



棉蚜人工饲料配方筛选及蔗糖浓度优化研究^{*}

张倩^{**} 陆宴辉^{***}

(中国农业科学院植物保护研究所, 植物病虫害综合治理全国重点实验室, 北京 100193)

摘要 【目的】棉蚜 *Aphis gossypii* 是一种重要的农业害虫, 筛选并优化出适用于棉蚜饲养的人工饲料, 有助于开展棉蚜生物学和生态学研究。【方法】在不同蚜虫人工饲料配方基础上, 将饲料 pH 值和蔗糖浓度分别调整为 7.6 和 25%, 设计了以氨基酸、维生素、无机盐和蔗糖等为营养基础的 5 种人工饲料 (配方 I、II、III、IV、V)。通过比较棉蚜成蚜在这 5 种饲料上的存活率和繁殖力, 筛选出适合棉蚜饲养的最佳饲料配方。将最佳饲料配方蔗糖浓度调整为 30% (配方 VI), 比较了棉蚜在蔗糖浓度 25% 和 30% 两个配方、棉花植株上的存活率、若蚜发育历期、产仔率、平均产蚜量和寿命, 及不同棉蚜试验种群的生命表参数。【结果】取食配方 V 饲料的棉蚜成蚜存活率和产蚜量最高。棉蚜在配方 V 与配方 VI 人工饲料上均能完成世代发育, 成蚜产仔率可达到 100%。人工饲料配方 V、VI 和棉花植株饲养的棉蚜寿命分别为 15.39、13.52 和 20.29 d, 平均产蚜量分别为 16.99、16.85 和 26.73 头, 内禀增长率分别为 0.24、0.23 和 0.29。【结论】综合所有参数比较及本着节约成本的原则, 筛选的人工饲料配方 V (含 25% 蔗糖) 更适用于棉蚜饲养。

关键词 棉蚜; 人工饲料; 棉花植株; 蔗糖; 生命表参数

Optimal and optimization of components and sucrose concentration in the artificial diet for rearing *Aphis gossypii*

ZHANG Qian^{**} LU Yan-Hui^{***}

(State Key Laboratory of Biology of Plant Diseases and Insect Pests, Institute of Plant Protection,
Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100193, China)

Abstract 【Aim】The cotton aphid, *Aphis gossypii*, is an important agricultural pest. Evaluating and optimizing artificial diets is crucial when rearing *A. gossypii* for biological and ecological research. 【Methods】Using previous studies, five different artificial diets (diets I–V) were developed for *A. gossypii* based on the nutritional composition of amino acids, vitamins, minerals, and sucrose. The diets had a pH of 7.6 and a sucrose concentration of 25%. The optimal diet formula was determined by comparing the survival rate and fecundity of adults fed on each diet. Additionally, survival rate, development duration, progeny production rate, fecundity, longevity, and life table parameters were compared between *A. gossypii* fed on cotton plants with those fed on the optimal diet formula containing 25% or 30% (diet VI) sucrose. 【Results】Aphids fed diet V exhibited the highest survival rate and fecundity. *A. gossypii* completed an entire generation on both diets V and VI, and the progeny production rate was 100% for both diets. Aphids fed on diets V, VI, and cotton plants had a longevity of 15.39 d, 13.52 d, and 20.29 d, respectively. Additionally, they had a fecundity of 16.99, 16.85, and 26.73, respectively, and an innate capacity for increase of, 0.24, 0.23, and 0.29, respectively. 【Conclusion】Following a comprehensive comparison of all parameters and considering cost-effectiveness, diet V containing 25% sucrose was determined to be the optimal diet for rearing *A. gossypii*.

Key words *Aphis gossypii*; artificial diet; cotton plant; sucrose; life table parameters

*资助项目 Supported projects: NSFC-新疆联合基金重点支持项目 (U2003212); 财政部和农业农村部国家现代农业产业技术体系 (CARS-15-19)

