



张晓滢, 彭之琦, 陆永跃, 洗继东. 不同温度条件下叉角厉蝽对草地贪夜蛾幼虫的捕食作用 [J]. 环境昆虫学报, 2022, 44 (2): 273–280.

不同温度条件下叉角厉蝽对草地贪夜蛾幼虫的捕食作用

张晓滢, 彭之琦, 陆永跃, 洗继东*

(华南农业大学植物保护学院, 广州 510642)

摘要: 为探明叉角厉蝽 *Eocanthecona furcellata* (Wolff) 对草地贪夜蛾 *Spodoptera frugiperda* (Smith) 的控害潜能, 本文研究了不同温度 (17℃、22℃、27℃、32℃、37℃) 条件下叉角厉蝽 3~4 龄若虫对草地贪夜蛾 2~3 龄幼虫的捕食作用, 评估了其在不同温度下的生物防治效果。结果表明, 在试验温度范围内叉角厉蝽 3~4 龄若虫对草地贪夜蛾 2~3 龄幼虫的捕食功能反应模型符合 Holling II 型方程, 捕食效能 a/Th 和日均捕食量均在 32℃ 时最大。在同一温度下, 叉角厉蝽 3~4 龄若虫的寻找效应与草地贪夜蛾幼虫密度呈负相关, 但猎物密度相同时叉角厉蝽 3~4 龄若虫的寻找效应与温度呈正相关。在 17℃~37℃ 范围内, Hassell-Varley 干扰反应模型能较好地反映出不同叉角厉蝽密度条件下对草地贪夜蛾的捕食情况; 在相同的猎物密度条件下叉角厉蝽 3~4 龄若虫个体间存在种内竞争和自我干扰作用, 随着自身密度增大, 相互干扰作用增强, 搜寻系数 Q 和相互干扰系数 m 随着温度升高而增大, 在 37℃ 时最大, 分别为 0.4719 和 0.788。本试验证实了叉角厉蝽若虫在温度为 32℃、猎物密度为 60 (头/皿) 条件下对草地贪夜蛾的日捕食量最大, 但随着温度升高, 若虫的捕食量趋于饱和或出现下降趋势, 在 37℃ 温度条件下种内竞争和自我干扰作用最强。

关键词: 叉角厉蝽; 草地贪夜蛾; 温度; 捕食功能反应; 干扰效应

中图分类号: Q968.1; S433; S476

文献标识码: A

文章编号: 1674-0858 (2022) 02-0273-08

Functional response of *Eocanthecona furcellata* (Wolff) on *Spodoptera frugiperda* (Smith) larvae at different temperatures

ZHANG Xiao-Ying, PENG Zhi-Qi, LU Yong-Yue, XIAN Ji-Dong* (College of Plant Protection, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

Abstract: In order to explore the control potential of *Eocanthecona furcellata* (Wolff) on *Spodoptera frugiperda* (Smith) larvae, this paper studied the predation effect of 3rd~4th instar nymphs of the *E. furcellata* on the 2nd~3rd instar larvae of *S. frugiperda* under different temperatures (17℃, 22℃, 27℃, 32℃, 37℃) to evaluate its biological control effect. The results showed that the functional responses of *E. furcellata* 3rd~4th nymph to *S. frugiperda* 2nd~3rd larvae fitted well with the Holling-II equation at the range of the tested temperatures, and the predator capacity (a/Th) and daily average predation were both peaked at 32℃. At the same temperature, the searching efficacy of *E. furcellata* 3rd~4th nymph was negatively correlated with the density of *S. frugiperda* 2nd~3rd larvae; but when the prey density was the same, the searching efficacy of *E. furcellata* 3rd~4th nymph was positively correlated with the

基金项目: 广东省重点领域研发计划项目 (2020B020223004); 广东省外来入侵物种风险评估和监测预警创新团队项目 (2022KJ134)

作者简介: 张晓滢, 1997 年生, 硕士研究生, 主要从事害虫生物防治研究, E-mail: 821833853@qq.com

* 通讯作者 Author for correspondence: 洗继东, 博士, 副教授, 主要研究方向为害虫控制、昆虫生态学与生物防治, E-mail: jdxian@scau.edu.cn

收稿日期 Received: 2022-02-20; 接受日期 Accepted: 2022-03-25

temperature. At 17°C ~ 37°C, Hassell-Varley interference response equation described predation was related to predator density. Under the same prey density conditions, there was intraspecific competition and self-interference between the *E. furcellate* 3rd ~ 4th nymph, and strong interference existed in the predator, which increased with the increasing density of *E. furcellate* 3rd ~ 4th nymph. The searching coefficient Q and the disturbance coefficient m increased with the increase of temperature, and the peak at 37°C, which were 0.4719 and 0.788 respectively.

