

沙巴拟刀角瓢虫对烟粉虱的捕食功能反应*

赵冬梅^{1**} 阙心怡² 曾莉玲² 黄楚阳² 王兴民^{2***}

(1. 浙江大学山东(临沂)现代农业研究院, 临沂 276034; 2. 生物防治教育部工程研究中心, 广东省生物农药创制与应用重点实验室, 华南农业大学植物保护学院昆虫学系, 广州 510642)

摘要 【目的】烟粉虱 *Bemisia tabaci* 是危害多种农作物的重要害虫, 在其诸多捕食性天敌中, 对东南亚地区粉虱类害虫的优势捕食性天敌沙巴拟刀角瓢虫 *Pangia sababensis* 的研究鲜有报道, 其控害潜力尚未得到充分研究。本文在观察其捕食量的基础上对沙巴拟刀角瓢虫的功能反应、温度对功能反应的影响和沙巴拟刀角瓢虫个体间的干扰反应进行了研究, 以进一步评价沙巴拟刀角瓢虫对烟粉虱的捕食潜能。【方法】在室内条件下设置卵、1-4 龄期烟粉虱若虫及伪蛹供沙巴拟刀角瓢虫捕食, 统计沙巴拟瓢虫 1-4 龄若虫对烟粉虱卵及沙巴拟瓢虫雌成虫对烟粉虱各龄期的捕食量, 研究沙巴拟刀角瓢虫对烟粉虱的捕食功能反应、搜寻效应及自身密度干扰作用。【结果】沙巴拟刀角瓢虫成虫对烟粉虱卵、1-4 龄若虫及伪蛹的功能反应均属 Holling II 型, 沙巴拟刀角瓢虫成虫对各虫态烟粉虱的捕食量随着烟粉虱密度的增大而增加, 增加的程度随猎物密度增加而逐渐变缓; 对不同虫态烟粉虱的瞬时攻击率以卵最大, 4 龄若虫最小; 处理时间卵最短, 伪蛹最长; 温度 15-30 °C 范围内, 沙巴拟刀角瓢虫成虫对烟粉虱卵的瞬时攻击率随着温度的增加而增加。【结论】沙巴拟刀角瓢虫对烟粉虱表现出较高的捕食能力和控害潜力, 温度对沙巴拟刀角瓢虫的捕食效应影响显著, 但不能改变其功能反应类型。在猎物密度固定的情况下, 沙巴拟刀角瓢虫的捕食量随自身密度的增加而减少, 瞬时攻击率降低。研究结果为沙巴拟刀角瓢虫的产业化和烟粉虱的生物防治提供了理论基础和数据支撑。

关键词 沙巴拟刀角瓢虫; 烟粉虱; 捕食能力; 功能反应; 温度; 捕食量

Functional response of *Pangia sababensis* to *Bemisia tabaci*

ZHAO Dong-Mei^{1**} QUE Xin-Yi² ZENG Li-Ling² HUANG Chu-Yang² WANG Xing-Min^{2***}

(1. Shandong (Linyi) of Modern Agriculture, Zhejiang University, Linyi 276034, China; 2. Key Laboratory of Bio-Pesticide Innovation and Application of Guangdong Province, Engineering Research Center of Biological Control of Agricultural Pests of Guangdong Province, Department of Entomology, College of Plant Protection, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

Abstract [Aim] To assess the potential of using *Pangia sababensis* as a biological control for *Bemisia tabaci*. [Methods] The number of eggs, 1st-4th instar nymphs and adults of *B. tabaci* consumed by adult *P. sababensis* were recorded under laboratory conditions. The functional response, search efficiency, and density-dependent interference, were also calculated. [Results] The functional response of adult *P. sababensis* to *B. tabaci* eggs, 1st-4th instar nymphs and pseudopupae, conformed to the Holling II type. This suggests that adult *P. sababensis* are effective predators of *B. tabaci*. Our results indicate that *P. sababensis* has a high predatory capacity for different developmental stages of *B. tabaci*, and that predation rates increase with prey density. However, the increase in predation rate declined at higher prey densities. Adult *P. sababensis* were most efficient searching for eggs and least efficient searching for 4th instar nymphs. Processing time was the shortest for eggs and longest for pupae. Furthermore, search efficiency increased with temperature within the range of 15-30 °C. [Conclusion] *P. sababensis* is an efficient predator of *B. tabaci* and has the potential to be an effective biological

*资助项目 Supported projects: 广州市科技计划项目 (202206010113); 岭南现代农业实验室科研项目 (NZ2021023); 云南省烟草公司科技计划项目 (2023530000241004); 中国烟草总公司重大科技项目[110202101053 (LS-13)]

**第一作者 First author, E-mail: zhaodongmei2024@163.com

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

收稿日期 Received: 2024-05-14; 接受日期 Accepted: 2024-12-30

control for this pest. Temperature, however, has a significant effect on its predatory efficiency. In addition, at a given prey density, the predation rate and search efficiency of *P. sababensis* declined with increasing conspecific density. These results provide a scientific basis for utilizing *P. sababensis* as a biological control for *B. tabaci*.