**第一作者 First author, E-mail: zhangqian9405@163.com

***通讯作者 Corresponding author, E-mail: luyanhui@caas.cn

收稿日期 Received: 2023-05-14; 接受日期 Accepted: 2023-11-12

植物介导蚜虫与其它昆虫间互作关系、蚜虫-植物病毒-植物互作关系、共生菌介导蚜虫适应性、蚜虫功能基因组学等研究是当前蚜虫学研究关注的重点领域(黄晓磊和乔格侠, 2006; 侯珍珍, 2020; Hu *et al.*, 2022; Luo *et al.*, 2022)。蚜虫全纯人工饲料成分明确、可控性强, 在这些研究中扮演着重要角色(叶超, 2016)。Luo 等(2022)通过在人工饲料中添加抗生素(氨苄西林、头孢噻肟和庆大霉素)去除了荻草谷网蚜 *Sitobion miscanthi* 体内兼性共生菌 *Regiella insecticola*, 发现异色瓢虫 *Harmonia axyridis* 对不携带共生菌的蚜虫取食效率显著提高。Hu 等(2022)利用混有纯化大麦黄矮病毒(Barley yellow dwarf virus)的人工饲料和标准人工饲料, 培育了携带与不携带病毒的麦二叉蚜 *Schizaphis graminum*, 发现感染病毒的小麦可以通过改变特定挥发物含量从而影响未携带病毒蚜虫的选择偏好。利用人工饲料饲养蚜虫, 可使蚜虫脱离寄主植物, 获得生理指标一致的试验用虫, 培养无菌蚜虫及增殖有效病毒; 以人工饲料为介质, 能够定性、定量的评价植物次生代谢物、杀虫蛋白、杀虫剂等物质对蚜虫及其天敌昆虫的影响(张莉, 2004)。因此, 研制适用于蚜虫饲养的人工饲料, 对保证其相关生物学和生态学及防治技术等研究的顺利开展至关重要(傅强等, 2001)。

棉蚜 *Aphis gossypii*, 是棉花生产上的重要害虫, 不仅可直接通过刺吸棉株汁液影响棉花正常生长, 还可传播多种植物病毒, 严重影响棉花的产量和品质(陆宴辉等, 2004)。棉蚜人工饲料的研究始于 20 世纪 60 年代, Auclair (1967) 通过改进豌豆蚜饲料配方研制出棉蚜人工饲料, 确定棉蚜人工饲料的最佳 pH 值为 7.4-7.8, 适宜糖浓度为 20%-30%。李彩霞等(1997)参照 Dadd 和 Mittler (1966) 及 Auclair (1967) 的方法配制棉蚜人工饲料, 筛选发现最佳糖浓度为 25%-30%。近年来, 虽然众多科研工作者对棉蚜人工饲料的成分和配制方法进行了改进, 但仍然存在蚜虫存活时间短、产仔率与繁殖力低等问题(贾芳翌, 2008; 杨巽, 2014; 钟乐荣, 2017)。

本文依据前人的研究成果, 以氨基酸、维生

素、无机盐和蔗糖等为营养基础, 将 pH 值修改为 7.6, 蔗糖浓度修改为 25%, 配制了 5 种棉蚜人工饲料, 通过比较棉蚜成蚜在这 5 种饲料上的存活率和繁殖力, 筛选棉蚜人工饲料最优配方。糖类能够刺激蚜虫取食, 是蚜虫主要的能源物质, 同时也能够调节人工饲料的渗透压, 被认为是影响蚜虫饲养效果的重要因素(纠敏和刘树生, 2004)。因此, 本文比较了棉蚜在 25%、30% 人工饲料(最优配方)和棉花植株上的存活率、若蚜发育历期、产仔率、平均产蚜量和寿命; 并利用生命表技术, 分析了人工饲料和棉花植株对棉蚜试验种群生命表参数的影响, 确定人工饲料中的最佳蔗糖浓度, 以期进一步完善棉蚜的饲养方法。

1 材料与方法

1.1 供试昆虫

供试棉蚜于 2022 年 5 月采自河北廊坊科研中试基地试验田, 在光照培养箱中用盆栽 4 叶期棉花植株连续饲养多代。

1.2 供试植物

试验所用棉花于日光温室内栽培。将棉花种子播种于装有育苗基质(蛭石: 泥炭: 灭菌大田土按体积比 1: 3: 4 混合)的花盆(直径 18 cm, 高 15 cm)中, 待棉苗 2 片子叶完全展开后间苗, 每个花盆中保留 1 株生长健壮的棉苗, 定期浇水。

1.3 人工饲料组分

主要包括“L 型”氨基酸: 赖氨酸、色氨酸、苯丙氨酸、甲硫氨酸、苏氨酸、异亮氨酸、亮氨酸、缬氨酸、丙氨酸、天冬酰胺、天冬氨酸、半胱氨酸、谷氨酰胺、甘氨酸、谷氨酸、脯氨酸、丝氨酸、酪氨酸、精氨酸、组氨酸、 γ -氨基丁酸、高丝氨酸、胱氨酸; 水溶性维生素: 生物素、泛酸钙、叶酸、烟酸、吡哆醇、硫胺素、胆碱、肌醇、抗坏血酸、核黄素、对氨基苯甲酸; 无机盐: 磷酸三钾、六水氯化镁、四水氯化锰、磷酸二氢钙一水合物、乳酸钙、氯化钙、三水合柠檬酸铁、五水合柠檬酸铁、六水三氯化铁、硫酸镁、七水

硫酸镁、磷酸氢二钾、磷酸二氢钾、磷酸氢钾三水合物、磷酸二氢钠、氯化钠、四水氯化铜、二水氯化铜、氯化锌、硫酸锌; 水解酪蛋白、酵母提取液、苯甲酸胆固醇酯、柠檬酸、蔗糖和去离子水。以上试剂购自北京酷来搏科技有限公司和上海阿拉丁生化科技股份有限公司, 皆为分析纯。

