

食蚜瘿蚊对茛苳指管蚜的捕食作用*

朱绪立^{1**} 苟剑渝² 吴慧子² 黄纯杨²

杨茂发^{1,3} 杨 相^{2***} 于晓飞^{1***}

(1. 贵州省烟草品质研究重点实验室, 贵州大学烟草学院, 贵阳 550025;

2. 贵州省烟草公司遵义市公司, 遵义 564200; 3. 贵州大学昆虫研究所,

贵州山地农业病虫害重点实验室, 贵阳 550025)

摘 要 【目的】为明确食蚜瘿蚊 *Aphidoletes aphidimyza* 对茛苳指管蚜 *Uroleucon formosanum* 的控害潜能。【方法】本研究在室内条件下测定食蚜瘿蚊对茛苳指管蚜的捕食功能反应, 并利用室外笼罩法模拟食蚜瘿蚊对茛苳指管蚜的田间控害潜能。【结果】食蚜瘿蚊 3 龄幼虫对 1-5 龄茛苳指管蚜的捕食功能反应符合 Holling II 模型, 对 1-2 龄茛苳指管蚜的瞬时攻击率 (a) 和捕食能力 (a/T_h) 均最高, 分别为 0.466 和 12.90; 搜寻效应随茛苳指管蚜密度的增大而下降; 食蚜瘿蚊 3 龄幼虫对 1-5 龄茛苳指管蚜的日均捕食量随自身密度的增加而增大, 但捕食作用率随其密度的增加而逐渐降低, 其种内干扰方程分别为: $E_{1-2}=0.304P^{-1.148}$ 、 $E_3=0.226P^{-1.155}$ 、 $E_4=0.177P^{-1.094}$ 、 $E_5=0.128P^{-1.028}$; 在捕食偏好选择中, 食蚜瘿蚊 3 龄幼虫对茛苳指管蚜 1-2 龄及 3 龄若蚜的捕食选择率分别为 43% 和 30%; 室外笼罩试验中, 释放食蚜瘿蚊蛹防治茛苳指管蚜的理想防效益害比为 1:10 和 1:15, 且释放后的第 6 天为防效最佳时期。【结论】食蚜瘿蚊对茛苳指管蚜具有较好的防控潜能。

关键词 食蚜瘿蚊; 茛苳指管蚜; 捕食功能; 室外笼罩; 生物防治

Predation effect of *Aphidoletes aphidimyza* on *Uroleucon formosanum*

ZHU Xu-Li^{1**} GOU Jian-Yu² WU Hui-Zi² HUANG Chun-Yang²
YANG Mao-Fa^{1,3} YANG Xiang^{2***} YU Xiao-Fei^{1***}

(1. Key Laboratory of Tobacco Quality Research in Guizhou Province, College of Tobacco Science, Guiyang 550025,

China; 2. Zunyi Branch Company of Guizhou Tobacco Company, Zunyi 564200, China;

3. Institute of Entomology, Guizhou University; Guizhou Provincial Key Laboratory for Agricultural Pest Management of the Mountainous Region, Guiyang 550025, China)

Abstract 【Aim】This study aims to determine the control potential of *Aphidoletes aphidimyza* against *U. formosanum*. 【Methods】The predatory behavior of *A. aphidimyza* towards *U. formosanum* was evaluated in a controlled laboratory environment. Additionally, the control potential of *A. aphidimyza* against *U. formosanum* in a field setting was simulated using a covered outdoor method. 【Results】The predatory functional response of *A. aphidimyza* 3rd instar larvae against 1st-5th instar *U. formosanum* was consistent with the Holling II model. The highest instantaneous attack rate (a) and predatory ability (a/T_h) were observed against 1st and 2nd instar *U. formosanum* were the highest, with values of 0.466 and 12.90, respectively. Search effect decreased with increasing *U. formosanum* density. As the density of 3rd instar larvae *A. aphidimyza* increased, there was an increase in the daily average intake of 1st to 5th instar *U. formosanum*. However, the predation rate gradually

*资助项目 Supported projects: 贵州省烟草公司遵义市公司成果转化项目 (2020xm05, 2021520300200081); 贵州省烟草公司遵义市公司重点研发项目 (2022XM11, 2022520300270188); 贵州省科技创新人才团队 (黔科合平台-CXTD[2021]004); 贵州省烟草公司遵义市公司科技项目 (遵烟计[2016]1号); 贵州大学人才引进项目 (贵大人基合字[2016]70号)

**第一作者 First author, E-mail: xulizhu2023@163.com

***通讯作者 Co-corresponding authors, E-mail: anjingfly2009@163.com; yx_0416@126.com

收稿日期 Received: 2023-06-07; 接受日期 Accepted: 2023-11-02

decreased with increasing *A. aphidimyza* density. The intraspecific interference equations were: $E_{1-2}=0.304P^{-1.148}$; $E_3=0.226P^{-1.155}$; $E_4=0.177P^{-1.094}$; $E_5=0.128P^{-1.028}$. With regards to predation preference selection, *A. aphidimyza* 3rd instar larvae had a predation selection rate of 43% and 30% for 1st-2nd instar and 3rd instar *U. formosanum*, respectively. In the covered outdoor experiment, the ideal control benefit-to-harm ratio of releasing *A. aphidimyza* pupae for the control of *U. formosanum* was 1 : 10 and 1 : 15, with the optimal control effect period occurring on the 6th day following *A. aphidimyza* release. **[Conclusion]** *A. aphidimyza* has good prevention and control potential against *U. formosanum*.

Key words *Aphidoletes aphidimyza*; *Uroleucon formosanum*; predatory functional; cage covering experiment; biological control

莴苣指管蚜 *Uroleucon formosanum* (Takahashi, 1921) 属半翅目蚜科 (Homoptera: Aphidinea), 体色呈红褐色至紫红色, 是莴苣上的重要害虫之一 (黄晓磊, 2013)。寄主植物除莴苣之外, 还有菠菜、蒲公英、苦菜等植物, 为东亚地区常见物种, 在我国大部分地区均有分布 (Martin and Brown, 2008; Choi *et al.*, 2019; Kanturski and Lee, 2020)。莴苣指管蚜常集群分布于植物叶背、嫩梢及花序, 并通过刺吸式口器吸取组织汁液, 使叶片畸形扭曲, 降低其产量与质量, 造成严重的经济损失 (Jing *et al.*, 2022)。然而, 目前针对蔬菜上蚜虫的防控主要依靠化学防治, 这对蔬菜质量和生态环境造成了较大风险 (唐平华等, 2013)。生物防治具有安全且能持续控制害虫等优点, 是害虫综合防治的重要措施, 具有广阔的发展空间 (雷仲仁等, 2016), 而利用生防天敌控制莴苣指管蚜的研究尚未见报道。因此, 找到对莴苣指管蚜防控效果好的天敌资源, 对我国蔬菜作物的安全生产具有重要意义。

食蚜瘿蚊 *Aphidoletes aphidimyza* (Rondani) 属双翅目瘿蚊科 (Diptera: Cecidomyiidae)。属于捕食性天敌昆虫, 具有分布广、生长周期短、繁殖能力强、控害范围大等优点 (Markkula *et al.*, 1979; 于晓飞等, 2018)。据统计其幼虫取食蚜虫种类达 85 种 (Boulanger *et al.*, 2019)。蚜虫数量充分的条件下, 单头食蚜瘿蚊幼虫可捕食蚜虫 20-60 头; 随着幼虫龄期的增加, 其捕食量随之增大, 以 3 龄幼虫的捕食量最大 (林清彩等, 2017; 商胜华等, 2019)。其捕食机制是利用上颚刺穿蚜虫的体壁, 并分泌大量毒素以猎杀蚜虫, 对蚜虫具有极好的防治效果 (叶长青, 1990; 王秀琴等, 2020)。相较于其他蚜虫天敌, 食蚜瘿蚊繁殖技术成熟, 已实现工厂化生产, 已被广

