

广重粉蛉对烟粉虱的捕食作用研究*

罗小龙^{1**} 韩阅叶² 梁建锋¹ 周 镇¹ 王兴民^{1***}

(1. 广东省生物农药创制与应用重点实验室, 华南农业大学农学院昆虫学系, 广州 510642;

2. 中华人民共和国淮安海关, 淮安 223001)

摘 要 【目的】广重粉蛉 *Semidalis aleyrodiformis* (Stephens) 是烟粉虱 *Bemisia tabaci* (Gennadius) 的重要天敌昆虫之一, 为了明确其控制潜能, 本文研究了广重粉蛉对烟粉虱的捕食作用。【方法】在室内温度(26±1)℃, 相对湿度 75%±5%, 光照周期 L:D=14:10 条件下, 对广重粉蛉幼虫捕食烟粉虱各个虫态的捕食作用进行研究。并且评估了广重粉蛉幼虫对烟粉虱卵、广重粉蛉成虫对烟粉虱若虫和伪蛹的捕食功能反应模型, 同时, 对广重粉蛉成虫捕食烟粉虱卵的干扰反应方程进行了拟合。【结果】广重粉蛉幼虫对烟粉虱的捕食量随着广重粉蛉龄期的增大而增大。广重粉蛉幼虫对烟粉虱卵的功能反应和广重粉蛉成虫对烟粉虱各个虫态的捕食功能反应都呈 Holling II 型。随着广重粉蛉龄期的增加, 广重粉蛉对烟粉虱卵的寻找效率(a)逐渐增加, 处置时间(T_h)依次缩短; 而广重粉蛉成虫对不同龄期烟粉虱的功能反应是随着猎物龄期的增加, 寻找效率逐渐降低, 处置时间(T_h)依次延长。广重粉蛉自身密度方程为 $E=0.1279 \times P^{-0.3173}$, 干扰系数为 0.3173。【结论】研究表明, 广重粉蛉 4 龄幼虫和雌成虫对烟粉虱有较好的捕食作用, 控害潜力最大。

关键词 广重粉蛉; 烟粉虱; 捕食作用; 功能反应

Predation of *Semidalis aleyrodiformis* (Stephens) on *Bemisia tabaci* (Gennadius)

LUO Xiao-Long^{1**} HAN Yue-Ye² LIANG Jian-Feng¹ ZHOU Zhen¹ WANG Xing-Min^{1***}

(1. Key Laboratory of Bio-Pesticide Creation and Application & Department of Entomology, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China; 2. Nan Jing Customs District P.R., Huaian 223001, China)

Abstract [Objectives] To understand the potential for using *Semidalis aleyrodiformis* (Stephens), one of the most important natural enemies of *Bemisia tabaci*, as a biological control for this pest. [Methods] Under laboratory conditions of (26±1) °C, RH=75% and L:D=14:10, the functional response of *S. aleyrodiformis* larvae feeding on *B. tabaci* eggs and adults was determined. The interference equation of *S. aleyrodiformis* adults feeding on *B. tabaci* eggs was also determined. [Results] Predation of *B. tabaci* larvae increased with the age of *S. aleyrodiformis* and was highest for 4th instar larvae. The functional responses of *S. aleyrodiformis* larvae on *B. tabaci* eggs and adults conformed to Holling's Type II equation. Although the efficiency of *S. aleyrodiformis* searching for *B. tabaci* eggs gradually increased with age, the treatment time (T_h) decreased. The search efficiency of *S. aleyrodiformis* gradually decreased with the age of *B. tabaci* aged and the treatment time increased. The density equation of *S. aleyrodiformis* was $E=0.1279 \times P^{-0.3173}$ and the interference coefficient (m) was 0.3173. [Conclusion] Fourth instar *S. aleyrodiformis* larvae and adult females have potential as a biological control for *B. tabaci*.

