

异色瓢虫对苹果-蛇床草微景观中两种蚜虫的捕食功能反应及选择偏好性



蔡志平¹ 张兴瑞² 肖云丽³ 张建萍^{1*} 戈峰^{4*}

(1. 石河子大学农学院, 新疆绿洲农业病虫害治理与植保资源利用重点实验室, 石河子 832000; 2. 中国科学院动物研究所, 农业虫害鼠害综合治理研究国家重点实验室, 北京 100101; 3. 山东省农业技术推广中心, 济南 250100; 4. 山东省农业科学院植物保护研究所, 济南 250100)

摘要: 为评估异色瓢虫 *Harmonia axyridis* 对苹果-蛇床草微景观中2种寄主上绣线菊蚜 *Aphis spiraeicola* 和胡萝卜微管蚜 *Semiaphis heraclei* 的生物防治潜能, 在实验室条件下测定异色瓢虫1~4龄幼虫和雌、雄成虫对2种蚜虫3~4龄若蚜的捕食功能反应、寻找效应以及捕食偏好性。结果表明, 异色瓢虫1~4龄幼虫和雌、雄成虫对绣线菊蚜和胡萝卜微管蚜的捕食功能反应均符合Holling II型功能反应类型, 其中, 雌成虫对绣线菊蚜的捕食能力最强, 为411.284, 雄成虫对胡萝卜微管蚜的捕食能力最强, 为356.403; 2龄幼虫对绣线菊蚜的瞬时攻击率最大, 为1.231, 3龄幼虫对胡萝卜微管蚜的瞬时攻击率最大, 为1.277。异色瓢虫各虫态对绣线菊蚜和胡萝卜微管蚜的寻找效应均随着蚜虫密度的升高而降低。当2种蚜虫共存且总密度为60头/皿时, 不同密度比例下异色瓢虫对2种蚜虫均无显著偏好性; 当总密度为240头/皿, 绣线菊蚜与胡萝卜微管蚜的密度比例为1:5、2:4、3:3和4:2时异色瓢虫对绣线菊蚜表现出显著的偏好性, 而在密度比例为1:5、3:3和4:2时异色瓢虫对胡萝卜微管蚜表现出显著的负偏好性。表明异色瓢虫对苹果-蛇床草微景观中绣线菊蚜的防控潜能更好。

关键词: 异色瓢虫; 绣线菊蚜; 胡萝卜微管蚜; 功能反应; 选择偏好; 苹果; 蛇床草

Functional response and predation preference of multicolored Asian lady beetle *Harmonia axyridis* to two aphids in the micro-landscape of apple and Monnier's snowparsley *Cnidium monnieri*

Cai Zhiping¹ Zhang Xingrui² Xiao Yunli³ Zhang Jianping^{1*} Ge Feng^{4*}

(1. Key Laboratory of Oasis Agricultural Pest Management and Plant Protection Resources Utilization, College of Agriculture, Shihezi University, Shihezi 832000, Xinjiang Uygur Autonomous Region, China; 2. State Key Laboratory of Integrated Management of Pest Insects and Rodents, Institute of Zoology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 3. Shandong Agricultural Technology Extension Center, Jinan 250100, Shandong Province, China; 4. Institute of Plant Protection, Shandong Academy of Agricultural Sciences, Jinan 250100, Shandong Province, China)

Abstract: In order to assess the biological control potential of multicolored Asian lady beetle *Harmonia axyridis* to spirea aphid *Aphis spiraeicola* and celery aphid *Semiaphis heraclei* available in the micro-landscape of apple and Monnier's snowparsley *Cnidium monnieri*, the predation effect, searching efficiency and predation preference of *H. axyridis* to *A. spiraeicola* and *S. heraclei* were studied under laboratory conditions. The results showed that the functional response of the 1st–4th instar larvae, female