泛应用于烟草 (商胜华等, 2019)、蔬菜 (程洪坤等, 1991) 等蚜虫的防治。然而国内外尚未见关于食蚜瘿蚊对莴苣指管蚜的控害潜能的研究。本文系统开展了食蚜瘿蚊 3 龄幼虫对不同龄期莴苣指管蚜的捕食功能研究, 以期为全面评价其防控潜能提供科学依据, 为田间释放应用奠定基础。

1 材料与方法

1.1 供试虫源

莴苣指管蚜于 2022 年 11 月采自贵州省农业科学院蔬菜种植基地, 寄主为莴苣 (“红尖叶”), 带回室内用莴苣饲养 5 代后供试。食蚜瘿蚊由贵州大学天敌扩繁中心提供, 并用莴苣指管蚜连续饲养多代后供试。饲养条件均为: 温度 (25±1) °C, 相对湿度 65%±5%, 光周期 14L : 10D。

1.2 试验方法

1.2.1 食蚜瘿蚊 3 龄幼虫对不同龄期莴苣指管蚜的捕食功能反应 试验在培养皿 (d=60 mm; h=15 mm) 内进行, 将直径为 50 mm 的滤纸覆盖培养皿底部, 加水润湿。将洗净阴干水分的莴苣叶片剪成边长为 40 mm 的大小, 叶背朝上平铺于滤纸之上。用毛笔挑取 1-2、3、4 和 5 龄莴苣指管蚜分别放入培养皿内, 并设计其密度分别为 10、20、30、40 和 50 头/皿。同时放入一头饥饿 12 h 的食蚜瘿蚊 3 龄幼虫, 参考王秀琴等 (2019) 对食蚜瘿蚊全虫态的形态记述, 3 龄幼虫体长 2.60-3.00 mm, 中胸腹板上有 “Y” 形剑骨片, 腹部及两侧白色云状脂肪体清晰可见。用封口膜封口, 膜上使用 0 号昆虫针孔孔, 以确保空气流通和防止蚜虫逃逸。置于温度 (25±1) °C, 相对

湿度 65%±5%，光周期 14L:10D 的人工气候箱（宁波江南仪器厂，型号 DRXM-358A）中，24 h 后于体视镜（深圳奥斯微光学仪器有限公司，型号 AO-HK830-0318）下观察和记录培养皿中死亡的茼蒿指管蚜数量。每个处理重复 5 次。

1.2.2 食蚜瘿蚊 3 龄幼虫捕食茼蒿指管蚜的种内干扰反应 试验条件与 1.2.1 相同，将饥饿处理 12 h 的食蚜瘿蚊 3 龄幼虫分别与 1-2、3、4 和 5 龄茼蒿指管蚜以 1:20、2:40、3:60、4:80 和 5:100 比例组合放入装有茼蒿叶片的培养皿中，24 h 后于体视镜下观察和记录培养皿中死亡的茼蒿指管蚜数量。每个处理重复 5 次。

1.2.3 食蚜瘿蚊 3 龄幼虫对茼蒿指管蚜的捕食选择性 试验条件与 1.2.1 相同，在装有茼蒿叶片的培养皿中，各挑选 5 头 1-2、3、4 和 5 龄茼蒿指管蚜，随即放入 1 头饥饿 12 h 的食蚜瘿蚊 3 龄幼虫，24 h 后于体视镜下观察和记录培养皿中死亡的各龄期茼蒿指管蚜数量。每个处理重复 5 次。

1.2.4 室外笼罩试验 本试验参考商胜华等（2019）方法，在此基础上稍加改良。将健康茼蒿苗种植后，罩上长×宽×高为 0.5 m×0.5 m×0.6 m 的 200 目纱网制成的笼子，以防止受到自然环境中其他生物因素的影响。当茼蒿苗长至高约 20 cm 时，将 2-3 龄茼蒿指管蚜以 50 头/株的数量随机接到茼蒿上，待蚜虫成功定殖后，随即按照 1:5、1:10、1:15、1:20、1:25、1:30 益害比向笼罩中放入即将羽化的食蚜瘿蚊蛹，每个处理 3 次重复。2 d 后开始调查各笼罩下茼蒿上剩余虫口数，直至食蚜瘿蚊幼虫不再取食蚜虫，进入化蛹阶段。计算虫口衰减率。

1.3 数据统计与分析

捕食功能反应：采用 Holling II 模型公式 $N_a = aTN/(1 + aT_hN_i)$ 进行拟合分析，其中， N_a ：被捕食猎物数， N_i ：猎物密度， T ：试验持续时间，本试验持续时间为 $T=1\text{ d}$ （24 h）， a ：瞬时攻击率， T_h ：处理 1 头猎物花费的时间（Holling, 1959）。

搜寻效应：采用方程为 $S = a/(1 + aT_hN_i)$ 进行拟合分析，其中， S ：搜寻效应，其余同上（丁

岩钦，1994）。

种内干扰反应：采用方程为 $E = QP^{-m} = N_a/(N \times P)$ 进行拟合分析，其中， E ：捕食作用率， Q ：搜寻常数， P ：捕食者密度， m ：干扰常数，其余同上（Hassell and Varley, 1969; Xiao and Li, 2019）。

分摊竞争强度：分摊竞争强度为 $I = (E_1 - E_p)/E_1$ ， I ：分摊竞争强度， E_1 ：1 头天敌的捕食作用率， E_p ： P 头天敌的捕食作用率（邱海燕等，2020）。

捕食选择性：捕食选择性用选择系数 Q 表示， Q = 某特定虫态被捕数占总捕食数的百分比/某特定虫态占总猎物数的百分比。其中， $Q < 1$ 代表捕食者对该虫态猎物不嗜食； $Q = 1$ 代表捕食者对该虫态猎物随机捕食； $Q > 1$ 代表捕食者对该虫态猎物嗜食（赵志模等，1993；黄婕等，2020）。

虫口衰减率：虫口衰减率 = [(防治前虫口数 - 防治后虫口数)/防治前虫口数] × 100%。

使用 Microsoft Excel 2016 和 SPSS 26.0 软件对所得数据进行分析处理，使用 Origin 2021 进行绘图。采用 LSD 最小显著差异法进行差异显著分析。自身干扰方程的拟合度用卡方 (χ^2) 检验判别。

2 结果与分析

2.1 食蚜瘿蚊 3 龄幼虫对不同龄期茼蒿指管蚜的捕食功能反应

食蚜瘿蚊 3 龄幼虫对 1-2、3、4 和 5 龄茼蒿指管蚜的捕食情况如图 1 所示，食蚜瘿蚊 3 龄幼虫的捕食量随着茼蒿指管蚜密度的增加而提高，但猎物密度增加至一定水平后，其捕食量增速逐渐减慢，表明食蚜瘿蚊对茼蒿指管蚜的捕食功能反应属于 Holling II 型。其中，食蚜瘿蚊 3 龄幼虫对 1-2 龄茼蒿指管蚜的捕食量最大，捕食量随茼蒿指管蚜龄期的增加而降低，即 1-2 龄若蚜 > 3 龄若蚜 > 4 龄若蚜 > 5 龄若蚜。

根据 Holling II 型圆盘方程拟合得到食蚜瘿蚊对茼蒿指管蚜的捕食功能反应模型及相关参数（表 1）。食蚜瘿蚊 3 龄幼虫对茼蒿指管蚜的实际日最大捕食量和捕食能力随着茼蒿指管蚜