Key words *Semidalis aleyrodiformis*; *Bemisia tabaci*; predation; functional response

烟粉虱 *Bemisia tabaci* (Gennadius) 属半翅 性和非滞育性昆虫 (Mound and Halsey, 1978;
目 (Hemiptera) 粉虱科 (Aleyrodidae), 为多食 Watson *et al.*, 1992), 寄主植物多达 600 余种

*资助项目 Supported projects: 广州市科技计划重点项目 (201804020070); 广东省科技计划项目 (2017A020208060)

**第一作者 First author, E-mail: lxlg@stu.scau.edu.cn

***通讯作者 Corresponding author, E-mail: wangxmcn@scau.edu.cn

收稿日期 Received: 2019-02-13; 接受日期 Accepted: 2019-03-26

(Oliveira *et al.*, 2001)。烟粉虱除了直接吸食汁液危害寄主植物外,还能分泌蜜露使寄主植物发生煤污病(张芝利和罗晨,2001)。烟粉虱具有很强的适应性,如亚热带、热带以及温带气候条件下都能生存繁殖(Brown,2007)。据报道,烟粉虱借助人类物流活动已传播到除南极洲外的100多个国家和地区(De Barro *et al.*,2011; Barbosa *et al.*,2014)。在国内除西藏、宁夏、青海外的其他省份均有分布(刘银泉和刘树生,2012)。目前,对烟粉虱的防治主要依靠化学防治,但是其体具有蜡质,若虫和卵通常在叶背,导致化学药品不易渗透、防治难度大(吴杏霞和胡敦孝,2000)。同时,化学杀虫剂的大量使用容易引起烟粉虱抗药性,对环境造成严重污染。因此,利用烟粉虱天敌进行生物防治具有重要研究意义。

烟粉虱的天敌种类丰富,世界范围内的捕食性天敌已发现191种(Gerling *et al.*,2001; Arnó *et al.*,2010; Li *et al.*,2011)。目前研究较多的烟粉虱捕食性天敌有刀角瓢虫 *Serangium japonicum*, 小黑瓢虫 *Delphastus catalinae*, 盲蝽 *Macrolophus caliginosus*, 草蛉 *Chrysoper lazarnea* 等(Nordlund and Legaspi,1996; Gerling *et al.*,2001)。其中小黑瓢虫、草蛉已商品化生产(Barnadas *et al.*,1998)。广重粉蛉 *Semidalis aleyrodiformis*(Stephens)属脉翅目(Neuroptera),粉蛉科(Coniopterygidae)是烟粉虱本土优势天敌(徐彩霞等,2008),对烟粉虱种群有很好的控制作用。然而,国内外对广重粉蛉防治烟粉虱的研究鲜有报道,对广重粉蛉捕食烟粉虱的功能反应特征尚不可知。

本文研究了不同龄期广重粉蛉对烟粉虱各虫态的捕食功能反应,建立了相关数学模型,以期科学评价广重粉蛉对烟粉虱的控制作用,为合理利用该天敌对烟粉虱进行生物防治提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 供试虫源

烟粉虱采自华南农业大学教学实习农场并

在实验室用扶桑 *Hibiscus rosa-sinensis* Linn 繁殖饲养多代供试。

广重粉蛉采自广州,实验室种群,保存10代以上。

1.2 实验方法

试验在温度(26±1)℃,相对湿度75%±5%,光周期L:D=14:10的人工气候箱中进行。

1.2.1 广重粉蛉幼虫对烟粉虱的捕食量 将带有已知数目烟粉虱的卵(600粒)、1龄(250头)、2龄(150头)、3龄(100头)、4龄若虫(50头)和伪蛹(50头)的扶桑叶片分别放入培养皿($\Phi=9$ cm, $h=1.5$ cm)中,再分别接入广重粉蛉初孵幼虫。观察并记录广重粉蛉每个龄期的幼虫对烟粉虱卵、1龄、2龄、3龄、4龄若虫和伪蛹的取食数量。实验过程中,每天更换新鲜的食料,直至幼虫化蛹,每个处理20次重复。

1.2.2 广重粉蛉成虫对烟粉虱的捕食量 在将带有已知数目烟粉虱的卵(600粒)、1龄(250头)、2龄(150头)、3龄(100头)、4龄若虫(50头)和伪蛹(50头)的扶桑叶片分别放入培养皿($\Phi=9$ cm, $h=1.5$ cm)中,再分别接入广重粉蛉初羽化成虫,观察并记录广重粉蛉成虫每日取食烟粉虱卵、1龄、2龄、3龄、4龄若虫和伪蛹的数量,每天更换新鲜的食料,观察记录3 d,雌雄成虫各重复10次。

