

亮腹釉小蜂的控害潜能及其与六斑月瓢虫 对柑橘木虱的联合控制效果研究^{*}

熊泽恩^{**} 刘兆康 李敏儿 董露露 谢予希 何万财 桑 文^{***}

(华南农业大学植物保护学院, 生物防治教育部工程研究中心, 绿色农药全国重点实验室, 广州 510640)

摘 要 【目的】柑橘木虱 *Diaphorina citri* 是柑橘黄龙病 (Huanglongbing, HLB) 的田间传播媒介。亮腹釉小蜂 *Tamarixia radiata* 是柑橘木虱的重要寄生性天敌, 为了明确其对柑橘木虱的控害潜能, 本文研究了亮腹釉小蜂对柑橘木虱的寄生功能反应、自身密度干扰效应、温度对其寄生能力的影响及其与六斑月瓢虫 *Menochilus sexmaculata* 对柑橘木虱的协同控害效果。【方法】在室内条件下, 研究了单头亮腹釉小蜂雌成虫对柑橘木虱 4 龄与 5 龄若虫的寄生功能反应; 不同密度亮腹釉小蜂的干扰效应; 不同温度对亮腹釉小蜂寄生能力的影响。此外, 还比较了亮腹釉小蜂与六斑月瓢虫组合释放与单独释放时对柑橘木虱的控制效果。【结果】25 °C 时亮腹釉小蜂对柑橘木虱 4 龄和 5 龄若虫的寄生功能反应均符合 Holling II 型, 单头日理论最大寄生量随寄主虫龄增加, 分别为 55.55 和 90.91 头。当亮腹釉小蜂自身密度增加时, 对柑橘木虱 4 龄和 5 龄若虫的日寄生量降低。从 25 °C 到 39 °C, 随着温度升高, 亮腹釉小蜂对柑橘木虱日均寄生量显著降低 ($F_{3,16}=344, P<0.001$; $F_{3,16}=295.07, P<0.001$), 当温度达 39 °C 时, 亮腹釉小蜂在 2 h 内全部死亡, 寄生量为 0。实验室笼罩实验表明, 当亮腹釉小蜂、六斑月瓢虫这两种天敌与柑橘木虱成虫益比为 2 : 1 : 4 时, 这两种天敌的组合控害能力最佳, 3 周后达 93.24%。【结论】亮腹釉小蜂对柑橘木虱有较强的控制能力, 且对 5 龄若虫优于 4 龄, 但其对高温的耐受能力差, 亮腹釉小蜂、六斑月瓢虫、柑橘木虱成虫益比为 2 : 1 : 4, 联合使用有利于提高天敌对柑橘木虱的防控效果。

关键词 柑橘木虱; 亮腹釉小蜂; 六斑月瓢虫; 功能反应; 协同控害

The potential of *Tamarixia radiata* to control *Diaphorina citri*, including the potential for synergistic control by both *T. radiata* and *Menochilus sexmaculata*

XIONG Ze-En^{**} LIU Zhao-Kang LI Min-Er DONG Lu-Lu

XIE Yu-Xi HE Wan-Cai SANG Wen^{***}

(State Key Laboratory of Green Pesticide, Ministry of Education Guangzhou, Engineering Research Center of Biological Control,
College of Plant Protection, South China Agricultural University, Guangzhou 510640, China)

Abstract [Aim] To determine the potential of *Tamarixia radiata* to act as a biological control for *Diaphorina citri*, a vector of Huanglongbing (HLB), and the potential for synergistic control in conjunction with *Menochilus sexmaculata*. [Methods] The parasitic functional response of adult female *T. radiata* towards 4th and 5th instar nymphs of *D. citri* was measured under laboratory conditions. The effect of different densities of *T. radiata* on the parasitism rate was examined, along with the effect of temperature. Furthermore, the benefit of releasing just *T. radiata* to control *D. citri*, or releasing this species together with *M. sexmaculata*, was assessed. [Results] At 25 °C, the parasitic function response of *T. radiata* to 4th and 5th instar nymphs followed the Holling II type pattern, with the theoretical maximum daily number of prey being 55.55 and 90.91, respectively.

^{*}资助项目 Supported projects: 广东省自然科学基金项目 (2023A1515030219); 广州市科技计划项目 (202206010042); “十四五”广东省农业科技创新十大主攻方向 (2023SDZG06)

^{**}第一作者 First author, E-mail: xze15007969290@stu.scau.edu.cn

^{***}通讯作者 Corresponding author, E-mail: sangwen@scau.edu.cn

收稿日期 Received: 2024-06-05; 接受日期 Accepted: 2024-08-10

The daily parasitism rate decreased significantly when *T. radiata* density increased in relation to both instars. An increase in temperature from 25 °C to 39 °C was followed by a significant decrease in the daily parasitism rate of *D. citri* nymphs ($F_{3,16}=344$, $P<0.001$; $F_{3,16}=295.07$, $P<0.001$). A temperature of 39 °C was lethal to *T. radiata* within 2 hours; no *D. citri* nymphs were parasitized at this temperature. Field enclosure experiments demonstrated that releasing both *T. radiata* and *M. sexmaculata* so that the ratio of these and adult *D. citri* was 2 : 1 : 4, reduced the *D. citri* population by 93.24% after 3 weeks. **[Conclusion]** *T. radiata* is an effective parasite of 5th instar *D. citri* nymphs, but is less effectiveness against 4th instar nymphs. It also has low tolerance to high temperatures. Best results were achieved by releasing *T. radiata* in combination with *M. sexmaculata* so that the ratio of these species and adult *D. citri* was 2 : 1 : 4.