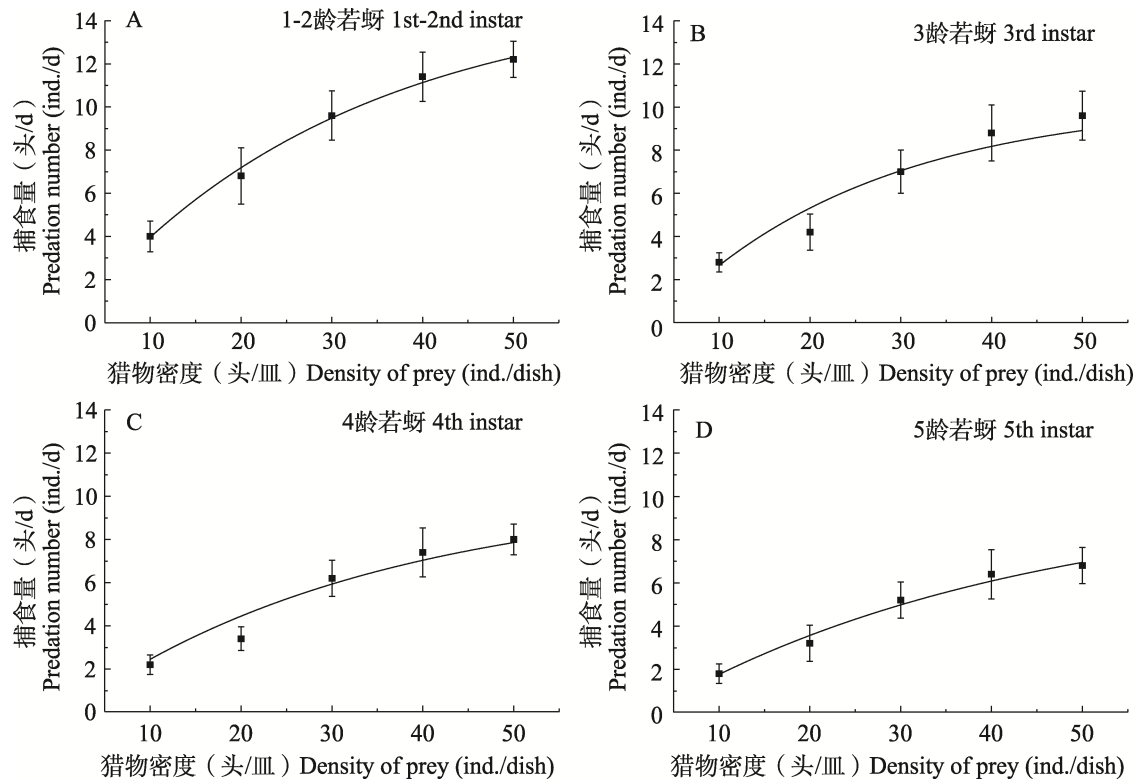


图 1 食蚜瘿蚊 3 龄幼虫对 1-2 龄 (A)、3 龄 (B)、4 龄 (C) 及 5 龄 (D) 莴苣指管蚜的捕食量
Fig. 1 Predation number of 3rd instar larvae of *Aphidoletes aphidimyza* on 1st-2nd instar (A), 3rd instar (B), 4th instar (C), and 5th instar (D) of *Uroleucon formosanum*

表 1 食蚜瘿蚊 3 龄幼虫对不同龄期莴苣指管蚜的捕食功能反应

Table 1 Predatory response of *Aphidoletes aphidimyza* 3rd instar larvae to different instars of *Uroleucon formosanum*

龄期 Instar	功能反应模型 Functional response equation	相关系数 R^2 Correlation coefficient	瞬时攻击率 a Attacking efficiency	捕食能力 a/T_h Predation capacity	处理时间 T_h/d Handling time	实际日最大捕食量 Maximum prey daily consumed
1-2 龄 1st-2nd instar	$N_a=0.466N_t/(1+0.036N_t)$	0.958 7	0.466	12.90	0.036	12.2
3 龄 3rd instar	$N_a=0.280N_t/(1+0.029N_t)$	0.970 6	0.280	9.61	0.029	9.6
4 龄 4th instar	$N_a=0.216N_t/(1+0.024N_t)$	0.949 4	0.216	9.18	0.024	8.0
5 龄 5th instar	$N_a=0.188N_t/(1+0.030N_t)$	0.956 9	0.188	6.33	0.030	6.8

龄期的增加而降低。其中，对 1-2、3、4 和 5 龄若蚜的实际日最大捕食量分别为 12.2、9.6、8.0 和 6.8 头；食蚜瘿蚊 3 龄幼虫对 1-2、3、4 和 5 龄莴苣指管蚜的瞬时攻击率分别为 0.466、0.280、0.216 和 0.188，处理猎物所用时间分别为 0.036、0.029、0.024 和 0.030，捕食能力 a/T_h 随着蚜虫龄

期的增加逐渐变小，以 1-2 龄若蚜最高，为 12.9。

2.2 食蚜瘿蚊 3 龄幼虫对不同龄期莴苣指管蚜的搜寻效应

由图 2 可知，食蚜瘿蚊 3 龄幼虫对莴苣指管蚜的搜寻效应随猎物虫龄的增大而降低。同一猎

物密度下, 对 1-2 龄若蚜的搜寻效应最高。搜寻方程分别为 $S_{1-2} = 0.4658/(1+0.0168N_i)$, $S_3 =$

$0.2799/(1+0.0081N_i)$, $S_4 = 0.2160/(1+0.0051N_i)$, $S_5 = 0.1880/(1+0.0056N_i)$ 。

