

六星瓢虫对柑橘木虱若虫的捕食 功能反应及捕食偏好*

陈晗馨** 程高祺** 叶明月 欧阳智刚 卢占军*** 杜一民***

(赣南师范大学生命科学学院, 国家脐橙工程技术研究中心, 赣州 341000)

摘 要 【目的】为探究六星瓢虫 *Oenopia formosana* 对柑橘木虱 *Diaphorina citri* 的生物防控潜能, 以及存在萝卜蚜 *Lipaphis erysimi* 时的捕食偏好。【方法】在实验室条件下测定六星瓢虫 1-4 龄幼虫和成虫对柑橘木虱 5 龄若虫的捕食功能和寻找效应, 以及同时存在柑橘木虱和萝卜蚜时六星瓢虫的捕食选择。【结果】各虫态的六星瓢虫均能捕食 5 龄的柑橘木虱若虫, 捕食功能反应均符合 Holling II 模型。六星瓢虫 1-4 龄幼虫和成虫对柑橘木虱 5 龄若虫的瞬时攻击率分别为 0.279、0.430、0.689、0.829 和 0.695, 理论日最大捕食量分别为 29.155、32.895、46.512、58.824 和 79.365 头, 处理时间分别为 0.034、0.030、0.022、0.017 和 0.013 d, 控害效能分别为 8.148、14.131、32.048、48.747 和 55.130。六星瓢虫的各个龄期对 5 龄的柑橘木虱若虫的搜寻效应均随着猎物密度的变大而降低, 4 龄六星瓢虫幼虫的搜寻效应随猎物密度增加下降趋势最大, 当柑橘木虱 5 龄若虫的低密度存在时, 4 龄幼虫的搜寻效应高于其他龄期的六星瓢虫。存在柑橘木虱与萝卜蚜两种捕食对象的情况下, 六星瓢虫成虫表现出对柑橘木虱有捕食偏好。【结论】各虫态的六星瓢虫对 5 龄的柑橘木虱若虫均具有一定的控害效果, 其 4 龄幼虫和成虫对柑橘木虱 5 龄若虫的防控效果比较好, 推荐用于柑橘木虱的生物防治。

关键词 六星瓢虫; 柑橘木虱; 生物防治; 捕食功能

Predatory functional response and predation preference of *Oenopia formosana* for the nymphs of Asian citrus psyllid *Diaphorina citri*

CHEN Han-Xin** CHENG Gao-Qi** YE Ming-Yue
OUYANG Zhi-Gang LU Zhan-Jun*** DU Yi-Min***

(School of Life Sciences, Gannan Normal University, National Navel Orange Engineering and
Technology Research Center, Ganzhou 341000, China)

Abstract 【Aim】To investigate the potential of *Oenopia formosana* as a biological control for the Asian citrus psyllid *Diaphorina citri*, and determine if they prefer *D. citri* to *Lipaphis erysimi*. 【Methods】The predatory functional response, search efficiency and preference of *O. formosana* for the 1st, 2nd, 3rd and 4th instar nymphs, and adult stages up to the 5th instar nymph of *D. citri*, were studied under laboratory conditions. 【Results】All stages of *O. formosana* preyed on the 5th instar nymph of *D. citri*, and the functional response of all stages fitted the Holling II model. The instant attack rates of *O. formosana* 1st to 4th instar nymphs and adults towards *D. citri* were 0.279, 0.430, 0.689, 0.829 and 0.695, respectively. Maximum daily predation rates were 29.155, 32.895, 46.512, 58.824 and 79.365 prey, respectively, and the predation capacity was 8.148, 14.131, 32.048, 48.747 and 55.130, respectively, and the processing times were 0.034, 0.030, 0.022, 0.017 and 0.013 d, respectively. The search effort of all stages decreased with increasing density of *D. citri*, showing the most obvious decline in the 4th instar. At low *D. citri* densities, 4th instar *O. formosana* had the highest search effort. When 5th instar

*资助项目 Supported projects: 国家自然科学基金项目 (32272549; 32360696); 国家科技部重点研发项目 (2021YFD1400800); 研究生创新专项资金项目 (YC2022-s927)

**共同第一作者 Co-first authors, E-mail: 2283328817@qq.com; 1455118487@qq.com

***共同通讯作者 Co-corresponding authors, E-mail: luzhanjun7@139.com; dym1009@163.com

收稿日期 Received: 2022-06-13; 接受日期 Accepted: 2023-04-10

nymphs of *D. citri* and adult *L. erysimi* were both present, adult *O. formosana* preferred to prey on *D. citri*. **[Conclusion]** All life-stages of *O. formosana* have the potential to control 5th instar *D. citri* nymphs, but 4th instar and adults are more likely to be effective biological control agents for *D. citri* than 1st to 3rd instar nymphs.