Key words: *Eocanthecona furcellate* (Wolff); *Spodoptera frugiperda* (Smith); temperature; predatory functional response; interference effect

草地贪夜蛾 *Spodoptera frugiperda* (Smith) 是一种多食性农业害虫, 原产于美洲热带和亚热带地区, 自 2016 年于非洲首次发现入侵后, 以非常迅速的速度扩散入侵了撒哈拉以南地区绝大多数国家 (Stokstad, 2017; Early *et al.*, 2018)。2018 年 12 月 26 日, 陈辉等 (2020) 在我国云南江城宝藏乡玉米田发现不明夜蛾类幼虫为害, 2019 年 1 月 12 日经确认为草地贪夜蛾, 随后该虫在我国各地迅速迁飞、发生, 造成了明显威胁。草地贪夜蛾主要以幼虫取食玉米 *Zea mays* L.、甘蔗 *Saccharum officinarum* L. 等多种作物的叶片 (王磊等, 2019; 陆永跃等, 2020)。在其幼虫 1~3 龄低龄时期取食作物叶片后, 通常会形成半透明薄膜“窗孔”; 4~6 龄老熟幼虫不仅取食作物叶片形成不规则状的长形孔洞, 还会取食作物的果穗 (FAO, 2017; 陆永跃等, 2020)。除了取食量大的特点, 草地贪夜蛾迁飞性强。从早期的世界传播轨迹来看, 草地贪夜蛾波及范围为阿根廷的拉潘帕最南端以及到最北端的佛罗里达州南部和美国得克萨斯州, 可见其迁飞能力 (Early *et al.*, 2018)。草地贪夜蛾雌成虫一生可产近 2 000 粒卵, 一年多个世代发生, 可在短时间内大规模暴发 (王磊等, 2019; 王燕平等, 2021)。因此, 如何高效预防与控制草地贪夜蛾成为重要问题。在目前草地贪夜蛾防控中, 可采用农业防治、理化诱控、生物防治、化学防治等多个方面的措施 (王磊等, 2019)。由于大量不规范使用化学杀虫剂, 草地贪夜蛾已对多类杀虫剂产生较高的抗性 (王芹芹等, 2019)。

已有报道显示草地贪夜蛾捕食性天敌昆虫种类繁多 (陈秀琴等, 2021), 益蝽 *Picromerus lewisi* 和蜀蝽 *Arma chinensis* 2 种捕食性昆虫均能取食草地贪夜蛾幼虫 (唐艺婷等, 2019)。叉角厉蝽是一种广谱性捕食性天敌昆虫, 捕食害虫种类多, 对夜蛾类幼虫捕食能力较强。Shylesha *et al.* (2018) 报道了玉米田地释放叉角厉蝽对草地贪夜蛾具有

显著防治效果。Sravika *et al.* (2020) 通过研究叉角厉蝽生物学特性, 证实了对草地贪夜蛾捕食潜力。范悦莉等 (2019)、唐敏等 (2019)、陈桢等 (2021) 研究了叉角厉蝽的捕食功能反应和捕食效能, 结果均表明该蝽对草地贪夜蛾幼虫具有良好的捕食效果。有关温度因素对于昆虫捕食作用影响的研究颇多。温度对异色瓢虫 *Harmonia axyridis* 捕食量、寻找效应、捕食功能等方面均有显著影响 (王峰巍等, 2010)。尚素琴等 (2016) 研究了不同温度下巴氏新小绥螨 *Neoseiulus barkeri* 对西花蓟马 *Frankliniella occidentalis* (Pergande) 的捕食功能, 表明在 28°C 下巴氏新小绥螨对西花蓟马的捕食量达到峰值。目前, 有关温度对叉角厉蝽捕食效应的影响尚未见报道。本文在实验室条件下研究温度对叉角厉蝽捕食草地贪夜蛾的影响, 寻找叉角厉蝽取食草地贪夜蛾的最适温度, 旨在为选择最佳释放温度应用叉角厉蝽防控草地贪夜蛾提供依据。

1 材料与方法

1.1 供试昆虫

叉角厉蝽: 采自华南农业大学农场十字花科蔬菜地, 于室内在培养箱内 (温度 27°C ± 1°C, 相对湿度 70% ± 10%, 光周期 16 L: 8 D) 用黄粉虫 *Tenebrio molitor* 进行多代饲养备用。

草地贪夜蛾: 幼虫采自广西来宾市林碑村, 用改进后的草地贪夜蛾人工饲料与玉米叶进行饲养, 成虫用 10% 蜂蜜水饲养。饲养温度为 26°C ± 1°C, 相对湿度 70% ± 10%, 光照 16 L: 8 D。在室内继代繁殖后, 选择发育健康的虫源作为供试材料。

1.2 试验方法

本次试验设 17°C、22°C、27°C、32°C、37°C 五个恒温处理, 在各温度下分别进行观察。

1.2.1 不同温度条件下叉角厉蝽对草地贪夜蛾的捕食作用

试验选取草地贪夜蛾 2~3 龄幼虫设置密度为 20、30、40、50、60 头, 置于 15 cm 培养皿中, 各处理分别接入 1 头饥饿 24 h 的 3~4 龄叉角厉蝽若虫, 放入适量人工饲料饲喂草地贪夜蛾, 分别置于 17℃、22℃、27℃、32℃ 和 37℃, RH 70% ± 10%, L:D=12:12 的恒温箱中, 每温度处理重复 5 次。24 h 后观察记录草地贪夜蛾幼虫存活虫数量。

1.2.2 不同温度条件下叉角厉蝽捕食草地贪夜蛾自身密度干扰效应

试验设置叉角厉蝽 3~4 龄若虫密度为 1、2、3、4、5 头分别与 50 头草地贪夜蛾 2~3 龄幼虫组合, 置于 15 cm 培养皿中, 放入人工饲料饲喂草地贪夜蛾, 再分别置于 17℃、22℃、27℃、32℃、37℃, RH 70% ± 10%, L:D=12:12 的恒温箱中, 每温度处理重复 3 次。24 h 后统计草地贪夜蛾幼虫存活虫数。