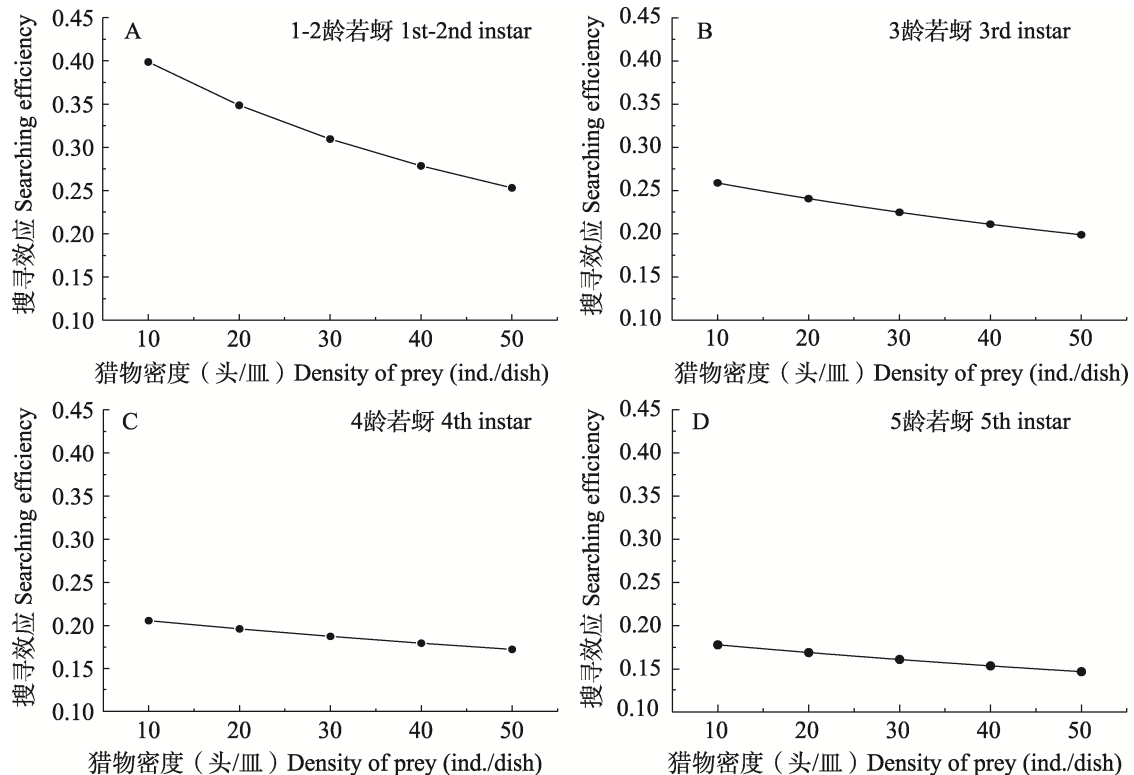


图2 食蚜瘿蚊 3 龄幼虫对 1-2 龄 (A)、3 龄 (B)、4 龄 (C) 及 5 龄 (D) 莴苣指管蚜的搜寻效应

Fig. 2 Searching efficiency of *Aphidoletes aphidimyza* 3rd instar larvae to 1st-2nd instar (A), 3rd instar (B), 4th instar (C), and 5th instar (D) *Uroleucon formosanum*

2.3 食蚜瘿蚊 3 龄幼虫捕食不同龄期莴苣指管蚜的种内干扰反应

由表 2 可知, 食蚜瘿蚊 3 龄幼虫对 1-2、3、4 和 5 龄莴苣指管蚜的总捕食量随自身密度的增加而增大, 但捕食作用率却随其密度的增加而逐渐降低。食蚜瘿蚊 3 龄幼虫捕食 1-5 龄莴苣指管蚜的种内干扰方程分别为: $E_{1-2}=0.304P^{-1.148}$ ($R^2=0.9576$)、 $E_3=0.226P^{-1.155}$ ($R^2=0.9733$)、 $E_4=0.177P^{-1.094}$ ($R^2=0.9761$)、 $E_5=0.128P^{-1.028}$ ($R^2=0.9683$)。通过卡方 (χ^2) 适合性检验, 发现捕食作用率 (E) 的理论值与观测值无显著差异 ($\chi^2 < \chi^2_{0.05}$)。食蚜瘿蚊 3 龄幼虫对不同龄期莴苣指管蚜的种内干扰程度不同, 其干扰系数大小依次为 3 龄 (1.155) > 1-2 龄 (1.148) > 4 龄 (1.094) > 5 龄 (1.028)。食蚜瘿蚊对同一龄期莴苣指管蚜的分摊竞争强度均随着自身密度的

增加而增大。当食蚜瘿蚊幼虫密度在 2 头以上时, 各处理均显示对 3 龄莴苣指管蚜的分摊竞争强度最大, 对 5 龄莴苣指管蚜的分摊竞争强度最小。

2.4 食蚜瘿蚊 3 龄幼虫对不同龄期莴苣指管蚜的捕食选择性

食蚜瘿蚊 3 龄幼虫对莴苣指管蚜 1-2、3、4 和 5 龄若蚜的捕食选择性存在显著差异, 对各龄期莴苣指管蚜的捕食量和选择系数如表 3 所示。食蚜瘿蚊 3 龄幼虫偏好捕食莴苣指管蚜 1-2 和 3 龄若蚜, 其捕食选择率分别为 43% 和 30%, 且选择系数均 $Q > 1$, 对 4 龄若蚜的捕食选择率为 21%, 对 5 龄若蚜的捕食偏好性最差, 选择率仅有 6%, 两者选择系数均 $Q < 1$ (表 3)。结果表明, 当莴苣指管蚜 1-2、3、4 和 5 龄若蚜同时存在时, 食蚜瘿蚊 3 龄幼虫优先捕食莴苣指管蚜 1-2 和 3 龄若蚜。

表 2 食蚜瘿蚊 3 龄幼虫对不同龄期莴苣指管蚜的捕食作用率 (E) 及分摊竞争强度 (I)
Table 2 Predation rate (E) and the intensity of scrambling competition (I) of *Aphidoletes aphidimyza* 3rd instar larvae to different instars of *Uroleucon formosanum*

龄期 Instar	食蚜瘿蚊密度 (头/皿) Density of <i>A. aphidimyza</i> (ind./dish)	莴苣指管蚜 密度 (头/皿) Density of <i>U. formosanum</i> (ind./dish)	日均捕食量 (头/d) predation number (ind./d)	捕食作用率 (E) $E=N_a/(N_t \times P)$ Predation ratio	自身密度方程 Self density equation	分摊竞争强度 (I) Intensity of scrambling competition
1-2 龄 1st-2nd instar	1	20	6.2 ± 0.89 d	0.310 0	$E=0.304P^{-1.148}$	0.000
	2	40	9.0 ± 0.71 d	0.112 5	$R^2=0.957\ 6$	0.549
	3	60	14.4 ± 1.67 c	0.080 0		0.717
	4	80	24.8 ± 3.35 b	0.077 5		0.796
	5	100	34.0 ± 2.55 a	0.068 0		0.842
3 龄 3rd instar	1	20	4.6 ± 0.55 d	0.230 0	$E=0.226P^{-1.155}$	0.000
	2	40	6.8 ± 0.84 d	0.085 0	$R^2=0.973\ 3$	0.551
	3	60	11.6 ± 2.07 c	0.064 4		0.719
	4	80	17.2 ± 1.92 b	0.053 0		0.798
	5	100	23.2 ± 1.30 a	0.046 4		0.844
4 龄 4th instar	1	20	3.6 ± 0.55 d	0.180 0	$E=0.177P^{-1.094}$	0.000
	2	40	5.8 ± 0.84 d	0.072 5	$R^2=0.976\ 1$	0.532
	3	60	9.0 ± 1.58 c	0.050 0		0.699
	4	80	14.8 ± 1.30 b	0.046 3		0.781
	5	100	19.2 ± 1.48 a	0.038 4		0.828
5 龄 5th instar	1	20	2.6 ± 0.55 d	0.130 0	$E=0.128P^{-1.028}$	0.000
	2	40	4.4 ± 1.14 cd	0.055 0	$R^2=0.968\ 3$	0.509
	3	60	6.8 ± 0.85 c	0.037 8		0.677
	4	80	11.4 ± 1.52 b	0.035 6		0.759
	5	100	15.8 ± 1.48 a	0.031 6		0.809

捕食量为平均值±标准误。数据后标有不同小写字母表示经 LSD 法检验在 $P<0.05$ 水平差异显著。下表同。
Data are mean±SE, and followed by different lowercase letters indicate significant difference at $P<0.05$ level by LSD test. The same below.

