

黄带犀猎蝽对草地贪夜蛾幼虫的捕食功能反应研究^{*}

陈苏怡^{1**} 赵 萍² 史爱民³ 石萍丽³ 彩万志¹ 石安宪^{4***} 李 虎^{1***}

(1. 中国农业大学植物保护学院昆虫学系, 北京 100193; 2. 南宁师范大学地理与海洋研究院, 南宁 530001;

3. 苏州推动者生物科技有限公司, 苏州 215000; 4. 昭通市植保植检站, 昭通 657100)

摘 要 【目的】为探明黄带犀猎蝽 *Sycanus croceovittatus* 对草地贪夜蛾 *Spodoptera frugiperda* 的控害效果。【方法】在室内条件下开展黄带犀猎蝽 3-5 龄若虫和成虫对草地贪夜蛾 3 龄和 4 龄幼虫的捕食功能反应、搜寻效应和自身密度对其捕食作用的干扰反应。【结果】黄带犀猎蝽各龄期若虫和成虫对草地贪夜蛾幼虫的捕食功能反应均符合 Holling II 模型; 拟合 Holling II 模型中黄带犀猎蝽 3-5 龄若虫、雌虫和雄成虫对草地贪夜蛾 3 龄幼虫的日均最大捕食量分别为 23.267、18.252、25.432、59.559 和 51.894 头, 控害效能分别为 10.321、19.219、21.251、52.877 和 44.390; 对 4 龄幼虫的日均最大捕食量分别为 5.886、7.570、8.584、22.477 和 10.057 头, 控害效能分别为 4.861、7.023、7.906、26.410 和 14.402, 其中雌成虫的控害效能最大。黄带犀猎蝽对草地贪夜蛾的捕食作用同时受猎物密度与捕食者自身密度的双重影响, 捕食量与猎物密度呈正相关, 搜寻效应与猎物密度呈负相关, 干扰反应与捕食者密度呈正相关。【结论】黄带犀猎蝽若虫和成虫对草地贪夜蛾 3 龄和 4 龄幼虫均有一定的捕食能力, 且成虫的捕食能力优于若虫。

关键词 草地贪夜蛾; 黄带犀猎蝽; 捕食功能反应; 搜寻效应; 干扰反应

The predatory functional responses of *Sycanus croceovittatus* preying on *Spodoptera frugiperda* larvae

CHEN Su-Yi^{1**} ZHAO Ping² SHI Ai-Min³ SHI Ping-Li³
CAI Wan-Zhi¹ SHI An-Xian^{4***} LI Hu^{1***}

(1. Department of Entomology, College of Plant Protection, China Agricultural University, Beijing 100193, China;

2. Institute of Geography and Oceanography, Nanning Normal University, Nanning 530001, China; 3. Suzhou Tuidongzhe

Biotechnology Co., LTD, Suzhou 215000, China; 4. Station of Plant Protection of Zhaotong City, Zhaotong 657100, China)

Abstract 【Objectives】To evaluate the potential of the assassin bug, *Sycanus croceovittatus*, as a biological control for *Spodoptera frugiperda*. 【Methods】The predatory functional responses of 3rd to 5th-instar nymphs and adults of *Sy. croceovittatus* preying on 3rd and 4th instar *Sp. frugiperda* larvae were tested under laboratory conditions. The effect of population density on the predatory behavior of *Sy. Croceovittatus* was also investigated. 【Results】The predatory functional responses of *Sy. croceovittatus* age classes fitted the Holling II disc equation. According to this model, 3rd to 5th instar nymphs, and female and male adults, of *Sy. croceovittatus* consumed a daily maximum of 23.267, 18.252, 25.432, 59.559 and 51.894 3rd instar *Sp. frugiperda* larvae, respectively, and had a predation capacity of 10.321, 19.219, 21.251, 52.877 and 44.390, respectively. Daily maximum consumption of the above age classes was 5.886, 7.570, 8.584, 22.477 and 10.057, respectively, and the predation capacity for 4th instar *Sp. frugiperda* larvae was 4.861, 7.023, 7.906, 26.410 and 14.402, respectively. Adults females were the most efficient predators. Predation of *Sy. croceovittatus* on *Sp. frugiperda* was affected by both prey and predator density. Predation rate was positively correlated with prey density, search duration was negatively

^{*}资助项目 Supported projects: 昭通市专家工作站 (2019ZTYX03, 2021ZTYX05)

^{**}第一作者 First author, E-mail: 940476083@qq.com

^{***}共同通讯作者 Co-corresponding authors, E-mail: tigerleecau@hotmail.com; ztanxian@163.com

收稿日期 Received: 2021-08-11; 接受日期 Accepted: 2022-04-11

correlated with prey density, and interference was positively correlated with predator density. **[Conclusion]** In general, nymphs and adults of *Sy. croceovittatus* could partly control 3rd and 4th instar *Sp. frugiperda* larvae, but adults were more efficient predators than nymphs.

Key words *Spodoptera frugiperda*; *Sycanus croceovittatus*; predatory functional response; searching effect; interference effect

草地贪夜蛾 *Spodoptera frugiperda*, 属鳞翅目 Lepidoptera 夜蛾科 Noctuidae, 又名秋粘虫, 原产于美洲热带和亚热带地区, 能够危害禾本科、菊科和豆科等 353 种寄主植物, 属于跨国界迁飞性农业重大害虫 (Todd and Poole, 1980; Montezano *et al.*, 2018)。2018 年 5 月于印度希莫加地区首次发现该虫出现于亚洲 (IITA, 2018), 之后相继传入泰国、孟加拉、缅甸、越南和老挝等国, 并于 2018 年底至 2019 年初传入我国云南 (姜玉英等, 2019; 马千里等, 2019)。该虫扩散路线与我国玉米种植带高度重合, 入侵云南西部地区后, 与斜纹夜蛾 *Spodoptera litura* 在冬玉米田混合发生 (吴秋琳等, 2019; 赵胜园等, 2019)。由于草地贪夜蛾具有寄主广泛性、暴食为害性、适生广泛性和迁飞扩散性等特点, 且对多种转基因作物和农药产生了较强抗性, 加之我国南部适宜的气候条件, 草地贪夜蛾可能会成为我国周年循环发生的重大害虫 (Yu, 1991; Carrière *et al.*, 2015; 姜玉英等, 2019), 必将对我国农业生产造成巨大威胁, 亟需研究出有效的控害方法。