1.3 数据处理

本试验所有数据均用 Excel 和 SPSS 25.0 进行分析并作图。

1.3.1 捕食功能反应 Holling-II 圆盘方程

$$\frac{1}{N_a} = \frac{1}{aT} \times \frac{1}{N} \frac{T_h}{T}$$

式中, N_a 为被捕食猎物的数量; N 为猎物的密度; a 为捕食者对猎物的瞬间攻击率; T_h 为处置 1 头猎物所需的时间; T 为试验处理时间。(Holling, 1959)

由于 $T=1$ d (24 h), 上述公式简化为:

$$\frac{1}{N_a} = \frac{1}{a} \times \frac{1}{N} + T_h$$

1.3.2 寻找效应方程

$$S = \frac{a}{1 + aT_h N}$$

S 为寻找效应; a 为瞬时攻击率; T_h 为处置 1 头猎物所需的时间; N 为猎物的密度。(丁岩钦, 1994)

1.3.3 干扰效应

$$E = QP^{-m}, E = \frac{Na}{NP}$$

自身密度干扰效根据 Hassell-Verley 模型拟合, E 为捕食作用率, 式中 N_a 为被捕食猎物数量、 N 为猎物初始数量、 P 为捕食者初始密度、 Q 为搜寻系数、 m 为干扰系数。

分摊竞争强度 $I = (E_1 - E_p) / E_1$, 公式中 E_1 为 1 头天敌的捕食作用率、 E_p 为 P 头天敌的捕食作用率。(Hassell MP and Varley GC, 1969)

2 结果与分析

2.1 不同温度条件对叉角厉蝽捕食量的影响

叉角厉蝽 3~4 龄若虫对草地贪夜蛾 2~3 龄幼虫的捕食量如表 1 所示, 不同温度及不同猎物密度对叉角厉蝽的捕食作用有明显影响。在同一温度下, 叉角厉蝽 3~4 龄若虫的日均捕食量随着猎物密度的增加而增加, 且在 27℃、32℃ 下, 叉角厉蝽捕食不同密度草地贪夜蛾时差异最为明显。17℃~37℃ 5 个恒温处理中, 在同一猎物密度下, 叉角厉蝽 3~4 龄若虫日均捕食量随着温度的升高而增加, 但在温度达到 32℃ 后, 叉角厉蝽捕食量趋于饱和或出现下降现象。叉角厉蝽 3~4 龄若虫对草地贪夜蛾 2~3 龄幼虫捕食量在不同温度间差异较显著, 在温度为 32℃、猎物密度为 60 头/皿时叉角厉蝽的日捕食量最大。

2.2 不同温度条件下叉角厉蝽对草地贪夜蛾的捕食功能反应

在温度 17℃~37℃ 范围内, 叉角厉蝽 3~4 龄若虫对草地贪夜蛾 2~3 龄幼虫的捕食功能反应均符合 Holling II 方程 (表 2)。叉角厉蝽的瞬间攻击率 a 随着温度的升高而升高, 在 37℃ 最大, 瞬间攻击率为 0.8540; 处置时间 T_h 随着温度的升高而降低, 在温度达到 32℃ 时最小 0.0144, 温度高于 32℃ 后开始增加。捕食效能 a/T_h 和日最大捕食量 $1/T_h$ 均随着温度的升高而升高, 且均在 32℃ 时达到最大值, 分别为 49.7778、69.4444, 温度高于 32℃ 时开始减小。由以上结果表明, 温度对叉角厉蝽 3~4 龄若虫捕食草地贪夜蛾 2~3 龄幼虫有明显影响, 在 17℃ 时瞬间攻击率最小、处置时间最长、捕食效能及日最大捕食量最小, 说明低温不利于叉角厉蝽 3~4 龄若虫的捕食行为。

2.3 不同温度条件下叉角厉蝽对草地贪夜蛾的寻找效应

根据寻找效应公式可得叉角厉蝽 3~4 龄若虫在不同温度条件下对草地贪夜蛾 2~3 龄幼虫的寻找效应 (图 1)。在相同温度条件下, 叉角厉蝽 3~4 龄若虫的寻找效应随着草地贪夜蛾幼虫密度的增加而逐渐降低。在相同猎物密度下, 叉角厉蝽的寻找效应随温度的升高逐渐上升, 寻找效应由高到低依次为 37℃、32℃、27℃、22℃、17℃,

表 1 不同温度下叉角厉蝽 3~4 龄若虫对草地贪夜蛾 2~3 幼虫的捕食量
Table 1 Consumption of *Eocanthecona furcellata* (Wolff) 3rd ~ 4th nymph on *Spodoptera frugiperda* (Smith) 2nd ~ 3rd larvae under different temperatures

猎物密度 (头/皿) Prey density	日均捕食量 (头) Daily mean predation (ind.)				
	17℃	22℃	27℃	32℃	37℃
20	5.20 ± 0.86 Cd	8.40 ± 0.51 Cc	10.80 ± 0.37 Eb	12.40 ± 0.25 Eab	13.20 ± 0.58 Da
30	6.40 ± 0.51 BCc	9.00 ± 0.84 Cc	13.00 ± 0.32 Db	15.00 ± 1.05 Dab	17.20 ± 1.39 Ca
40	7.20 ± 0.37 BCd	13.00 ± 0.71 Bc	16.60 ± 0.68 Cb	19.40 ± 0.68 Ca	18.60 ± 0.75 Ca
50	7.60 ± 0.51 Bd	12.40 ± 0.93 Bc	20.00 ± 0.84 Bb	23.40 ± 0.25 Ba	23.40 ± 0.40 Ba
60	11.80 ± 0.97 Ad	15.40 ± 0.75 Ac	24.20 ± 1.02 Ab	30.60 ± 0.25 Aa	29.80 ± 0.37 Aa