表 3 食蚜瘿蚊 3 龄幼虫对不同龄期莴苣指管蚜的捕食选择性
Table 3 Predation preference of *Aphidoletes aphidimyza* 3rd instar larvae to different instars of *Uroleucon formosanum*

龄期 Instar	日均捕食量 (头/d) Predation number (ind./d)	捕食 选择率 (%) Predatory choice ratio (%)	选择 系数 (Q) Selection coefficient
1-2 龄 1st-2nd instar	4.6 ± 0.55 a	43	1.7
3 龄 3rd instar	3.2 ± 0.45 b	30	1.2
4 龄 4th instar	2.2 ± 0.45 c	21	0.8
5 龄 5th instar	0.6 ± 0.55 d	6	0.2

2.5 食蚜瘿蚊防控莴苣指管蚜的室外笼罩试验

2.5.1 莴苣指管蚜种群发生动态 在笼罩条件下, 随时间的延长, 观察到各处理中蚜虫种群数量呈下降趋势, 且随着益害比的增加, 种群数量下降速度越快。释放食蚜瘿蚊蛹后的第 4 天 (4 月 9 日), 蚜虫种群数量逐渐减少 (图 3)。

2.5.2 食蚜瘿蚊对莴苣指管蚜的防控效果 如图 4 所示, 在食蚜瘿蚊蛹释放第 3 天后, 不同处理的虫口衰减率均随时间的增长而增加, 其中益害比为 1 : 10 和 1 : 15 虫口衰减率增长相对稳定。从第 6 天开始, 所有处理的虫口衰减率均为正值, 其中益害比为 1 : 5、1 : 10、1 : 15 对

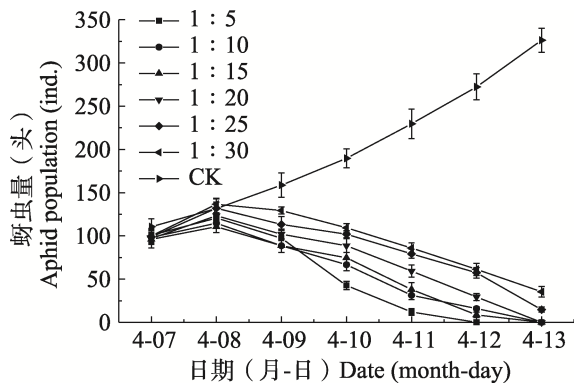


图3 室外笼罩中按不同益害比释放食蚜瘿蚊后莴苣指管蚜的种群发生动态

Fig. 3 Occurrence dynamics of *Uroleucon formosanum* after released *Aphidoletes aphidimyza* in outdoor cage experiment by different benefit-to-harm ratio

莴苣指管蚜防控效果达 60% 以上; 第 8 天后, 各处理的虫口衰减率均达 75% 以上, 益害比为 1:5、1:10、1:15、1:20 防控效果达 100%。

3 结论与讨论

相较于传统的化学防治, 生物防治在一定程度上解决了“3R”问题, 实现可持续控制害虫、降低环境污染等农业发展战略。因此, 生物防治在害虫综合治理中具有不可替代的作用 (Symondson *et al.*, 2002; 陈学新等, 2013)。蚜虫是农业上重要的世界性害虫, 目前关于蚜虫天敌昆虫的研究, 以烟蚜 *Myzus persicae* (Sulzer)、棉蚜 *Aphis gossypii* Glover、豆蚜 *Aphis craccivora* 的相关研究最全面 (潘明真等, 2022)。而莴苣指管蚜捕食性天敌尚未见相关报道。本研究通过室内测定食蚜瘿蚊对莴苣指管蚜的捕食功能反应, 发现食蚜瘿蚊对不同龄期莴苣指管蚜的捕食功能符合 Holling II 型圆盘方程, 这与报道的食蚜瘿蚊对葱蚜 *Neotoxoptera formosana* (王雄等, 2021)、烟蚜 (王秀琴等, 2020)、玉米蚜 *Rhopalosiphum maidis* (Fitch) (林清彩等, 2017)、甘蓝蚜 *Brevicoryne brassicae* Linnaeus、蔷薇长管蚜 *Macrosiphum rosae* (张洁和杨茂发, 2007) 的捕食功能反应相似。评估天敌昆虫的捕食能力强弱时, 捕食能力 a/T_h 是一个重要的指标。瞬间攻击率 a 与处理时间 T_h 的比值越大, 说明天敌对害

虫的控制效果越好 (周集中和陈常铭, 1986)。本研究发现食蚜瘿蚊 3 龄幼虫对莴苣指管蚜 1-2 龄若蚜瞬时攻击率最高, a 为 0.466, 对莴苣指管蚜 4 龄若蚜的处理时间最短, T_h 为 0.024, 捕食能力 a/T_h 以 1-2 龄若蚜 12.9 最高。食蚜瘿蚊 3 龄幼虫对 1-2、3、4 和 5 龄莴苣指管蚜的实际日最大捕食量分别为 12.2、9.6、8.0 和 6.8 头。该结果与食蚜瘿蚊 3 龄幼虫对不同龄期葱蚜 (王雄等, 2021) 1-2、3、4 龄若蚜的日最大捕食量存在一定差异。这种差异可能受到多种因素影响, 包括蚜虫的种类、体型、密度, 食蚜瘿蚊的生理状态以及外部环境因素等。

在限定空间范围内, 猎物密度的增加通常会降低天敌对猎物的搜寻效应 (唐艺婷等, 2020)。本文研究证明食蚜瘿蚊 3 龄幼虫对 1-2、3、4 和 5 龄莴苣指管蚜的搜寻效应均随着猎物密度的增加而降低, 这与食蚜瘿蚊捕食葱蚜 (王雄等, 2021)、异色瓢虫 *Harmonia axyridis* Pallas 捕食禾谷缢管蚜 *Rhopalosiphum padi* (周丽君等, 2022)、黑襟毛瓢虫 *Scymnus (Neopullus) hoffmanni* 捕食莲缢管蚜 *Rhopalosiphum nymphaeae* (文扬等, 2022)、黄玛草蛉 *Mallada basalis* 捕食甘蓝蚜与玉米蚜 (周娟等, 2020) 的研究结果一致, 表明随着猎物密度的增加天敌对猎物的搜寻效应逐渐降低的现象普遍存在。当天敌与猎物比例一定时, 天敌对猎物的捕食作用会受到自身密度的干扰, 捕食作用率降低, 自身干扰强度增强。该结论在捕食性天敌如环斑猛猎蝽 *Sphedanolestes impressicollis* 捕食烟蚜 (冯万祖等, 2021) 和斜纹夜蛾 *Spodoptera litura* 低龄幼虫 (蒋文丽等, 2022)、六斑月瓢虫 *Menochilus sexmaculata* 捕食柑橘木虱 *Diaphorina citri* 若虫 (周军辉等, 2020)、异色瓢虫成虫捕食豌豆修尾蚜 *Megoura japonica* (王海诺等, 2020)、十一星瓢虫 *Coccinella undecimpunctata* 捕食枸杞棉蚜 *Aphis gossypii* Glover (李秋荣等, 2020)、异色瓢虫幼虫捕食云南云杉长足大蚜 *Cinara alba* 若虫 (马艳芳等, 2016)、以及大草蛉 *Chrysopa pallens* (Rambur) 捕食桃蚜 (陈斌等, 2022) 等的研究结果中得到支持。本研究亦证明食蚜瘿蚊

