Lepidoptera: Noctuidae). *Applied Entomology and Zoology*, 21(2): 191–202.
- Hodgson C, Abbas G, Arief MJ, Saeed S, Karar H, 2008. *Phenacoccus solenopsis* Tinsley (Sternorrhyncha: Coccoidea: Pseudococcidae), an invasive mealybug damaging cotton in Pakistan and India, with a discussion on seasonal morphological variation. *Zootaxa*, 1913(1): 1–35.
- Huang F, Zhang JM, Zhang PJ, Lu YB, 2013. Reproduction of the solenopsis mealybug, *Phenacoccus solenopsis*: Males play an important role. *Journal of Insect Science*, 13(1): 137.
- Huang F, Zhang PJ, Zhang JM, Zhu YY, Lv YB, Zhang ZJ, 2011. Effects of three host plants on the development and reproduction of *Phenacoccus solenopsis*. *Plant Protection*, 37(4): 58–62. [黄芳, 张蓬军, 章金明, 朱艺勇, 吕要斌, 张治军, 2011. 三种寄主植物对扶桑绵粉蚧发育和繁殖的影响. 植物保护, 37(4): 58–62.]
- Klomp H, 1964. Intraspecific competition and the regulation of insect numbers. *Annual Review of Entomology*, 9(1): 17–40.
- Kong HL, Luo LZ, Jiang XF, Zhang L, Yang ZL, Hu Y, 2012. Effects of larval density on food utilization efficiency and digestive enzyme activity of the beet webworm, *Loxostege sticticalis* (Lepidoptera: Pyralidae). *Acta Entomologica Sinica*,

- 55(3): 361–366. [孔海龙, 罗礼智, 江幸福, 张蕾, 杨志兰, 胡毅, 2012. 幼虫密度对草地螟食物利用率及消化酶活性的影响. 昆虫学报, 55(3): 361–366.]
- Kong HL, Zhang YX, Zhu SD, Kong Y, Wu L, Hu RL, 2013. Effects of larval density on growth, development and reproduction of diamondback moth (DBM), *Plutella xylostella* (L.). *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 21(4): 474–479. [孔海龙, 张云霞, 祝树德, 孔勇, 吴琳, 胡荣利, 2013. 幼虫密度对小菜蛾生长发育和繁殖的影响. 中国生态农业学报, 21(4): 474–479.]
- Li Y, Jiang XF, Zhang L, Cheng YX, Liu YQ, Luo LZ, 2014. Effects of larval density on the development and reproduction of *Athetis lepigone*. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 51(3): 623–629. [李艳, 江幸福, 张蕾, 程云霞, 刘彦群, 罗礼智, 2014. 幼虫密度对二点委夜蛾生长发育及繁殖的影响. 应用昆虫学报, 51(3): 623–629.]
- Li ZK, Wang CY, Hu CH, Dong ZS, Wang WD, Zhao GK, Dong WX, 2017. Effect of larval density on the reproduction of the potato tuber moth, *Phthorimaea operculella* (Zeller). *Chinese Journal of Applied Entomology*, 54(2): 221–229. [李宗锴, 王春娅, 胡纯华, 董智森, 王伟丹, 赵贵科, 董文霞, 2017. 幼虫密度对马铃薯块茎蛾生殖的影响. 应用昆虫学报, 54(2): 221–229.]
- Liao P, Yin YF, Li YY, Wang MQ, Mao JJ, Chen HY, Liu CX, Zhang LS, 2021. Effect of individually reared female *Arma chinensis* Fallou (Hemiptera: Pentatomidae) on its longevity and reproductive potential. *Plant Protection*, 47(4): 85–89. [廖平, 殷艳芳, 李玉艳, 王孟卿, 毛建军, 陈红印, 刘晨曦, 张礼生, 2021. 雌虫单头饲养对蝥蟥寿命和繁殖力的影响. 植物保护, 47(4): 85–89.]
- Lin CY, Zhang X, Hao YN, Liu CZ, 2020. Effects of CO₂ concentration and population density on the growth and fecundity of two color morphs of pea aphid. *Grassland and Turf*, 40(6): 46–51. [林春燕, 张祥, 郝亚楠, 刘长仲, 2020. CO₂ 浓度和种群密度对两种色型豌豆蚜生长发育和繁殖的影响. 草原与草坪, 40(6): 46–51.]
- Liu YJ, Li JP, Liu YJ, Li CR, 2009. Influence of nymphal density on fecundity of *Corythucha ciliata* (Say). *Journal of Yangtze University (Nat. Sci. Edit)*, 6(2): 9–11. [柳乙君, 李金甫, 刘亚军, 李传仁, 2009. 悬铃木方翅网蝽若虫密度对其生长发育的影响. 长江大学学报(自然科学版), 6(2): 9–11.]
- Ma CL, Wang DS, Teng HY, Yuan YD, Zhang TS, Chang XL, 2016. Feeding preference and host fitness of *Phenacoccus solenopsis* Tinsley larvae for different host vegetables. *Journal of Environmental Entomology*, 38(4): 690–697. [马彩亮, 王冬生, 滕海媛, 袁永达, 张天澍, 常晓丽, 2016. 扶桑绵粉蚧若虫对不同蔬菜寄主的选择性与适生性. 环境昆虫学报, 38(4): 690–697.]
- Ma J, Hu XN, Liu HJ, Liang F, Zhao JP, Feng LX, Chen NZ, 2009. *Phenacoccus solenopsis* Tinsley found on *Hibiscus rosasinensis* in Guangzhou. *Plant Quarantine*, 23(2): 35–36. [马骏, 胡学难, 刘海军, 梁帆, 赵菊鹏, 冯黎霞, 陈乃中, 2009. 广州扶桑上发现扶桑绵粉蚧. 植物检疫, 23(2): 35–36.]