注: 表中数据为平均值 ± 标准差, 同列数据后不同大写字母表示在同一温度不同猎物密度条件下捕食量差异显著, 同行不同小写字母表示在同一猎物密度不同温度下捕食量差异显著 (Duncan's 复极差检验)。Note: Data were means ± SD, data in the same column followed by different uppercase letters indicated significant difference in the same temperature at different prey density conditions. Data in the same row followed by different lower case letters indicated significant difference in the same prey density at different temperature conditions ($P < 0.05$) by Duncan's new multiple range.

表 2 不同温度条件下叉角厉蝽 3~4 龄若虫对草地贪夜蛾 2~3 幼虫的捕食功能反应 (Holling II 圆盘方程)
Table 2 Predation functional response model (Holling-II disc equation) of *Eocanthecona furcellata* (Wolff) 3rd ~ 4th nymph to 2nd ~ 3rd *Spodoptera frugiperda* (Smith) larvae under different temperatures

温度 (℃) Temperature	Holling II 圆盘方程 Holling-II disc equation	瞬间攻击率 a Rate of instantaneous attack	处置时间 (d) Th Handling time	捕食效能 a/Th Predator capacity	日最大捕食量 $1/Th$ Maximum prey consumed daily	R^2	P
17	$Na = 0.3670N / (1 + 0.0227N)$	0.3670	0.0618	5.9385	16.1812	0.8588	< 0.05
22	$Na = 0.6177N / (1 + 0.0269N)$	0.6177	0.0436	14.1674	22.9358	0.8535	< 0.05
27	$Na = 0.6579N / (1 + 0.0132N)$	0.6579	0.0201	32.7313	49.7512	0.9579	< 0.01
32	$Na = 0.7168N / (1 + 0.0103N)$	0.7168	0.0144	49.7778	69.4444	0.9480	< 0.01
37	$Na = 0.8540N / (1 + 0.0161N)$	0.8540	0.0189	45.1852	52.9101	0.9437	< 0.01

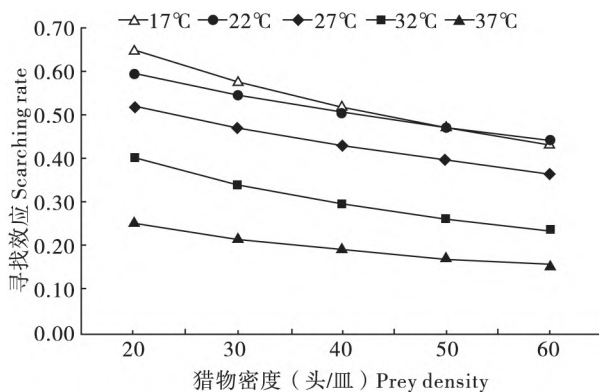


图 1 不同温度条件下叉角厉蝽 3~4 龄若虫对草地贪夜蛾 2~3 龄幼虫的寻找效应

Fig. 1 Searching efficacy of *Eocanthecona furcellata* (Wolff) 3rd ~ 4th nymph to 2nd ~ 3rd instar larvae of *Spodoptera frugiperda* (Smith) under different temperatures

但当猎物密度大于 50 头时, 在 32℃ 时的寻找效应与相接近且大于 37℃ 时的寻找效应。结果表明, 不同温度下叉角厉蝽对草地贪夜蛾的寻找效应有明显影响, 温度为 17℃ 时寻找效应最低, 猎物密度为 50 头以下时 37℃ 寻找效应最高。

2.4 不同温度条件下叉角厉蝽捕食草地贪夜蛾自身密度干扰效应

在不同捕食者密度条件下, 叉角厉蝽 3~4 龄若虫对草地贪夜蛾 2~3 龄幼虫的捕食量随着温度的升高而增大。在 22℃ ~ 37℃ 温度范围内, 随着叉角厉蝽密度的增加, 被捕食的草地贪夜蛾幼虫总数量和分摊竞争强度随之增加, 同时, 捕食作用率 E 逐渐降低, 说明在一定空间范围内, 叉角厉蝽个体间存在竞争和相互干扰作用, 且自身密度越大, 捕食作用越低, 干扰效应越明显 (表 3)。

表 3 不同温度条件下叉角厉蝽 3~4 龄若虫的自身密度干扰效应
 Table 3 Intraspecific interference by different densities of *Eocanthecona furcellata* (Wolff)
 3rd ~ 4th nymph at different temperatures