Key words *Oenopia formosana*; *Diaphorina citri*; biological control; predatory function

柑橘木虱 *Diaphorina citri* Kuwayama 是柑橘黄龙病 (Citrus Huanglongbing, HLB) 的主要传播媒介,属于半翅目 Hemiptera 木虱科 Psyllidae,可危害多种芸香科植物,全球广泛分布 (Hall *et al.*, 2013)。利用化学药剂杀灭柑橘木虱是切断柑橘黄龙病传播蔓延的重要途径,化学农药虽然高效,但也带了新的问题,比如果园节肢动物生物多样性降低、农药残留以及木虱产生抗药性等 (Tian *et al.*, 2019), 利用天敌来防治柑橘木虱是绿色防控的重要手段。柑橘木虱捕食性天敌种类丰富,包括瓢虫和草蛉等多个类群 (代晓彦等, 2014), 相关学者研究了天敌对柑橘木虱的捕食作用,如龟纹瓢虫 *Propylea japonica* 捕食木虱成虫及若虫 (庞虹, 1991; 周军辉等, 2020a)、丽草蛉捕食木虱成虫 (杜一民等, 2023)、异色瓢虫 *Harmonia axyridis* 捕食柑橘木虱成虫 (黄振东等, 2019)、红星瓢虫 *Phrynocaria congener* 捕食木虱成虫 (庞虹, 1991)、六斑月瓢虫 *Cheilomenes sexmaculata* 捕食木虱成虫及若虫 (庞虹, 1991; 周军辉等, 2020b)、红基瓢虫 *Lemnia circumsta* 捕食木虱若虫 (韦党扬等, 1995)、红通草蛉 *Chrysoperla rufilabris* 捕食木虱若虫 (Michaud, 2004) 等, 结果表明这些捕食性天敌均对柑橘木虱成虫或若虫有一定的控制作用。

在赣州脐橙园害虫多样性调查中发现多个脐橙园存在六星瓢虫 *Oenopia formosana* 捕食柑橘木虱的现象,而其他捕食性天敌却不多见,说明六星瓢虫较适应本地区脐橙园环境,可考虑作为主要的生防资源来加以利用。六星瓢虫属鞘翅目 Coleoptera 瓢虫科 Coccinellidae 巧瓢虫属 *Oenopia*, 是农田和果园较为常见的天敌昆虫,体长 3.5-4.0 mm, 体近似卵形,呈半球形拱起,前胸背板黑色,左右两边各有一个白斑,翅鞘黑色,每一翅鞘各有 3 个黄色椭圆形大斑。六星瓢

虫可捕食蚜虫和木虱,李成等 (2016) 在广西钦州市浦北县对红椎林进行昆虫种类调查时发现六星瓢虫可捕食蚜虫、木虱和蚧壳虫, Lu 等 (2018) 在台湾地区害虫自然天敌综述中记录了六星瓢虫是本地区的天敌资源。虽然是常见的天敌昆虫,但目前鲜见六星瓢虫对猎物的捕食作用研究,关于巧瓢虫属昆虫的研究也很有限,仅在几篇文献中有所报道,经希立 (1987) 记述了巧瓢虫属一新种波密小巧瓢虫 *Oenopia pomiensis* 和 2 个新纪录 (双六小巧瓢虫 *Oenopia billieti* 和点斑小巧瓢虫 *Oenopia signatella*); 张亚玲等 (2015) 记述了西藏巧瓢虫属 2 个新记录种 (贡嘎巧瓢虫 *Oenopia gonggarensis* 和六斑巧瓢虫 *Oenopia sexmaculata*); 杜予州等 (1989) 研究了巧瓢虫属的另外一种天敌黄缘巧瓢虫 *Oenopia sauzeti* 对烟蚜 *Myzus persicae* 的捕食功能反应,发现不同龄期的黄缘巧瓢虫均可捕食烟蚜,功能反应类型均属于 Holling II 模型,且捕食者个体间存在干扰效应;阿克旦·吾外士等 (2013) 发现菱斑巧瓢虫 *Oenopia conglobata* 是新疆和田县核桃种植园的捕食性天敌;陆承志和阿不都日西提 (2005) 发现菱斑巧瓢虫是新疆阿拉尔地区棉田害虫的天敌,在防护林胡杨树树皮中以成虫越冬。

进行生物防治的前提是明确天敌对害虫的控制作用大小,评价捕食性天敌控害能力的基本方法之一是捕食功能反应 (段雪莹等, 2021)。六星瓢虫虽然在本地果园较为常见,但目前尚缺乏其对柑橘木虱的控害效果和捕食能力的系统性研究。本研究选取六星瓢虫的 1-4 龄幼虫及成虫,以柑橘木虱 5 龄若虫为捕食对象,分别测定各虫态六星瓢虫的搜寻效应和捕食功能反应,从而评估其对柑橘木虱 5 龄若虫的控害效果;同时由于本地脐橙园有种植肥田萝卜作为绿肥的习惯,本文选取萝卜蚜 *Lipaphis erysimi* 和柑橘木