Key words *Pangia sababensis*; *Bemisia tabaci*; predatory ability; functional response; temperature; predation quantity

烟粉虱 *Bemisia tabaci* 属半翅目 Hemiptera 粉虱科 Leyrodidae 小粉虱属 *Aleyrodes*, 该虫种具有多个俗称, 包括甘薯粉虱、棉粉虱、小白蛾等, 是热带、亚热带地区的重要害虫之一 (Gennadius, 1889; Mound and Halsey, 1978)。近年来, 随着全球贸易及气候变暖, 烟粉虱的分布范围也持续扩大, 在中国、印度等世界多个国家广泛分布, 已成为一种全球性的农业灾害性害虫 (张芝利和罗晨, 2001)。目前烟粉虱对我国烟草、蔬菜等经济作物栽培的危害尤其突出, 已成为制约相关产业的重要因素 (闫文茜等, 2012)。

近年来, 化学防治在烟粉虱防控中面临着严峻挑战。长期依赖化学杀虫剂不仅导致烟粉虱种群产生显著抗药性 (褚栋和张友军, 2018), 更对田间天敌群落造成毁灭性打击, 严重破坏了生态平衡。这种防治方式不仅效果日益降低, 更引发了一系列环境与食品安全问题, 包括农药残留超标和生态系统受损。

在此背景下, 随着绿色农业发展战略的推进, 蔬菜害虫防控策略正经历重要转型。现代农业害虫综合治理 (IPM) 体系强调减少化学农药依赖, 转而采用环境友好型防控措施 (褚栋和张友军, 2018)。其中, 生物防治技术因其可持续性和生态安全性而备受关注。因此, 利用天敌昆虫和虫生真菌等进行生物防治是控制烟粉虱发生与危害的重要技术措施。

烟粉虱的捕食性天敌种类繁多, 全球范围内已记录的捕食性天敌包括 9 个目、34 个科共计 191 个物种 (Gerling *et al.*, 2001; Arnó *et al.*, 2009; Li *et al.*, 2011)。沙巴拟刀角瓢虫 *Pangia sababensis* 作为东南亚地区粉虱类害虫的重要天敌 (苗静等, 2010a, 2010b), 属于瓢虫科 Coccinellidae 拟小刀角瓢虫属 *Pangia* 刀角瓢族 Serangini, 目前, 利用沙巴拟刀角瓢虫控制烟粉

虱的研究尚不多见, 为进一步评价沙巴拟刀角瓢虫对烟粉虱的捕食潜能, 本文在观察其捕食量的基础上对沙巴拟刀角瓢虫的功能反应和温度对功能反应的影响进行了研究。

1 材料与方法

1.1 供试材料

1.1.1 寄主植物 扶桑 *Hibiscus rosa-sinensis*, 为本实验室继代种植的扦插苗。

1.1.2 供试虫源 烟粉虱采集于本实验室保存在网室内扶桑和变叶木上的种群。沙巴拟刀角瓢虫采自云南西双版纳景洪市, 饲养在带有烟粉虱的变叶木上。

1.1.3 试验条件 试验在养虫室内进行, 室内温度 (26 ± 1) °C, 相对湿度 70%-80%, 光照时间 14 L : 10D。

1.2 试验方法

1.2.1 沙巴拟刀角瓢虫对烟粉虱的捕食量测定

沙巴拟刀角瓢虫成虫对不同虫态烟粉虱的捕食量: 实验采用健康盆栽健康扶桑苗为寄主植物, 每盆接种 100 对烟粉虱成虫, 经 24 h 产卵后移除成虫, 饲养不同虫态的烟粉虱, 待烟粉虱发育至目标虫态 (卵、各龄若虫及伪蛹) 时, 采集带虫叶片, 在解剖镜下计数后在培养皿中饲喂单头瓢虫, 培养皿中垫一层滤纸, 加几滴水保湿, 24 和 48 h 后分别更换猎物并记录瓢虫的捕食量, 每个处理设 10 个重复。