1.2.3 广重粉蛉幼虫对烟粉虱卵的捕食功能反应测定 在试管($\Phi=10$ mm, $h=75$ mm)中放入带有烟粉虱卵的扶桑叶片,烟粉虱卵的密度分别设为10、20、40、80和160粒5个处理。实验前将广重粉蛉各个龄期的幼虫饥饿12 h后,取广重粉蛉各个龄期幼虫1头分别置于不同密度烟粉虱卵放入试管中。喂食24 h后观察并记录试管内剩余的烟粉虱卵的数量,每个组合5次重复。

1.2.4 广重粉蛉成虫对烟粉虱若虫及伪蛹捕食的功能反应测定 在培养皿($\Phi=9$ cm, $h=1.5$ cm)中放入带烟粉虱卵的扶桑叶,烟粉虱卵的密度分别设为50、100、200、400和800粒5个处理,烟粉虱1龄、2龄、3龄、4龄和伪蛹的密度梯度分别设为10、20、40、80和160头5个密度,

共 25 个处理。分别将饥饿处理 12 h 的单头广重粉蛉成虫放入含不同密度的烟粉虱的培养皿中, 24 h 后观察并记录培养皿内剩余的烟粉虱数量。雌雄成虫每个组合各 5 次重复。

1.2.5 不同密度广重粉蛉成虫的干扰反应 以广重粉蛉成虫 1、3、5、7、9 头分别与 2 000 头烟粉虱卵组合, 共 5 个处理, 24 h 后观察剩余烟粉虱卵量, 每处理 5 次重复。

1.3 数据处理

所有数据的分析和处理, 绘图均在 SAS 数据处理系统中进行。广重粉蛉幼虫对烟粉虱的功能反应和干扰反应采用以下两个方程式。

(1) 功能反应采用 Holling II 型, 即圆盘方程 (Holling, 1959), 其数学模型为:

$$N_a = aNT / (1 + aT_h N)$$

式中 N_a 为被捕食的猎物数; N 为猎物密度; T 为供试的总时间; a 为捕食者对猎物的寻找效率 (或瞬间攻击率); T_h 为处置时间。

(2) 干扰反应采用模拟 Hassel-Varley 模型 (Hassell and Varley, 1969), 求解寻找系数 (Q) 和相互干扰系数 (m) 参数。其模型为: $E = QP^{-m}$

式中: E 为捕食作用率; P 为捕食者密度; Q 为寻找系数; m 为相互干扰系数。

2 结果与分析

2.1 广重粉蛉幼虫对烟粉虱各龄期的捕食量

广重粉蛉不同龄期的幼虫对同一龄期的烟粉虱捕食量随着广重粉蛉龄期的增大而增大, 各个龄期取食量差异显著 ($P < 0.05$), 特别是广重粉蛉 4 龄幼虫对各龄期烟粉虱若虫的捕食量达到最大 (表 1), 其中粉蛉 1 龄幼虫取食烟粉虱卵、1-4 龄若虫和伪蛹的捕食量分布是: 20.29 粒、18.53 头、3.19 头、1 头和 1 头; 粉蛉 2 龄幼虫取食烟粉虱卵、1-4 龄若虫和伪蛹的捕食量分布是: 63.13 粒、31.87 头、6.94 头、3.57 头、1.63 头和 1.75 头; 粉蛉 3 龄幼虫取食烟粉虱卵、1-4 龄若虫和伪蛹的捕食量分布是: 96.87 粒、50.62 头、11.94 头、5.13 头、3.90 头和 3.81 头; 粉蛉 4 龄幼虫取食烟粉虱卵、1-4 龄若虫和伪蛹的捕食量分布是: 290.21 粒、99.92 头、51.25 头、36.50 头、12.39 头和 9.63 头。

由于猎物龄期的不同, 猎物个体大小的差异造成广重粉蛉捕食量的差异, 世代平均捕食烟粉虱卵、1-4 龄若虫和伪蛹为 464.21 粒、201.69 头、73.31 头、46.19 头、19.0 头和 16.19 头, 差异显著 ($P < 0.05$)。

表 1 广重粉蛉不同龄期的幼虫对烟粉虱各个虫态的捕食量

Table 1 The consumption of *Semidalis aleyrodiformis* larva on different developmental stages of *Bemisia tabaci*