虱为对象, 研究六星瓢虫对二者的捕食偏好性, 以期为脐橙园使用六星瓢虫防治柑橘木虱提供参考, 并丰富巧瓢虫属昆虫捕食方面的资料。

1 材料与方法

1.1 材料

供试虫源: 六星瓢虫和柑橘木虱均采自江西省赣州市潭口镇脐橙园, 转移至室内后, 柑橘木虱于相对湿度 60%-70%, 光周期 14L: 10D 和温度 (27 ± 1) °C 的条件下, 用盆栽九里香于温室中饲养。六星瓢虫采用柑橘木虱若虫饲养种群, 待产卵孵化后选择整齐一致的 1-4 龄幼虫和羽化 1 日的成虫作为供试虫源进行试验。萝卜蚜在相对湿度 60%-70%, 光周期 14L: 10D 和温度 (27 ± 1) °C 的温室内用萝卜进行饲养。

仪器: QHP-600BE 型人工气候箱 (上海力辰仪器科技有限公司); SZ2-ILST 体式显微镜 (奥林巴斯公司)。

1.2 方法

1.2.1 六星瓢虫对柑橘木虱的捕食功能反应 根据预试验的结果, 六星瓢虫若虫和成虫在饱食 1 d 后, 再进行饥饿处理, 1 龄和 2 龄若虫的处理时间是 12 h, 其他龄期的处理时间是 24 h, 然后在直径 9 cm、高 1.5 cm 的培养皿内进行捕食研究, 放入九里香嫩枝及柑橘木虱 5 龄若虫, 为了保证培养皿内部的湿度及透气, 用脱脂棉包裹嫩枝基部, 并用昆虫针扎出少量小孔, 培养皿放在人工气候箱内培养, 24 h 后统计并统计六星瓢虫的捕食量, 每个处理重复 5 次。六星瓢虫 1 龄幼虫的供试柑橘木虱密度梯度为 5、10、15、20 和 25 头/皿; 2 和 3 龄幼虫的供试柑橘木虱密度梯度分别为 10、20、30、40 和 50 头/皿; 4 龄幼虫和成虫的供试柑橘木虱密度梯度分别为 20、40、60、80 和 100 头/皿。

1.2.2 六星瓢虫对猎物的捕食偏好 在每个培养皿中放入用脱脂棉包裹保湿的萝卜嫩叶和九里香嫩枝, 放入 1 头饱食后进行饥饿处理 24 h 的六星瓢虫成虫, 再放入柑橘木虱 5 龄若虫和萝卜蚜成虫的猎物组合, 控制各个组合的虫口总数

为 100 头。试验共设置 3 个处理 (木虱 70 头和萝卜蚜 30 头; 木虱 50 头和萝卜蚜 50 头; 木虱 30 头和萝卜蚜 70 头), 每处理 5 次重复, 培养皿置于 1.2.1 描述的气候箱内, 24 h 后统计每个培养皿中剩下的柑橘木虱和萝卜蚜数量, 计算六星瓢虫成虫的捕食量。

1.3 数据统计与分析

1.3.1 捕食功能反应 各虫态六星瓢虫对柑橘木虱 5 龄若虫的捕食功能反应可以利用 Holling II 模型: $N_a = aN_0T/(1+aT_hN_0)$ (Holling, 1959) 进行拟合分析。六星瓢虫对柑橘木虱的瞬时攻击率用 a 表示, 柑橘木虱 5 龄若虫密度为 N_0 , 六星瓢虫捕食柑橘木虱的头数为 N_a , T 为试验总时间取 1 d, T_h 为六星瓢虫捕食 1 头 5 龄柑橘木虱若虫需要的时间, $1/T_h$ 为六星瓢虫的理论日最大捕食量, a/T_h 为六星瓢虫的控害效能。将模型方程倒数法转化为 $1/N_a = 1/aTN_0 + T_h/T$, 用最小二乘法求出相应的参数值。

1.3.2 六星瓢虫对柑橘木虱 5 龄若虫的搜寻效应 各虫态六星瓢虫对柑橘木虱 5 龄若虫的搜寻效应利用方程 $S = a/(1+aT_hN_0)$ (丁岩钦, 1994) 进行拟合分析, 其中 S 为搜寻效应, N_0 为柑橘木虱 5 龄若虫密度、瞬时攻击率 a 和处理时间 T_h 均由 1.3.1 得到。

1.3.3 六星瓢虫的捕食偏好性 根据模型方程 $D = N_{p1}N_2/(N_{p2}N_1)$ 计算食物选择性指数 D , 其中 N_{p1} 为六星瓢虫成虫捕食柑橘木虱 5 龄若虫的数量, N_{p2} 为六星瓢虫成虫捕食萝卜蚜成虫的数量, N_1 和 N_2 分别为两种猎物的初始密度。当计算 $D > 1$ 时, 结果表明捕食者对猎物具有捕食偏好性。

利用 Excel 2019 软件对试验数据进行处理, 拟合捕食功能反应模型并且进行卡方检验, ANOVA 方差分析用 SPSS 21.0 软件 (Tukey 法)。