温度 (°C) Temperature	叉角厉蝽密度 (头/皿) Predator density of <i>E. furcellata</i>														
	1			2			3			4			5		
	<i>N_a</i>	<i>E</i>	<i>I</i>	<i>N_a</i>	<i>E</i>	<i>I</i>	<i>N_a</i>	<i>E</i>	<i>I</i>	<i>N_a</i>	<i>E</i>	<i>I</i>	<i>N_a</i>	<i>E</i>	<i>I</i>
17	7.00	0.14	0.00	13.00	0.13	0.07	13.33	0.09	0.37	13.00	0.07	0.54	21.33	0.09	0.39
22	11.67	0.23	0.00	18.00	0.18	0.23	19.67	0.13	0.44	21.33	0.11	0.54	32.33	0.13	0.45
27	18.67	0.37	0.00	20.67	0.21	0.45	26.33	0.18	0.53	26.00	0.13	0.65	34.00	0.14	0.64
32	23.33	0.47	0.00	24.00	0.24	0.49	27.67	0.18	0.60	32.67	0.16	0.65	32.67	0.15	0.67
37	23.00	0.46	0.00	28.33	0.28	0.38	31.00	0.21	0.55	30.00	0.13	0.72	33.33	0.13	0.71

注: *N_a*, 叉角厉蝽日捕食数/头; *E*, 捕食作用率; *I*, 分摊竞争强度。Note: *N_a*, Number of predation; *E*, Predation rate; *I*, Intensity of scrambling competition.

采用 Hassell-Varley 干扰模型对不同温度条件下叉角厉蝽 3~4 龄若虫受自身密度干扰的捕食作用进行拟合 (表 4), 捕食作用率 *E* 和叉角厉蝽密度之间的关系系数 $R^2 > 0.74$, 拟合优度检验 $\chi^2 < \chi_{0.05}^2 = 9.488$, 表明理论值与观察值较吻合, 该模型能够较好的反映叉角厉蝽 3~4 龄若虫在捕食时的自我干扰情况。搜寻系数 *Q* 和相互干扰系数 *m* 随着温度的升高而增大, 在 37°C 时最大, 分别为

0.4719、0.788; 在 17°C 时最小, 分别为 0.1478、0.431。表明在这个温度范围内, 随着温度的升高, 叉角厉蝽 3~4 龄若虫的搜寻能力增大, 相互干扰作用也增大, 但在温度高于 32°C 时增加趋势趋于平缓。说明在一定的叉角厉蝽密度下, 适当增加温度能提高叉角厉蝽 3~4 龄若虫对草地贪夜蛾 2~3 龄幼虫的搜寻能力。

表 4 不同温度条件下叉角厉蝽 3~4 龄若虫自身密度的干扰反应方程及参数估计
 Table 4 Equations and estimated parameters of interferential effect to *Eocanthecona furcellata* (Wolff)
 3rd ~ 4th nymph different temperatures

温度 (°C) Temperature	搜寻系数 <i>Q</i> Searching coefficient	相互干扰系数 <i>m</i> Disturbance coefficient	Hassell-Varley 干扰模型	R^2
17	0.1478	0.431	$E = 0.1478P^{-0.431}$	0.7422
22	0.2316	0.454	$E = 0.2316P^{-0.454}$	0.8645
27	0.3539	0.657	$E = 0.3539P^{-0.657}$	0.9607
32	0.4434	0.765	$E = 0.4434P^{-0.765}$	0.9845
37	0.4719	0.788	$E = 0.4719P^{-0.788}$	0.9936

3 结论与讨论

温度及猎物密度对捕食者的捕食行为有较大影响, 已有研究表明叉角厉蝽 3 龄若虫的捕食量与草地贪夜蛾 3 龄幼虫密度正相关 (范悦莉等, 2019)。在本次试验温度范围内 (17°C ~ 37°C), 叉角厉蝽 3~4 龄若虫对草地贪夜蛾 2~3 龄幼虫的捕食功能反应模型符合 Holling II 型方程, 捕食效

能 a/Th 和日均捕食量均在 32°C 时最大。在同一温度下, 叉角厉蝽 3~4 龄若虫的寻找效应与草地贪夜蛾幼虫密度呈负相关; 但猎物密度相同时, 叉角厉蝽 3~4 龄若虫的寻找效应与温度呈正相关。在 17°C ~ 37°C 范围内, Hassell-Varley 干扰反应模型能较好地反映出不同叉角厉蝽密度条件下对草地贪夜蛾的捕食情况, 在相同的猎物密度条件下, 叉角厉蝽 3~4 龄若虫个体间存在种内竞争和自我干扰作用, 随着自身密度增大, 相互干扰作用增

强, 搜寻系数 Q 和相互干扰系数 m 随着温度的升高而增大, 在 37°C 时最大, 分别为 0.4719 和 0.788。本研究中叉角厉蝽 3~4 龄若虫对草地贪夜蛾 2~3 龄幼虫的捕食量在不同温度及猎物密度间差异较显著, 且在温度为 32°C 、猎物密度为 60 头/皿时, 叉角厉蝽的日捕食量最大 (30.6 头)。但在温度达到 32°C 后, 叉角厉蝽 3~4 龄若虫捕食量趋于饱和或出现下降现象。这表明在一定的猎物密度范围内, 适当增加温度能提高叉角厉蝽的捕食能力。