1.4 人工饲料制备

参照 Auclair (1967)、Singh 等 (1985)、

李彩霞等 (1997)、潘科等 (2006)、Prosser 和 Douglas (1992) 及叶超 (2016) 的研究将 pH 值均修改为 7.6, 蔗糖浓度均修改为 25%, 设计了 5 种棉蚜人工饲料, 详细配方见表 1。将各组分按氨基酸+维生素+无机盐+糖的顺序分别溶于去离子水, 然后用磁力搅拌器搅拌 30 min。溶液混合均匀后, 用 1 mol/L KOH 溶液调 pH 值至 7.6, 加去离子水定容至 100 mL。最后用 0.2 μ m 的细菌过滤器对配制好的人工饲料进行过滤, 分装至无菌离心管中, -20 $^{\circ}$ C 保存, 避免反复冻融。

表 1 不同棉蚜人工饲料物质组成 (mg/100 mL)

Table 1 Composition of different artificial diets for *Aphis gossypii* (mg/100 mL)

组分 Composition	配方 Diet				
	I 参照 Auclair, 1967 设计 Referring to Auclair, 1967	II 参照 Singh 等, 1985 设计 Referring to Singh <i>et al.</i> , 1985	III 参照李彩霞等, 1997 设计 Referring to Li <i>et al.</i> , 1997	IV 参照潘科等, 2006 设计 Referring to Pan <i>et al.</i> , 2006	V 参照 Prosser 和 Douglas, 1992; 叶超, 2016 设计 Referring to Prosser and Douglas, 1992; Ye, 2016
氨基酸类 Amino acids					
精氨酸 Arg	400.00	400.00	400.00	—	300.20
苏氨酸 Thr	200.00	200.00	200.00	—	103.60
亮氨酸 Leu	200.00	200.00	200.00	—	114.10
色氨酸 Trp	100.00	100.00	120.00	—	58.20
天冬氨酸 Asp	100.00	100.00	600.00	—	189.70
甘氨酸 Gly	20.00	20.00	100.00	—	9.00
酪氨酸 Try	20.00	20.00	20.00	—	10.90
组氨酸 His	200.00	200.00	200.00	—	182.40
赖氨酸 Lys	200.00	200.00	200.00	—	158.90
苯丙氨酸 Phe	100.00	100.00	120.00	—	47.10
天冬酰胺 Asn	300.00	300.00	110.00	—	213.90
谷氨酰胺 Gln	600.00	600.00	600.00	—	241.10
丝氨酸 Ser	100.00	100.00	100.00	—	59.90
半胱氨酸 Cys	50.00	50.00	50.00	—	42.50
甲硫氨酸 Met	100.00	100.00	120.00	—	42.50
缬氨酸 Val	200.00	200.00	200.00	—	101.90
异亮氨酸 Iso	200.00	200.00	150.00	—	114.10
谷氨酸 Glu	200.00	200.00	200.00	—	123.60
丙氨酸 Ala	100.00	100.00	100.00	—	50.80
脯氨酸 Pro	100.00	100.00	100.00	—	65.60
γ -氨基丁酸 Gaba	20.00	20.00	20.00	—	—
高丝氨酸 Hse	800.00	800.00	—	—	—
胱氨酸 Cystine	—	5.00	10.00	—	—
水解酪蛋白 Hydrolyzed casein	—	—	—	2 000.00	—
维生素类 Vitamins					
生物素 Biotin	0.10	0.10	0.20	0.10	0.10

续表 1 (Table 1 continued)