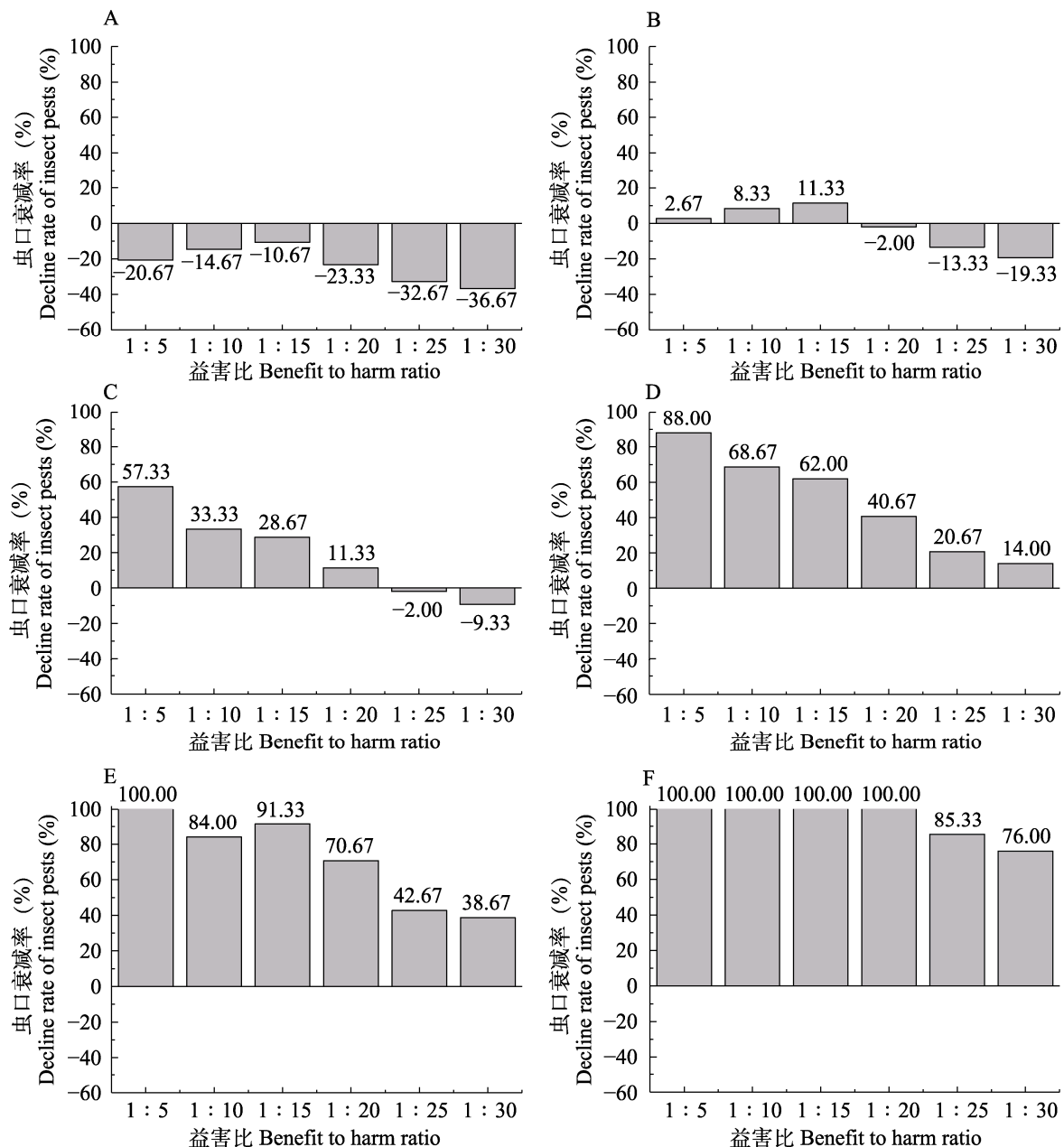


图4 不同益害比下食蚜瘿蚊对茼蒿指管蚜的防控效果

Fig. 4 Control effect of *Uroleucon formosanum* by *Aphidoletes aphidimyza* under different benefit-to-harm ratio

A-F 分别表示释放食蚜瘿蚊蛹后的第 3-8 天各益害比的控制效果。

A-F represent the control effects of the respective benefits-to-harm ratios on the 3rd-8th day after releasing *Aphidoletes aphidimyza* pupa, respectively.

自身密度对其捕食茼蒿指管蚜具有干扰作用。这与食蚜瘿蚊捕食烟蚜（王秀琴等，2020）和葱蚜（王雄等，2021）的研究结果一致。表明在一定空间内，同种天敌昆虫之间会相互干扰，导致它们的平均捕食率降低（王利平等，2011）。

此外，食蚜瘿蚊 3 龄幼虫对不同龄期茼蒿指

管蚜的捕食选择性试验中显示出偏好捕食 1-2 和 3 龄若蚜，而对 4 和 5 龄若蚜则没有明显的偏好。与王雄等（2021）研究食蚜瘿蚊 3 龄幼虫对葱蚜不同龄期若蚜的捕食偏好性结果相反。这种差异可能与蚜虫种类、密度以及食蚜瘿蚊幼虫的虫态和捕食习性有关。通过室外笼罩模拟自然生境，

探究食蚜瘿蚊对莴苣指管蚜的防控效果。结果发现不同处理虫口衰减率均随食蚜瘿蚊投放时间的延长而上升, 其中益害比为 1:10 和 1:15 虫口衰减率增长较为稳定; 第 6 d 开始所有处理虫口衰减率均为正值, 其中益害比为 1:5、1:10、1:15 对莴苣指管蚜防控效果均达 60% 以上; 第 7 d 时益害比为 1:15 的虫口衰减率高于 1:10, 达 91.33%; 第 8 d 后各处理虫口衰减率均达 75% 以上, 其中 1:5、1:10、1:15、1:20 防控效果达 100%。该结果与商胜华等 (2019) 研究发现食蚜瘿蚊对烟蚜最佳控制效果所释放益害比相似。因此, 田间释放食蚜瘿蚊防治莴苣指管蚜时需根据最佳益害比 1:15 进行释放, 既有助于实现对莴苣指管蚜的最佳防控, 又节约释放成本。

本研究全面研究了食蚜瘿蚊 3 龄幼虫对莴苣指管蚜的室内捕食功能及室外笼罩控害潜能。结果表明, 利用食蚜瘿蚊防治莴苣指管蚜具有较好的应用前景, 将为科学指导食蚜瘿蚊防控莴苣指管蚜提供重要参考依据。但本研究是在恒定温湿度条件下进行, 室外笼罩试验也仅是简单模拟天敌与害虫间的自然生境, 田间利用天敌昆虫对害虫的防治理应受到环境中光照、温度、雨水, 以及寄主植物、天敌性别、天敌种类等多种因素的影响 (金剑雪等, 2011; 王然等, 2016; 贾静静等, 2019), 其田间防控试验及相关释放技术还需进一步探索。

参考文献 (References)