沙巴拟刀角瓢虫幼虫对烟粉虱卵的捕食量: 剪取扶桑叶上新产的烟粉虱卵在解剖镜下计数后, 在培养皿中分别饲喂刚孵化的单头瓢虫 1 龄幼虫, 每天定时更换食料, 每天 2 次观察记录瓢虫的蜕皮情况和捕食量, 直至化蛹。设 10 个重复。

1.2.2 沙巴拟刀角瓢虫对烟粉虱的功能反应

1.2.2.1 沙巴拟刀角瓢虫成虫对不同虫态烟粉虱的功能反应 同一发育时期的瓢虫成虫在试验前饥饿 24 h, 然后在培养皿中分别放入 1 头瓢虫成虫和不同虫态的烟粉虱, 不同虫态的烟粉虱密度设置如下: 卵、1 龄和 2 龄若虫每片叶 50、100、200、400 和 800 粒 (头), 3 龄、4 龄若虫和伪蛹每片叶 5、10、20、40 和 80 头, 24 h 后观察记录瓢虫的捕食量。每个密度处理设 5 个重复。

1.2.2.2 温度对沙巴拟刀角瓢虫功能反应的影响 瓢虫成虫在试验前饥饿 24 h, 然后在培养皿中分别放入 1 头瓢虫成虫和烟粉虱卵, 卵的密度为 50、100、200、400 和 800 粒, 温度设置为 15、20、25、30 和 35 °C, 试验在生产于宁波普仪实验仪器有限公司的人工气候箱 (PYX-300Q-B) 中进行, 温度误差为 ±1 °C, 相对湿度为 75%, 光照时间 14 L : 10 D。24 h 后观察记录瓢虫的捕食量。每个密度处理设 5 个重复。

1.2.2.3 沙巴拟刀角瓢虫个体间的干扰反应 在实验前, 将沙巴拟刀角瓢虫成虫饥饿处理 24 h, 随后将其接入培养皿中, 设置不同密度的瓢虫成虫 1、3、5、7、9 头与烟粉虱卵 (每叶 800 粒) 进行试验, 24 h 后观察、记录和统计瓢虫的捕食量。每个密度设 5 个重复。

1.3 数据分析

功能反应分析: 采用 Holling II 型的数学模型: $N_a = aNT / (1 + aT_h N)$ 。其中, N_a 为被捕食的猎物数; a 为捕食者对猎物的瞬时攻击率 (或瞬间攻击率); N 为猎物初始密度; T 为捕食者发现和处理猎物的总时间; T_h 为处置时间。

干扰反应分析方法: 模拟 Hassell-Varley 模

型 (Hassell, 1969), 求解寻找系数 (Q) 和相互干扰系数 (m)。其模型为: $E = QP^{-m}$ 。其中,

$E = \frac{N_a}{PN}$ 为捕食作用率; N_a 为被攻击的害虫数; N 为猎物总数; P 为捕食者密度; Q 为寻找系数; m 为相互干扰系数。数据分析在 SAS 9.4 系统上进行。

差异显著分析方法: 采用邓肯氏多重范围检验方法, 比较不同处理组均值之间的差异。其模型为:

临界差异 (LSR) = $SSR_{\alpha, p, df} \times \sqrt{\frac{MSE}{n}}$, 其中,

LSR 为判断两组差异显著的最小临界值; SSR 为基于显著性水平 (α)、组数 (p) 和误差自由度 (df) 查表得到的临界值; MSE 为方差分析中的误差均方; n 为每组样本量。数据分析在 SAS 9.4 系统上进行。

2 结果与分析

2.1 沙巴拟刀角瓢虫对烟粉虱的捕食量

结果显示, 沙巴拟刀角瓢虫成虫对烟粉虱各虫态的捕食效率存在显著差异, 具体表现为对卵和低龄若虫 (1-2 龄) 的捕食偏好显著高于高龄若虫 (3-4 龄) 和伪蛹阶段 ($P < 0.05$) (表 1)。沙巴拟刀角瓢虫幼虫期的捕食能力同样突出, 不同龄期幼虫对卵的捕食量具有显著差异 ($P < 0.05$), 4 龄幼虫到达捕食高峰, 1 龄幼虫最低 (表 2)。

2.2 沙巴拟刀角瓢虫对烟粉虱的功能反应

2.2.1 沙巴拟刀角瓢虫成虫对不同虫态烟粉虱的功能反应 实验结果表明, 在不同发育阶段烟粉虱密度条件下, 沙巴拟刀角瓢虫成虫对烟粉虱

表 1 沙巴拟刀角瓢虫成虫对各虫态烟粉虱的捕食量

Table 1 Predation amount of adult *Pangia sababensis* on different developmental stages of *Bemisia tabaci*