利用生物防治可减少化学防治带来的抗药性和环境污染问题, 通过天敌昆虫以虫治虫是控制草地贪夜蛾有效可行的生物防控手段之一 (唐璞等, 2019)。草地贪夜蛾具有丰富的天敌资源, 其中捕食性蝽占目前发现的草地贪夜蛾捕食性天敌昆虫总数的 41%, 具有广阔的开发应用前景 (唐艺婷等, 2019)。为做好草地贪夜蛾的防控工作, 国内许多学者迅速开展了捕食性天敌对草地贪夜蛾的控害研究, 证实了叉角厉蝽 *Eocanthecona furcellata*、蠊蝽 *Arma custos* 和东亚小花蝽 *Orius sauteri* 等捕食性蝽均对草地贪夜蛾有一定的控制作用 (Zhao *et al.*, 2018; 唐敏等, 2019; 王燕等, 2019; 代晓彦等, 2020)。我国农田猎蝽资源较为丰富, 在已知的猎蝽中大

多数为捕食性种类, 以其它昆虫或节肢动物为主要捕食对象 (黄霞, 2007)。黄带犀猎蝽 *Sycanus croceovittatus*, 属于半翅目 Hemiptera 猎蝽科 Reduviidae 真猎蝽亚科 Harpactorinae 犀猎蝽属 *Sycanus*, 广泛分布于我国云南、贵州、香港和广西等省 (自治区), 在国外分布于缅甸和印度等国家 (赵萍, 2008)。作者在室内饲养时发现黄带犀猎蝽若虫和成虫均能够捕食草地贪夜蛾幼虫 (图 1), 同时已有研究发现黄带犀猎蝽在云南玉米地等农田环境中捕食草地贪夜蛾幼虫的现象 (王亚楠等, 2020)。在犀猎蝽属天敌昆虫的捕食能力测定中, 目前仅有黄带犀猎蝽 4 龄和 5 龄若虫以及大红犀猎蝽 *Sycanus falleni* 3 龄若虫和成虫对草地贪夜蛾 3 龄幼虫的研究 (侯峥嵘等, 2020; 王亚楠等, 2020), 尚缺少对天敌虫态和猎物龄期选择更全面的研究。

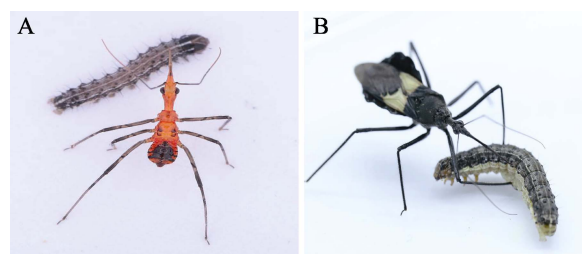


图 1 黄带犀猎蝽 3 龄若虫 (A) 和成虫 (B) 取食草地贪夜蛾幼虫

Fig. 1 *Sycanus croceovittatus* 3rd instar nymph (A) and adult (B) consuming *Spodoptera frugiperda* larva

本研究为进一步探明黄带犀猎蝽对草地贪夜蛾的防控潜力, 在室内研究了黄带犀猎蝽 3-5 龄若虫和雌成虫和雄成虫捕食草地贪夜蛾 3 龄和 4 龄幼虫的功能反应、搜寻效应和自身密度对其捕食作用的干扰反应, 分析黄带犀猎蝽不同龄期若虫、雌成虫和雄成虫对草地贪夜蛾捕食能力的差异, 并探讨猎物密度和天敌密度对黄带犀猎蝽捕食能力的影响, 进而对其控害能力进行综

合评价, 以期为田间防治草地贪夜蛾提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试虫源: 黄带犀猎蝽为室内饲养多代的香港种群与野外采集的广西种群的杂交 1 代, 饲养容器为定制养虫笼 (42 cm×28 cm×20 cm), 喂食黄粉虫 *Tenebrio molitor* 幼虫与斜纹夜蛾幼虫。草地贪夜蛾幼虫由苏州推动者生物科技有限公司提供, 已在室内利用人工饲料饲养 20 代以上。

供试仪器: QHX-250BSH-Ⅲ人工气候培养箱, 上海新苗医疗器械制造有限公司。

1.2 方法

所有供试昆虫饲养于温度为 (25±1) °C, 光照周期为 14L:10D, 湿度为 60%±5% 的人工气候室内; 所有试验于温度 (27±1) °C, 光照周期 14L:10D, 湿度 70%±5% 的人工气候培养箱中进行。本试验设置了空白对照, 在没有黄带犀猎蝽的情况下, 设置草地贪夜蛾 3 龄幼虫密度为 30 头/盒时, 草地贪夜蛾死亡率为 3.333%; 设置草地贪夜蛾 4 龄幼虫密度为 18 头/盒时, 草地贪夜蛾死亡率为 5.556%, 本试验忽略不计。

1.2.1 黄带犀猎蝽对草地贪夜蛾的捕食量 选取当日蜕皮 24 h 内的黄带犀猎蝽 3 龄、4 龄、5 龄若虫及羽化 24 h 内的雌成虫和雄成虫, 分别单头置于 300 mL 透明太空杯(上底直径 7.5 cm、下底直径 5.5 cm、高 9.6 cm)中, 用尼龙纱网(120 目)和橡皮筋封口, 尼龙纱网上放置一块浸湿脱脂棉, 饥饿处理 24 h。根据预实验的结果对每头黄带犀猎蝽设置的草地贪夜蛾 3 龄幼虫密度梯度为 5、10、15、20 和 30 头/盒, 草地贪夜蛾 4 龄幼虫密度梯度为 3、6、9、12 和 18 头/盒, 按设计的密度将草地贪夜蛾 3 龄、4 龄幼虫和 1 头饥饿处理过的黄带犀猎蝽一起放入塑料盒 (22.3 cm×15.3 cm×9.0 cm,) 中, 盒盖上切割下一长方块后用尼龙纱网密封, 盒底部放入适量人工饲料供草地贪夜蛾取食。每个密度为 1 个处理, 每个塑料盒为 1 个重复, 每个处理 10 次重

复。24 h 之后观察并记录黄带犀猎蝽的捕食量。

1.2.2 黄带犀猎蝽对草地贪夜蛾的捕食功能反应 利用功能反应模型方程与 1.2.1 中统计的捕食量进行拟合, 确定黄带犀猎蝽不同龄期若虫和雌、雄成虫对草地贪夜蛾幼虫的捕食功能反应。Holling II 型功能反应模型为 $N_a = aNT_r / (1 + aT_hN)$ (Holling, 1959), 其中 N_a 为天敌捕食量 (头); a 为瞬时攻击率; N 为猎物密度 (头); T_r 为试验时间 (d), 本试验为 1 d; T_h 为处理 1 头猎物所用的时间 (d), 当 $N \rightarrow \infty$ 时, $1/N \rightarrow 0$, 理论日最大捕食量 $N_{a\max} = 1/T_h$ 。