基金项目: 国家自然科学基金(32160664), 第三师团木舒克市重点领域科技攻关计划(KY2022GG01),

* 通信作者 (Authors for correspondence), E-mail: zhjp_agr@shzu.edu.cn, gef@ioz.ac.cn

收稿日期: 2022-11-07

and male adults of *H. axyridis* to the 3rd–4th instar nymphs of *A. spiraecola* and *S. heraclei* fitted well with the Holling II model. The predation capacity of female adults of *H. axyridis* against *A. spiraecola* was the strongest, which was 411.284, while the predation capacity of male adults of *H. axyridis* to *S. heraclei* was the strongest (356.403). The instantaneous attack rate of the 2nd instar nymph of *H. axyridis* against *A. spiraecola* was the strongest, which was 1.231, while the instantaneous attack rate of the 3rd instar nymph of *H. axyridis* against *S. heraclei* was the strongest (1.277). The searching efficiency of *H. axyridis* for *A. spiraecola* and *S. heraclei* decreased with increasing prey densities. Under the condition of coexistence of *A. spiraecola* and *S. heraclei*, when the total density was 60 individuals per dish, *H. axyridis* female adults had no significant preference for both aphid species at different ratios; when the total density was 240 individuals per dish, *H. axyridis* female adults showed significant positive preference for *A. spiraecola* in the ratios (*A. spiraecola* : *S. heraclei*) of 1 : 5, 2 : 4, 3 : 3 and 4 : 2, but showed negative preference for *S. heraclei* in the ratios of 1 : 5, 3 : 3 and 4 : 2. This study suggested that *H. axyridis* has strong control potential against *A. spiraecola* in the micro-landscape of apple and functional plant.

Key words: *Harmonia axyridis*; *Aphis spiraecola*; *Semiaphis heraclei*; functional response; predation preference; apple; *Cnidium monnieri*

近年来,随着苹果园的集约化发展以及化学农药的大量使用,果园中害虫的抗药性不断增强,主要害虫与次要害虫的演替进程加快,自然天敌种群数量不断减少,不仅影响果品的食用安全,还造成一定的生态环境污染,给苹果产业带来了巨大挑战(李丽莉等,2021;Zhang et al.,2022)。功能植物是指在农林生态系统中能够发挥生态功能的一类植物,在害虫的生态调控过程中通常具有为有益节肢动物提供“衣、食、住、行”的功能,而不为目标保护作物上的主要害虫提供“衣、食、住、行”的服务(杨泉峰等,2020)。随着绿色农业生产发展的需求,在果园中引入功能植物,增加对天敌的涵养作用,充分发挥自然天敌对果树主要害虫的生态调控作用,已经成为果园害虫绿色防控的重要途径(肖云丽等,2020;Cai et al.,2021)。

绣线菊蚜 *Aphis spiraecola* 属半翅目蚜科,是苹果、梨以及柑橘等果树上的主要害虫,在国内各苹果产区均有发生,主要以刺吸式口器为害苹果叶片及幼果,影响苹果的产量和品质(姜莉莉等,2021)。有研究表明在苹果园果树行间种植功能植物蛇床草 *Cnidium monnieri* 不仅可以增加苹果-蛇床草微景观中捕食性天敌的种群数量,还能有效降低绣线菊蚜种群的数量(Cai et al.,2021;Zhang et al.,2022)。胡萝卜微管蚜 *Semiaphis heraclei* 属半翅目蚜科,生活史为异寄主全周期型,夏季寄主主要为胡萝卜和芹菜等伞形科植物,冬季寄主为金银花等忍冬科植物(史朝晖等,2022),在蛇床草上普遍发生。异色瓢虫

Harmonia axyridis 属鞘翅目瓢甲科,是蚜虫天敌中的优势种,可取食多种蚜虫(孙丽娟等,2012;陈旭等,2021;张超维等,2021)。本课题组前期研究了蛇床草吸引异色瓢虫的化学生态学机制,发现蛇床草挥发物能够显著吸引异色瓢虫成虫(Cai et al.,2020)。捕食性天敌在害虫生物防治中发挥着重要作用,捕食性天敌对猎物的捕食功能反应是衡量其捕食能力的重要指标,也是评价其控害能力的重要依据(王庆森等,2014)。在农业生态系统中,多种害虫往往同时存在,因此捕食性天敌常对多种害虫的捕食表现出不同的偏好性(朱冠雄,2019),捕食性天敌与猎物的作用系统中必然会出现单种捕食性天敌-单种猎物和单种捕食性天敌-多种猎物的作用系统,这些都会影响捕食性天敌的捕食效能(荆英等,2004)。因此,研究捕食性天敌对多种猎物的捕食功能反应和选择捕食作用,对利用捕食性天敌控制害虫具有重要意义。

目前,捕食性天敌对猎物的偏好性研究大多集中在同一寄主上的猎物,如多异瓢虫 *Hippodamia variegata* 和异色瓢虫对红色和绿色2种色型豌豆蚜 *Acyrtosiphon pisum* 的捕食偏好性研究(杜军利等,2015);异色瓢虫对苹果上苹果瘤蚜 *Myzus malisuctus* 和绣线菊蚜的捕食偏好性研究(孙丽娟等,2012);异色瓢虫对苹果上苹果绵蚜 *Eriosoma lanigerum* 和绣线菊蚜的捕食偏好性研究(朱冠雄,2019)。然而,捕食性天敌对农田生态系统中2种寄主上猎物的偏好研究报道相对较少。在苹果-蛇床