	卵 Eggs	1 龄若虫 1st instar nymphs	2 龄若虫 2nd instar nymphs	3 龄若虫 3rd instar nymphs	4 龄若虫 4th instar nymphs	伪蛹 Pseudopupae
捕食量 (头/d) Predation amount (ind./d)	201.04±12.16 a	147.75±9.88 b	51.25±4.13 c	20.75±2.16 d	14.45±1.54 d	9.85±0.56 d

表中数据为平均值±标准误, 数据后不同字母表示显著差异 ($P < 0.05$, 邓肯氏多重检验)。表 2 同。

Data in the table are mean±SE, and followed by the different letters indicate significant difference ($P < 0.05$, Duncan's multiple range test). The same below.

表 2 沙巴拟刀角瓢虫各龄幼虫对烟粉虱卵的捕食量

Table 2 Predation amount of different instar stages larvae of *Pangia sababensis* on *Bemisia tabaci* eggs

	1 龄幼虫 1st instar larvae	2 龄幼虫 2nd instar larvae	3 龄幼虫 3rd instar larvae	4 龄幼虫 4th instar larvae	1 个世代 One generation
捕食量 (粒) Predation amount (grains)	45.40±3.87 d	114.20±4.03 d	304.80±18.85 c	820.20 ±48.95 b	1 284.60±38.07 a

卵、各龄若虫(1-4 龄)及伪蛹的捕食行为均符合 Holling II 型功能反应特征, 其数据可采用 Holling 圆盘方程进行拟合分析, 其模型为: 卵: $N_a=1.078\ 2NT/(1+0.001\ 9N)$; 1 龄若虫: $N_a=0.906\ 3NT/(1+0.003\ 6N)$; 2 龄若虫: $N_a=1.012\ 0NT/(1+0.013\ 8N)$; 3 龄若虫: $N_a=0.804\ 0NT/(1+0.023\ 9N)$; 4 龄若虫: $N_a=0.745\ 3NT/(1+0.031\ 7N)$; 伪蛹: $N_a=0.927\ 4NT/(1+0.047\ 1N)$ 。

沙巴拟刀角瓢虫成虫对烟粉虱各虫态的捕食作用参数如表 3。拟合的功能反应方程的相关系数均大于 0.98, F 检验的 F 值均大于 $F_{0.01}$, 说明模型均能很好地描述在不同的猎物密度下, 沙巴拟刀角瓢虫成虫对烟粉虱各虫态的捕食作用。沙巴拟刀角瓢虫成虫对不同虫态烟粉虱的瞬时攻击率以卵最大, 4 龄若虫最小; 处理时间以卵最短, 伪蛹最长。

表 3 沙巴拟刀角瓢虫成虫对各虫态烟粉虱功能反应参数

Table 3 Functional response parameters of adult *Pangia sababensis* to different developmental stages of *Bemisia tabaci*

烟粉虱 <i>Bemisia tabaci</i>	瞬时攻击率 a Attack rate	处置时间 T_h Handling time	R^2	理论最大捕食量 (头) Predation capacity threshold (ind.)
卵 Eggs	1.078 2	0.001 8	0.990 3	556
1 龄若虫 1st instar nymphs	0.906 3	0.004 0	0.985 2	250
2 龄若虫 2nd instar nymphs	1.012 0	0.013 6	0.991 2	74
3 龄若虫 3rd instar nymphs	0.804 0	0.029 7	0.999 7	34
4 龄若虫 4th instar nymphs	0.745 3	0.042 5	0.999 4	24
伪蛹 Pseudopupae	0.927 4	0.050 8	0.969 4	20

随着烟粉虱种群密度的升高, 沙巴拟刀角瓢虫成虫对各发育阶段烟粉虱的捕食量均呈现上升趋势, 但其增长速率随猎物密度增加而逐渐降低。(图 1, 图 2)。

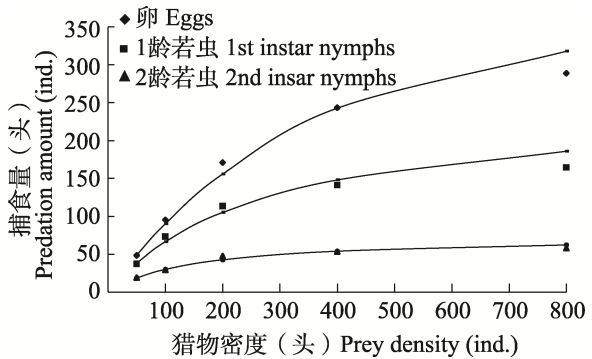


图 1 沙巴拟刀角瓢虫成虫对烟粉虱卵、1 龄和 2 龄若虫的功能反应

Fig. 1 Functional responses of adult *Pangia sababensis* to the eggs, 1st and 2nd instar nymphs of *Bemisia tabaci*