1.2.3 黄带犀猎蝽对草地贪夜蛾的搜寻效应 利用 1.2.2 中 Holling II 型功能反应模型得到的参数瞬时攻击率 a 和处理 1 头猎物所用的时间 T_h , 以及设置的猎物密度 N , 计算出黄带犀猎蝽对草地贪夜蛾 3 龄和 4 龄幼虫的搜寻效应并作图, 搜寻效应模型方程为 $S = a / (1 + aT_hN)$ (丁岩钦, 1994), 其中 S 为搜寻效应。

1.2.4 黄带犀猎蝽自身密度干扰反应 对黄带犀猎蝽进行饥饿处理 24 h (方法同 1.2.1), 将饥饿处理过的黄带犀猎蝽 3-5 龄若虫、雌成虫和雄成虫分别与 20、20、30、40 和 40 头草地贪夜蛾 3 龄幼虫或 12、12、18、24 和 24 头草地贪夜蛾 4 龄幼虫一起放入塑料盒中, 底部放入适量人工饲料供草地贪夜蛾取食, 设置黄带犀猎蝽的密度梯度分别为 1、2、3、4 和 5 头/盒, 每个密度为 1 个处理, 每个塑料盒为 1 个重复, 每个处理重复 5 次。24 h 之后观察并记录黄带犀猎蝽的捕食量。

利用模型方程与统计的捕食量进行拟合, 确定黄带犀猎蝽不同龄期若虫和雌、雄成虫对草地贪夜蛾 3 龄和 4 龄幼虫的干扰反应。干扰反应模型 (Watt 模型) 为 $A = aP^{-b}$ (Watt, 1959), 其中 P 为捕食者密度 (头); A 为平均每只黄带犀猎蝽捕食的猎物数量 (头); a 为天敌的最大捕食量 (头); b 为捕食者之间的干扰系数。

1.3 数据分析

所有数据分析及相关图形绘制均由 Excel 和 GraphPad Prism 6.01 软件完成, 采用 Tukey's 法进行差异显著性检验。Holling II、寻找效应及干

扰模型的拟合及参数利用非线性回归估计。

2 结果与分析

2.1 黄带犀猎蝽对草地贪夜蛾的捕食量

黄带犀猎蝽对草地贪夜蛾的捕食量如表 1 所示, 黄带犀猎蝽 3-5 龄若虫、雌成虫和雄成虫对草地贪夜蛾 3 龄和 4 龄幼虫的日平均捕食量均随猎物密度增加而显著上升, 除草地贪夜蛾 4 龄幼虫密度为 6 头/盒外, 黄带犀猎蝽对草地贪夜蛾 3 龄和 4 龄幼虫的日平均捕食量均为雌成虫最

大, 且黄带犀猎蝽不同龄期若虫、雌成虫和雄成虫对草地贪夜蛾 3 龄幼虫的捕食量普遍高于 4 龄幼虫。在草地贪夜蛾 3 龄幼虫最大密度 30 头/盒时, 黄带犀猎蝽 3-5 龄若虫、雌成虫和雄成虫的日平均捕食量分别为 (9.000±0.447)、(11.100±0.482)、(12.500±0.477)、(18.700±0.367) 和 (17.300±0.597) 头; 在草地贪夜蛾 4 龄幼虫最大密度 18 头/盒时, 黄带犀猎蝽 3-5 龄若虫、雌成虫和雄成虫的日平均捕食量分别为 (4.200±0.490)、(5.000±0.471)、(5.700±0.423)、(10.400±0.581) 和 (6.700±0.496) 头。

表 1 黄带犀猎蝽在不同草地贪夜蛾猎物密度下的日平均捕食量
Table 1 Average daily preying number of *Sycanus croceovittatus* under different prey densities of *Spodoptera frugiperda*

猎物虫态 Stages of prey	猎物密度 (头/盒) Density of prey per box (ind./box)	3 龄若虫 3rd instar nymph	4 龄若虫 4th instar nymph	5 龄若虫 5th instar nymph	雌成虫 Female adult	雄成虫 Male adult
3 龄幼虫 3rd instar larva	5	2.500±0.167 Cb	4.000±0.333 Ca	3.900±0.379 Ca	4.300±0.260 Ea	3.500±0.373 Dab
	10	4.400±0.306 Bc	6.500±0.522 Bab	5.400±0.371 Cbc	8.000±0.333 Da	7.700±0.396 Ca
	15	4.900±0.458 Bc	8.100±0.482 Bb	9.100±0.348 Bab	11.100±0.605 Ca	10.700±0.633 Ba
	20	5.400±0.600 Bc	10.800±0.327 Aab	10.100±0.623 Bb	12.900±0.567 Ba	12.300±0.496 Ba
	30	9.000±0.447 Ac	11.100±0.482 Ab	12.500±0.477 Ab	18.700±0.367 Aa	17.300±0.597 Aa
4 龄幼虫 4th instar larva	3	1.600±0.163 Cc	2.000±0.258 Cbc	2.200±0.133 Cabc	2.800±0.133 Ca	2.400±0.163 Cab
	6	2.900±0.233 Bc	3.000±0.298 BCbc	3.600±0.221 Babc	4.200±0.416 Cab	4.600±0.340 Ba
	9	3.200±0.200 ABc	4.100±0.379 ABc	3.600±0.306 Bc	8.400±0.427 Ba	6.400±0.427 Ab
	12	3.700±0.213 ABc	4.800±0.249 Ac	5.100±0.315 Ac	9.100±0.547 ABa	6.600±0.340 Ab
	18	4.200±0.490 Ac	5.000±0.471 Abc	5.700±0.423 Abc	10.400±0.581 Aa	6.700±0.496 Ab

表中数据为平均数±标准误。同列数据后标有不同大写字母和同行数据后标有不同小写字母分别表示同一捕食者虫态不同猎物密度和同一猎物密度不同捕食者虫态上捕食量差异显著 ($P<0.05$, Tukey's 法检)。

Data in the table are mean ± SE, and followed by the different uppercase letters in the same column or different lowercase letters in the same row indicate significant differences in predacious quantity among different prey densities on the same predator stage or different predator stages under the same prey density at the 0.05 level by Tukey's test.