Holling 捕食功能反应是测定捕食者捕食能力的一种重要方法和途径, 广泛应用于评价捕食者对猎物的捕食效率, 以及捕食者对猎物种群的控制能力 (张文军, 2007)。本研究中 5 个恒温处理下的叉角厉蝽捕食作用均属于 Holling II 模型, 这与前人所报道的叉角厉蝽、大红犀猎蝽 *Sycanus falleni*、东亚小花蝽 *Orius sauteri*、黄带犀猎蝽 *Sycanus croceouittatus*、益蝽 *Picromerus lewisi*、蝟蝽 *Arma chinensis*、大草蛉 *Chrysopa pallens*、黄足肥螋 *Eurellia pallipes* 对草地贪夜蛾低龄幼虫的捕食功能反应模型相一致 (代晓彦等, 2019; 范悦莉等, 2019; 唐敏等, 2019; 王燕等, 2019 a; 2019 b; 赵雪晴等, 2019; 赵英杰等, 2019; 葛轩宇, 2020; 侯峥嵘等, 2020; 李萍等, 2020; 王亚楠等, 2020)。以瞬间攻击率 a 与处置时间 Th 为评价指标, 本试验结果得出在温度为 32°C 时叉角厉蝽 3~4 龄若虫对草地贪夜蛾 2~3 龄幼虫的捕食效能 a/Th 最高, 为 49.7778, 其次为 37°C , 为 45.1852, 说明叉角厉蝽 3~4 龄若虫在 $32^{\circ}\text{C} \sim 37^{\circ}\text{C}$ 高温时捕食能力最强, 而在低温条件下生长发育慢及活动能力弱表现出较低的控制效果。因此, 在华南地区草地贪夜蛾爆发严重的高温夏季可选择在田间应用叉角厉蝽防治害虫。寻找效应是天敌在捕食过程中对于猎物攻击的一种行为效应。本研究在同一温度条件下叉角厉蝽 3~4 龄若虫的寻找效应随着草地贪夜蛾低龄幼虫密度的增加而逐渐降低。这与范悦莉等 (2019) 的研究中叉角厉蝽 3 龄若虫对草地贪夜蛾 3 龄幼虫寻找效应与猎物密度负相关的结果相一致。另外, 研究结果表明, 不同温度下叉角厉蝽 3~4 龄若虫对草地贪夜蛾 2~3 龄幼虫的寻找效应随温度的升高逐渐上升, 温度为 17°C 时寻找效应最低, 当温度高于 32°C 且猎物密度较大时, 寻找效应增加趋于平缓或开始下降, 可能是当温度升高到一定程度后该叉角厉蝽的个体活动

受到抑制引起。这与贾静静等 (2019) 的研究中温度对加州新小绥螨 *Neoseiulus californicus* 对东方真叶螨 *Eutetrany chusorientalis* 寻找效应随温度的升高逐渐上升但在 33°C 时后下降的结果相似。捕食者对猎物的捕食作用与捕食者密度密切相关, 在对叉角厉蝽 3~4 龄若虫自身密度干扰反应研究中发现, 在 $22^{\circ}\text{C} \sim 37^{\circ}\text{C}$ 温度范围内, 随着叉角厉蝽密度的增加, 被捕食的草地贪夜蛾幼虫总数量和分摊竞争强度随之增加, 同时, 捕食作用率 E 逐渐降低。这与范悦莉 (2019) 等和唐敏 (2019) 等叉角厉蝽捕食草地贪夜蛾幼虫自身密度干扰作用的结果相一致。但与陈祯等 (2021) 叉角厉蝽自身密度不影响其捕食行为的实验结果不一致, 原因可能与叉角厉蝽及草地贪夜蛾的实验龄期有关。由寻找效应与干扰效应结果可以得知, 在进行田间应用时, 应注意观察统计草地贪夜蛾实际为害密度以及控制合适的叉角厉蝽释放密度, 从而达到最佳控害效果。

本实验是在实验室人工气候箱设定条件下进行, 所处光照周期与湿度等环境条件相对单一, 且只研究了温度对叉角厉蝽 3~4 龄若虫对草地贪夜蛾 2~3 龄幼虫的捕食作用。因此, 在田间应用叉角厉蝽防治草地贪夜蛾时应综合考虑温度、湿度、猎物密度、害虫空间分布、天敌释放次数及密度等条件。此外, 叉角厉蝽因捕食范围广在田间应用前景较好, 但能否在田间定殖还有待进一步的研究, 后期还需要结合开展小区笼罩试验对叉角厉蝽捕食草地贪夜蛾的捕食效能作进一步研究。

参考文献 (References)

- Chen H, Yang XL, Chen AD, et al. Invasion time and source distribution of *Spodoptera frugiperda* in China [J]. *Applied Entomology*, 2020, 57 (6): 1270-1278. [陈辉, 杨学礼, 谌爱东, 等. 我国最早发现为害地草地贪夜蛾的入侵时间及其虫源分布 [J]. 应用昆虫学报, 2020, 57 (6): 1270-1278]
- Chen XQ, Liu QQ, Tian XH, et al. Research progress on biological control of *Spodoptera frugiperda* [J]. *Fujian Agricultural Journal*, 2021, 36 (8): 981-988. [陈秀琴, 刘其全, 田新湖, 等. 草地贪夜蛾生物防治研究进展 [J]. 福建农业学报, 2021, 36 (8): 981-988]
- Chen Z, Fu W, Li WB, et al. Study on the predation characteristics of *Eocanthecona furcellata* on *Spodoptera frugiperda* [J]. *China Plant Protection Guide*, 2021, 41 (5): 5-10, 74. [陈祯, 付文, 李文标, 等. 叉角厉蝽对草地贪夜蛾的捕食特性研究 [J]. 中国植保导刊, 2021, 41 (5): 5-10, 74]