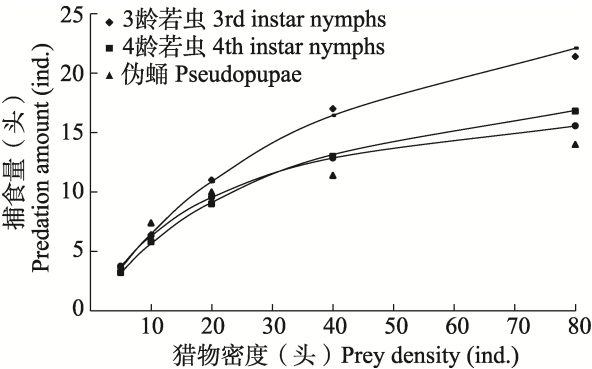


图 2 沙巴拟刀角瓢虫成虫对烟粉虱 3 龄、4 龄若虫和伪蛹的功能反应

Fig. 2 Functional responses of adult *Pangia sababensis* to the 3rd and 4th instar nymphs and pseudopupae of *Bemisia tabaci*

2.2.2 温度对沙巴拟刀角瓢虫功能反应的影响

在不同温度下沙巴拟刀角瓢虫对烟粉虱卵的捕食模型分别为: 15 ℃: $N_a=0.587\ 8NT/(1+0.005\ 2N)$; 20 ℃: $N_a=0.634\ 7NT/(1+0.001\ 5N)$;

25 °C: $N_a=0.937\ 7NT/(1+0.001\ 4N)$; 30 °C: $N_a=1.046\ 4NT/(1+0.000\ 8N)$; 35 °C: $N_a=1.045\ 2NT/(1+0.000\ 7N)$ 。

由模型估算出不同温度下沙巴拟刀角瓢虫对卵的功能反应参数见表 4, 不同温度对瞬时攻击率 (a) 和处置时间 (T_h) 的影响见图 3 和图 4。温度显著影响沙巴拟刀角瓢虫的捕食效应, 在 15-30 °C 温度区间内, 瞬时攻击率随着温度的上升而增加, 但超过 30 °C 时则呈下降趋势; 同时, 处置时间在 30 °C 以下随着温度的升高而减短, 超过该阈值后则出现延长现象。瞬时攻击率 (a) 和处置时间 (T_h) 与温度 (T) 之间呈二次函数关系, 其关系式为: $a=-0.000\ 8T^2+0.068\ 6T-0.290\ 1$ ($R^2=0.912\ 4$); $T_h=0.000\ 04T^2-0.002\ 2T+0.033\ 0$ ($R^2=0.939\ 2$)

表 4 不同温度下沙巴拟刀角瓢虫对烟粉虱卵的功能反应参数

Table 4 Functional response parameters of *Pangia sababensis* to *Bemisia tabaci* eggs at different temperatures

温度 (°C) Temperature (°C)	瞬时攻击效率 a Attack rate	处置时间 T_h Handling time	R^2	理论最大捕食量 (头) Predation capacity threshold (ind.)
15	0.587 8	0.008 8	0.999 1	114
20	0.634 7	0.002 4	0.988 2	417
25	0.937 7	0.001 5	0.995 3	667
30	1.046 4	0.000 8	0.997 6	1 250
35	1.045 2	0.000 8	0.997 6	1 252

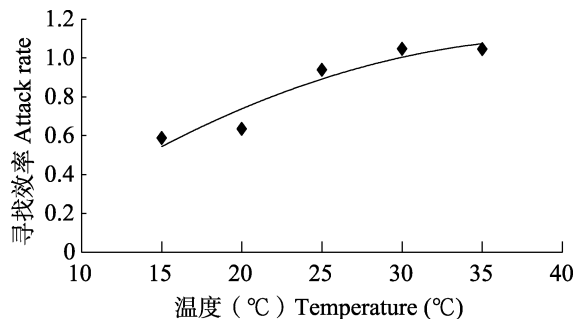


图 3 温度对沙巴拟刀角瓢虫瞬时攻击率的影响
Fig. 3 Effects of temperature on the attack rate of *Pangia sababensis*