2.2 黄带犀猎蝽对草地贪夜蛾的捕食功能反应

随着草地贪夜蛾密度的增加, 黄带犀猎蝽不同龄期若虫、雌成虫和雄成虫对草地贪夜蛾 3 龄和 4 龄幼虫的捕食量均不断增加, 但增加幅度逐渐变缓 (图 2)。从表 2 中可以看出, 黄带犀猎蝽不同龄期若虫和雌成虫和雄成虫对草地贪夜

蛾 3 龄幼虫的瞬时攻击率顺序为 4 龄若虫 (1.053) > 雌成虫 (0.888) > 雄成虫 (0.855) > 5 龄若虫 (0.836) > 3 龄若虫 (0.444); 日均最大捕食量顺序为雌成虫 (59.559 头) > 雄成虫 (51.894 头) > 5 龄若虫 (25.432 头) > 3 龄若虫 (23.267 头) > 4 龄若虫 (18.252 头); 控害效能顺序为雌成虫 (52.877) > 雄成虫 (44.390)

> 5 龄若虫 (21.251) > 4 龄若虫 (19.219) > 3 龄若虫 (10.321); 其中雌成虫对草地贪夜蛾 3

龄幼虫的功能反应模型与 Holling II 型拟合度最高, 为 0.957, 3 龄若虫最低, 为 0.811。而黄带

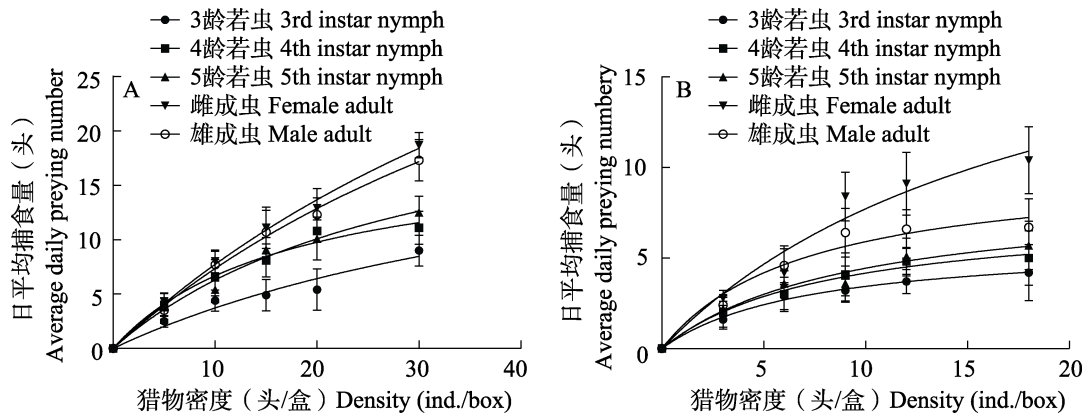


图2 黄带犀猎蝽对草地贪夜蛾 3 龄 (A) 和 4 龄 (B) 龄幼虫的捕食功能反应 (Holling II)

Fig. 2 Predatory functional responses of *Sycanus croceovittatus* to 3rd instar (A) and 4th instar (B) larvae of *Spodoptera frugiperda* (Holling II)

表2 黄带犀猎蝽对草地贪夜蛾 3 龄和 4 龄幼虫的捕食功能反应模型方程 (Holling II)

Table 2 Predatory functional response model equations of *Sycanus croceovittatus* to 3rd instar and 4th instar larvae of *Spodoptera frugiperda* (Holling II)

猎物虫态 Stages of prey	捕食者虫态 Stages of predator	功能反应方程 Functional response equation	瞬时攻击率 (a) Instantaneous attacking rate	处理时间 (T_h)/d Handling time	日均最大捕食量 ($1/T_h$) (头) Daily maximum consumption (ind.)	控害效能 (a/T_h) Predation capacity	拟合度 (R^2)
3 龄幼虫 3rd instar larva	3 龄若虫 3rd instar nymph	$N_a = 0.444N/(1+0.019N)$	0.444	0.043	23.267	10.321	0.811
	4 龄若虫 4th instar nymph	$N_a = 1.053N/(1+0.058N)$	1.053	0.055	18.252	19.219	0.899
	5 龄若虫 5th instar nymph	$N_a = 0.836N/(1+0.033N)$	0.836	0.039	25.432	21.251	0.908
	雌成虫 Female adult	$N_a = 0.888N/(1+0.015N)$	0.888	0.017	59.559	52.877	0.957
	雄成虫 Male adult	$N_a = 0.855N/(1+0.016N)$	0.855	0.019	51.894	44.390	0.939
4 龄幼虫 4th instar larva	3 龄若虫 3rd instar nymph	$N_a = 0.826N/(1+0.140N)$	0.826	0.170	5.886	4.861	0.761
	4 龄若虫 4th instar nymph	$N_a = 0.928N/(1+0.123N)$	0.928	0.132	7.570	7.023	0.769
	5 龄若虫 5th instar nymph	$N_a = 0.921N/(1+0.107N)$	0.921	0.117	8.584	7.906	0.823
	雌成虫 Female adult	$N_a = 1.175N/(1+0.052N)$	1.175	0.044	22.477	26.410	0.867
	雄成虫 Male adult	$N_a = 1.432N/(1+0.142N)$	1.432	0.099	10.057	14.402	0.829

犀猎蝽不同龄期若虫、雌成虫和雄成虫对草地贪夜蛾 4 龄幼虫的瞬时攻击率顺序为雄成虫 (1.432) > 雌成虫 (1.175) > 4 龄若虫 (0.928) > 5 龄若虫 (0.921) > 3 龄若虫 (0.826); 日均最大捕食量顺序为雌成虫 (22.477 头) > 雄成虫 (10.057 头) > 5 龄若虫 (8.584 头) > 4 龄若虫 (7.570 头) > 3 龄若虫 (5.886 头); 控害效能顺序同样为雌成虫 (26.410) > 雄成虫 (14.402) > 5 龄若虫 (7.906) > 4 龄若虫 (7.023) > 3 龄若虫 (4.861); 雌成虫对草地贪夜蛾 4 龄幼虫的功能反应模型与 Holling II 型拟合度最高, 为 0.867, 3 龄若虫最低, 为 0.761。

2.3 黄带犀猎蝽对草地贪夜蛾的搜寻效应

从图 3 可以看出, 黄带犀猎蝽不同龄期若虫、雌成虫和雄成虫对草地贪夜蛾 3 龄和 4 龄幼

虫的搜寻效应均随猎物密度的增加而下降。在草地贪夜蛾 3 龄幼虫最大密度 30 头/盒时, 黄带犀猎蝽 3-5 龄若虫、雌成虫和雄成虫的搜寻效应分别为 0.282、0.386、0.421、0.613 和 0.572; 在草地贪夜蛾 4 龄幼虫最大密度 18 头/盒时, 搜寻效应分别为 0.234、0.289、0.314、0.605 和 0.402。其中猎物密度分别为 19.068 (4 龄若虫)、20.363 (5 龄若虫)、51.733 (雌成虫) 和 44.375 (雄成虫) 头/盒时, 为黄带犀猎蝽对草地贪夜蛾 3 龄幼虫搜寻效应能达到 50% 以上的最大密度; 猎物密度分别为 4.657 (3 龄若虫)、6.959 (4 龄若虫)、7.869 (5 龄若虫)、25.961 (雌成虫) 和 13.126 (雄成虫) 头/盒时, 为黄带犀猎蝽对草地贪夜蛾 4 龄幼虫搜寻效应能达到 50% 以上的最大密度。