烟粉虱 <i>B. tabaci</i>	1 龄取食量 (粒/头) Consumption of 1st instar larva (egg/ind.)	2 龄取食量 (粒/头) Consumption of 2nd instar larva (egg/ind.)	3 龄取食量 (粒/头) Consumption of 3rd instar larva (egg/ind.)	4 龄取食量 (粒/头) Consumption of 4th instar larva (egg/ind.)	总取食量 (粒/头) Total prey consumption (egg/ind.)	$F; (df_1, df_2); P$
卵 Egg	20.29±0.97d	63.13±9.24cd	96.87±9.05c	290.21±21.50b	464.21±26.99a	141.79; (4,70); <0.001
1 龄 1st instar	18.53±1.64d	31.87±4.83cd	50.62±6.79c	99.92±7.67b	201.69±12.75a	101.42; (4,64); <0.001
2 龄 2nd instar	3.19±0.41d	6.94±0.68cd	11.94±1.26c	51.25±2.87b	73.31±2.91a	257.03; (4,75); <0.001
3 龄 3rd instar	1.00±0.00d	3.57±0.33cd	5.13±0.42c	36.50±1.66b	46.19±1.64a	400.39; (4,76); <0.001
4 龄 4th instar	1.00±0.00d	1.63±0.16d	3.90±0.35c	12.39±1.03b	19.00±1.04a	140.19; (4,88); <0.001
蛹 Pupae	1.00±0.00d	1.75±0.16d	3.81±0.44c	9.63±0.94b	16.19±1.90a	128.94; (4,77); <0.001

表中数据为平均数±标准误, 同一行数据后具有相同字母表示在 0.05 水平上差异不显著 (Duncan's 多重检验法)。Date are mean±SE, and followed by the same letters in the same row indicate no significant difference at 0.05 level by Duncan's multiple range test.

2.2 广重粉蛉成虫对烟粉虱的捕食量

广重粉蛉雌虫对烟粉虱的捕食量显著高于雄虫。广重粉蛉雌虫平均每天捕食烟粉虱卵为 238.83 粒, 雄虫为 100.03 粒 (表 2)。随着猎物龄期的增大, 广重粉蛉成虫日平均捕食量逐渐减少。

2.3 广重粉蛉幼虫对烟粉虱卵的功能反应测定

根据广重粉蛉幼虫对不同烟粉虱卵密度下单日捕食量可知, 广重粉蛉幼虫单日捕食烟粉虱卵量随猎物密度升高而增加, 当猎物密度增加到一定程度时, 单日捕食量缓慢增加逐渐趋于平缓。当烟粉虱卵的密度在 10-80 粒时, 广重粉蛉各龄期幼虫对烟粉虱卵的捕食表现为较快增长趋势, 当烟粉虱卵达到 80-160 粒时广重粉蛉对烟粉虱卵的取食表现增长平缓, 烟粉虱卵超过 160 粒时捕食量基本不增长, 表现平稳。因此广重粉蛉幼虫对烟粉虱卵的捕食功能反应属于 Holling II 型圆盘方程 (表 3)。通过参数比较可

以看出广重粉蛉幼虫对烟粉虱卵的寻找效率随着龄期的增长而随之提高, 但处置时间相反。理论最大捕食量同样随着广重粉蛉幼虫龄期的增大而增加, 1、2、3、4 龄的广重粉蛉的理论最大捕食量分别是 31.85、50.25、78.74、303.03 粒。

2.4 广重粉蛉成虫对烟粉虱的功能反应

根据广重粉蛉雌、雄成虫分别在烟粉虱卵、1 龄若虫、2 龄若虫、3 龄若虫、蛹不同密度下的单日捕食量可知, 广重粉蛉成虫单日捕食量随猎物密度的升高而增加, 当烟粉虱卵的密度在 0-600 粒时, 广重粉蛉雌雄成虫对猎物的捕食量随着烟粉虱卵密度的增加而增加, 表现为较快增长, 烟粉虱卵超过 600 粒时, 广重粉蛉对烟粉虱卵的捕食表现平稳。当烟粉虱若虫的密度在 0-150 头时, 广重粉蛉雌雄成虫的捕食量随着烟粉虱若虫的密度增加而增加, 表现为较快增长。当烟粉虱若虫密度超过 150 头时广重粉蛉雌雄成虫对烟粉虱若虫的捕食量表现平稳, 基本不增长。当广重粉蛉雌、雄成虫取食同一龄期烟粉虱