组分 Composition	配方 Diet				
	I 参照 Auclair, 1967 设计 Referring to Auclair, 1967	II 参照 Singh 等, 1985 设计 Referring to Singh <i>et al.</i> , 1985	III 参照李彩霞 等, 1997 设计 Referring to Li <i>et al.</i> , 1997	IV 参照潘科等, 2006 设计 Referring to Pan <i>et al.</i> , 2006	V 参照 Prosser 和 Douglas, 1992; 叶超, 2016 设计 Referring to Prosser and Douglas, 1992; Ye, 2016
泛酸钙 D-calcium pantothenate	5.00	5.00	5.00	5.00	2.50
叶酸 Folic acid	1.00	1.00	0.50	0.50	2.00
烟酸 Nicotinic acid	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00
吡哆醇 Pyridoxine	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50
硫胺素 Thiamine	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50
胆碱 Choline	50.00	50.00	50.00	50.00	50.00
肌醇 Myo-inositol	50.00	50.00	50.00	50.00	50.00
核黄素 Riboflavin	5.00	5.00	2.50	2.50	—
对氨基苯甲酸 P-aminobenzoic acid	10.00	10.00	10.00	10.00	—
抗坏血酸 Ascorbic acid	10.00	10.00	50.00	100.00	200.00
无机盐类 Inorganic salts					
磷酸三钾 K_3PO_4	700.00	—	—	—	—
六水氯化镁 $MgCl_2 \cdot 6H_2O$	200.00	200.00	200.00	—	—
四水氯化锰 $MnCl_2 \cdot 4H_2O$	—	0.79	0.50	0.40	0.34
磷酸二氢钙—水合物 $CaH_4(PO_4)_2 \cdot H_2O$	0.68	—	0.70	—	—
乳酸钙 $Ca(C_3H_5O_3)_2 \cdot 5H_2O$	1.64	—	1.70	—	—
氯化钙 $CaCl_2$	—	3.12	—	—	—
三水合柠檬酸铁 $FeC_6H_5O_7 \cdot 3H_2O$	0.15	—	—	—	—
五水合柠檬酸铁 $FeC_6H_5O_7 \cdot 5H_2O$	—	—	0.20	—	—
六水三氯化铁 $FeCl_3 \cdot 6H_2O$	—	2.23	—	11.00	0.66
硫酸镁 $MgSO_4$	0.69	—	0.70	—	—
七水硫酸镁 $MgSO_4 \cdot 7H_2O$	—	—	—	123.00	400.00
磷酸氢二钾 K_2HPO_4	1.20	300.00	—	1 500.00	—
磷酸二氢钾 KH_2PO_4	—	500.00	500.00	—	—
磷酸氢钾三水合物 $KH_2PO_4 \cdot 3H_2O$	—	—	—	—	1 650.00
磷酸二氢钠 $NaH_2PO_4 \cdot H_2O$	0.44	—	0.50	—	—
氯化钠 $NaCl$	0.22	—	0.30	—	—
四水氯化铜 $CuCl_2 \cdot 4H_2O$	—	0.27	—	—	—
二水氯化铜 $CuCl_2 \cdot 2H_2O$	—	—	0.30	0.20	0.17
氯化锌 $ZnCl_2$	—	0.40	1.30	—	1.44
硫酸锌 $ZnSO_4 \cdot H_2O$	—	—	—	0.85	—
糖类 Saccharides					
蔗糖 Sucrose	25 000.00	25 000.00	25 000.00	25 000.00	25 000.00
其它 Others					
酵母提取液 Yeast extract	—	—	—	2 000.00	—
苯甲酸胆固醇酯 Cholesteryl benzoate	2.50	—	—	—	—
柠檬酸 Citric acid	—	—	—	—	22.00

1.5 不同饲料及棉花植株饲养棉蚜的效果比较

1.5.1 不同配方人工饲料饲养 采用两端开口、直径 2 cm、高 3 cm 的玻璃管饲养蚜虫。玻璃管一端覆上 Parafilm 膜, 置于紫外灯照射 15 min, 然后在 Parafilm 膜中间加 120 μ L 人工饲料, 在饲料上覆一层膜, 形成双层膜包被的饲料室。用软毛笔刷将初产若蚜接在玻璃管内的内膜上, 玻璃管另一端罩上细纱网(100 目)防止蚜虫逃跑。接入蚜虫后, 将玻璃管有营养液的一端朝上。每个玻璃管中放入 1 头蜕皮 24 h 内的成蚜, 每 24 h 记录蚜虫的死亡和产蚜情况, 并剔除新产若蚜, 直至蚜虫死亡, 每 2 d 更换一次饲料。5 种不同人工饲料分别接蚜虫 30 头, 一头蚜虫为一个重复。

1.5.2 不同蔗糖浓度的饲料饲养 采用上述相同方法, 分别用蔗糖浓度为 25% 和 30% 的最佳配方饲料构建棉蚜饲养的饲料室。每个玻璃管中放入 1 头初产若蚜(< 24 h), 每 24 h 记录蚜虫蜕皮、死亡和产蚜情况, 剔除每天新产若蚜, 直至蚜虫死亡, 每 2 d 更换一次饲料。每蔗糖浓度饲料共接 100 头蚜虫, 一头蚜虫为一个重复。

1.5.3 棉花植株饲养 用软毛笔刷将初产若蚜单头接到 4 叶期棉花植株的嫩叶上, 并将接蚜叶片罩上 100 目白色纱网袋(15 cm $\times$ 12 cm), 防止蚜虫逃逸, 每 24 h 观察并记录蚜虫蜕皮、死亡和产蚜情况, 同时将每天新产的若蚜移除掉, 直至蚜虫死亡。共接蚜虫 45 头, 一头蚜虫为 1 个重复。

1.6 环境条件

棉蚜饲养条件和棉花植株的生长条件均为: 温度(25 $\pm$ 1) $^{\circ}$ C, 相对湿度 40% $\pm$ 10%, 光周期 14 L : 10 D。

1.7 数据分析

不同配方人工饲料对棉蚜成蚜繁殖力影响数据采用 Graphpad Prism7 软件的非参数 Kruskal-Wallis 检验和 Dunn's 多重比较。使用 TWOSEX-MSChart (Chi, 2020) 软件分析棉蚜若蚜发育历期、繁殖力、寿命和种群参数。采用 bootstrap 技术重复 100 000 次计算各参数的平均