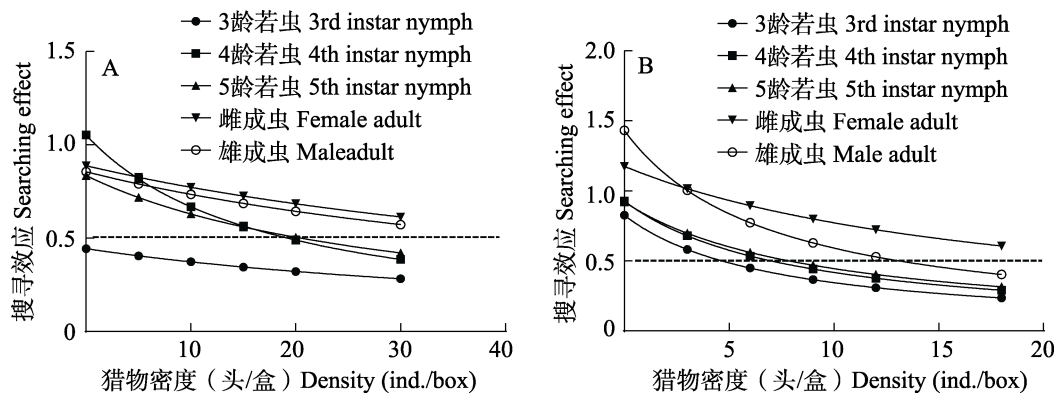


图 3 黄带犀猎蝽对草地贪夜蛾 3 龄 (A) 和 4 龄 (B) 幼虫的搜寻效应
Fig. 3 Searching effect of *Synanus croceovittatus* to 3rd instar (A) and 4th instar (B) larvae of *Spodoptera frugiperda*

2.4 黄带犀猎蝽自身密度干扰反应

从表 3 中可以看出, 单头黄带犀猎蝽对草地贪夜蛾 3 龄和 4 龄幼虫的日平均捕食量随着天敌密度的增加而降低, 且均存在显著差异 ($P < 0.05$), 其中黄带犀猎蝽雌成虫的日平均捕食量下降趋势最大。当天敌密度为 1 头/盒时, 黄带犀猎蝽 3-5 龄若虫、雌成虫和雄成虫对草地贪夜蛾 3 龄幼虫捕食量分别为 (5.400 ± 0.678)、(10.800 ± 0.490)、(13.600 ± 0.510)、(27.400 ± 1.327) 和 (23.200 ± 0.800) 头, 但天敌密度为 5 头/盒时, 单头黄带犀猎蝽的日平均捕食量分别降为 (3.400 ± 0.127)、(2.760 ± 0.417)、

(6.000 ± 0.000)、(6.040 ± 0.591) 和 (5.000 ± 0.456) 头; 当天敌密度为 1 头/盒时, 黄带犀猎蝽 3-5 龄若虫、雌成虫和雄成虫对草地贪夜蛾 4 龄幼虫捕食量分别为 (3.600 ± 0.400)、(4.800 ± 0.374)、(5.800 ± 0.374)、(13.800 ± 1.319) 和 (9.600 ± 0.400) 头, 但天敌密度为 5 头/盒时, 单头黄带犀猎蝽的日平均捕食量分别降为 (1.520 ± 0.186)、(1.760 ± 0.147)、(3.240 ± 0.194)、(4.040 ± 0.271) 和 (3.960 ± 0.440) 头。Watt 模型可以用来描述捕食功能反应过程中的自身密度干扰情况, 拟合 Watt 模型结果表明, 黄带犀猎蝽捕食草地贪夜蛾 3 龄幼虫的自身密度干扰

表 3 不同密度黄带犀猎蝽对草地贪夜蛾 3 龄和 4 龄幼虫的日平均捕食量
Table 3 Average daily preying number of *Sycanus croceovittatus* at different densities to 3rd instar and 4th instar larvae of *Spodoptera frugiperda*

猎物虫态 Stages of prey	捕食者虫态 Stages of predator	猎物密度 (头/盒) Density of prey (ind./box)	捕食者密度 (头/盒) Density of predator (head/box)				
			1	2	3	4	5
3 龄幼虫 3rd instar larva	3 龄若虫 3rd instar nymph	20	5.400±0.678 a	4.200±0.583 ab	4.133±0.430 ab	3.050±0.215 b	3.400±0.127 b
	4 龄若虫 4th instar nymph	20	10.800±0.490 a	6.300±0.644 b	3.867±0.646 c	3.300±0.374 c	2.760±0.417 c
	5 龄若虫 5th instar nymph	30	13.600±0.510 a	11.200±0.464 b	9.400±0.400 c	7.450±0.050 d	6.000±0.000 d
	雌成虫 Female adult	40	27.400±1.327 a	19.100±0.245 b	7.733±0.499 c	7.650±0.281 c	6.040±0.591 c
	雄成虫 Male adult	40	23.200±0.800 a	18.800±0.374 b	9.333±0.863 c	8.950±0.509 c	5.000±0.456 d
4 龄幼虫 4th instar larva	3 龄若虫 3rd instar nymph	12	3.600±0.400 a	2.400±0.187 b	1.600±0.125 b	1.450±0.094 b	1.520±0.186 b
	4 龄若虫 4th instar nymph	12	4.800±0.374 a	2.700±0.436 b	2.467±0.133 b	1.750±0.112 b	1.760±0.147 b
	5 龄若虫 5th instar nymph	18	5.800±0.374 a	4.100±0.332 b	3.867±0.249 b	3.700±0.094 b	3.240±0.194 b
	雌成虫 Female adult	24	13.800±1.319 a	10.300±0.123 b	7.733±0.163 b	4.650±0.332 c	4.040±0.271 c
	雄成虫 Male adult	24	9.600±0.400 a	6.200±0.752 b	6.133±0.170 b	5.500±0.137 bc	3.960±0.440 c

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捕食者同一虫态不同密度的日平均捕食量经 Tukey's 法检验在 $P<0.05$ 水平差异显著。

Data in the table are mean ± SE, and followed by the different lowercase letters in the same row indicate significant differences in average daily preying number among different densities on the same stage of predator at 0.05 level by Tukey's test.