表 2 广重粉蛉雌雄虫对烟粉虱各虫态的日均捕食量
Table 2 Number of prey consumed per day of males and females of *Semidalis aleyrodiformis* on *Bemisia tabaci*

广重粉蛉 <i>S. aleyrodiformis</i>	雌虫 Female	雄虫 Males	<i>t</i> ; <i>d.f</i> ; <i>P</i>
卵 (粒) Egg	238.83±17.01a	100.30±3.47b	7.98; 9.75; 0.03
1 龄 (头) 1st instar (ind.)	99.10±9.17a	62.23±2.49b	3.88; 10.33; 0.01
2 龄 (头) 2nd instar (ind.)	42.50±2.56a	26.50±1.59a	5.31; 18; 0.20
3 龄 (头) 3rd instar (ind.)	23.70±1.39a	14.80±1.18a	4.88; 18; 0.34
4 龄 (头) 4th instar (ind.)	12.27±1.10a	7.50±0.76a	3.56; 18; 0.32
伪蛹 (头) Pupae (ind.)	11.87±0.90a	7.10±0.46a	4.71; 13.42; 0.09

表中数据为平均数±标准误, 同一列数据后具有相同字母者, 表示在 0.05 水平上差异不显著 (*t*-检验)。
Date are mean±SE, and followed by the same letters in the same column indicate no significant difference at 0.05 level by *t*-test.

表 3 广重粉蛉各龄期幼虫对烟粉虱卵的功能反应参数
Table 3 Functional response parameters of *Semidalis aleyrodiformis* larvae to *Bemisia tabaci* eggs

广重粉蛉 <i>S. aleyrodiformis</i>	寻找效率 (<i>a</i>) Searching	处置时间 (<i>T_h</i>) Handling time	<i>R</i> ²	捕食上限 Maximum predation	Holling II 圆盘方程 Holling equation
1 龄 1st instar	0.875	0.031 4	0.978 3	31.847	$N_a=0.875NT/(1+0.027\ 5N)$
2 龄 2nd instar	0.966	0.019 9	0.994 5	50.251	$N_a=0.966NT/(1+0.019\ 2N)$
3 龄 3rd instar	1.053	0.012 7	0.981 8	78.740	$N_a=1.053NT/(1+0.013\ 4N)$
4 龄 4th instar	1.070	0.003 3	0.879 2	303.030	$N_a=1.070NT/(1+0.003\ 5N)$

若虫时，雌虫的捕食率高于雄虫的捕食率。

广重粉蛉雌、雄成虫的寻找效率 (a) 以捕食烟粉虱卵为最大，捕食烟粉虱伪蛹最小，处置时间 (T_h) 以捕食烟粉虱伪蛹为最长，以捕食烟粉虱卵为最小。广重粉蛉成虫的寻找效率随着烟粉虱若虫龄期的增大而逐渐降低，取食烟粉虱卵时寻找效率最高，雄虫为 1.002、雌虫为 1.117；而取食伪蛹时寻找效率最低，雄虫为 0.598；雌虫为 0.970。处置时间随着烟粉虱若虫龄期的增大而变长，雌雄成虫在取食同一龄期烟粉虱若虫的处置时间，雌虫短于雄虫。广重粉蛉成虫取食烟粉虱卵，1 龄，2 龄，3 龄，4 龄若虫和伪蛹时的理论最大捕食量雌虫显著大于雄虫，数值分别是雄虫：188.68 粒，136.99 头，68.97 头，49.02 头，31.45 头和 30.40 头；雌虫：500 粒，294.12 头，76.92 头，56.50 头，48.54 头，

46.95 头（表 4，表 5）。

2.5 干扰反应的测定

在一定的空间内，根据不同密度广重粉蛉的雌雄成虫对烟粉虱卵的捕食率关系（图 1），表明随着广重粉蛉自身密度增大，其捕食率逐渐下降。由此可见，天敌昆虫密度的增加，增加了个体间相互干扰。在捕食者密度较低（在 1-5 头）时，捕食作用率下降较快，说明捕食者自身密度对捕食作用率影响较大；而在捕食者密度高于 6 头时，其对捕食作用率的影响效果逐渐减小。