2 结果与分析

2.1 六星瓢虫在柑橘木虱不同密度下的捕食量

各个虫态的六星瓢虫对 5 龄的柑橘木虱若虫均有捕食, 在设置好的试验猎物密度下, 其其

捕食量的增大的幅度慢慢减缓,在六星瓢虫 1 和 2 龄若虫龄期时,猎物密度最高时,其捕食量反而变少了,是一种逆密度制约。各个龄期六星瓢虫在高密度猎物时的捕食量均显著高于低密度猎物时的捕食量,六星瓢虫 4 龄幼虫和成虫对柑橘木虱 5 龄若虫的捕食能力明显强于低龄幼虫(表 1)。

2.2 六星瓢虫对柑橘木虱捕食功能反应

随着柑橘木虱 5 龄若虫密度的升高,六星瓢虫 1-4 龄幼虫和成虫的捕食量也在增加,但在高密度猎物时增幅减缓而后逐渐趋于日最大捕食量(图 1),功能反应均符合 Holling II 模型。经圆盘方程模型拟合后(表 2),六星瓢虫 1-4 龄幼虫和成虫的 R^2 分别为 0.932、0.982、0.959、0.933

表 1 六星瓢虫对不同密度柑橘木虱 5 龄若虫的日捕食量
Table 1 Daily predation capacity of *Oenopia formosana* to the 5th instar nymphs of *Diaphorina citri* at different densities

1 龄幼虫 1st instar larva		2 龄幼虫 2nd instar larva		3 龄幼虫 3rd instar larva		4 龄幼虫 4th instar larva		成虫 Adult	
猎物密度 (头/皿) Prey densities (ind./dish)	捕食量 (头) Predation (ind.)	猎物密度 (头/皿) Prey densities (ind./dish)	捕食量 (头) Predation (ind.)	猎物密度 (头/皿) Prey densities (ind./dish)	捕食量 (头) Predation (ind.)	猎物密度 (头/皿) Prey densities (ind./dish)	捕食量 (头) Predation (ind.)	猎物密度 (头/皿) Prey densities (ind./dish)	捕食量 (头) Predation (ind.)
5	1.4±0.2 b	10	3.8±0.9 c	10	6.2±1.2 c	20	12.4±1.2 b	20	11.6±0.9 c
10	2.0±0.4 b	20	6.6±0.7 bc	20	9.0±1.7b c	40	25.6±2.3 a	40	22.8±1.5 b
15	3.8±0.9 ab	30	9.8±1.4 ab	30	15.2±2.2 ab	60	28.8±2.7 a	60	26.2±3.6 ab
20	6.2±0.9 a	40	13.2±1.1 a	40	19.6±1.5 a	80	28.4±2.1 a	80	33.4±2.4 a
25	6.0±0.5 a	50	11.0±1.6 ab	50	20.2±1.7 a	100	30.0±2.6 a	100	34.0±2.0 a

表中数据为平均数±标准误。同行数据后标有不同小写字母表示经 Tukey 法检验差异显著 ($P<0.05$)。
Data in the table are mean±SE, and followed by the different lowercase letters in the same row indicate significant difference by Tukey test ($P<0.05$).