- Nagrare VS, Kranthi S, Biradar VK, Zade NN, Sangode V, Kakde G, Shukla RM, Shivare D, Khadi BM, Kranthi, KR, 2009. Widespread infestation of the exotic mealybug species, *Phenacoccus solenopsis* (Tinsley) (Hemiptera: Pseudococcidae), on cotton in India. *Bulletin of Entomological Research*, 99(5): 537–541.
- Qin W, Hu Y, Gui FR, Qin JM, Cai XY, Chen HS, 2021. Effects of host plants on body size and energy substances contents of *Phenacoccus solenopsis* Tinsley. *Journal of Biosafety*, 30(3): 189–194. [覃武, 胡雍, 桂富荣, 覃江梅, 蔡晓燕, 陈红松, 2021. 寄主植物对扶桑绵粉蚧体型及体内能源物质含量的影响. 生物安全学报, 30(3): 189–194.]
- Ricupero M, Biondi A, Russo A, Zappalà L, Mazzeo G, 2021. The cotton mealybug is spreading along the Mediterranean: First pest detection in Italian tomatoes. *Insects*, 12(8): 675.
- Simmonds MSJ, Blaney WM, 1986. Effects of rearing density on development and feeding behaviour in larvae of *Spodoptera exempta*. *Journal of Insect Physiology*, 32(12): 1043–1053.
- Tinsley JB, 1898. An ants'-nest coccid from New Mexico. *The Canadian Entomologist*, 30(2): 47–48.
- Wang Y, Watson GW, Zhang R, 2010. The potential distribution of an invasive mealybug *Phenacoccus solenopsis* and its threat to cotton in Asia. *Agricultural and Forest Entomology*, 12(4): 403–416.
- Wang YP, Wu SA, Zhang RZ, 2009. Pest risk analysis of a new invasive pest, *Phenacoccus solenopsis*, to China. *Chinese Bulletin of Entomology*, 46(1): 101–106. [王艳平, 武三安, 张润志, 2009. 入侵害虫扶桑绵粉蚧在中国的风险分析. 昆虫知识, 46(1): 101–106.]
- Wang YS, 2009. Distribution pattern and genetic syructure of *Phenacoccus solenopsis* Tinsley and distribution pattern of its parasitoid wasps in China. Doctoral dissertation. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences. [王玉生, 2019. 扶桑绵粉蚧在中国的地理分布与遗传结构及其寄生蜂的地理分

- 布格局研究. 博士学位论文. 北京: 中国农业科学院.]
- Waqas MS, Shi Z, Yi TC, Xiao R, Shoaib AA, Elabasy AS, Jin DC, 2021. Biology, ecology, and management of cotton mealybug *Phenacoccus solenopsis* Tinsley (Hemiptera: Pseudococcidae). *Pest Management Science*, 77(12): 5321–5333.
- Wei J, Zhang H, Zhao W, Zhao Q, 2017. Niche shifts and the potential distribution of *Phenacoccus solenopsis* (Hemiptera: Pseudococcidae) under climate change. *PLoS ONE*, 12(7): e0180913.
- Williams BK, Nichols JD, Conroy MJ, 2002. Analysis and Management of Animal Populations. Massachusetts: Academic Press. 136–171.
- Wu KJ, Chen YP, Li MH, 1978. Life table for experimental populations of cotton bollworm at different temperatures. *Acta Entomologica Sinica*, 21(4): 385–392. [吴坤君, 陈玉平, 李明辉, 1978. 不同温度下的棉铃虫实验种群生命表. 昆虫学报, 21(4): 385–392.]
- Wu SA, Zhang RZ, 2009. A new invasive pest. *Phenacoccus solenopsis*, threatening seriously to cotton production. *Chinese Bulletin of Entomology*, 46(1): 159–162. [武三安, 张润志, 2009. 威胁棉花生产的外来入侵新害虫——扶桑绵粉蚧. 昆虫知识, 46(1): 159–162.]
- Yu C, Yao MY, Zhao RN, Wang L, Chen WL, 2021. Effects of breeding density on growth and development of *Eocanthecona furcellata* (Wolff). *Journal of Mountain Agriculture and Biology*, 40(2): 75–79. [余春, 姚明勇, 赵如娜, 王岚, 陈文龙, 2021. 饲养密度对叉角厉蝽生长发育的影响. 山地农业生物学报, 40(2): 75–79.]
- Zhang LL, Lin D, Wang DZ, Wei JQ, Qiu ZL, Wu MH, Rao Q, 2016. Infestation and phylogenetic study of an invasive mealbug *Phenacoccus solenopsis* in Hangzhou. *Journal of Biosafety*, 25(2): 127–132. [张莉丽, 林丹, 王道泽, 尉吉乾, 仇智灵, 吴慧明, 饶琼, 2016. 杭州地区扶桑绵粉蚧危害调查及系统进化分析. 生物安全学报, 25(2): 127–132.]
- Zhou R, Chen L, 2006. The effect of rearing densities on growth and development of larvae of *Palembus dermestoides*. *Chinese Bulletin of Entomology*, 43(3): 389–391. [周蕊, 陈力, 2006. 饲养密度对洋虫生长发育的影响. 昆虫知识, 43(3): 389–391.]
- Zhu YY, Huang F, Lv YB, 2011. Bionomics of mealybug *Phenacoccus solenopsis* Tinsley (Hemiptera: Pseudococcidae) on cotton. *Acta Entomologica Sinica*, 54(2): 246–252. [朱艺勇, 黄芳, 吕要斌, 2011. 扶桑绵粉蚧生物学特性研究. 昆虫学报, 54(2): 246–252.]