- Dai XY, Zhai YF, Chen FS, *et al.* Predation of *Orius sauteri* on *Spodoptera frugiperda* larva [J]. *Chinese Journal of Biological Control*, 2019, 35 (5): 704–708. [代晓彦, 翟一凡, 陈福寿, 等. 东亚小花蝽对草地贪夜蛾幼虫的捕食能力评价 [J]. 中国生物防治学报, 2019, 35 (5): 704–708]
- Ding YQ. *Insect Mathematical Ecology* [M]. Beijing: Science Press, 1994: 257–258, 303–304. [丁岩钦. 昆虫数学生态学 [M]. 北京: 科学出版社, 1994: 257–258, 303–304]
- Early R, González-Moreno P, Murphy ST, *et al.* Forecasting the global extent of invasion of the cereal pest *Spodoptera frugiperda*, the fall armyworm [J]. *NLeobiota*, 2018, 40: 25–50.
- Fan YL, Gu XH, Xian JD, *et al.* Functional response of *Eocanthecona furcellata* (Hemiptera: Pentatomidae) to *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae) [J]. *Journal of Environmental Entomology*, 2019, 41 (6): 1175–1180. [范悦莉, 谷星慧, 洗继东, 等. 叉角厉蝽对草地贪夜蛾的捕食功能反应 [J]. 环境昆虫学报, 2019, 41 (6): 1175–1180]
- FAO. Integrated management of the fall armyworm on maize [R]. Rome: FAO, 2017.
- Ge XY. Study on the Effects of Temperature on the Development and Control Method to *Spodoptera frugiperda* [D]. Foshan University, 2020. [葛轩宇. 温度对草地贪夜蛾生长发育的影响及防治技术研究 [D]. 佛山科学技术学院, 2020]
- Hassell MP, Varley GC. New inductive population model for insect parasites and its bearing on biological control [J]. *Nature*, 1969, 223 (5211): 1133–1137.
- Holling CS. Some characteristics of simple types of predation and parasitism [J]. *The Canadian Entomologist*, 1959, 91 (7): 385–398.
- Hou ZR, Sun BB, Liu XJ, *et al.* Predatory functional response of assassin bug *Sycanus falleni* to the larvae of fall armyworm *Spodoptera frugiperda* [J]. *Journal of Plant Protection*, 2020, 47 (4): 852–858. [侯峥嵘, 孙贝贝, 刘先建, 等. 大红犀猎蝽对草地贪夜蛾 3 龄幼虫捕食功能反应 [J]. 植物保护学报, 2020, 47 (4): 852–858]
- Jia JJ, Fu YG, Zhang FP, *et al.* Effects of temperature on predatory functional responses of *Neoseiulus californicus* to *Eutetranychus chusorientalis* [J]. *Chinese Journal of Biological Control*, 2019, 35 (3): 382–389. [贾静静, 符悦冠, 张方平, 等. 温度对加州新小绥螨捕食东方真叶螨功能反应的影响 [J]. 中国生物防治学报, 2019, 35 (3): 382–389]
- Li P, Li YY, Xiang M, *et al.* Predation capacity of *Chrysopa pallens* larvae to young larvae of *Spodoptera frugiperda* [J]. *Chinese Journal of Biological Control*, 2020, 36 (4): 513–519. [李萍, 李玉艳, 向梅, 等. 大草蛉幼虫对草地贪夜蛾低龄幼虫的捕食能力评价 [J]. 中国生物防治学报, 2020, 36 (4): 513–519]
- Lu YY, Huang DC, Zhang YP. Technical Manual for Monitoring and Control of *Spodoptera frugiperda* [M]. Guangzhou: South China University of Technology Press, 2020. [陆永跃, 黄德超, 章玉苹. 草地贪夜蛾监测与防治技术手册 [M]. 广州: 华南理工大学出版社, 2020]
- Shang SQ, Liu P, Zhang XH. Predatory function of *Neoseiulus barkeri* to newly hatched thrips at different temperatures [J]. *Plant Protection*, 2016, 42 (3): 141–144. [尚素琴, 刘平, 张新虎. 不同温度下巴氏新小绥螨对西花蓟马初孵若虫的捕食功能 [J]. 植物保护, 2016, 42 (3): 141–144]
- Shylesha AN, Jalali S, Gupta A, *et al.* Natural occurrence of predatory bugs, *Eocanthecona furcellata* (Wolff) and *Andrallus spinidens* (Fabr.) on *Spodoptera frugiperda* (Smith) (Hemiptera: Pentatomidae) in maize and their potential in management of fall army worm [J]. *Journal of Biological Control*, 2018, 32 (3): 209–211.
- Sravika AN, Shylesha KS, Jagadeesh TM, *et al.* Biology and potential of pentatomid predator, *Eocanthecona furcellata* (Wolff) (Hemiptera: Pentatomidae) on fall armyworm, *Spodoptera frugiperda* (Smith) [J]. *Journal of Biological Control*, 2020, 34 (1): 26–29.
- Stokstad E. New crop pest takes Africa at lightning speed [J]. *Science*, 2017, 356 (6337): 473–474.
- Tang M, Kuang ZL, Li ZY, *et al.* Functional response of *Eocanthecona furcellata* to *Spodoptera frugiperda* [J]. *Journal of Environmental Entomology*, 2019, 41 (5): 979–985. [唐敏, 邝昭琅, 李子园, 等. 叉角厉蝽对草地贪夜蛾幼虫的捕食功能反应 [J]. 环境昆虫学报, 2019, 41 (5): 979–985]
- Tang YT, Wang MQ, Chen HY, *et al.* Evaluation of predation ability and observation of predation behavior of *Eocanthecona furcellata* on the elderly larvae of *Spodoptera frugiperda* [J]. *China Journal of Biological Control*, 2019, 35 (5): 698–703. [唐艺婷, 王孟卿, 陈红印, 等. 益蝽对草地贪夜蛾高龄幼虫的捕食能力评价和捕食行为观察 [J]. 中国生物防治学报, 2019, 35 (5): 698–703]
- Wang FW, Wang S, Zhang F, *et al.* Effects of different temperatures on the predation ability of *Harmonia axyridis* treated with imidacloprid [J]. *Journal of Environmental Entomology*, 2010, 32 (4): 504–509. [王峰巍, 王甦, 张帆, 等. 不同温度对经吡虫啉处理的异色瓢虫捕食能力的影响 [J]. 环境昆虫学报, 2010, 32 (4): 504–509]
- Wang L, Chen KW, Lu YY. Long-distance spreading speed and trend prediction of fall armyworm, *Spodoptera frugiperda*, in China [J]. *Journal of Environmental Entomology*, 2019, 41 (4): 683–694. [王磊, 陈科伟, 陆永跃. 我国草地贪夜蛾入侵扩张动态与发生趋势预测 [J]. 环境昆虫学报, 2019, 41 (4): 683–694]
- Wang L, Chen KW, Zhong GH, *et al.* Progress for occurrence and management and the strategy of the fall armyworm *Spodoptera frugiperda* (Smith) [J]. *Journal of Environmental Entomology*, 2019, 41 (3): 479–487. [王磊, 陈科伟, 钟国华, 等. 重大入侵害虫草地贪夜蛾发生危害、防控研究进展及防控策略探讨 [J]. 环境昆虫学报, 2019, 41 (3): 479–487]
- Wang L, Lu YY. Spreading trend prediction of fall armyworm, *Spodoptera frugiperda*, in year of 2020 in China [J]. *Journal of Environmental Entomology*, 2020, 42 (5): 1139–1145. [王磊, 陆永跃. 2020 年我国草地贪夜蛾蔓延发生趋势及预测 [J]. 环境昆虫学报, 2020, 42 (5): 1139–1145]
- Wang QQ, Cui L, Wang L, *et al.* Research progress on insecticides resistance in fall armyworm, *Spodoptera frugiperda* [J]. *Chinese*