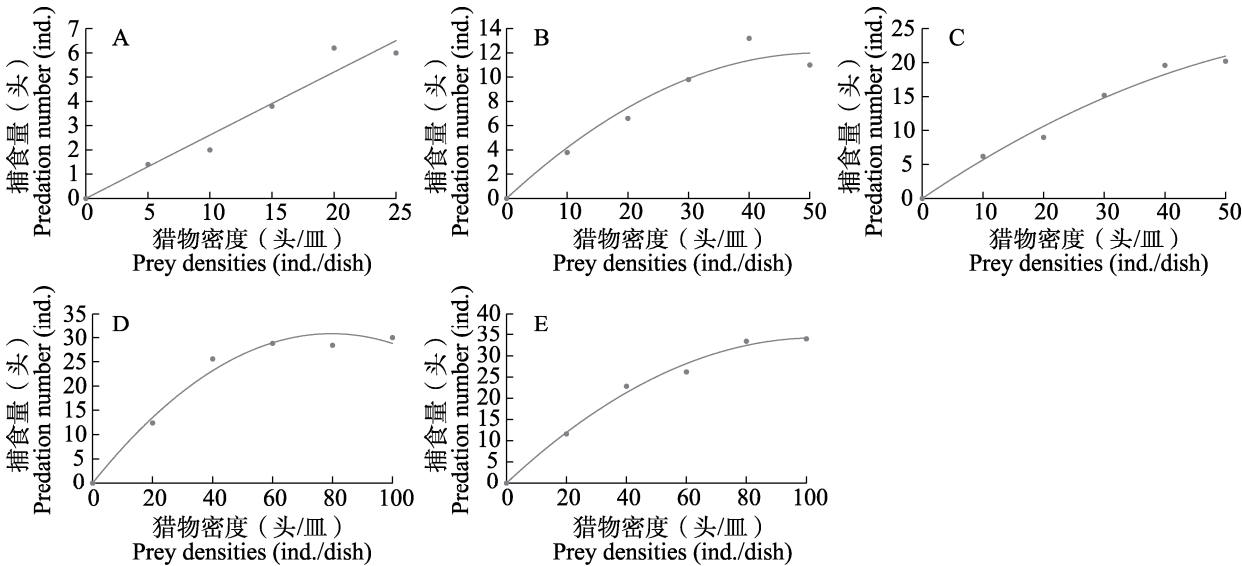


图 1 六星瓢虫 1 龄 (A)、2 龄 (B)、3 龄 (C) 及 4 龄幼虫 (D) 和成虫 (E) 对柑橘木虱 5 龄若虫的捕食功能反应

Fig. 1 Functional responses of the 1st instar larva (A), 2nd instar larva (B), 3rd instar larva (C), 4th instar larva (D) and adult (E) of *Oenopia formosana* to the 5th instar nymphs of *Diaphorina citri*

表 2 六星瓢虫对柑橘木虱 5 龄若虫的捕食功能反应

Table 2 Functional responses of *Oenopia formosana* to the 5th instar nymphs of *Diaphorina citri*

捕食者虫态 Stage of predator	捕食功能方程 Functional response equation	R^2	瞬时攻击率 (a) Attacking efficiency	处理时间(T_h) (d) Handling time (d)	控害效能 (a/T_h) Predation capacity	理论日最大捕食量(头) The maximum predation (ind.)	卡方值 χ^2
1 龄幼虫 1st instar larva	$N_a=0.279N_0/(1+0.010N_0)$	0.932	0.279	0.034	8.148	29.155	0.636
2 龄幼虫 2nd instar larva	$N_a=0.430N_0/(1+0.013N_0)$	0.982	0.430	0.030	14.131	32.895	0.667
3 龄幼虫 3rd instar larva	$N_a=0.689N_0/(1+0.015N_0)$	0.959	0.689	0.022	32.048	46.512	0.678
4 龄幼虫 4th instar larva	$N_a=0.829N_0/(1+0.014N_0)$	0.933	0.829	0.017	48.747	58.824	1.871
成虫 Adult	$N_a=0.695N_0/(1+0.009N_0)$	0.985	0.695	0.013	55.130	79.365	0.518

N_a : 被六星瓢虫捕食的猎物数; N_0 : 猎物密度。 N_a : Number of preys predated; N_0 : Prey density.

和 0.985, 进一步对实际值与理论值进行卡方适合性检验, 得到了六星瓢虫各个虫态的卡方值均小于 $\chi^2_{0.05} = 9.49$ 的结果, 说明实际值与理论值之间的差异不显著, 得到的功能反应方程可正确反映实际捕食情况。

各个虫态的六星瓢虫对柑橘木虱 5 龄若虫的理论日最大捕食量分别为 29.155、32.895、46.512、58.824 和 79.365 头, 瞬时攻击率分别为 0.279、0.430、0.689、0.829 和 0.695, 处理时间分别为 0.034、0.030、0.022、0.017 和 0.013 d, 控害效能分别为 8.148、14.131、32.048、48.747 和 55.130 (表 2)。结果表明六星瓢虫对柑橘木虱 5 龄若虫控害效能比较好的龄期是 4 龄幼虫和成虫, 六星瓢虫瞬时攻击率最高的是 4 龄幼虫, 其次是成虫, 但成虫的处理时间相对较短, 因而具有更高的控害效能, 因此, 在 4 龄幼虫和成虫阶段的六星瓢虫对柑橘木虱 5 龄若虫防控效果比较好, 而低龄的六星瓢虫幼虫对柑橘木虱 5 龄若虫的捕食较少。

2.3 六星瓢虫对柑橘木虱的搜寻效应

各个虫态的六星瓢虫对柑橘木虱 5 龄若虫的搜寻效应均随着猎物密度的增加而降低 (图 2), 猎物密度的增加降低了六星瓢虫对柑橘木虱 5 龄若虫的搜寻难度, 致使搜寻时间减少, 更加地有利于捕食。其中 4 龄六星瓢虫幼虫的搜寻效应随柑橘木虱 5 龄若虫密度增加下降趋势最