用 Hassell 和 Verley（1969）提出的干扰反应模型 $E = QP^{-m}$ ，将其进行拟合得 $E=0.127\ 9 \times P^{-0.317\ 3}$ ，其相互干扰系数 $m=0.317\ 3$ ，说明捕食者之间有明显的干扰作用。

表 4 广重粉蛉雄虫对烟粉虱各虫态功能反应参数
Table 4 Functional response of *Semidalis aleyrodiformis* male on to *Bemisia tabaci*

烟粉虱 <i>B.tabaci</i>	寻找效率 (a) Searching rate	处置时间 (T_h) Handling time	R^2	捕食上限 $N_{a\ max}$ The maximum predation	Holling II 圆盘方程 Holling equation
卵 Egg	1.002	0.005 3	0.995 1	188.68	$N_a=1.002NT/(1+0.005\ 1N)$
1 龄 1st instar	0.981	0.007 3	0.995 3	136.99	$N_a=0.981NT/(1+0.007\ 2N)$
2 龄 2nd instar	0.810	0.014 5	0.996 8	68.97	$N_a=0.810NT/(1+0.011\ 7N)$
3 龄 3rd instar	0.679	0.020 4	0.977 8	49.02	$N_a=0.679NT/(1+0.013\ 9N)$
4 龄 4th instar	0.645	0.003 2	0.964 3	31.45	$N_a=0.645NT/(1+0.020\ 5N)$
伪蛹 Pupae	0.598	0.032 9	0.972 0	30.40	$N_a=0.598NT/(1+0.019\ 7N)$

表 5 广重粉蛉雌虫对烟粉虱各虫态功能反应参数
Table 5 Functional response of *Semidalis aleyrodiformis* female on to *Bemisia tabaci*

烟粉虱 <i>B.tabaci</i>	寻找效率 (a) Searching rate	处置时间 (T_h) Handling time	R^2	捕食上限 $N_{a\ max}$ The maximum predation	Holling II 圆盘方程 Holling equation
卵 Egg	1.117	0.002 0	0.957 4	500.00	$N_a=1.117NT/(1+0.002\ 2N)$
1 龄 1st instar	1.053	0.003 4	0.947 7	294.12	$N_a=1.053NT/(1+0.003\ 6N)$
2 龄 2nd instar	1.040	0.013 0	0.925 1	76.92	$N_a=1.040NT/(1+0.013\ 5N)$
3 龄 3rd instar	1.003	0.017 7	0.976 4	56.50	$N_a=1.003NT/(1+0.017\ 8N)$
4 龄 4th instar	0.985	0.020 6	0.980 3	48.45	$N_a=0.985NT/(1+0.020\ 3N)$
伪蛹 Pupae	0.970	0.021 3	0.982 9	46.95	$N_a=0.970NT/(1+0.020\ 6N)$

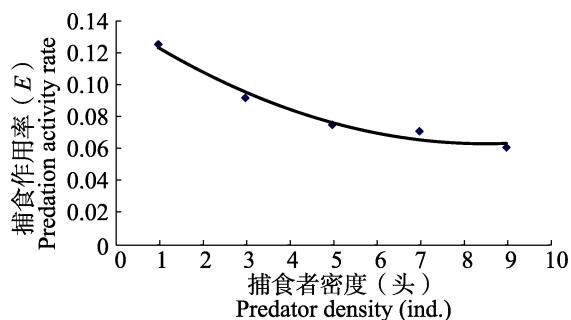


图 1 捕食者密度对捕食作用率的影响

Fig. 1 Effect of density of *Semidalis aleyrodiformis* on predation efficiency

3 讨论

本研究结果表明广重粉蛉不同龄期幼虫对同一龄期烟粉虱的取食量随着广重粉蛉龄期的增长而增大。而对于同一龄期广重粉蛉幼虫捕食不同龄期的烟粉虱,其捕食量随着烟粉虱龄期的增大而减小。广重粉蛉幼虫对烟粉虱的捕食规律与日本刀角瓢虫 *Seranium japonicum* Chapin 和越南斧瓢虫 *Axinoscymnus apioides* Kuznetsov & Ren 对烟粉虱不同龄期的捕食规律基本一致(周慧平等, 2015; 姚凤奎, 2018)。其中广重粉蛉 4 龄幼虫捕食烟粉虱卵高达 290 粒左右, 因此用广重粉蛉幼虫防治烟粉虱具有良好的生防应用前景。