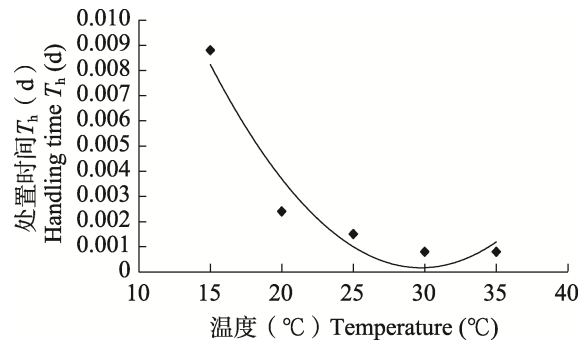


图 4 温度对沙巴拟刀角瓢虫处置时间的影响
Fig. 4 Effects of temperature on the handling time of *Pangia sababensis*

用 Holling 模型模拟在不同温度条件下沙巴拟刀角瓢虫成虫对烟粉虱卵的功能反应 (图 5)。

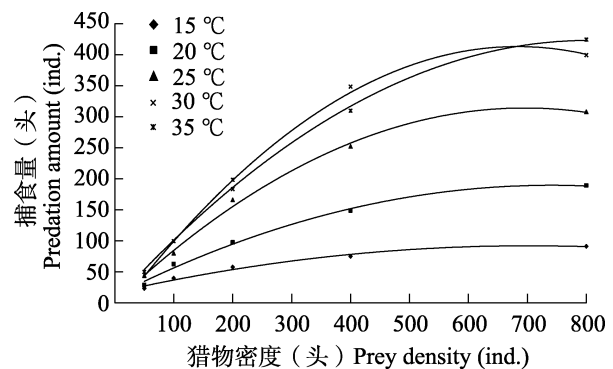


图 5 温度对沙巴拟刀角瓢虫功能反应的影响
Fig. 5 Effects of temperature on the functional response of *Pangia sababensis*

2.2.3 沙巴拟刀角瓢虫个体间的干扰反应 在实验培养皿内, 沙巴拟刀角瓢虫成虫密度与捕食效率呈负相关关系, 随着沙巴拟刀角瓢虫密度的增加, 个体间的相互干扰增强, 使得单个捕食者寻找猎物的机会降低, 从而影响了捕食者的瞬时攻击率, 致使捕食作用率降低。用 Hassell-Varley 模型 $E=QP^{-m}$ 模拟培养皿内沙巴拟刀角瓢虫成虫间捕食烟粉虱卵的干扰作用, 其模型为: $E=0.419\ 0P^{-0.533\ 6}$, 模型的相关系数为 0.888 6, 表明该模型能够有效反映沙巴拟刀角瓢虫种群密度对其捕食作用的影响规律 (图 6)。当猎物密度恒定时, 随着沙巴拟刀角瓢虫自身的密度上升, 其单位个体的捕食效能下降, 主要表现为瞬时攻击率降低和总捕食量减少。

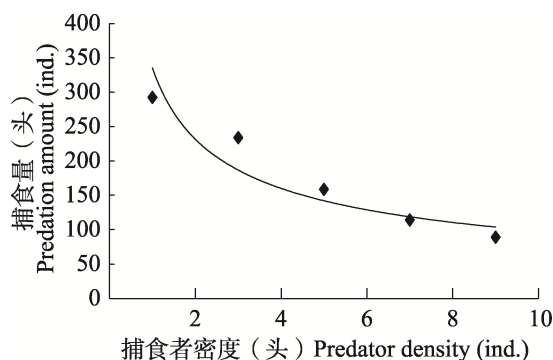


图 6 沙巴拟刀角瓢虫自身密度对捕食作用的影响

Fig. 6 Influence of density on predation of *Pangia sababensis*

3 讨论

在影响天敌捕食作用的诸多因素中,除天敌本身的特性外,害虫密度是最重要的因素之一,天敌对害虫密度变化在捕食量方面作出的反应称为功能反应 (Solomon, 1949),这一指标可有效评估捕食者的控害潜能 (任顺祥等, 2001)。功能反应综合反映了捕食者的觅食情况 (包括寻找能力和处置效率)、最大捕食潜力,以及捕食者在捕食猎物过程中双方的行为动态和密度因素等关键特征。沙巴拟刀角瓢虫成虫对烟粉虱卵、1-4 龄若虫及伪蛹的功能反应均属 Holling II 型,即沙巴拟刀角瓢虫成虫对烟粉虱各虫态的捕食量随猎物密度的增大而增加,增加的程度随猎物密度增加而逐渐变缓。沙巴拟刀角瓢虫成虫对不同烟粉虱虫态的瞬时攻击率以卵最大,4 龄若虫最小;处理时间以卵最短,伪蛹最长。利用沙巴拟刀角瓢虫进行防治在烟粉虱卵期开展效果最佳,需根据危害实际情况释放合适数量,以维持天敌与害虫种群间的动态平衡。