值与标准误 (Huang and Chi, 2013; Yu *et al.*, 2013), 不同处理间的显著性差异水平通过 Paired bootstrap test (5%) 进行检验 (Liu *et al.*, 2023)。种群参数计算公式如下: 净生殖率

$$R_0 = \sum_{x=0}^{\infty} l_x m_x; \text{ 内禀增长率 } r_m \text{ 以 Euler-Lotka 方}$$

程式 $\sum_{x=0}^{\infty} e^{-r(x+1)} l_x m_x = 1$ 求出; 平均世代周期

$T = \ln R_0 / r_m$; 周限增长率 $\lambda = e^{r_m}$ 。其中: x 为年龄 (d), l_x 为特定年龄存活率, m_x 为特定年龄繁殖力 (Chi and Getz, 1988)。

2 结果与分析

2.1 不同人工饲料对棉蚜成蚜存活率和繁殖力的影响

取食配方 V 人工饲料的棉蚜成蚜存活率最高 (图 1)。取食第 3 天, 棉蚜成蚜在配方 I、配方 II、配方 III、配方 IV 和配方 V 饲料上的存活率分别为 80%、97%、60%、93% 和 100%。配方 III 和配方 IV 饲料饲养的棉蚜成蚜分别于第 5 天和第 4 天全部死亡。取食第 7 天, 棉蚜成蚜在配方 I、配方 II 和配方 V 饲料上的存活率分别为 10%、10% 和 77%。配方 V 饲料饲养的棉蚜成蚜最长存活时间为 27 d。不同饲料配方饲养的棉蚜平均产蚜量差异显著, 其中, 配方 V 饲料平均产蚜量最高, 为 (21.27 $\pm$ 1.92) 头, 配方 I、配方

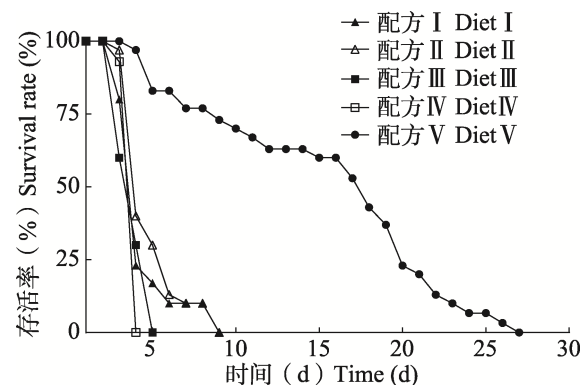


图 1 不同人工饲料 (配方 I - V) 对棉蚜成蚜存活率的影响

Fig. 1 The survival rate of *Aphis gossypii* adults feeding on different artificial diets (diets I - V)

Ⅱ、配方Ⅲ和配方Ⅳ饲料均不到 2 头（图 2）。根据存活和产蚜参数，确定配方Ⅴ饲料更适于棉蚜饲养。

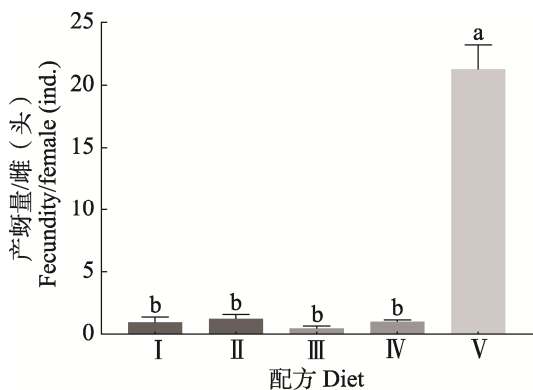


图 2 不同人工饲料（配方Ⅰ-Ⅴ）对棉蚜成蚜繁殖力的影响

Fig. 2 The fecundity of *Aphis gossypii* adults feeding on different artificial diets (diets I - V)

柱上不同小写字母代表差异显著 ($P < 0.05$, Dunn's test)。
Histograms with different letters indicate significant difference ($P < 0.05$, Dunn's test).

2.2 不同蔗糖浓度人工饲料和棉花植株饲养对棉蚜的影响

基于配方Ⅴ，配制了 30%蔗糖浓度人工饲料（配方Ⅵ）。由图 3 可知，棉蚜在棉花植株上的存活率高于人工饲料，25%蔗糖浓度饲料饲养的棉蚜存活率要高于 30%蔗糖浓度。饲养第 3 天，棉蚜在棉花植株和 25%蔗糖浓度饲料上的存活率分别为 100%和 99%，而在 30%蔗糖浓度饲料上的存活率下降至 86%。第 7 天，棉蚜在棉花植株、25%和 30%蔗糖浓度饲料上的存活率分别为

77.80%、64%和 48%。第 15 天，棉蚜在棉花植株上的存活率仍在 50%左右，而在 25%和 30%蔗糖浓度饲料上的存活率仅为 25%。棉蚜在 25%和 30%蔗糖浓度人工饲料上的最长存活时间均为 22 d，但在棉花植株上为 39 d。