广重粉蛉幼虫对烟粉虱卵和广重粉蛉成虫对烟粉虱各虫态的捕食功能反应都属于 Holling II 型。在 Holling II 型圆盘方程中广重粉蛉幼虫随着龄期的增大对烟粉虱卵的寻找效率逐渐增大, 而处置时间逐渐减少。这与马丽君等(2018)研究的日本刀角瓢虫和丽蚜小蜂 *Encarsia formosa* Gahan 对烟粉虱的捕食功能反应一致, 表明高龄期的捕食性天敌对猎物有更好的防治效果。而广重粉蛉成虫对烟粉虱卵的寻找效率最大, 处置时间最短, 说明广重粉蛉偏好捕食烟粉虱卵。另外广重粉蛉雌虫的理论最大捕食量远大于雄虫, 其可能的原因是广重粉蛉雌成虫为了繁衍下一代, 因此需要更多的营养。这也说明了广重粉蛉雌虫具有较好的防治效果, 在生物防治上极具开发价值。本实验的 Holling II 型圆盘方程, 可为田间释放广重粉蛉防治烟粉虱提供比

例参考。

本试验干扰作用研究证实, 广重粉蛉成虫对烟粉虱卵的捕食率随着捕食者密度的增加而下降, 该结果与刀角瓢虫等捕食性天敌的功能类似(周慧平等, 2015; 唐天成等, 2018)。因此, 在进行人工释放广重粉蛉防治烟粉虱时, 应在烟粉虱种群增长较快, 广重粉蛉成虫数量较小的环境条件下释放, 避免种群间产生干扰作用, 影响防治效果。

本研究在室内条件下证实了广重粉蛉对烟粉虱具有较强的捕食作用, 在生物防治具有很强的潜能。但在自然条件下, 防治效果会受到温度、湿度及其他烟粉虱天敌影响, 这些因素可能会导致广重粉蛉的利用率降低。因此, 明确广重粉蛉田间最佳的释放时间及释放比例, 将广重粉蛉与烟粉虱其他天敌, 包括虫生真菌、寄生蜂等进行联合防治, 有利于提高烟粉虱防治效果, 达到生物防治的最终目的。

参考文献 (References)

- Arnó J, Gabarra R, Liu TX, Simmons AM, Gerling D, 2010. Natural Enemies of *Bemisia tabaci*: Predators and Parasitoids//Stansly PA, Naranjo SE(eds.). *Bemisia*: Bionomics and Management of a Global Pest. New York: Springer. 385–421.
- Barbosa LD, Marubayashi JM, De Marchi BR, Yuki VA, Pavan MA, Moriones E, Navas-Castillo J, Krause-Sakate R, 2014. Indigenous American species of the *Bemisia tabaci* complex are still widespread in the Americas. *Pest Management Science*, 70(10): 1440–1445.
- Barnadas I, Gabarra R, Albajes R, 1998. Predatory capacity of two miridbugs preying on *Bemisia tabaci*. *Entomol. Exp. Appl.*, 86(2): 215–219.
- Brown JK, 2007. The *Bemisia tabaci* complex: Genetic and phenotypic variation and relevance to TYLCV–vector Interactions//Czosnek H (ed.). *Tomato Yellow Leaf Curl Virus Disease*. Dordrecht: Springer. 25–56.
- De Barro PJ, Liu SS, Boykin LM, Dinsdale AB, 2011. *Bemisia tabaci*: A statement of species status. *Annual Review of Entomology*, 56: 1–19.
- Gerling D, Alomar O and Arno J, 2001. Biological control of *Bemisia tabaci* using predators and parasitoids. *Crop Protection*, 20(9): 779–799.
- Holling CS, 1959. Some characteristics of simple type of predation