Key words *Diaphorina citri*; *Tamarixia radiata*; *Menochilus sexmaculata*; functional response; synergistic control

柑橘木虱 *Diaphorina citri* 是柑橘重要害虫,其通过直接取食植物的韧皮部为害,可导致叶片出现萎蔫和畸形;更重要的是它在取食过程中能从柑橘黄龙病 (Huanglongbing, HLB) 带病植株中获取黄龙病菌,并通过再次取食将病菌传入健康植株,致使柑橘“癌症”在田间迅速蔓延,对柑橘产业的发展危害巨大 (Antolinez *et al.*, 2021; Sétamou *et al.*, 2023; Wang *et al.*, 2023)。因此,防治柑橘木虱是有效降低柑橘黄龙病扩散的重要途径之一 (Liu and Tsai, 2000)。目前生产上对柑橘木虱的防治主要依赖化学防治,但由于长期不规范用药,导致柑橘木虱在大部分地区均产生了不同程度的抗药性,寻求高效、可持续的绿色防控方法来防治柑橘木虱具有重要意义 (Kruse *et al.*, 2017; 桑文等, 2018, 2022)。

生物防治是利用自然天敌对病虫害进行控制的一种方法,对环境友好、持续性强、应用前景广泛 (Chen *et al.*, 2018)。柑橘木虱的天敌昆虫包括捕食性和寄生性两类,其中,亮腹釉小蜂 *Tamarixia radiata* 是一种针对柑橘木虱的优势寄生性天敌,具有专一性程度高、寄生能力强等优点,在许多国家和地区已被开发成柑橘木虱的主要生物防治产品,具有广泛的应用市场 (Étienne *et al.*, 2001; Chirinos *et al.*, 2021; Stenberg *et al.*, 2021; 何万财等, 2023)。美国最大的柑橘产地佛罗里达州很早就从中国台湾地区引进了亮腹釉小蜂用于防治当地柑橘木虱种群 (Michaud *et al.*, 2002)。已有研究表明,亮腹釉小蜂主要寄生柑橘木虱 3-5 龄若虫,其中对 5 龄若虫偏好性最强,其雌虫一生可寄生超过 500 头柑橘木虱 (Étienne *et al.*, 2001; 代晓彦等, 2014; Liu *et al.*, 2019,

2024; Chirinos *et al.*, 2021)。

龟纹瓢虫 *Propylea japonica*、异色瓢虫 *Harmonia axyridis*、六斑月瓢虫 *Menochilus sexmaculata* 等捕食性天敌均能捕食柑橘木虱 (周军辉等, 2020; 何万财等, 2023)。其中六斑月瓢虫广泛分布于中国南方,食性广、食量大,除捕食柑橘木虱外还能捕食粉虱、蚜虫等多种农林害虫 (Gandarilla-Pacheco *et al.*, 2013)。已有研究表明,六斑月瓢虫幼虫和成虫对柑橘木虱若虫和成虫均能捕食,且捕食量均较大,其中六斑月瓢虫 4 龄幼虫的捕食能力最强,对柑橘木虱低龄若虫、高龄若虫、成虫的日最大捕食量分别为 500、200 和 200 头 (何万财等, 2023)。

亮腹釉小蜂能够寄生柑橘木虱高龄若虫,而对低龄若虫和成虫无法发挥作用,导致亮腹釉小蜂防控的时间窗口期较窄,如若配合利用六斑月瓢虫对柑橘木虱其它虫态的捕食能力,将有望提升天敌对柑橘木虱的控害能力。捕食性天敌和寄生性天敌联合控害的研究已有报道,如利用日本刀角瓢虫 *Serangium japonicum* 和丽蚜小蜂 *Encarsia formosa* 联合控制烟粉虱 *Bemisia tabaci*,其同时释放对烟粉虱的捕食量与寄生效率比分别释放时均有增加 (马丽君等, 2018)。

亮腹釉小蜂作为柑橘木虱的专性寄生蜂,具有较强的应用潜力。迄今为止,国内外对亮腹釉小蜂控害潜能的评估并不全面,且其与捕食性天敌昆虫六斑月瓢虫对柑橘木虱的协同控制效果未见报道。为进一步明确亮腹釉小蜂的生防潜力,本研究对其功能反应、自身密度干扰效应、温度对其寄生能力的影响及其与六斑月瓢虫对柑橘木虱的协同控害效果进行了系统的研究,以

期为柑橘木虱和黄龙病的生物防治提供理论依据和数据支撑。

1 材料与方法

1.1 供试虫源

亮腹釉小蜂、柑橘木虱、六斑月瓢虫、蚕豆蚜 *Aphis craccivora* 种群均为华南农业大学生物防治教育部工程研究中心长期饲养。亮腹釉小蜂饲养采用九里香-柑橘木虱体系, 六斑月瓢虫饲养采用蚕豆-蚕豆蚜体系。饲养温度 (25 ± 1) $^{\circ}\text{C}$, 相对湿度 $70\% \pm 5\%$, 光周期 14 L : 10 D。

1.2 实验方法

1.2.1 亮腹釉小蜂对柑橘木虱若虫的寄生功能反应 在底部直径为 90 mm、高为 3 mm 的培养皿中放入长度为 5 cm 的九里香枝条, 末端缠绕润湿的脱脂棉保湿。分别将柑橘木虱 4 龄与 5 龄若虫 3、6、9、12、15、18 和 21 头接种至九里香枝条上, 随后每皿放入 1 头羽化 5 d 且已交配的亮腹釉小蜂雌蜂。24 h 后, 在体式镜 (Stemi305, 德国 Zeiss) 下统计被寄生的柑橘木虱若虫数量, 各处理重复 5 次。由于自然死亡和逃逸率接近 0, 因此无需对寄生功能反应中的寄生量进行校正。

1.2.2 亮腹釉小蜂的自身密度对寄生柑橘木虱若虫的干扰效应 九里香保湿处理同 1.2.1。九里香枝条上分别接种柑橘木虱 4 龄与 5 龄若虫各 50 头, 随后每个培养皿分别接入羽化 5 d 已交配的亮腹釉小蜂雌蜂 1、2、3、4 和 5 头。24 h 后统计被寄生的柑橘木虱若虫数量, 各处理重复 5 次。