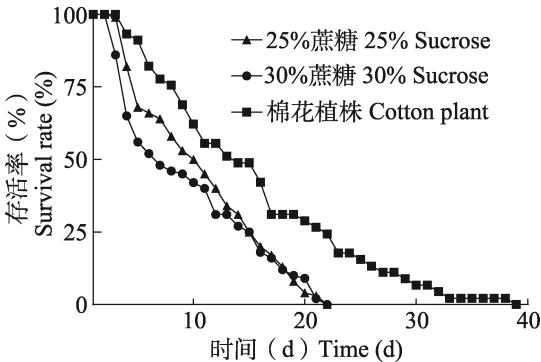


图 3 不同蔗糖浓度人工饲料和棉花植株饲养对棉蚜存活率的影响

Fig. 3 The survival rate of *Aphis gossypii* feeding on artificial diets with different sucrose concentrations and cotton plant

25%、30%蔗糖浓度人工饲料和棉花植株饲养棉蚜的若蚜发育历期分别为（ 6.52 ± 0.06 ）、（ 6.47 ± 0.07 ）和（ 6.45 ± 0.08 ）d，三者无明显差异。棉蚜取食 25%、30%蔗糖浓度人工饲料和棉花植株的产仔率均为 100%。取食 25%和 30%蔗糖浓度人工饲料的棉蚜平均产蚜量分别为（ 16.99 ± 1.19 ）和（ 16.85 ± 1.20 ）头，显著低于棉花植株上饲养的棉蚜[（ 26.73 ± 2.04 ）头]。25%和 30%蔗糖浓度人工饲料饲养的棉蚜寿命无明显差异，但与棉花植株相比[（ 20.29 ± 1.49 ）d]，寿命分别显著缩短 4.90 和 6.77 d（表 2）。

表 2 不同蔗糖浓度人工饲料和棉花植株饲养对棉蚜若蚜发育历期、产仔率、繁殖力和寿命的影响

Table 2 Effects of artificial diets with different sucrose concentrations and cotton plant on pre-adult developmental duration, progeny produced rate, fecundity and longevity of *Aphis gossypii*

处理 Treatment	若蚜发育历期 (d) Pre-adult developmental duration (d)	产仔率 (%) Progeny produced rate (%)	产蚜量/雌 (头) Fecundity/female (ind.)	寿命 (d) Longevity (d)
25%蔗糖 25% Sucrose	6.52±0.06 a	100.00	16.99±1.19 b	15.39±0.72 b
30%蔗糖 30% Sucrose	6.47±0.07 a	100.00	16.85±1.20 b	13.52±0.85 b
棉花植株 Cotton plant	6.45±0.08 a	100.00	26.73±2.04 a	20.29±1.49 a

表中数值为平均值±标准误，同一列数据后标有不同小写字母代表差异显著 ($P < 0.05$, paired bootstrap test)。下表同。
Data were presented as mean±SE, and followed by the different letters within a column indicate significant difference ($P < 0.05$, paired bootstrap test). The same below.

取食 25%和 30%蔗糖浓度人工饲料的棉蚜净生殖率(R_0)[(14.10±1.17)和(12.30±1.14)]、内禀增长率(r_m)[(0.24±0.01)和(0.23±0.01)]和周限增长率(λ)[(1.27±0.01)和(1.26±0.01)]没有明显差异,但与棉花植株饲养棉蚜相比

[(23.76±2.18)、(0.29±0.01)和(1.33±0.01)],均显著降低。棉蚜在 25%、30%蔗糖浓度人工饲料和棉花植株饲料上的平均世代周期(T)分别为(11.19±0.17)、(10.91±0.16)和(11.10±0.30),三者间没有显著差异(表 3)。

表 3 不同蔗糖浓度人工饲料和棉花植株饲养对棉蚜种群参数的影响

Table 3 Effects of artificial diets with different sucrose concentrations and cotton plant on life table parameters of *Aphis gossypii*

处理 Treatment	净生殖率 R_0 Net reproduction rate	内禀增长率 r_m Innate capacity for increase	世代周期 T Generation length	周限增长率 λ Finite rate for increase
25%蔗糖 25% Sucrose	14.10±1.17 b	0.24±0.01 b	11.19±0.17 a	1.27±0.01 b
30%蔗糖 30% Sucrose	12.30±1.14 b	0.23±0.01 b	10.91±0.16 a	1.26±0.01 b
棉花植株 Cotton plant	23.76±2.18 a	0.29±0.01 a	11.10±0.30 a	1.33±0.01 a