系数呈现出雌成虫 (0.905) > 4 龄若虫 (0.862) > 雄成虫 (0.744) > 5 龄若虫 (0.439) > 3 龄若虫 (0.319); 捕食草地贪夜蛾 4 龄幼虫的自身密度干扰系数呈现出雌成虫 (0.670) > 4 龄若虫 (0.668) > 3 龄若虫 (0.624) > 雄成虫 (0.467) > 5 龄若虫 (0.349)。黄带犀猎蝽对草地贪夜蛾 3 龄和 4 龄幼虫的最大捕食量同样呈现出雌成虫 > 雄成虫 > 5 龄若虫 > 4 龄若虫 > 3 龄若虫 (表 4)。

3 讨论

本研究结果表明, 黄带犀猎蝽 3-5 龄若虫、雌成虫和雄成虫对草地贪夜蛾 3 龄和 4 龄幼虫的捕食量均随着草地贪夜蛾的密度增加整体呈上

升趋势, 且对草地贪夜蛾 3 龄幼虫的捕食量普遍高于 4 龄幼虫, 捕食量的差异与草地贪夜蛾幼虫的体积和虫体的营养成分密切相关, 分析其原因可能是由于草地贪夜蛾 3 龄幼虫体积较小, 黄带犀猎蝽需要捕食较多虫量才能满足其生长发育需要, 4 龄幼虫体积较大且抗逆性较强, 所以捕食量较小。

通过拟合 Holling II 模型能够得出瞬时攻击率和处理时间这两个有意义的生物学参数, 各捕食功能反应均拟合 Holling II 功能反应模型, 与叉角厉蝽和黄带犀猎蝽的捕食功能反应结果相似 (唐敏等, 2019; 王亚楠等, 2020)。本研究结果表明, 在黄带犀猎蝽不同龄期若虫中 5 龄若

表 4 黄带犀猎蝽捕食草地贪夜蛾 3 龄和 4 龄幼虫的 Watt 模型方程
Table 4 Watt model equations of *Sycanus croceovittatus* to 3rd instar and 4th instar larvae of *Spodoptera frugiperda*

猎物虫态 Stages of prey	捕食者虫态 Stages of predator	Watt 模型方程 Watt model equation	最大捕食量 (头) Maximum predation capacity (ind.)	自身密度干扰系数 Interference factor	拟合度 R-squared (R^2)
3 龄幼虫 3rd instar larva	3 龄若虫 3rd instar nymph	$A=5.385P^{-0.319}$	5.385	0.319	0.899
	4 龄若虫 4th instar nymph	$A=10.859P^{-0.862}$	10.859	0.862	0.995
	5 龄若虫 5th instar nymph	$A=14.069P^{-0.439}$	14.069	0.439	0.935
	雌成虫 Female adult	$A=28.279P^{-0.905}$	28.279	0.905	0.929
	雄成虫 Male adult	$A=24.439P^{-0.744}$	24.439	0.744	0.883
4 龄幼虫 4th instar larva	3 龄若虫 3rd instar nymph	$A=3.589P^{-0.624}$	3.589	0.624	0.972
	4 龄若虫 4th instar nymph	$A=4.726P^{-0.668}$	4.726	0.668	0.975
	5 龄若虫 5th instar nymph	$A=5.663P^{-0.349}$	5.663	0.349	0.952
	雌成虫 Female adult	$A=14.337P^{-0.670}$	14.337	0.670	0.933
	雄成虫 Male adult	$A=9.463P^{-0.467}$	9.463	0.467	0.929

虫对草地贪夜蛾 3 龄和 4 龄幼虫的日均最大捕食量较大,可能是由于 5 龄若虫即将羽化,需要储存更多的物质和能量用于生长发育,而雌成虫和雄成虫之间雌成虫的日均最大捕食量较大,可能因为雌成虫为了产卵需要补充更多营养。与其它捕食性蝽相比,黄带犀猎蝽雌成虫对草地贪夜蛾 3 龄幼虫的日均最大捕食量 (59.559 头) 高于大红犀猎蝽 (47.619 头) 和益蝽 *Picromerus lewisi* 雌成虫 (58.824 头),但略低于蠋蝽 (59.7 头) 和叉角厉蝽雌成虫 (59.88 头) (王燕等, 2019; 侯峥嵘等, 2020; 潘应拿等, 2020; 唐艺婷, 2020)。在黄带犀猎蝽对草地贪夜蛾 4 龄幼虫的捕食功能反应中同样为雌成虫日均最大捕食量最大 (22.477 头), 低于叉角厉蝽 (49.260 头)、益蝽 (45.455 头) 和蠋蝽雌成虫 (23.400 头) 对草地贪夜蛾 4 龄幼虫的捕食量 (王燕等, 2019; 潘应拿等, 2020; 唐艺婷, 2020)。瞬时攻击率与处理时间之比可用来衡量天敌对害虫的控害效能, 即 a/T_h 值越大, 表明天敌控害能力越强 (周集中和陈常铭, 1986)。在此捕食功能反应中, 黄带犀猎蝽雌成虫对草地贪夜蛾 3 龄和 4 龄幼虫的控害效能分别为 52.877 和 26.410, 优于其它虫态, 东亚小花蝽雌成虫对草地贪夜蛾 1 龄幼虫 (15.853 和大红犀猎蝽雌成虫对草地贪夜蛾 3 龄幼虫 (34.143) 的控害效能同样优于其它虫态,

但低于黄带犀猎蝽 (代晓彦等, 2020; 侯峥嵘等, 2020)。

搜寻效应是捕食者在捕食过程中对猎物攻击的一种行为效应 (范悦莉等, 2019), 通过对黄带犀猎蝽搜寻效应的研究发现, 黄带犀猎蝽不同龄期若虫、雌成虫和雄成虫对草地贪夜蛾 3 龄和 4 龄幼虫的搜寻效应均随猎物密度的增加而降低。除其 3 龄若虫对草地贪夜蛾 3 龄幼虫的搜寻效应低于 50% 外, 通过分析搜寻效应结果推测出黄带犀猎蝽与草地贪夜蛾 3 龄幼虫的室内益害比不应低于 1 : 19.068 (4 龄若虫)、1 : 20.363 (5 龄若虫)、1 : 51.733 (雌成虫) 和 1 : 44.375 (雄成虫); 与草地贪夜蛾 4 龄幼虫的室内益害比不应低于 1 : 4.657 (3 龄若虫)、1 : 6.959 (4 龄若虫)、1 : 7.869 (5 龄若虫)、1 : 25.961 (雌成虫) 和 1 : 13.126 (雄成虫), 在此范围内黄带犀猎蝽对草地贪夜蛾的搜寻效应能达到 50% 以上, 且益害比越大, 防治时间越早, 防治的效果越好。