- Boulanger F, Jandricic S, Bolckmans K, Wäckers F, Pekas A, 2019. Optimizing aphid biocontrol with the predator *Aphidoletes aphidimyza*, based on biology and ecology. *Pest Management Science*, 75(6): 1479–1493.
- Chen B, Zhang W, Liu XW, Huang Y, Wang L, Li GH, Peng XL, 2022. Predation ability of *Chrysopa pallens* (Rambur) on *Myzus persicae*. *Journal of Environmental Entomology*, 44(4): 830–837. [陈斌, 张伟, 刘兴旺, 黄英, 王玲, 李国慧, 彭秀丽, 2022. 不同龄期的大草蛉对桃蚜的捕食作用. 环境昆虫学报, 44(4): 830–837.]
- Chen XX, Ren SX, Zhang F, Cai WZ, Zeng FR, Zhang WQ, 2013. Mechanism of pest management by natural enemies and their sustainable utilization. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 50(1): 9–18. [陈学新, 任顺祥, 张帆, 彩万志, 曾凡荣, 张文庆, 2013. 天敌昆虫控害机制与可持续利用. 应用昆虫学报, 50(1): 9–18.]
- Cheng HK, Zhao JH, Xie M, 1991. Biological control of vegetable aphids with *Aphidoletes aphidimyza*. Proceedings of the 1991 National Symposium on Biological Control. Beijing: Biological Control Institute of Chinese Academy of Agricultural Sciences. 74–75. [程洪坤, 赵军华, 谢明, 1991. 食蚜瘿蚊防治蔬菜蚜虫的研究. 1991 年全国生物防治学术讨论会论文集. 北京: 中国农业科学院生物防治研究所. 74–75.]
- 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]
- Feng WZ, Natasha I, Tanatsiwa M, Zhang HR, Wu YX, Li JP, Xu RB, Li YY, Zhang JM, Li XH, 2021. Predatory responses of *Sphedanolestes impressicollis* Stal. on the nymphs of *Myzus persicae* (Sulzer). *Journal of Southern Agriculture*, 52(11): 3041–3048. [冯万祖, Natasha Isabel, Tanatsiwa Mbiza, 张浩然, 吴雨欣, 李建平, 许汝冰, 黎妍妍, 张建民, 李锡宏, 2021. 环斑猛猎蝽对烟蚜若虫的捕食作用. 南方农业学报, 52(11): 3041–3048.]
- Hassell MP, Varley GC, 1969. New inductive population model for insect parasites and its bearing on biological control. *Nature*, 223(5211): 1133–1137.
- Holling CS, 1959. Some characteristics of simple types of predation and parasitism. *Canadian Entomologist*, 91: 385–398.
- Huang J, Wang M, Men XY, Ji J, Liu YJ, Yin SY, 2020. Predation of European red mite *Panonychus ulmi* by predatory mite *Neoseiulus californicus* at different stages. *Journal of Plant Protection*, 47(1): 46–52. [黄婕, 王蔓, 门兴元, 季洁, 刘永杰, 尹淑艳, 2020. 加州新小绥螨对苹果全爪螨各螨态的捕食作用. 植物保护学报, 47(1): 46–52.]
- Huang XL, 2013. *Uroleucon formosanum* (Takahashi). *Chinese Journal of Applied Entomology*, 50(1): 40. [黄晓磊, 2013. 莴苣指管蚜 *Uroleucon formosanum* (Takahashi). 应用昆虫学报, 50(1): 40.]
- Choi H, Kim H, Lee W, Lee S, 2019. The genus *Uroleucon* (Hemiptera: Aphididae) in the Korean Peninsula, with descriptions of two new species. *Journal of Asia-Pacific Entomology*, 22(2): 481–486.
- Jia JJ, Fu YG, Zhang FP, Liang M, Chen JY, 2019. Effects of temperature on predatory functional responses of *Neoseiulus californicus* to *Eutetranychus orientalis*. *Chinese Journal of Biological Control*, 35(3): 382–389. [贾静静, 符悦冠, 张方平, 梁敏, 陈俊谕, 2019. 温度对加州新小绥螨捕食东方真叶螨功能反应的影响. 中国生物防治学报, 35(3): 382–389.]

- Jiang WL, Feng WZ, Hu ZW, Chen Q, Wu YX, Li JP, Xu RB, Li YY, Li CR, Zhang JM, Li XH, 2022. Predatory functional response of *Sphedanolestes impressicollis* to young larvae of *Spodoptera litura*. *Tobacco Science*, 55(6): 27–34. [蒋文丽, 冯万祖, 胡宗伟, 陈黔, 吴雨欣, 李建平, 许汝冰, 黎妍妍, 李传仁, 张建民, 李锡宏, 2022. 环斑猛猎蝽对斜纹夜蛾低龄幼虫的捕食功能反应. 烟草科技, 55(6): 27–34.]
- Jin JX, Li FL, Cheng Y, Li ZY, 2011. Functional response of *Coccinella septempunctata* to *Aphis craccivora*. *Plant Protection*, 37(4): 68–71. [金剑雪, 李凤良, 程英, 李忠英, 2011. 七星瓢虫对豆蚜的功能反应. 植物保护, 37(4): 68–71.]
- Jing TX, Qi CC, Jiao A, Liu XQ, Zhang S, Su HH, Yang YZ, 2022. Life table construction under different temperatures and insecticide susceptibility analysis of *Uroleucon formosanum* (Hemiptera: Aphididae). *Insects*, 13(8): 693.
- Kanturski M, Lee Y, 2020. Hitherto unknown and poorly known sexual morphs of three Asiatic species of the aphid genus *Uroleucon* (Hemiptera: Aphididae). *Bonn Zoological Bulletin*, 69(2): 293–307.
- Lei ZR, Wu SY, Wang HH, 2016. Progresses in biological control of vegetable insect pests in China. *Plant Protection*, 42(1): 1–6. [雷仲仁, 吴圣勇, 王海鸿, 2016. 我国蔬菜害虫生物防治研究进展. 植物保护, 42(1): 1–6.]
- Li QR, Qi QM, Lai YP, 2020. Study on predation of *Coccinella undecimpunctata* Linnaeus on *Aphis gossypii* Glover. *Journal of Environmental Entomology*, 42(6): 1472–1481. [李秋荣, 祁全梅, 来有鹏, 2020. 十一星瓢虫对枸杞棉蚜的捕食作用研究. 环境昆虫学报, 42(6): 1472–1481.]
- Lin QC, Zhai YF, Chen H, Yin YY, Sun M, Yu Y, Zheng L, 2017. Predatory capacity of *Aphidoletes aphidimyza* (Rondani). *Chinese Journal of Biological Control*, 33(2): 171–175. [林清彩, 翟一凡, 陈浩, 尹园园, 孙猛, 于毅, 郑礼, 2017. 食蚜瘿蚊捕食能力研究. 中国生物防治学报, 33(2): 171–175.]
- Markkula M, Tiittanen K, Hämäläinen M, Forsberg A, 1979. The aphid midge *Aphidoletes aphidimyza* (Diptera, Cecidomyiidae) and its use in biological control of aphids. *Annales Entomologici Fennici*, 45(4): 89–98.
- Martin HJ, Brown AP, 2008. Aphids on the world's herbaceous plants and shrubs. Volume 1 host lists and keys; volume 2 the aphids. *Systematic Entomology*, 33(1): 210–215.
- Ma YF, Zhang SL, Zhang YQ, Chang CX, Ma H, Zhu HY, Chen XL, 2016. Predatory efficiencies of the multicolored Asian lady beetle *Harmonia axyridis* larvae on the aphid *Cinara alba* nymphs. *Plant Protection*, 42(2): 104–108. [马艳芳, 张山林, 张永强, 常承秀, 马慧, 朱慧英, 陈小玲, 2016. 异色瓢虫幼虫对云南云杉长足大蚜若虫的捕食效应. 植物保护, 42(2): 104–108.]
- Pan MZ, Zhang Y, Cao HH, Wang XX, Liu TX, 2022. Research progresses, application, and prospects in aphid biological control on main crops in China. *Journal of Plant Protection*, 49(1): 146–172. [潘明真, 张毅, 曹贺贺, 王杏杏, 刘同先, 2022. 我国主要农作物蚜虫生物防治的研究进展、应用与展望. 植物保护学报, 49(1): 146–172.]
- Qiu HY, Fu BL, Ma XT, Qin T, Tang LD, Liu K, 2020. Functional response and searching efficiency of *Orius tantillus* against *Thrips hawaiiensis*. *Plant Protection*, 46(6): 84–89. [邱海燕, 付步礼, 马晓彤, 李曼交, 覃婷, 唐良德, 刘奎, 2020. 淡翅小花蝽对黄胸蓟马的捕食功能反应与搜寻效应. 植物保护, 46(6): 84–89.]
- Shang SH, Huang CY, Shen XX, Yu XF, Cao Y, Liu MH, Yang MF, 2019. Field control effect of *Aphidoletes aphidimyza* on tobacco *Myzus persicae*. *Guizhou Agricultural Sciences*, 47(6): 41–44. [商胜华, 黄纯杨, 申修贤, 于晓飞, 曹毅, 刘明宏, 杨茂发, 2019. 食蚜瘿蚊对烟蚜的田间控害效果. 贵州农业科学, 47(6): 41–44.]
- Symondson W, Sunderland K, Greenstone M, 2002. Can generalist predators be effective biocontrol agents? *Annual Review of Entomology*, 47: 561–594.
- Tang PH, Chen GP, Zhu MK, Ren LJ, Hu ZL, 2013. Advances in aphid control technology. *Plant Protection*, 39(2): 5–12, 19. [唐平华, 陈国平, 朱明库, 任丽军, 胡宗利, 2013. 蚜虫防治技术研究进展. 植物保护, 39(2): 5–12, 19.]
- Tang YT, Wang MQ, Li YY, Liu CX, Mao JJ, Chen HY, Zhang LS, 2020. Predation of *Arma chinensis* on *Spodoptera litura* larvae. *Chinese Tobacco Science*, 41(1): 62–66. [唐艺婷, 王孟卿, 李玉艳, 刘晨曦, 毛建军, 陈红印, 张礼生, 2020. 螞蛄对斜纹夜蛾幼虫的捕食作用. 中国烟草科学, 41(1): 62–66.]
- Wang HN, Geng S, Yi CQ, Chen JJ, Wu YL, Liu TH, 2020. Predation of *Harmonia axyridis* Pallas adults to *Megoura japonica* Matsumura. *Hubei Agricultural Sciences*, 59(10): 81–83. [王海诺, 耿硕, 羿超群, 陈佳杰, 吴雨伦, 刘廷辉, 2020. 异色瓢虫成虫对豌豆修尾蚜的捕食作用. 湖北农业科学, 59(10): 81–83.]
- Wang LP, Wang YM, Du JP, Zhang GA, 2011. Predation of *Amblyseius swirskii* on *Tetranychus cinnabarinus* nymphs. *Chinese Journal of Biological Control*, 27(2): 171–175. [王利平, 王永模, 杜进平, 张国安, 2011. 斯氏钝绥螨对朱砂叶螨若螨的捕食作用. 中国生物防治学报, 27(2): 171–175.]
- Wang R, Wang S, Qu C, Li JH, Chen ZQ, Zhang F, 2016. The predatory functional response and searching effect of *Chrysopa pallens* larvae to *Bemisia tabaci* eggs on different host plants. *Journal of Plant Protection*, 43(1): 149–154. [王然, 王甦, 渠成,