3 结论与讨论

本文依据前人研究成果,并做适当改进(调整饲料 pH 值为 7.6,蔗糖浓度为 25%),配制了 5 种不同棉蚜人工饲料,发现成蚜在配方 V 饲料上的存活率最高,存活时间最长(27 d),产蚜量[(21.27±1.92)头]是配方 I、配方 II、配方 III 和配方 IV 的 17.25-45.58 倍。据此确定配方 V 饲料较其他饲料更适用饲养棉蚜。之前的棉蚜人工饲料配方相对繁杂,一些组分用量范围较大,操作不便(傅强等, 2001)。本研究对人工饲料 pH 值和蔗糖浓度进行了精确调整,相较于前期的研究,配方 V 人工饲料成分少且更精确,制作简单易行,且显著提高了棉蚜的存活率。

糖浓度是影响蚜虫人工饲料饲养效果的重要因素之一,姜永幸(1994)研究发现以不同蔗糖浓度饲料饲养的棉蚜存活率存在显著差异。本研究根据配方 V,配制了蔗糖浓度为 30%的人工饲料(配方 VI),结果表明,25%和 30%蔗糖浓度人工饲料饲养的棉蚜都能够完成世代发育,且产蚜率均可达到 100%。取食 25%蔗糖浓度人工饲料棉蚜的存活率、产仔率、产蚜量、寿命、净生殖率、内禀增长率和周限增长率等参数均略高于 30%蔗糖浓度。综合各个参数,以及本着节约成本的原则,人工饲料中采用 25%蔗糖浓度更适用于棉蚜饲养。

蚜虫在天然寄主上的饲养效果往往优于人工饲料,这可能是由于蚜虫在人工饲料上的取食量要低于寄主植物,也可能是因为人工饲料缺少天然寄主植物特有的生长因子和次生物质(傅强等, 2001)。高文兴等(2011)研究发现桃蚜在人工饲料上的产蚜量仅为油菜饲养桃蚜的 22.22%。本研究中虽然取食 25%蔗糖浓度人工饲料棉蚜的平均产蚜量与棉花植株相比有所降低,但达到棉花植株饲养棉蚜的 63.56%,且寿命是取食棉花植株棉蚜的 75.85%,饲养效果较目前已公布的棉蚜人工饲料有显著提高。综上所述,参考配方 V 配制人工饲料,棉蚜饲养效果较好,适用于开展棉蚜生物学和生态学以及防治技术等研究。在未来研究中,应结合蚜虫的食性、营养及生长发育和繁殖的温度、光周期、相对湿度等饲养条件,可进一步改善和提高蚜虫的人工饲养水平。

参考文献 (References)

- Auclair JL, 1967. Effects of pH and sucrose on rearing the cotton aphid, *Aphis gossypii*, on a germ-free and holidic diet. *Journal of Insect Physiology*, 13(3): 431-446.
- Chi H, 2020. TWOSEX-MSChart: A computer program for the age-stage, two-sex life table analysis. <http://140.120.197.173/Ecology/>.
- Chi H, Getz WM, 1988. Mass rearing and harvesting based on an age-stage, two-sex life table: A potato tuberworm (Lepidoptera: Gelechiidae) case study. *Environmental Entomology*, 17(1):