当空间和猎物数量一定时, 捕食过程中还存在捕食者种内自身密度干扰, 干扰效应随天敌个体间不同程度的互相干扰和分摊竞争作用增强而增强 (张安盛等, 2007; 鄧军锐等, 2011)。利用 Watt 模型能较好地反映出捕食者的干扰效应, 黄带犀猎蝽不同龄期若虫、雌成虫和雄成虫

在取食草地贪夜蛾时,个体间也存在自身密度干扰反应,且自身密度越大,干扰也越大,单个捕食者的捕食量随天敌密度的增加而降低。陈然等(2015)及侯峥嵘等(2020)利用 Hassell 模型发现叉角厉蝽和大红犀猎蝽的干扰反应研究也有类似结果。黄带犀猎蝽捕食草地贪夜蛾幼虫时雌成虫的自身密度干扰系数大于其它虫态,捕食草地贪夜蛾 3 龄和 4 龄幼虫干扰系数分别为 0.905 和 0.670,同样也大于益蝽雌成虫捕食斜纹夜蛾(0.664)、甜菜夜蛾 *Spodoptera exigua* 3 龄幼虫(0.395)和小菜蛾 *Plutella xylostella* 4 龄幼虫(0.622)(唐艺婷,2020),表明黄带犀猎蝽更倾向于单独捕食。因此在进行田间释放利用时,可采用分期分批分散释放天敌的方式,把虫害严重区域作为重点释放区,以正常发挥黄带犀猎蝽的捕食效能,达到把害虫种群长期控制在一个较低水平的目标。

在田间开展生物防治时,黄带犀猎蝽对草地贪夜蛾的捕食作用除了受到猎物密度和自身密度影响外,还受自然界中温湿度、寄主植物、其它生物和一些不稳定气候因子等影响,因此应结合草地贪夜蛾的种群动态,充分考虑黄带犀猎蝽释放量和释放方式,才能达到较好的防治效果。为充分发挥天敌的防控效能,下一步可研究黄带犀猎蝽的人工饲料、黄带犀猎蝽和寄生性天敌联合释放、以及黄带犀猎蝽和生物农药联合使用等应用技术。此外,黄带犀猎蝽分布在我国南方地区,是否能在北方玉米区生存,需要通过人工释放黄带犀猎蝽进一步探究其对草地贪夜蛾的防控潜力。

参考文献 (References)

- Carrière Y, Crickmore N, Tabashnik BE, 2015. Optimizing pyramided transgenic Bt crops for sustainable pest management. *Nature Biotechnology*, 33(2): 161–168.
- Chen R, Liang GW, Zhang ZY, Zeng R, Xian JD, 2015. The functional response of *Cahtheconidea furcellata* (Hemiptera: Asopinae) to *Spodoptera litura* (Lepidoptera: Noctuidae). *Journal of Environmental Entomology*, 37(2): 401–406. [陈然, 梁广文, 张拯研, 曾嵘, 洗继东, 2015. 叉角厉蝽对斜纹夜蛾的捕食功能反应. 环境昆虫学报, 37(2): 401–406.]
- Dai XY, Wang Y, Zhai YF, Zhou H, Li LL, Zheng L, Chen H, 2020. Predation capability of *Orius sauteri* (Hemiptera: Anthracoridae) on the 1st instar larvae of *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae). *Acta Entomologica Sinica*, 63(5): 649–654. [代晓彦, 王瑜, 翟一凡, 周浩, 李丽莉, 郑礼, 陈浩, 2020. 东亚小花蝽对草地贪夜蛾 1 龄幼虫的捕食能力. 昆虫学报, 63(5): 649–654.]
- 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.]
- Fan YL, Gu XH, Xian JD, Chen XM, Lu YY, Zhang LM, Zhou WB, 2019. Functional response of *Eocanthecona furcellata* (Hemiptera: Pentatomidae) to *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae). *Journal of Environmental Entomology*, 41(6): 1175–1180. [范悦莉, 谷星慧, 洗继东, 陈雪梅, 陆永跃, 张立猛, 周文兵, 2019. 叉角厉蝽对草地贪夜蛾的捕食功能反应. 环境昆虫学报, 41(6): 1175–1180.]
- Holling CS, 1959. Some characteristics of simple types of predation and parasitism. *The Canadian Entomologist*, 91(7): 385–398.
- Hou ZY, Sun BB, Liu XJ, Yin Z, Li JP, Guo XH, 2020. Predatory functional response of assassin bug *Sycanus falleni* to the larvae of fall armyworm *Spodoptera frugip*. *Journal of Plant Protection*, 47(4): 852–858. [侯峥嵘, 孙贝贝, 刘先建, 尹哲, 李金萍, 郭喜红, 2020. 大红犀猎蝽对草地贪夜蛾 3 龄幼虫捕食功能反应. 植物保护学报, 47(4): 852–858.]
- Huang X, 2007. Reduviidae insect taxonomic study of Guangxi province. Master dissertation. Guilin: Guangxi Normal University. [黄霞, 2007. 广西猎蝽科昆虫分类研究. 硕士学位论文. 桂林: 广西师范大学.]
- IITA, 2018. Fall armyworm has reached the Indian subcontinent. *Crop Protection*, 114: 228–230.
- Jiang YY, Liu J, Zhu XM, 2019. Analysis on the occurrence and future trend of *Spodoptera frugiperda* invasion in China. *China Plant Protection*, 39(2): 33–35. [姜玉英, 刘杰, 朱晓明, 2019. 草地贪夜蛾侵入我国的发生动态和未来趋势分析. 中国植保导刊, 39(2): 33–35.]
- Ma QL, Wu JYZ, Song ZX, Wang RF, Wang YQ, Lv YY, Liu BJ, Cheng DM, Xu HH, Zhang ZX, 2019. Comparative analysis of the harm trend of *Spodoptera frugiperda* in China with that in the United States. *Journal of Environmental Entomology*, 41(5): 929–936. [马千里, 吴吉英子, 宋紫霞, 王瑞飞, 王勇庆, 吕怡颖, 刘本菊, 程东美, 徐汉虹, 张志祥, 2019. 与美国对比分析草地贪夜蛾在我国的危害发展趋势. 环境昆虫学报, 41(5): 929–936.]
- Montezano DG, Sosa-Gómez DR, Paula-Moraes SV, Sousa-Silva JC,