1.2.3 不同温度下亮腹釉小蜂对柑橘木虱若虫的寄生量 九里香保湿处理同 1.2.1。在九里香枝条上分别接种柑橘木虱 5 龄若虫 25 头, 每皿放入 1 头羽化 5 d 已交配的亮腹釉小蜂雌蜂, 随后分别置于温度为 25、29、34 和 39 $^{\circ}\text{C}$ 的光照培养箱 (RXZ-436E, 宁波江南) 中。24 h 后统计被寄生的柑橘木虱若虫数量, 各处理重复 5 次。

1.2.4 亮腹釉小蜂与六斑月瓢虫对柑橘木虱的联合控制效果 将同一批长势健壮、大小一致的 1 年生九里香植株经修剪长出嫩梢后, 移至温室

养虫笼 (60 cm×60 cm×60 cm) 中, 每个养虫笼内各放置 1 盆九里香植株, 随后接入性成熟未产卵柑橘木虱雌雄成虫 20 对, 1 周后分别进行如下处理: (1) 接入 5 对性成熟的亮腹釉小蜂 (5T); (2) 接入 10 对性成熟的亮腹釉小蜂 (10T); (3) 接入 5 对六斑月瓢虫 (5M); (4) 先接入 5 对性成熟的亮腹釉小蜂, 1 周后再接入 5 对六斑月瓢虫 (5T+5M); (5) 先接入 10 对性成熟的亮腹釉小蜂, 1 周后再接入 5 对六斑月瓢虫 (10T+5M); (6) 对照组不释放任何天敌 (CK)。从首次接入天敌昆虫时开始, 于 3 周后统计每株九里香上所有柑橘木虱成虫数量, 计算其防治效果。每处理重复 3 次。

1.3 数据分析

亮腹釉小蜂对柑橘木虱的寄生功能反应试验结果使用 Holling 圆盘方程进行拟合 (Holling *et al.*, 1959)。圆盘方程数学模型为: $N_a = aNT / (1 + aT_h N)$, 其中 N 为猎物密度, N_a 为被寄生猎物数量, T 为猎物暴露于寄生者的时间, 本试验中 $T=1$ d, a 为猎物搜寻效率, T_h 为寄生 1 头猎物所需要的时间, a/T_h 为寄生能力, $1/T_h$ 为日最大寄生量。

依据拟合功能反应得数据计算亮腹釉小蜂对柑橘木虱的搜寻效应, 搜寻效应方程为: $S = a / (1 + aT_h N)$, 其中 a 为攻击系数, T_h 为处理时间, N 为猎物密度 (胡昌雄等, 2023)。

亮腹釉小蜂自身密度对寄生柑橘木虱的干扰效应可用公式: $E = N_a / N_p$ 与 $E = QP^m$, Q 为搜寻常数, m 为干扰系数, 分摊竞争强度 $I = (E_1 - E_p) / E_1$, 式中 E_1 为 1 头寄生蜂的平均寄生率, E_p 为 P 头寄生蜂时的寄生率 (Holling *et al.*, 1959)。

亮腹釉小蜂与六斑月瓢虫对柑橘木虱的联合控制效果可用方程: 防治效果 =

$$\left(1 - \frac{\text{对照区前种群数量} \times \text{处理区后种群数量}}{\text{对照区后种群数量} \times \text{处理区前种群数量}} \right) \times 100\%。$$

使用 Excel 2010、GraphPad Prism 8.0.2 和 SPSS 21 软件对数据进行拟合、分析与作图。使用单因素方差检验 HSD 法对数据进行组间差异性检验。使用卡方检验分析观测值与理论值是否存在差异。

2 结果与分析

2.1 亮腹釉小蜂对柑橘木虱若虫的寄生功能反应

亮腹釉小蜂对柑橘木虱若虫的寄生量随着猎物密度的增大而增大（图 1：A，B）。根据观测值数据，亮腹釉小蜂寄生不同密度的 4 龄若虫与 5 龄若虫均能较好的拟合 Holling II 型功能反应模型，拟合度分别为 0.930 与 0.981（ $F=66.29$, $P=0.000\ 1$; $F=260.95$, $P=0.000\ 1$ ），亮腹釉小蜂对柑橘木虱 4 龄或 5 龄若虫的瞬时攻击率分别为 0.705 7 和 0.664 0，理论最大日寄生量分别为 55.55 和 90.91 头（表 1）。经卡方检验，亮腹釉小蜂寄生不同密度的 4 龄若虫与 5 龄若虫的 χ^2 分别为 1.750 与 9.257, $\chi^2<\chi^2_{(0.05, 6)}=12.59$, 表明亮腹釉小蜂对柑橘木虱 4 龄与 5 龄若虫寄生数量的观测值与理论值吻合度较高。

2.2 亮腹釉小蜂搜寻效应

在 25 ℃时，亮腹釉小蜂寄生柑橘木虱若虫

的搜寻效应均随着猎物密度的增加而下降，对 4 龄若虫搜寻效应的下降速率更快。同时，亮腹釉小蜂对柑橘木虱 4 龄若虫的搜寻效应也大于 5 龄若虫（图 2）。

2.3 亮腹釉小蜂自身密度对寄生柑橘木虱若虫的干扰效应

在捕食空间一定和柑橘木虱若虫密度固定的情况下，单头亮腹釉小蜂的寄生量随自身密度的增加而降低（表 2）。随着亮腹釉小蜂自身密度的增加，其对柑橘木虱 5 龄若虫的日最大单头寄生量由 10.8 头降至 7.3 头；对 4 龄若虫的日最大单头寄生量由 9.2 头降至 6.1 头。