温度不仅可以影响昆虫的生长发育、存活和繁殖,而且可以影响昆虫的行为活动等。在一定温度范围内,瓢虫的活动随温度的上升而增强,对猎物的搜索捕食能力随之增大。黄振等 (2006) 通过对沙巴拟刀角瓢虫在不同温度下的功能反应测定表明,温度对沙巴拟刀角瓢虫的捕食效应影响显著,但不能改变其功能反应类型,这与二斑唇瓢虫 *Chilocorus bipustulatus* (任顺祥等,

2001)、异色瓢虫 *Harmonia axyridis* (林克剑等, 2006) 等的测定结果一致。在沙巴拟刀角瓢虫对烟粉虱的取食中,温度调控沙巴拟刀角瓢虫的捕食效率参数。分析表明,瞬时攻击率与处置时间均呈现温度依赖的二次函数关系 (15-30 °C)。具体表现为:在 15-30 °C 范围内,瞬时攻击率与温度呈正相关,而超过 30 °C 后随着温度升高瞬时攻击率逐步下降;处置时间则呈现相反的变化趋势。温度具有双刃剑效应,不同地区的气候条件差异可能使瓢虫的捕食效应在不同地域和季节表现出不同的效果,在利用沙巴拟刀角瓢虫防治害虫时必须注意释放地区气候。

沙巴拟刀角瓢虫的捕食作用率随瓢虫数量的增加呈幂函数曲线下下降。用 Hassell-Varley 模型 (Hassell, 1969) 模拟沙巴拟刀角瓢虫成虫间的干扰作用,其模型为: $E = 0.419 0P^{-0.533 6}$,结果表明在猎物密度固定的情况下,沙巴拟刀角瓢虫自身密度增加,个体之间可能发生猎物竞争、空间竞争等干扰行为,捕食量随之减少,瞬时攻击率降低。这一结果与另一引进瓢虫小黑瓢虫 *Delphastus catalinae* 的研究结果一致 (王联德等, 2001; 黄建等, 2002)。在瓢虫的人工繁殖饲养和生物防治中必须加以注意。

本研究系统解析了沙巴拟刀角瓢虫对烟粉虱的控害潜能及其环境调控机制,根据所得数据表明其防控策略应优先针对烟粉虱产卵期,而温度通过双刃剑效应调控捕食效能,在利用沙巴拟刀角瓢虫进行田间烟粉虱防治时,需合理调控规模化释放的温度和释放位点规模,优化其空间配置,为田间实际防控提供科学依据。未来可聚焦分子机制层面,解析温度敏感基因对捕食行为的调控通路;同时在田间应用层面,开发基于温度-密度耦合模型的动态释放策略,评估该沙巴拟刀角瓢虫与本土瓢虫的竞争排斥风险。本研究为热带地区烟粉虱的绿色防控提供了理论依据和技术参数,但实际应用仍需结合区域性气候特征及作物系统进行适应性优化。

参考文献 (References)