- Hunt TE, Specht A, Roque-Specht VF, Peterson JA, 2018. Host plants of *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae) in the Americas. *African Entomology*, 26(2): 286–300.
- Pan YN, Yao MY, Fu D, Guo F, Qin R, Jiang L, Chen WL, 2020. Predation effects of *Eocanthecona furcellata* adults against *Spodoptera frugiperda* larvae. *Journal of Mountain Agriculture and Biology*, 39(3): 23–27. [潘应拿, 姚明勇, 付迪, 郭峰, 覃韧, 姜霖, 陈文龙, 2020. 叉角厉蝽成虫对草地贪夜蛾幼虫的捕食作用研究. 山地农业生物学报, 39(3): 23–27.]
- Tang M, Kuang ZL, Li ZY, Lu YY, Chen KW, Liu GH, 2019. Functional response of *Eocanthecona furcellata* (Wolff) to the larvae of *Spodoptera frugiperda* (J. E. Smith). *Journal of Environmental Entomology*, 41(5): 979–985. [唐敏, 邝昭琅, 李子园, 陆永跃, 陈科伟, 刘光华, 2019. 叉角厉蝽对草地贪夜蛾幼虫的捕食功能反应. 环境昆虫学报, 41(5): 979–985.]
- Tang P, Wang ZZ, Wu Q, Liu YQ, Shi M, Huang JH, Chen XX, 2019. The natural enemies of the fall armyworm *Spodoptera frugiperda* and their application in biological control programs. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 56(3): 370–381. [唐璞, 王知知, 吴琼, 刘银泉, 时敏, 黄健华, 陈学新, 2019. 草地贪夜蛾的天敌资源及其生物防治中的应用. 应用昆虫学报, 56(3): 370–381.]
- Tang YT, Wang MQ, Li YY, Liu CX, Mao JJ, Chen HY, Zhang LS, 2019. Research advances of predatory bugs to *Spodoptera frugiperda*. *Chinese Journal of Biological Control*, 35(5): 682–690. [唐艺婷, 王孟卿, 李玉艳, 刘晨曦, 毛建军, 陈红印, 张礼生, 2019. 捕食性蝽防治草地贪夜蛾的研究进展. 中国生物防治学报, 35(5): 682–690.]
- Tang YT, 2020. Study on potential of a novel natural enemy insect *Picromerus lewisi* Scott in biological control. Master dissertation. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences. [唐艺婷, 2020. 一种新天敌——益蝽的生物防治潜能研究. 硕士学位论文. 北京: 中国农业科学院.]
- Todd EL, Poole RW, 1980. Keys and illustrations for the armyworm moths of the noctuid genus *Spodoptera* Guenée from the Western Hemisphere. *Annals of the Entomological Society of America*, 73(6): 722–738.
- Wang Y, Zhang HM, Yin YQ, Li XY, Zhao XQ, Tang YT, Wang MQ, Chen AD, Chen FS, Zhang LS, 2019. Predation of adult of *Arma chinensis* to larvae of *Spodoptera frugiperda*. *Plant Protection*, 45(5): 42–46. [王燕, 张红梅, 尹艳琼, 李向永, 赵雪晴, 唐艺婷, 王孟卿, 湛爱东, 陈福寿, 张礼生, 2019. 蝽成虫对草地贪夜蛾不同龄期幼虫的捕食能力. 植物保护, 45(5): 42–46.]
- Wang YN, Zhao SY, He YZ, Wu KM, Li GP, Feng HQ, 2020. Predation of the larvae of *Spodoptera frugiperda* (J. E. Smith) by *Sycanus croceovittatus* Dohrn. *Chinese Journal of Biological Control*, 36(4): 525–529. [王亚楠, 赵胜园, 何运转, 吴孔明, 李国平, 封洪强, 2020. 黄带犀猎蝽对草地贪夜蛾幼虫的捕食作用. 中国生物防治学报, 36(4): 525–529.]
- Watt K, 1959. A mathematical model for the effect of densities of attacked and attacking species on the number attacked. *The Canadian Entomologist*, 91(3): 129–144.
- Wu QL, Jiang YY, Wu KM, 2019. Analysis of migration routes of the fall armyworm *Spodoptera frugiperda* (J. E. Smith) from Myanmar to China. *Plant Protection*, 45(2): 1–6. [吴秋琳, 姜玉英, 吴孔明, 2019. 草地贪夜蛾缅甸虫源迁入中国的路径分析. 植物保护, 45(2): 1–6.]
- Yu SJ, 1991. Insecticide resistance in the fall armyworm, *Spodoptera frugiperda* (J. E. Smith). *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 39(1): 84–91.
- Zhang AS, Yu Y, Li LL, Zhang SC, 2007. Predation of *Orius sauteri* adult on adults of western flower thrips (*Frankliniella occidentalis*), an invasive insect pest. *Acta Ecologica Sinica*, 27(5): 1903–1909. [张安盛, 于毅, 李丽莉, 张思聪, 2007. 东亚小花蝽 (*Orius sauteri*) 成虫对入侵害虫西花蓟马 (*Frankliniella occidentalis*) 成虫的捕食作用. 生态学报, 27(5): 1903–1909.]
- Zhao P, 2008. Taxonomic study on the subfamily Harpactorinae (Heteroptera: Reduviidae) from China. Doctoral dissertation. Beijing: China Agricultural University. [赵萍, 2008. 中国真猎蝽亚科分类研究(异翅亚目: 猎蝽科). 博士学位论文. 北京: 中国农业大学.]
- Zhao Q, Wei JF, Bu WJ, Liu GQ, Zhang HF, 2018. Synonymize *Arma chinensis* as *Arma custos* based on morphological, molecular and geographical data. *Zootaxa*, 4455(1): 161–176.
- Zhao SY, Luo QM, Sun XX, Yang XM, Jiang YY, Wu KM, 2019. Comparison of morphological and biological characteristics between *Spodoptera frugiperda* and *Spodoptera litura*. *China Plant Protection*, 39(5): 26–35. [赵胜园, 罗倩明, 孙小旭, 杨现明, 姜玉英, 吴孔明, 2019. 草地贪夜蛾与斜纹夜蛾的形态特征和生物学习性比较. 中国植保导刊, 39(5): 26–35.]
- Zhi JR, Zheng SS, Zhang CR, Liu FJ, 2011. The predation of *Orius similis* to *Frankliniella occidentalis* and *Aphis craccivora*. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 48(3): 573–578. [郅军锐, 郑珊珊, 张昌容, 刘丰姣, 2011. 南方小花蝽对西花蓟马和蚕豆蚜的捕食作用. 应用昆虫学报, 48(3): 573–578.]
- Zhou JZ, Chen CM, 1986. Study on predation of *Lycosa pseudoannulata* (Boes et Str.) on *Nilaparvata lugens* Stal and its simulation model. *Chinese Journal of Biological Control*, 2(1): 2–9. [周集中, 陈常铭, 1986. 拟环纹狼蛛对褐飞虱的捕食作用及其模拟模型的研究 I. 功能反应. 生物防治通报, 2(1): 2–9.]