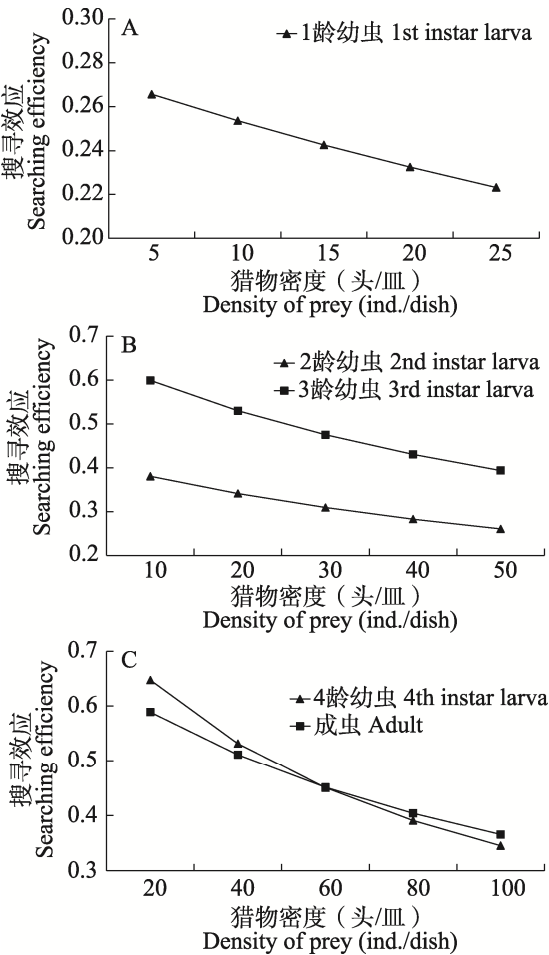


图 2 六星瓢虫 1 龄 (A)、2 龄及 3 龄幼虫 (B)、4 龄幼虫和成虫 (C) 对柑橘木虱 5 龄若虫的搜寻效应

Fig. 2 Searching efficiency of the 1st instar larva (A), 2nd and 3rd instar larva (B), 4th instar larva and adult (C) of *Oenopia formosana* to the 5th instar nymphs of *Diaphorina citri*

大,受猎物密度影响最大,成虫次之,而六星瓢虫 1 龄幼虫的搜寻效应下降趋势最小。当柑橘木虱 5 龄若虫的密度较低时(20 头/皿),4 龄幼虫的搜寻效应(0.648)高于其他龄期的六星瓢虫。

2.4 六星瓢虫成虫对柑橘木虱和萝卜蚜的捕食偏好

放置不同数目的 5 龄柑橘木虱若虫和萝卜蚜成虫的混合于培养皿中,分别设置柑橘木虱 5 龄

若虫密度大于、等于和小于萝卜蚜成虫密度,以六星瓢虫成虫为捕食者,统计其对这两种猎物的捕食量。结果显示,所有处理的食物选择性指数 D 值均大于 1(表 3),前 2 种比例处理的六星瓢虫成虫对柑橘木虱 5 龄若虫的捕食量均高于萝卜蚜成虫,当柑橘木虱密度等于或小于萝卜蚜密度时,食物选择性指数 D 值达到 1.3,六星瓢虫成虫表现出来对柑橘木虱 5 龄若虫有一定的捕食偏好,但在柑橘木虱密度大于萝卜蚜时捕食偏好不明显。

表 3 六星瓢虫对柑橘木虱和萝卜蚜的捕食偏好性

Table 3 Predation preference of *Oenopia formosana* to *Diaphorina citri* and *Lipaphis erysimi*

柑橘木虱 <i>Diaphorina citri</i>			萝卜蚜 <i>Lipaphis erysimi</i>		
处理 Treatment	密度 (头/皿) Densities (ind./dish)	被捕食量 (头) Arrested number (ind.)	密度 (头/皿) Densities (ind./dish)	被捕食量 (头) Arrested number (ind.)	食物选择性指数 Food selectivity index
1	70	27.40±1.60	30	11.40±0.68	1.04
2	50	19.00±1.05	50	14.20±0.80	1.34
3	30	11.80±0.66	70	22.20±2.41	1.31

3 讨论

本研究结果表明,六星瓢虫 1-4 龄幼虫和成虫均能取食 5 龄若虫,捕食功能反应均符合 Holling II 模型,这与同属的黄缘巧瓢虫 *Oenopia sauzeti* 对烟蚜的捕食功能反应的结果相同(杜予州等,1989),其他瓢虫对柑橘木虱的捕食功能反应均符合 Holling II 模型(庞虹,1991;周军辉等,2020a)。本研究发现,六星瓢虫 4 龄幼虫的瞬时攻击率最高,其次是成虫,明显高于 1 和 2 龄幼虫;六星瓢虫对柑橘木虱 5 龄若虫的处理时间随着龄期增加而缩短,最短的是成虫,因而具有最大的理论日最大捕食量;对柑橘木虱 5 龄若虫的控害效能则是成虫最高(55.130),其次是 4 龄幼虫(48.747),明显高于 1 和 2 龄幼虫,在周军辉等(2020a)开展的龟纹瓢虫对柑橘木虱若虫的捕食功能研究中,龟纹瓢虫 4 龄幼虫和成虫的控害效能分别为 73.125 和 42.188,高于其他龄期,本研究结果与之相似,但龟纹瓢虫对柑橘木虱 5 龄若虫的控害能力高于六星瓢虫,在利用六星瓢虫进行柑橘木虱生物防治时,应考虑