2.4 不同温度对亮腹釉小蜂寄生能力的影响

亮腹釉小蜂对柑橘木虱若虫的日均寄生量随着环境温度升高而显著降低（ $F_{3,16}=344$, $P<0.001$; $F_{3,16}=295.07$, $P<0.001$ ）。亮腹釉小蜂对柑橘木虱 4 龄若虫的日均寄生量在 25 ℃最高为 16.6 头，34 ℃为 10.6 头（图 3：A）。亮腹釉小

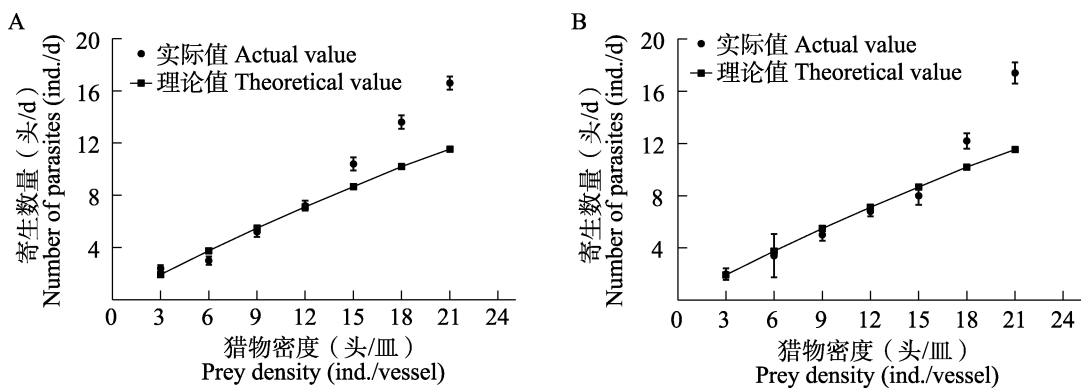


图 1 亮腹釉小蜂对柑橘木虱 4 龄 (A) 和 5 龄 (B) 若虫的日均寄生量
Fig. 1 Average daily parasitic number of *Tamarixia radiata* on 4th (A) and 5th (B) instar of *Diaphorina citri* nymphs

表 1 亮腹釉小蜂对柑橘木虱若虫的寄生功能反应方程及其参数
Table 1 The parasitic functional response equation and its parameters of *Tamarixia radiata* on *Diaphorina citri* nymphs

柑橘木虱龄期 Instar of <i>D. citri</i>	功能反应方程 Functional response equation	拟合度 (R^2) Goodness of fit (R^2)	模型检验 Model checking	日最大寄生量 (头) Maximum daily parasitism (ind.)	处置时间 (T_h/d) Processing times (T_h/d)	瞬时攻击率 (a) Instantaneous attack rate
4 龄 4th instar	$N_a=0.705\ 7N/(1+0.012\ 7N)$	0.930	$F=66.29$ $P=0.000\ 1$	55.55	0.018	0.705 7
5 龄 5th instar	$N_a=0.664\ 0N/(1+0.010\ 0N)$	0.981	$F=260.95$ $P=0.000\ 1$	66.66	0.015	0.664 0

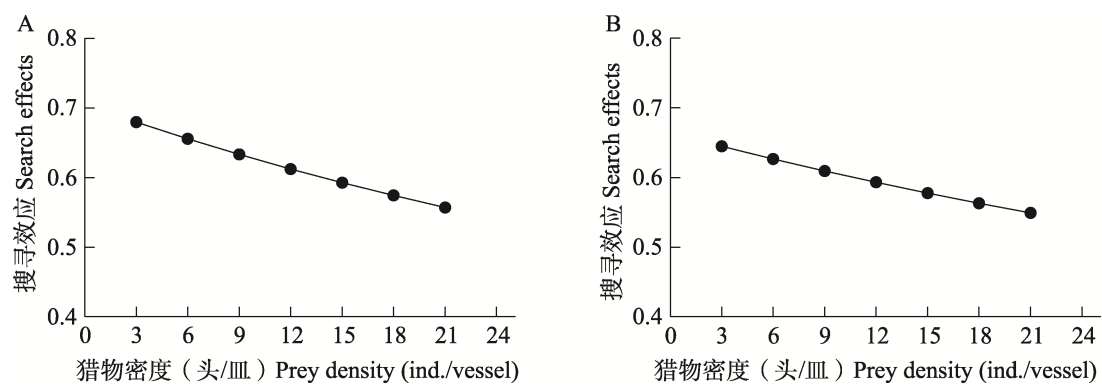


图 2 亮腹釉小蜂对柑橘木虱 4 龄 (A) 和 5 龄 (B) 若虫的搜寻效应
Fig. 2 The search effects of *Tamarixia radiata* on 4th (A) and 5th (B) instar of *Diaphorina citri* nymphs

表 2 亮腹釉小蜂自身密度对柑橘木虱若虫寄生的干扰效应

Table 2 The interference effect of the density of <i>Tamarixia radiata</i> on the parasitism of <i>Diaphorina citri</i> nymphs							
柑橘木虱 龄期 Instar of <i>D. citri</i>	亮腹釉小蜂密度 (头/皿) <i>T. radiata</i> density (ind./vessel)	柑橘木虱密度 (头/皿) <i>D. citri</i> density (ind./vessel)	日均寄生量 (头) Average daily parasitism (ind.)	寄生效率 <i>E</i> Parasitism efficiency	分摊竞争强度 <i>I</i> Assessing the intensity of competition	种内干扰方程 Intraspecific interference equation	干扰系数 <i>m</i> Coefficient of interference
4 龄 4th instar	1	50	9.2	0.18	0	$E=0.185P^{-0.261}$	0.261
	2	50	7.6	0.15	0.173 9		
	3	50	7.5	0.15	0.188 5		
	4	50	6.2	0.12	0.331 5		
	5	50	6.1	0.12	0.339 1		
5 龄 5th instar	1	50	10.8	0.22	0	$E=0.203P^{-0.232}$	0.232
	2	50	7.8	0.16	0.277 7		
	3	50	8.4	0.16	0.222 2		
	4	50	7.5	0.15	0.305 5		
	5	50	7.3	0.15	0.325 9		