Arnó J, Gabarra R, Liu TX, Simmons AM, Gerling D, 2009. Natural

- enemies of *Bemisia tabaci*: Predators and parasitoids// Naranjo SE (ed.). *Bemisia: Bionomics and Management of a Global Pest*. New York: Springer. 385–421.
- Chu D, Zhang YJ, 2018. Research progress on the damages and management of *Bemisia tabaci* (Gennadius) in China over the past 10 years. *Plant Protection*, 44(5): 51–55. [褚栋, 张友军, 2018. 近 10 年我国烟粉虱发生为害及防治研究进展. 植物保护, 44(5): 51–55.]
- Gennadius P, 1889. Disease of tobacco plantations in Trikonis: The aleurodid of tobacco. *Ellenike Georgia*, 5: 1–3.
- Gerling D, Alomar O, Arnò J, 2001. Biological control of *Bemisia tabaci* using predators and parasitoids. *Crop Protection*, 20(9): 779–799.
- Hassell MP, 1969. A population model for the interaction between *Cyzenis albicans* (Fall.) (Tachinidae) and *Operophtera brumata* (L.) (Geometridae) at Wytham, Berkshire. *Journal of Animal Ecology*, 38: 567–576.
- Huang J, Fu JW, Liu BY, 2002. Predation of *Delphastus catalinae* (Horn) (Coleoptera: Coccinellidae) to *Aleurotuberculatus takahashi* (Homoptera: Aleyrodidae). *Entomological Journal of East China*, 11(1): 59–62. [黄建, 傅建伟, 刘冰妍, 2002. 小黑瓢虫对高氏瘤粉虱捕食作用的研究. 华东昆虫学报, 11(1): 59–62.]
- Huang Z, Ren SX, Yao SL, 2006. Predation of *Axinoscymnus cardilobus* to *Bemisia tabaci*. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 17(10): 1928–1932. [黄振, 任顺祥, 姚松林, 2006. 淡色斧瓢虫对烟粉虱的捕食作用. 应用生态学报, 17(10): 1928–1932.]
- 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* (Homoptera: Aleyrodidae) in China. *Insect Science*, 18(1): 101–120.
- Lin KJ, Wu KM, Liu SB, Zhang YJ, Guo YY, 2006. The functional response of *Chrysoperla sinica*, *Propylaea japonica*, and *Harmonia axyridis* to *Bemisia tabaci* (B biotype). *Chinese Journal of Applied Entomology*, 43(3): 339–343. [林克剑, 吴孔明, 刘山蓓, 张永军, 郭予元, 2006. 中华草蛉、龟纹瓢虫和异色瓢虫对 B 型烟粉虱的捕食功能反应. 应用昆虫学报, 43(3): 339–343.]
- Miao J, Qiu BL, Ren SX, 2010a. Effects of the pest-natural enemy ratio on the predatory behavior of *Pangia sababensis* and *Axinoscymnus apioides* (Coleoptera: Coccinellidae), two predators of *Bemisia tabaci* (Homoptera: Aleyrodidae). *Journal of Environmental Entomology*, 32(2): 230–234. [苗静, 邱宝利, 任顺祥, 2010a. 益害比对沙巴拟刀角瓢虫与越南斧瓢虫捕食烟粉虱行为的影响. 环境昆虫学报, 32(2): 230–234.]
- Miao J, Li SJ, Qiu BL, Ren SX, 2010b. The predatory behaviors of *Pangia sababensis* and *Axinoscymnus apioides*. *Chinese Bulletin of Entomology*, 47(4): 700–704. [苗静, 李绍建, 邱宝利, 任顺祥, 2010b. 烟粉虱天敌沙巴拟刀角瓢虫与越南斧瓢虫的捕食行为比较. 昆虫知识, 47(4): 700–704.]
- Mound LA, Halsey SH, 1978. Whitefly of the World. London: British Museum and John Wiley & Sons. 34–38.
- Ren SX, Guo ZZ, Xiong JW, He YF, 2001. Predation of *Chilocorus bijugus* (Col.: Coccinellidae) to *Unaspis yanonensis* (Hom.: Diaspididae). *Acta Ecologica Sinica*, 21(10): 1602–1606. [任顺祥, 郭振中, 熊继文, 何永福, 2001. 二斑唇瓢虫对矢尖蚧的捕食作用. 生态学报, 21(10): 1602–1606.]
- Solomon ME, 1949. The natural control of animal populations. *Journal of Animal Ecology*, 18(1): 1–35.
- Wang LD, Liu BY, Huang J, Gu DX, Zhang GR, 2001. Selectivity and intra-species disturbance in the prey performance of *Delphastus catalinae* (Horn), a predator of sweetpotato whitefly, *Bemisia tabaci*. *Natural Enemies of Insects*, 23(2): 93–94. [王联德, 刘冰妍, 黄建, 古德祥, 张古忍, 2001. 小黑瓢虫对甘薯粉虱的捕食选择性和种内干扰反应. 昆虫天敌, 23(2): 93–94.]
- Yan WQ, Wang XJ, Zhang YJ, Wang SL, 2012. Population dynamics of the vegetable whitefly, *Bemisia tabaci*, and its resistance to neonicotinoid insecticides in Beijing area. *Plant Protection*, 38(5): 154–157, 169. [闫文茜, 王相晶, 张友军, 王少丽, 2012. 北京地区蔬菜烟粉虱种群动态及其对烟碱类杀虫剂的抗药性监测. 植物保护, 38(5): 154–157, 169.]
- Zhang ZL, Luo C, 2001. Occurrence and control countermeasures of *Bemisia tabaci* (Gennadius) 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.]