使用 4 龄幼虫和成虫。

各个虫态的六星瓢虫对 5 龄柑橘木虱若虫的搜寻效应会随柑橘木虱密度变大而减小,其中 4 龄六星瓢虫幼虫下降的幅度最明显,说明 4 龄六星瓢虫的搜寻效应受到柑橘木虱密度的影响最大,成虫次之,而六星瓢虫 1 龄幼虫受猎物影响最小,这一结果与周军辉等(2020a)的结果相同,龟纹瓢虫各个龄期对柑橘木虱若虫的搜寻效应也随着猎物密度的变大而减小。所以在利用天敌进行生物防治时,天敌对猎物的搜寻效应很重要,在害虫的数量比较少的时候,释放对害虫搜寻能力较高的天敌昆虫尤为必要(孙婧婧等,2021),本研究中,当降低柑橘木虱 5 龄若虫的密度,使其低至 20 头/皿时,六星瓢虫 4 龄幼虫的搜寻效应(0.648)明显高于其他龄期的六星瓢虫,因此当柑橘木虱以较低密度存在时,利用六星瓢虫 4 龄幼虫进行防治是较好的选择。六星瓢虫除了能捕食柑橘木虱,还能捕食蚜虫等小型节肢动物,本研究发现,相对于萝卜蚜,六星瓢虫对柑橘木虱有一定的捕食偏好,这对六星瓢虫在多猎物环境中的生物防治具有指导意义。

本研究证实了六星瓢虫对柑橘木虱若虫具有一定的控害能力,但考虑到一旦将六星瓢虫释放到田间,还得承受各种生物及非生物因素的影响(代晓彦等,2014;李玉艳等,2021;孙婧婧等,2021),还需通过田间试验来评价六星瓢虫对柑橘木虱的实际防控能力。此外,六星瓢虫幼虫会出现相互残杀行为,尤其在缺乏食物时表现更为突出,因此在田间释放六星瓢虫时,还应注意控制六星瓢虫和柑橘木虱的比例。肥田萝卜是脐橙园常见的套种植物,除了作为绿肥,还可抑制杂草、改善土壤,六星瓢虫对萝卜蚜和柑橘木虱均可捕食,且对柑橘木虱有捕食偏好,但肥田萝卜在脐橙园涵养天敌的具体效果,还值得进一步研究。

参考文献 (References)

- Ahtam U, Liu J, Tursunjiang Y, Liu WL, Aniwar K, 2013. Occurrence of pest insects and natural enemies on walnut trees in fruit tree and crop intercropping system. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 50(4): 655–661. [阿克旦·吾外士, 刘建, 图荪江·伊敏托合提, 刘午玲, 安尼瓦尔·库尔班, 2013. 果园间作模式下核桃主要害虫、天敌及其田间及其消长规律研究. 新疆农业科学, 50(4): 655–661.]
- 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.]
- Ding YQ, 1994. *Mathematical Ecology of Insects*. Beijing: Science Press. 257–258, 303–304. [丁岩钦, 1994. 昆虫数学生态学. 北京: 科学出版社. 257–258, 303–304.]
- Du YM, Chen HX, Cheng GQ, Ouyang ZG, Yu HZ, Lu ZJ, 2023. Functional response and prey preference of beautiful lacewing *Chrysopa formosa* to adult of Asian citrus psyllid *Diaphorina citri*. *Journal of Plant Protection*, 50(4): 1025–1032. [杜一民, 陈晗馨, 程高祺, 欧阳智刚, 余海中, 卢占军, 2023. 丽草蛉对柑橘木虱成虫的捕食功能反应及捕食偏好. 植物保护学报, 50(4): 1025–1032.]
- Du YZ, Diao CQ, Liu CY, Zhong YX, Wu XM, 1989. Predation of *Oenopia sauzeti* functional response of *Oenopia sauzeti* to *Myzus persicae*. *Journal of Guizhou Agricultural College*, 8(1): 80–86. [杜予州, 刁朝强, 刘呈义, 钟永先, 吴晓敏, 1989. 黄缘巧瓢虫对烟蚜捕食作用的研究——黄缘巧瓢虫对烟蚜的功能反应. 贵州农学院学报, 8(1): 80–86.]
- Duan XY, Wang YD, Zhang NZ, Gao F, Zhao ZH, 2021. Research advances in evaluation methods of predator's control of insect pests. *Journal of Plant Protection*, 48(2): 275–288. [段雪莹, 王祎丹, 张乃钊, 高峰, 赵紫华, 2021. 捕食性天敌控害能力评价方法进展. 植物保护学报, 48(2): 275–288.]
- Hall DG, Richardson ML, Ammar ED, Halbert SE, 2013. Asian citrus psyllid, *Diaphorina citri*, vector of citrus huanglongbing disease. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 146(2): 207–223.
- Holling CS, 1959. Some characteristics of simple types of predation and parasitism. *The Canadian Entomologist*, 91(7): 385–398.
- Huang ZD, Zhou XM, Pu ZX, Hu XR, Du DC, Chen GQ, Zhang HY, 2019. Effect of spatial scale and prey density on predation of the adult Asian citrus psyllid *Diaphorina citri* Kuwayama (Hemiptera: Liviidae) by adult *Harmonia axyridis* (Pallas) (Coleoptera: Coccinellidae). *Chinese Journal of Applied Entomology*, 56(1): 85–90. [黄振东, 周新苗, 蒲占涓, 胡秀荣, 杜丹超, 陈国庆, 张宏宇, 2019. 空间和猎物密度对异色瓢虫取食柑橘木虱的影响. 应用昆虫学报, 56(1): 85–90.]
- Jing XL, 1987. A new species and two new records of *Oenopia* Mulsant from China (Coleoptera: Coccinellidae). *Acta Zootaxonomica Sinica*, 12(4): 413–414. [经希立, 1987. 小巧瓢虫属一新种及中国二新纪录 (鞘翅目:瓢虫科). 动物分类学报, 12(4): 413–414.]
- Li C, Xian ZH, Zheng XL, Wei JG, 2016. Investigation on insects for *Castanopsis hystrix* in Qinzhou Pubei county, Guangxi. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 29(4): 820–825. [李成, 贤振华, 郑霞林, 韦继光, 2016. 广西浦北红椎昆虫种类调查研究. 西南农业学报, 29(4): 820–825.]
- Li YY, Wang MQ, Zhang YY, Ma M, Li P, Mao JJ, Chen HY, Zhang LS, 2021. Predatory capacity of *Chrysopa formosa* on the eggs and young larvae of *Spodoptera frugiperda*. *Plant Protection*, 47(5): 178–184, 197. [李玉艳, 王孟卿, 张莹莹, 马梦, 李萍, 毛建军, 陈红印, 张礼生, 2021. 丽草蛉幼虫对草地贪夜蛾卵及低龄幼虫的捕食能力评价. 植物保护, 47(5): 178–184, 197.]
- Lu CZ, Abudourixiti, 2005. Study on trapping and protecting function of overwintering of natural enemies of pest of cotton