草微景观中,绣线菊蚜是苹果树上的主要害虫,胡萝卜微管蚜是蛇床草上的主要植食性昆虫。绣线菊蚜主要在5月中旬至6月下旬以及8月中旬至9月上旬发生,胡萝卜微管蚜主要在5月中旬至7月下旬发生,2种蚜虫在各自寄主上的发生时间有一定重合。本研究拟测定异色瓢虫对苹果-蛇床草微景观中2种寄主上绣线菊蚜和胡萝卜微管蚜的捕食功能反应和选择偏好性,评估异色瓢虫对2种蚜虫的捕食效能,探究异色瓢虫对不同寄主上猎物的偏好性,以期为苹果园种植功能植物蛇床草吸引捕食性天敌来防控果树上的绣线菊蚜提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料

供试虫源:异色瓢虫成虫和胡萝卜微管蚜3~4龄若蚜采自中国科学院动物研究所农业虫害鼠害综合治理研究国家重点实验室烟台工作站试验基地蛇床草上,绣线菊蚜3~4龄若蚜采自该试验基地苹果树上。异色瓢虫成虫放入25 cm×25 cm×30 cm的养虫盒中饲养,用实验室内豆苗上建立的豌豆蚜3~4龄若蚜种群饲喂至第2代,待卵孵化后,选择整齐一致的1~4龄幼虫和羽化1日龄的雌、雄成虫供试。室内饲养条件均为温度(25±1)℃、相对湿度(60±5)%、光照周期14 L:10 D。

供试植物:微景观试验区位于中国科学院动物研究所农业虫害鼠害综合治理研究国家重点实验室烟台工作站试验基地,苹果品种为红富士,2014年栽植,树高2.5 m左右,南北行向,株行距为4 m×6 m;蛇床草种子从本试验基地自收,于9月下旬播种,株行距为20 cm×50 cm。微景观试验区大小为24 m×20 m,试验期间不施用任何化学药剂。取花期蛇床草幼嫩叶片和幼果期苹果树幼嫩叶片供试。

仪器:A10000型光照培养箱,上海泽泉科技股份有限公司。

1.2 方法

1.2.1 异色瓢虫对2种蚜虫的捕食功能反应测定

异色瓢虫各虫态先饱食24 h,然后将1龄和2龄幼虫分别再饥饿12 h,3龄、4龄幼虫和雌、雄成虫分别再饥饿24 h供试。试验在直径9 cm、高1.5 cm的培养皿中进行,先放入1片新鲜的苹果嫩叶或蛇床草嫩叶,再用软毛笔分别往相应寄主叶片上挑入龄期及大小相对一致的绣线菊蚜或胡萝卜微管蚜的3~4龄若蚜,每个培养皿中放入1头异色瓢虫,用保鲜膜将

培养皿密封,其上用昆虫针扎若干小孔以保持透气。异色瓢虫1龄幼虫捕食绣线菊蚜或胡萝卜微管蚜的密度分别设计为10、20、30、40、50和60头/皿;2龄幼虫捕食绣线菊蚜或胡萝卜微管蚜的密度分别设计为20、30、40、50、60和70头/皿;3龄幼虫捕食绣线菊蚜或胡萝卜微管蚜的密度分别设计为30、60、90、120、150和180头/皿;4龄幼虫及雌、雄成虫捕食绣线菊蚜或胡萝卜微管蚜的密度分别设计为40、80、120、160、200和240头/皿。每个处理重复5次,1个培养皿为1个重复。24 h后观察并统计培养皿中剩余绣线菊蚜或胡萝卜微管蚜的数量,计算不同虫态异色瓢虫的捕食量。

各虫态异色瓢虫对不同密度绣线菊蚜或胡萝卜微管蚜的捕食量关系利用Holling II型圆盘方程进行模拟,其数学模型表达式(Holling, 1959; 1966)为 $N_a = aT_i N / (1 + aT_i N)$,式中, N_a 为不同密度下捕食者对猎物的捕食数量, a 为捕食者对猎物的瞬时攻击率, T_i 为试验持续时间(本试验中 T_i 为1 d), N 为猎物密度, T_h 为捕食者捕食1头猎物所消耗的时间(处理时间),用 a/T_h 来评价异色瓢虫对绣线菊蚜和胡萝卜微管蚜的捕食能力。采用倒数法将模型方程转化为 $1/N_a = 1/aT_i N + T_h/T_i$,用最小二乘法求出相应参数值。