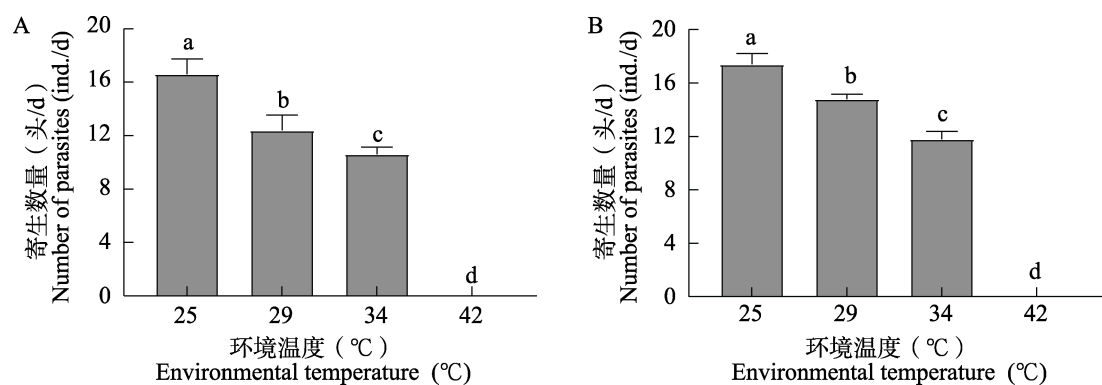


图 3 不同温度下亮腹釉小蜂对柑橘木虱 4 龄 (A) 和 5 龄 (B) 若虫的寄生量
Fig. 3 Parasitic number of *Diaphorina citri* 4th (A) and 5th (B) instar nymphs by *Tamarixia radiata* at different temperatures

柱上不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$, 单因素方差分析)。
Different lowercase letters above bars indicate significant difference ($P<0.05$, One-way ANOVA).

蜂对柑橘木虱 5 龄若虫的日均寄生量在 25 °C 最高为 17.4 头, 34 °C 为 11.8 头 (图 3: B)。当环境温度达到 39 °C 时, 亮腹釉小蜂在 2 h 内全部死亡, 寄生量为 0。

2.5 六斑月瓢虫与亮腹釉小蜂联合释放对柑橘木虱的控制作用

结果表明, 使用天敌昆虫防治后的柑橘木虱种群数量显著低于无防治措施的柑橘木虱种群数量 ($df=5$, $F=228.872$, $P<0.001$) (图 4)。5 对亮腹釉小蜂的防治效果最差, 仅为 55.91%; 10 对亮腹釉小蜂与 5 对六斑月瓢虫联合防治效果最佳, 为 93.24%。10 对亮腹釉小蜂、5 对六斑月瓢虫、5 对亮腹釉小蜂与 5 对六斑月瓢虫组合防治效果接近 ($df=2$, $F=1.188$, $P=0.869$), 分别为 78.03%、85.11%和 84.46%。

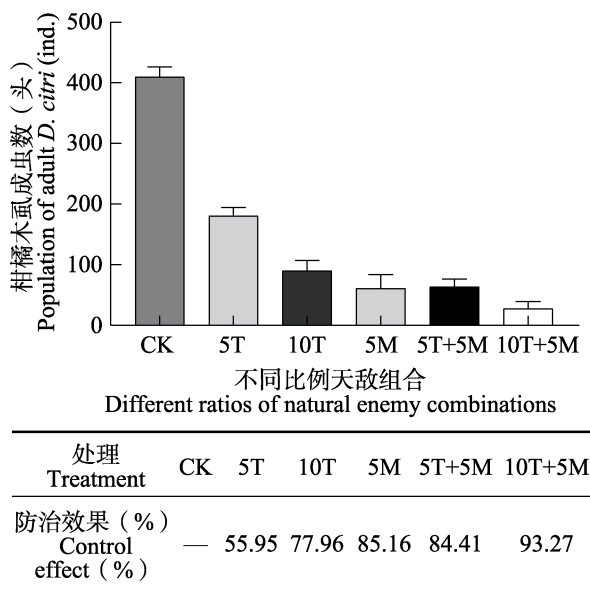


图 4 不同天敌昆虫组合对柑橘木虱的控制效果
Fig. 4 Effectiveness of different combinations of natural enemy insects in controlling *Diaphorina citri*

5T: 5 对亮腹釉小蜂; 10T: 10 对亮腹釉小蜂;
5M: 5 对六斑月瓢虫; 5T+5M: 5 对亮腹釉小蜂与
5 对六斑月瓢虫; 10T+5M: 10 对亮腹釉小蜂与
5 对六斑月瓢虫; CK: 无天敌对照组。

5T: 5 pairs of *T. radiata*; 10T: 10 pairs of *T. radiata*; 5M: 5 pairs of *M. sexmaculata*; 5T+5M: 5 pairs of *T. radiata* + 5 pairs of *M. sexmaculata*; 10T+5M: 10 pairs of *T. radiata* + 5 pairs of *M. sexmaculata*; CK: No natural enemy control group.