- field by several main protection forest species. *Protection Forest Science and Technology*, 2005(4): 11–13. [陆承志, 阿不都日西提, 2005. 几种主要防护林树种对棉田害虫天敌越冬诱集保护作用的研究. 防护林科技, 2005(4): 11–13.]
- Lu MC, Chen HR, Wu YH, 2018. Current status and future perspectives on natural enemies for pest control in taiwan. *Biocontrol Science and Technology*, 28(10): 953–960.
- Michaud JP, 2004. Natural mortality of Asian citrus psyllid (Homoptera: Psyllidae) in central Florida. *Biological Control*, 29(2): 260–269.
- Pang H, 1991. A study on the predation of three ladybird beetles (Coleoptera: Coccinellidae) on the adults of *Diaphorina citri* (Hemiptera: Psyllidae). *Natural Enemies of Insects*, 13(4): 186–188. [庞虹, 1991. 三种瓢虫对木虱成虫的捕食量观察. 昆虫天敌, 13(4): 186–188.]
- Sun JJ, Wang MQ, Tang YT, Li XY, Zhang LS, Li H, 2021. Predatory functional response of *Arma custos* (Hemiptera: Pentatomidae) to the larvae of *Helicoverpa armigera* (Lepidoptera: Noctuidae). *Journal of Plant Protection*, 48(5): 1081–1087. [孙婧婧, 王孟卿, 唐艺婷, 李心钰, 张礼生, 李虎, 2021. 蠊蝽对棉铃虫幼虫的捕食功能反应. 植物保护学报, 48(5): 1081–1087.]
- Tian FJ, Li CF, Wang ZB, Liu JL, Zeng XN, 2019. Identification of detoxification genes in imidacloprid-resistant Asian citrus psyllid (Hemiptera: Lividae) and their expression patterns under stress of eight insecticides. *Pest Management Science*, 75(5): 1400–1410.
- Wei DY, Zhao Q, Huang Q, Li XZ, 1995. A study on the predation of *Lemnia circumsta* on the *Diaphorina citri* (Hemiptera: Psyllidae). *Natural Enemies of Insects*, 17(2): 59–63. [韦党扬, 赵琦, 黄琼, 李兴忠, 1995. 红基盘瓢虫对柑桔木虱捕食作用的研究. 昆虫天敌, 17(2): 59–63.]
- Zhang YL, Wang BH, Zhang XD, Wang WF, 2015. Two new records of *Oenopia Mulsant* from Tibet. *Tibet Science and Technology*, 2015(6): 27, 39. [张亚玲, 王保海, 张小东, 王文峰, 2015. 西藏巧瓢虫属二新记录种. 西藏科技, 2015(6): 27, 39.]
- Zhou JH, Li PL, Naiwuzhati ZN, Zheng HN, Huang J, Wang ZH, 2020a. 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, 2020a. 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.]
- Zhou JH, Li PL, Zheng HN, Huang J, Wang ZH, 2020b. Functional response of *Menochilus sexmaculata* (Fabricius) on the nymph of *Diaphorina citri* Kuwayama. *Journal of Fujian Agriculture and Forestry University (Natural Science Edition)*, 49(3): 295–299. [周军辉, 李鹏雷, 郑卉娜, 黄建, 王竹红, 2020b. 六斑月瓢虫对柑橘木虱若虫的捕食功能反应. 福建农林大学学报(自然科学版), 49(3): 295–299.]