- 18–25.
- Dadd RH, Mittler TE, 1966. Permanent culture of an aphid on a totally synthetic diet. *Experientia*, 22(12): 832–833.
- Fu Q, Zhang ZT, Hu C, 2001. Artificial rearing technique of homopterans. *Entomological Knowledge*, 38(2): 98–104. [傅强, 张志涛, 胡萃, 2001. 同翅目昆虫人工饲料饲养技术. 昆虫知识, 38(2): 98–104.]
- Gao WX, Chen HY, Zhang LS, 2011. Effects of diets pH value on survival, fecundity and antioxidant enzyme activities of green peach aphid, *Myzus persicae*. *Journal of Applied Entomology*, 48(3): 605–610. [高文兴, 陈红印, 张礼生, 2011. 人工饲料 pH 值对桃蚜存活、繁殖及抗氧化酶活性的影响. 应用昆虫学报, 48(3): 605–610.]
- Gou ZZ, 2020. Screening of lethal genes for control the pea aphid, *Acyrtosiphon pisum* through RNAi feeding method. Master dissertation. Yangling: Northwest A&F University. [猴珍珍, 2020. 应用饲喂法 RNAi 筛选豌豆蚜致死基因的研究. 硕士学位论文. 杨凌: 西北农林科技大学.]
- Hu ZQ, Chai RR, Liu X, Dong Y, Su D, Desneux N, Tan XL, Luo C, 2022. Barley yellow dwarf virus-infected wheat plant modulated selection behavior of vector aphids. *Journal of Pest Science*, 95(3): 1273–1285.
- Huang XL, Qiao GX, 2006. Research status and trends in aphidology. *Acta Entomologica Sinica*, 49(6): 1017–1026. [黄晓磊, 乔格侠, 2006. 蚜虫学研究现状与学科发展趋势. 昆虫学报, 49(6): 1017–1026.]
- Huang YB, Chi H, 2013. Life tables of *Bactrocera cucurbitae* (Diptera: Tephritidae): With an invalidation of the jackknife technique. *Journal of Applied Entomology*, 137(5): 327–339.
- Jia FZ, 2008. Population dynamics of *Aphis gossypii* on prickly ash and effect of prickly ash coumarin on biochemical characteristics of *Aphis gossypii*. Master dissertation. Chongqing: Southwest University. [贾芳翌, 2008. 棉蚜在花椒上的种群动态及花椒香豆素对棉蚜生化特性的影响. 硕士学位论文. 重庆: 西南大学.]
- Jiang YX, 1994. Doctoral dissertation. Feeding behavior of *Aphis gossypii* and physiological and biochemical mechanism of cotton resistance to the aphid. Doctor dissertation. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences. [姜永幸, 1994. 棉蚜的取食行为及棉花抗蚜的生理生化机制. 博士学位论文. 北京: 中国农业科学院.]
- Jiu M, Liu SS, 2004. Aphid rearing with artificial diets. *Entomological Journal of East China*, 13(2): 102–109. [纠敏, 刘树生, 2004. 利用人工饲料饲养蚜虫的技术. 华东昆虫学报, 13(2): 102–109.]
- Li CX, Gao LF, Gao LL, Li RZ, 1997. Studies on chemically defined diets for rearing aphids. *Journal of Shanxi Agricultural University*, 17(3): 225–228. [李彩霞, 高丽锋, 高玲玲, 李润植, 1997. 全纯人工营养液饲养蚜虫的研究. 山西农业大学学报, 17(3): 225–228.]
- Liu JP, Wang, C, Li HT, Gao Y, Yang YZ, Lu YH, 2023. Bottom-up effects of drought-stressed cotton plants on performance and feeding behavior of *Aphis gossypii*. *Plants*, 12(15): 2886.
- Lu YH, Yang YZ, Yin Y, Yu YS, 2004. Advances in the resistance and relevant genetic mechanism of cotton to *Aphis gossypii*. *Chinese Bulletin of Entomology*, 41(4): 291–294. [陆宴辉, 杨益众, 印毅, 余月书, 2004. 棉花抗蚜性及抗性遗传机制研究进展. 昆虫知识, 41(4): 291–294.]
- Luo C, Chai RR, Liu X, Dong Y, Desneux N, Feng YZ, Hu ZQ, 2022. The facultative symbiont *Regiella insecticola* modulates non-consumptive and consumptive effects of *Harmonia axyridis* on host aphids. *Entomologia Generalis*, 42(5): 733–741.
- Pan K, Huang BQ, Hou XW, 2006. A modified practical method for rearing *Aphis craccivora* with meridic liquid nutrients. *Chinese Bulletin of Entomology*, 43(5): 728–730. [潘科, 黄炳球, 侯学文, 2006. 一种简单实用的人工营养液饲养豆蚜的方法. 昆虫知识, 43(5): 728–730.]
- Prosser WA, Douglas AE, 1992. A test of the hypotheses that nitrogen is upgraded and recycled in an aphid (*Acyrtosiphon pisum*) symbiosis. *Journal of Insect Physiology*, 38(2): 93–99.
- Singh P, Clare GK, Ashby MD, 1985. Handbook of Insect Rearing. Amsterdam: Elsevier Science Publication. 19–44.
- Yang X, 2014. Studies on cytochrome P450s expression differences under gossypol induction in *Aphis gossypii* Glover. Master dissertation. Changchun: Jilin University. [杨巽, 2014. 棉酚诱导棉蚜 P450 表达差异的研究. 硕士学位论文. 长春: 吉林大学.]
- Ye C, 2016. Investigation on artificial diet and rearing technique of pea aphid (*Acyrtosiphon pisum* Harris). Master dissertation. Gansu: Gansu Agricultural University. [叶超, 2016. 豌豆蚜人工饲料及饲养技术研究. 硕士学位论文. 甘肃: 甘肃农业大学.]
- Yu LY, Chen ZZ, Zheng FQ, Shi AJ, Guo TT, Yeh BH, Chi H, Xu YY, 2013. Demographic analysis, a comparison of the jackknife and bootstrap methods, and predation projection: A case study of *Chrysopa pallens* (Neuroptera: Chrysopidae). *Journal of Economic Entomology*, 106(1): 1–9.
- Zhang L, 2004. Selection of chemically defined diet and effects of symbiotic-bacteria on growth and reproduction of *Sitobion avenae* (Homoptera: Aphididae). Master dissertation. Shanxi: Northwest A&F University. [张莉, 2004. 麦长管蚜全人工饲料的筛选及共生菌对麦长管蚜生殖、生长的影响. 硕士学位论文. 陕西: 西北农林科技大学.]
- Zhong LR, 2017. Effects of amino acids and a primary symbiont on feeding behavior of host-specialized aphids *Aphis gossypii* Glover. Master dissertation. Nanjing: Nanjing Agricultural University. [钟乐荣, 2017. 氨基酸和原生共生菌对寄主专化型棉蚜取食行为的影响. 硕士学位论文. 南京: 南京农业大学.]