3 讨论

亮腹釉小蜂作为柑橘木虱优势寄生蜂, 是柑橘木虱防控的理想天敌资源, 其对柑橘木虱 4-5 龄若虫有较好的控制效果 (Liu *et al.*, 2019; 刘燕梅等, 2021; Liu *et al.*, 2024)。功能反应是评价天敌昆虫防治效能强弱的常用方法, 能反应不同猎物密度下单头天敌昆虫与对猎物捕食数量之间的关系 (Farrokhi *et al.*, 2010)。本研究中, 亮腹釉小蜂成虫对柑橘木虱 4 龄与 5 龄若虫的寄生功能反应均可拟合 Holling II 型圆盘方程, 在寄主密度达到一定数量时, 亮腹釉小蜂的日均寄生量趋于饱和, 这与蝇蛹金小蜂 *Pachycrepoideus vindemmiae* 对桔小实蝇 *Bactrocera dorsalis*、短翅蚜小蜂 *Aphelinus asychis* 和白足蚜小蜂 *Aphelinus albipodus* 对桃蚜 *Myzus persicae* 的寄生功能反应以及六斑月瓢虫对普通大蓟马 *Megalurothrips usitatus* 和黄胸蓟马 *Thrips hawaiiensis* 的捕食功能反应模型类似 (赵海燕等, 2014; 王圣印等, 2016; 李善光等, 2020; 李盼等, 2022; 赵艳丽等, 2022)。

此外, 寄生蜂在寄生过程中的大部分时间都在寻找猎物, 而如何减少搜寻猎物花费的时间与寄生蜂自身的特性有关联 (陈俊谕等, 2013)。本研究结果表明, 在一定范围内, 猎物密度越高, 亮腹釉小蜂搜索猎物花费的时间越少, 搜寻效应越低, 寄生效率越高, 这与沙地木虱跳小蜂 *Psyllaephagus arenarius* 对枸杞木虱 *Paratrioza sinica* 搜寻效应的研究结果类似 (巫鹏翔等, 2017)。

本研究中在捕食空间不变且柑橘木虱若虫密度固定的情况下, 亮腹釉小蜂的平均寄生量随自身密度的增加逐渐降低, 表明亮腹釉小蜂在寄生柑橘木虱若虫时个体间存在相互干扰和竞争, 这与茶足柄瘤蚜茧蜂 *Lysiphlebus testaceipes* 寄生苜蓿蚜 *Aphis craccivora* 的干扰效应类似 (刘爱萍等, 2012)。结合亮腹釉小蜂对柑橘木虱的寄生功能反应、搜寻效应以及其自身密度的干扰效应结果可知, 寄生蜂的寄生效率与猎物密度和

自身密度密切相关。因此, 建议田间释放亮腹釉小蜂控制柑橘木虱时, 需先明确柑橘木虱虫态、数量、密度等情况, 再根据实际情况调整需要释放亮腹釉小蜂的数量, 从而合理优化天敌与其猎物之间的比例, 避免天敌资源的浪费。

柑橘在夏季会抽出夏梢, 夏梢抽发是柑橘木虱种群增长的重要原因 (Guo *et al.*, 2021; Wang *et al.*, 2023)。本研究结果表明, 亮腹釉小蜂的寄生能力随着温度升高而降低, 当温度为 34 °C 时, 其对柑橘木虱 4 龄与 5 龄若虫的日均寄生量仅为 10.6 与 11.8 头; 当温度达 39 °C 时, 亮腹釉小蜂迅速死亡。以 2023 年 6-8 月的日最高气温为例, 我国南方广州、南宁、福州、南昌分别有 26、29、39 和 29 d 超过 35 °C, 此时在田间释放亮腹釉小蜂的防效很低, 甚至很可能会导致其失去防效, 因此在我国华南地区的夏季高温时节不建议田间释放亮腹釉小蜂来防治柑橘木虱。

本研究中, 在亮腹釉小蜂与六斑月瓢虫单独释放的情况下, 5 对六斑月瓢虫对柑橘木虱的控制效果要优于 5 对亮腹釉小蜂, 可能是由于亮腹釉小蜂只有雌性能寄生, 而六斑月瓢虫雌雄都能捕食柑橘木虱, 且其捕食量大。5 对六斑月瓢虫与 5 对亮腹釉小蜂组合、单独 5 对六斑月瓢虫和 10 对亮腹釉小蜂的控制效果无差异, 可能是亮腹釉小蜂在寄生产卵后, 部分木虱僵化前就被六斑月瓢虫捕食, 即两种天敌的寄生或捕食目标存在重叠, 导致其最后的防治效果差异不大。当亮腹釉小蜂、六斑月瓢虫和柑橘木虱数量比为 1 : 1 : 4 和 2 : 1 : 4 时, 其对柑橘木虱的控制效果均比单独释放一种天敌时要好, 且益害比 2 : 1 : 4 优于 1 : 1 : 4。因此, 捕食性天敌和寄生性天敌协同控害可以互相弥补各自的劣势, 相对于单一种类天敌的控害效果, 协同控害的效果会更好。

本研究在室内条件下明确了亮腹釉小蜂对柑橘木虱有着较强的寄生作用, 在生物防治应用中具有很强的潜能, 同时也证实了亮腹釉小蜂对高温的不耐受性。在生物防治应用中, 防治效果会受到猎物密度、猎物虫龄、自身密度以及温度

的影响, 这些因素可能会导致亮腹釉小蜂的防治效率降低。因此, 在释放亮腹釉小蜂控制柑橘木虱时需要根据柑橘木虱的虫态与数量明确田间最佳释放时机。此外, 将亮腹釉小蜂与六斑月瓢虫按照一定比例释放, 有利于提高天敌对柑橘木虱的防效。

参考文献 (References)