- 李济航, 陈支芹, 张帆, 2016. 大草蛉幼虫对不同寄主植物上烟粉虱卵的捕食功能反应与搜寻效应. 植物保护学报, 43(1): 149–154.]
- Wang X, Zhang H, Zeng C, Huang CY, Ye S, Yu XF, Liu JF, Yang MF, 2021. Predatory responses of *Aphidoletes aphidimyza* to *Neotoxoptera formosana*. *Plant Protection*, 47(6): 128–133. [王雄, 张慧, 曾琛, 黄纯杨, 叶帅, 于晓飞, 刘健锋, 杨茂发, 2021. 食蚜瘿蚊对葱蚜的捕食作用. 植物保护, 47(6): 128–133.]
- Wang XQ, Wang XY, Yu XF, Huang CY, Shen XX, Yang XC, Yang MF, 2019. Morphological ontogeny of *Aphidoletes aphidimyza* (Rondani). *Chinese Journal of Applied Entomology*, 56(4): 832–839. [王秀琴, 王小彦, 于晓飞, 黄纯杨, 申修贤, 杨先才, 杨茂发, 2019. 食蚜瘿蚊全虫态形态记述. 应用昆虫学报, 56(4): 832–839.]
- Wang XQ, Ou HD, Yu XF, Gou JY, Liu JF, Shen XX, Liu MH, Yang MF, 2020. Predation ability of the gall midge *Aphidoletes aphidimyza* (Rondani) on tobacco aphid *Myzus persicae* (Sulzer). *Chinese Tobacco Science*, 41(5): 79–86. [王秀琴, 欧后丁, 于晓飞, 苟剑渝, 刘健锋, 申修贤, 刘明宏, 杨茂发, 2020. 食蚜瘿蚊对烟蚜的捕食作用. 中国烟草科学, 41(5): 79–86.]
- Wen Y, Yang LB, Sang HD, Wei S, Xu JX, Tang JP, Zheng XW, Wang JG, 2022. Predation of *Rhopalosiphum nymphaeae* (Linnaeus) by *Scymnus (Neopullus) hoffmanni* Weise. *Journal of Environmental Entomology*, 44(1): 177–183. [文扬, 杨良波, 桑海东, 魏松, 徐金星, 唐记平, 郑兴汶, 王建国, 2022. 黑襟毛瓢虫对莲缢管蚜的捕食作用. 环境昆虫学报, 44(1): 177–183.]
- Xiao ZW, Li Z, 2019. Stability analysis of a mutual interference predator-prey model with the fear effect. *Journal of Applied Science and Engineering*, 22(2): 205–211.
- Ye CQ, 1990. Progress in research on *Aphidoletes aphidimyza*. *Entomological Knowledge*, 27(3): 181–184. [叶长青, 1990. 食蚜瘿蚊研究进展. 昆虫知识, 27(3): 181–184.]
- Yu XF, Han XB, Song DM, Wang XQ, Cheng TZ, Tian TA, Yang MF, 2018. Technical regulations for industrialize propagation of *Aphidoletes aphimyza*. *Guizhou Agricultural Sciences*, 46(5): 2, 38–40. [于晓飞, 韩小斌, 宋冬梅, 王秀琴, 陈廷智, 田太安, 杨茂发, 2018. 食蚜瘿蚊工厂化繁殖技术规程. 贵州农业科学, 46(5): 2, 38–40.]
- Zhang J, Yang MF, 2007. Study on the predation function of *Aphidoletes aphidimyza* on three species of aphids. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 35(36): 11897–11898. [张洁, 杨茂发, 2007. 食蚜瘿蚊对 3 种蚜虫捕食作用的研究. 安徽农业科学, 35(36): 11897–11898.]
- Zhao ZM, CHEN Y, Wu SY, 1993. Studies on the predacity of *Amblyseius vulgaris* to *Tetranychus cinnabarinus*. *Acta Arachnologica Sinica*, 2(1): 31–35. [赵志模, 陈艳, 吴仕元, 1993. 普通钝绥螨(*Amblyseius vulgaris*)对朱砂叶螨(*Tetranychus cinnabarinus*)捕食作用的研究. 蛛形学报, 2(1): 31–35.]
- Zhou J, Sheng HY, Li ZY, Guan YX, Chen KW, 2020. Function response of *Mallada basalis* (Walker) on *Brevicoryne brassicae* (L.) and *Rhopalosiphum maidis* (Fitch). *Journal of Environmental Entomology*, 42(1): 152–156. [周娟, 生惠宇, 李子园, 关迎雪, 陈科伟, 2020. 黄玛草蛉对两种蚜虫的捕食效能. 环境昆虫学报, 42(1): 152–156.]
- Zhou JH, Li PL, Zheng HN, Huang J, Wang ZH, 2020. 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, 2020. 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.]
- Zhou JZ, Chen CM, 1986. Predation of wolf spider, *Lycosa pseudoannulata* on brown planthopper, *Nilaparvata lugens*, and its simulation model: I. Functional response. *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.]
- Zhou LJ, Yang DH, Hu QL, Shi LZ, Cao HQ, Li GT, Jiang XC, 2022. Prey selectivity and predatory functional response of *Harmonia axyridis* to *Spodoptera frugiperda* and *Rhopalosiphum padi*. *Plant Protection*, 48(2): 111–117. [周丽君, 杨灯海, 胡其磊, 石凌志, 操海群, 李桂婷, 蒋兴川, 2022. 异色瓢虫对草地贪夜蛾和禾谷缢管蚜的捕食功能反应及捕食选择性研究. 植物保护, 48(2): 111–117.]