- and parasitism. *Can. Entomol.*, 91(7): 385–398.
- Hassell MP, Varley GC, 1969. New inductive population model for insect parasite and its bearing on biological control. *Nature*, 223(5211): 1113–1117.
- Liu YQ, Liu SS, 2012. Species status of *Bemisia tabaci* complex and their distributions in China. *Journal of Biosafety*, 21(4): 247–255. [刘银泉, 刘树生, 2012. 烟粉虱的分类地位及在中国的分布. 生物安全学报, 21(4): 247–255.]
- Li SJ, Xue X, Ahmed MZ, Ren SX, Du YZ, Wu JH, Cuthbertson AGS, Qiu BL, 2011. Host plants and natural enemies of *Bemisia tabaci* (Hemiptera: Aleyrodidae) in China. *Insect Science*, 18(1): 101–120.
- 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*. *Journal of Plant Protection*, 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.]
- Mound LA, Halsey SH, 1978. Whitefly of the World. A Systematic Catalogue of the Aleyrodidae (Homoptera) with Host Plant and Natural Enemy Data. London: John Wiley & Sons. 340.
- Nordlund DA, Legaspi JC, 1996. Whitefly Predators and Their Potential for Use in Biological Control//Gerling D(ed.). *Bemisia* 1995: Taxonomy, Biology, Damage, Control and Management. Intercept, Andover. UK. 499–513.
- Oliveira MRV, Henneberry TJ, Anderson P, 2001. History, current status, and collaborative research project for *Bemisia tabaci*. *Crop Protection*, 20(9): 709–723.
- Tang TC, Zhang Y, Li CJ, Cao XR, Chen ZZ, Xu YY, 2018. Predatory responses of *Chrysoperla sinica* (Tjeder) and *Chrysopa pallens* larvae to *Aleurocan spinifetus* (Quaintance) nymphs. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 55(2): 217–222. [唐天成, 张艳, 李程锦, 曹欣然, 陈珍珍, 许永玉, 2018. 中华通草蛉和大草蛉幼虫对黑刺粉虱若虫的捕食功能反应. 应用昆虫学报, 55(2): 217–222.]
- Watson TF, Silvertooth JC, Telle ZA, Lastra L, 1992. Seasonal dynamics of sweet potato whitefly in Arizona. *Southwestern Entomol.*, 17: 149–167.
- Wu XX, Hu DX, 2000. Identification of three sympatric whiteflies, the greenhouse whitefly (*Trialeurodes vaporariorum*), sweetpotato whitefly (*Bemisia tabaci*) and silverleaf whitefly (*Bemisia argentifolii*). *Beijing Agricultural Science*, 1(Suppl.): 36–41. [吴杏霞, 胡敦孝, 2000. 温室白粉虱、烟粉虱及银叶粉虱的识别. 北京农业科学, 1(增刊): 36–41.]
- Xu CX, Ren SX, Wang XM, 2008. Effects of *Bemisia tabaci* populations on the biological characteristics of *Semidalis aleyrodiformis* (Stephens) in different plants. Abstract of the 2nd National Conference on Biological Invasion. Beijing. 5. [徐彩霞, 任顺祥, 王兴民, 2008. 不同植物上烟粉虱种群对广重粉蛉生物学特性的影响. 第二届全国生物入侵学术研讨会论文摘要集. 北京. 5.]
- Zhou HP, Wang XM, Qiu BL, Wu JH, Ren SX, 2015. Predation of *Axinoscymnus apioides* Kuznetsov & Ren on *Bemisia tabaci* (Gennadius). *Chinese Journal of Applied Entomology*, 52(1): 96–103. [周慧平, 王兴民, 邱宝利, 吴建辉, 任顺祥, 2015. 越南斧瓢虫对烟粉虱的捕食作用. 应用昆虫学报, 52(1): 96–103.]
- Zhang ZL, Luo C, 2001. Occurrence and harm of *Bemisia tabaci* and its control strategy in China. *Plant Protection*, 27(2): 25–30. [张芝利, 罗晨, 2001. 我国烟粉虱的发生危害和防治对策. 植物保护, 27(2): 25–30.]
- Yao FL, Zheng Y, Ding XL, Lu XS, He YX, Weng QY, 2018. Controlling effect of *Serangium japonicum* population of *Bemisia tabaci*. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 33(5): 520–524. [姚凤銮, 郑宇, 丁雪玲, 卢学松, 何玉仙, 翁启永. 日本刀角瓢虫对烟粉虱种群的控制作用评价. 福建农业学报, 33(5): 520–524.]