- Antolinez CA, Moyneur T, Martini X, Rivera MJ, 2021. High temperatures decrease the flight capacity of *Diaphorina citri* Kuwayama (Hemiptera: Liviidae). *Insects*, 12(5): 394.
- Chen JY, Chen TY, Fu YG, Zhang FP, Han DY, Niu LM, 2013. Functional Response of *Encarsia guadeloupae* Viggiani on *Aleurodicus dispersus* Russell. *Chinese Journal of Biological Control*, 29(2): 175–180. [陈俊谕, 陈泰运, 符悦冠, 张方平, 韩冬银, 牛黎明, 2013. 哥德恩蚜小蜂对螺旋粉虱的功能反应研究. 中国生物防治学报, 29(2): 175–180.]
- Chen XL, Wong SWK, Stansly PA, 2018. Oviposition behaviour of *Tamarixia radiata*: Effects of host density and exposure time. *Ecological Entomology*, 43(1): 55–59.
- Chirinos DT, Cuadros IM, Velez J, Castro R, Somoza G, Kondo T, 2021. Predicting the establishment of *Diaphorina citri* and *Tamarixia radiata* on *Citrus xaurantiifolia* orchards based on the plant-psyllid-parasitoid interaction on *Murraya paniculata*. *Egyptian Journal of Biological Pest Control*, 31(1): 129.
- Dai XY, Ren SL, Zhou YT, Ren SX, Qiu BL, 2014. Advances in biological control of citrus psyllid *Diaphorina citri*, a vector insect of citrus Huanglongbing disease. *Chinese Journal of Biological Control*, 30(3): 414–419. [代晓彦, 任素丽, 周雅婷, 任顺祥, 邱宝利, 2014. 黄龙病媒介昆虫柑橘木虱生物防治新进展. 中国生物防治学报, 30(3): 414–419.]
- Étienne J, Quilici S, Marival D, Franck A, 2001. Biological control of *Diaphorina citri* (Hemiptera: Psyllidae) in Guadeloupe by imported *Tamarixia radiata* (Hymenoptera: Eulophidae). *Fruits*, 56(5): 307–315.
- Farrokhi S, Ashouri A, Shirazi J, Allahvari H, Huigens ME, 2010. A comparative study on the functional response of *Wolbachia*-infected and uninfected forms of the parasitoid wasp *Trichogramma brassicae*. *Journal of Insect Science*, 10: 167.
- Gandarilla-Pacheco FL, Galán-Wong LJ, López-Arroyo JI, Rodríguez-Guerra R, Quintero-Zapata I, 2013. Optimization of pathogenicity

- tests for selection of native isolates of entomopathogenic fungi isolated from citrus growing areas of México on adults of *Diaphorina citri* Kuwayama (Hemiptera: Liviidae). *Florida Entomologist*, 96(1): 187–195.
- Guo SH, Liu YM, Wang ZY, Wang FF, Mao YK, Hu YW, Han P, Cuthbertson AGS, Qiu BL, Sang W, 2021. Transcriptome analysis reveals TOR signalling-mediated plant flush shoots governing *Diaphorina citri* Kuwayama oviposition. *Insect Molecular Biology*, 30(3): 264–276.
- He WC, Ye QQ, Wang FF, Hu YW, Liu JH, Mao XX, Zhang RF, Wang XM, Qiu BL, Liu YT, Sang W, 2023. Predatory responses of *Cheilomenes sexmaculata* to *Diaphorina citri*. *Chinese Journal of Biological Control*, 39(3): 514–522. [何万财, 叶青青, 王飞凤, 胡玉伟, 刘金华, 毛熊兴, 张瑞峰, 王兴民, 邱宝利, 刘玉涛, 桑文, 2023. 六斑月瓢虫对柑橘木虱的捕食作用. 中国生物防治学报, 39(3): 514–522.]
- Holling CS, 1959. Some characteristics of simple types of predation and parasitism. *The Canadian Entomologist*, 91(7): 385–398.
- Hu CX, Liu ZH, Yang WK, Li YQ, Li T, Dong ZP, 2023. Predation of *Pseudodendrothrips mori* by *Propylea japonica* and their distribution on mulberry trees. *Plant Protection*, 49(6): 147–154. [胡昌雄, 刘增虎, 杨伟克, 李琼艳, 李涛, 董占鹏, 2023. 龟纹瓢虫对桑蓟马的捕食作用及两者在桑树上的分布. 植物保护, 49(6): 147–154.]
- Kruse A, Fattah-Hosseini S, Saha S, Johnson R, Warwick E, Sturgeon K, Mueller L, MacCoss MJ, Shatters RG Jr, Heck MC, 2017. Combining 'omics and microscopy to visualize interactions between the Asian citrus psyllid vector and the Huanglongbing pathogen candidate *Liberibacter asiaticus* in the insect gut. *PLoS ONE*, 12(6): e0179531.
- Li P, Zhu JX, Mo XN, Lin XM, Liu TZ, Li JH, Cai DC, 2022. The functional response of *Menochilus sexmaculata* to *Megalurothrips usitatus*. *Chinese Journal of Biological Control*, 38(1): 140–148. [李盼, 朱津贤, 莫小娜, 林幸明, 刘田振, 李金花, 蔡笃程, 2022. 六斑月瓢虫对普通大蓟马的捕食功能反应. 中国生物防治学报, 38(1): 140–148.]
- Li SG, Fu BL, Qiu HY, Yang SY, Ma XT, Zhou SH, Tang LD, Zhang FP, Liu K, 2020. The predation of *Menochilus sexmaculata* (Coleoptera: Coccinellidae) to *Thrips hawaiiensis* (Thysanoptera: Thripidae) in the laboratory. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 57(5): 1173–1180. [李善光, 付步礼, 邱海燕, 杨石有, 马晓彤, 周世豪, 唐良德, 张方平, 刘奎, 2020. 六斑月瓢虫对黄胸蓟马若虫的室内捕食作用研究. 应用昆虫学报, 57(5): 1173–1180.]
- Liu AP, Huang HG, Xu LB, Gao SJ, Zhang YH, Kang AG, 2012. Parasitic functional response of *Lysiphlebus testaceipes* (Cresson) to *Aphis craccivora* (Koch). *Journal of Environmental Entomology*, 34(1): 69–74. [刘爱萍, 黄海广, 徐林波, 高书晶, 张玉慧, 康爱国, 2012. 茶足柄瘤蚜茧蜂对苜蓿蚜的寄生功能反应. 环境昆虫学报, 34(1): 69–74.]
- Liu YH, Tsai JH, 2000. Effects of temperature on biology and life table parameters of the Asian citrus psyllid, *Diaphorina citri* Kuwayama (Homoptera: Psyllidae). *Annals of Applied Biology*, 137(3): 201–206.
- Liu YM, Guo SH, Wang FF, Zhang LH, Guo CF, Cuthbertson AGS, Qiu BL, Sang W, 2019. *Tamarixia radiata* behaviour is influenced by volatiles from both plants and *Diaphorina citri* nymphs. *Insects*, 10(5): 141.
- Liu YM, Zeng HY, Wang ZY, Guo SH, Lu ZT, Zhang LH, Qiu BL, Sang W, 2021. Ultrastructure of the antennal sensilla of ectoparasitoid *Tamarixia radiata* adults. *Journal of Plant Protection*, 48(4): 822–829. [刘燕梅, 曾浩源, 王姿烨, 郭墅濠, 卢梓潼, 张利荷, 邱宝利, 桑文, 2021. 亮腹釉小蜂成虫触角感受期的超微结构. 植物保护学报, 48(4): 822–829.]
- Liu YM, Huang YY, Wang FF, Hu YW, Zhang ZL, Cuthbertson AGS, Qiu BL, Sang W, 2024. Electrophysiological and behavioral responses of *Tamarixia radiata* (Hymenoptera: Eulophidae) to volatiles of nymphal *Diaphorina citri* (Hemiptera: Liviidae). *Journal of Insect Science*, 24(3): 23.
- Ma LJ, Zhang SZ, Liu TX, 2018. Influences of interspecific competition between ladybeetle *Serangium japonicum* and parasitoid *Encarsia formosa* on predation of tobacco whitefly *Bemisia tabaci*, 45(6): 1289–1295. [马丽君, 张世泽, 刘同先, 2018. 种间竞争对烟粉虱天敌日本刀角瓢虫和丽蚜小蜂捕食功能反应的影响. 植物保护学报, 45(6): 1289–1295.]
- Michaud JP, 2002. Biological control of Asian citrus psyllid, *Diaphorina citri* (Hemiptera: Psyllidae) in Florida: A preliminary report. *Entomological News*, 113(3): 216–222.
- Sang W, Liu YM, Qiu BL, 2018. Advances in the eco-friendly management of *Diaphorina citri*. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 55(4): 557–564. [桑文, 刘燕梅, 邱宝利, 2018. 柑橘木虱绿色防控技术研究进展. 应用昆虫学报, 55(4):