- Journal of Pesticide Science*, 2019, 21 (4): 401–408. [王芹芹, 崔丽, 王立, 等. 草地贪夜蛾对杀虫剂的抗性研究进展 [J]. 农药学学报, 2019, 21 (4): 401–408]
- Wang Y, Wang MQ, Zhang HM, *et al.* Predation potential of adult of *Picromerus lewisi* (Fallou) on larvae of *Spodoptera frugiperda* [J]. *Chinese Journal of Biological Control*, 2019a, 35 (5): 691–697. [王燕, 王孟卿, 张红梅, 等. 益蝽成虫对草地贪夜蛾不同龄期幼虫的捕食能力 [J]. 中国生物防治学报, 2019a, 35 (5): 691–697]
- Wang Y, Zhang HM, Yin YQ, *et al.* Predation of adult of *Arma chinensis* to larvae of *Spodoptera frugiperda* [J]. *Plant Protection*, 2019b, 45 (5): 42–46. [王燕, 张红梅, 尹艳琼, 等. 蝽成虫对草地贪夜蛾不同龄期幼虫的捕食能力 [J]. 植物保护, 2019b, 45 (5): 42–46]
- Wang YN, Zhao SY, He YZ, *et al.* Predation of the larvae of *Spodoptera frugiperda* (J. E. Smith) by *Sycanus croceovittatus* Dohrn [J]. *Chinese Journal of Biological Control*, 2020, 36 (4): 525–529. [王亚楠, 赵胜园, 何运转, 等. 黄带犀猎蝽对草地贪夜蛾幼虫的捕食作用 [J]. 中国生物防治学报, 2020, 36 (4): 525–529]
- Wang YP, Xiang J, Yuan J, *et al.* Review on the control technology of *Spodoptera frugiperda* [J]. *Sichuan Agricultural Science and Technology*, 2021, 9: 28–29. [王燕平, 向娟, 袁娇等. 草地贪夜蛾的防治技术综述 [J]. 四川农业科技, 2021, 9: 28–29]
- Zhang WJ. *Research Methods of Ecology* [M]. Guangzhou: Sun Yat-sen University Press, 2007: 318–319. [张文军. 生态学研究方法 [M]. 广州: 中山大学出版社, 2007: 318–319]
- Zhao XQ, Liu Y, Shi WP, *et al.* Predatory effects of *Orius sauteri* on *Spodoptera frugiperda* larva [J]. *Plant Protection*, 2019, 45 (5): 79–83. [赵雪晴, 刘莹, 石旺鹏, 等. 东亚小花蝽对草地贪夜蛾幼虫的捕食效应 [J]. 植物保护, 2019, 45 (5): 79–83]
- Zhao YJ, Fu CY, Xu TM, *et al.* Predatory functional response of *Eurellia pallipes* to the second instar larva of *Spodoptera frugiperda* [J]. *Plant Protection*, 2019, 45 (6): 35–38, 54. [赵英杰, 符成悦, 徐天梅, 等. 黄足肥螋成虫对草地贪夜蛾 2 龄幼虫的捕食功能反应 [J]. 植物保护, 2019, 45 (6): 35–38, 54]