- 557–564.]
- Sang W, Gao Q, Zhang CY, Huang QY, Lei CL, Wang XP, 2022. Researches and applications of physical control of agricultural insect pests in China. *Journal of Plant Protection*, 49(1): 173–183. [桑文, 高俏, 张长禹, 黄求应, 雷朝亮, 王小平, 2022. 我国农业害虫物理防治研究与应用进展. 植物保护学报, 49(1): 173–183.]
- Sétamou M, Soto YL, Tachin M, Alabi OJ, 2023. Report on the first detection of Asian citrus psyllid *Diaphorina citri* Kuwayama (Hemiptera: Liviidae) in the Republic of Benin, West Africa. *Scientific Reports*, 13(1): 801.
- Stenberg JA, Sundh I, Becher PG, Björkman C, Dubey M, Egan PA, Friberg H, Gil JF, Jensen DF, Jonsson M, Karlsson M, Khalil S, Ninkovic V, Rehmann G, Vetukuri RR, Viketoft M, 2021. Correction to: When is it biological control? A framework of definitions, mechanisms, and classifications. *Journal of Pest Science*, 94(3): 677.
- Wang ZY, Tan DL, Wang FF, Guo SH, Liu JH, Cuthbertson AGS, Qiu BL, Sang W, 2023. Insulin peptides and their receptors regulate ovarian development and oviposition behavior in *Diaphorina citri*. *Insect Science*, 30(1): 95–108.
- Wu PX, Ma BX, Xu J, Zhang R, He J, Zhang RZ, 2017. Parasitic biological characteristics of *Psyllaephagus arenarius* (Hymenoptera: Encyrtidae) on *Paratrioza sinica* (Hemiptera: Psyllidae). *Acta Entomologica Sinica*, 60(4): 431–440. [巫鹏翔, 马宝旭, 徐婧, 张蓉, 何嘉, 张润志, 2017. 沙地木虱跳小蜂对枸杞木虱的寄生物学特性. 昆虫学报, 60(4): 431–440.]
- Zhao HY, Zeng L, Liang GW, Lu YY, 2014. Parasitism efficiency of *Pachycrepoideus vindemmiae* Rondani on the pupae of *Bactrocera dorsalis* (Hendel). *Journal of Environmental Entomology*, 36(1): 122–126. [赵海燕, 曾玲, 梁广文, 陆永跃, 2014. 蝇蛹金小蜂对桔小实蝇的寄生功能反应. 环境昆虫学报, 36(1): 122–126.]
- Zhou JH, Li PL, Naiwuzhati·Zunong, Zheng HN, Huang J, Wang ZH, 2020. Functional response and predation preference of ladybeetle *Propylea japonica* to Asian citrus psyllid *Diaphorina citri*. *Journal of Plant Protection*, 47(5): 1062–1070. [周军辉, 李鹏雷, 乃吾扎提·祖农, 郑卉娜, 黄建, 王竹红, 2020. 龟纹瓢虫对柑橘木虱的捕食功能反应及猎物偏好性. 植物保护学报, 47(5): 1062–1070.]
- Zhao YL, Han L, Tian XF, Liu QX, Sa CL, Duan LQ, 2022. Functional response and searching effect of *Aphelinus albipodus* on *Myzus persicae*. *Forest Pest and Disease*, 41(1): 27–32. [赵艳丽, 韩丽, 田秀峰, 刘青娴, 萨出拉, 段立清, 2022. 白足蚜小蜂对桃蚜的取食和寄生功能反应及搜寻效应. 中国森林病虫, 41(1): 27–32.]