1.2.2 异色瓢虫对2种蚜虫寻找效应的确定

寻找效应是捕食者在捕食过程中对猎物攻击的一种行为效应,在不同的猎物密度条件下,捕食者对猎物的寻找时间也不相同。寻找效应 S 的计算公式为 $S = a / (1 + aT_h N)$ (丁岩钦, 1994),式中各参数的含义同1.2.1,并将1.2.1所得相应的 a 、 T_h 、 N 值代入公式计算出 S 。

1.2.3 异色瓢虫雌成虫对2种蚜虫总捕食作用的确定

基于1.2.1和1.2.2结果,异色瓢虫雌成虫对2种蚜虫的捕食量较高,因此本试验选择异色瓢虫雌成虫进行总捕食作用分析。单种捕食者对多种猎物的总捕食作用以总捕食猎物数 N_a^* 表征(李超等, 1982),

$$N_a^* = \frac{T \sum_{i=1}^n a_i F_i \sum_{i=1}^n N_i}{1 + \sum_{i=1}^n a_i F_i \sum_{i=1}^n T_{hi} F_i \sum_{i=1}^n N_i}$$

式中, a_i 、 T_{hi} 分别指捕食者对第 i 种猎物的瞬时攻击率及处理时间, T 指捕食者可利用的总时间, N_i 指第 i 种猎物的数量, F_i 指总猎物中第 i 种猎物所占的比例, n 为猎物种类数。

1.2.4 异色瓢虫雌成虫对2种蚜虫的选择偏好测定

在每个培养皿中放置1片新鲜的苹果嫩叶和蛇床草嫩叶,将不同数量的绣线菊蚜和胡萝卜微管蚜

3~4龄若蚜分别挑入到苹果嫩叶和蛇床草嫩叶上,再放入1头饱食24 h后再饥饿24 h的异色瓢虫雌成虫。蚜虫总密度设置为低密度(60头/皿)、中密度(120头/皿)和高密度(240头/皿),其中绣线菊蚜和胡萝卜微管蚜的密度比例分别设为1:5、2:4、3:3、4:2和5:1,即绣线菊蚜和胡萝卜微管蚜的密度呈互补状态变化。每个处理重复5次,每个培养皿为1个重复。24 h后观察并统计各密度处理下2种蚜虫的剩余数量。多种猎物共存时,捕食者对不同猎物的偏好性用下列方程计算(周集中和陈常铭,1987): $Q_i=(1+C_i)/(1-C_i) \times F_i$,式中, Q_i 为捕食者对第*i*种猎物的捕食比例; C_i 指捕食者对第*i*种猎物的偏好性。当 $C_i=0$ 时表明捕食者对第*i*种猎物没有偏好性,当 $0 < C_i \leq 1$ 时表明捕食者对第*i*种猎物有正偏好性,当 $-1 \leq C_i < 0$ 时表明捕食者对第*i*种猎物有负偏好性。

1.3 数据分析

采用Excel 2016软件整理试验数据,利用SPSS

20.0软件进行单因素方差分析,对功能反应模型进行拟合和卡方检验;在偏好性分析时,将 C_i 的统计值与零假设($C_i=0$)进行*t*测验,检验其差异是否显著。

2 结果与分析

2.1 异色瓢虫对2种蚜虫的捕食功能反应

各虫态异色瓢虫对绣线菊蚜和胡萝卜微管蚜的捕食功能反应曲线如图1和图2所示,随着绣线菊蚜和胡萝卜微管蚜密度的增加,异色瓢虫各虫态的捕食量增大,但当猎物达到一定密度后,异色瓢虫各虫态的捕食量趋于平缓。各虫态异色瓢虫对绣线菊蚜和胡萝卜微管蚜的捕食量关系利用Holling II型圆盘方程进行拟合,所有模型均具有较高的拟合度(表1)。经卡方检验得出 $\chi^2 < \chi^2_{(0.01,5)} = 15.086$,说明异色瓢虫各虫态对2种蚜虫的捕食量实测值与理论值吻合度较高,拟合的方程可用于描述各虫态异色瓢虫对绣线菊蚜和胡萝卜微管蚜的捕食规律。

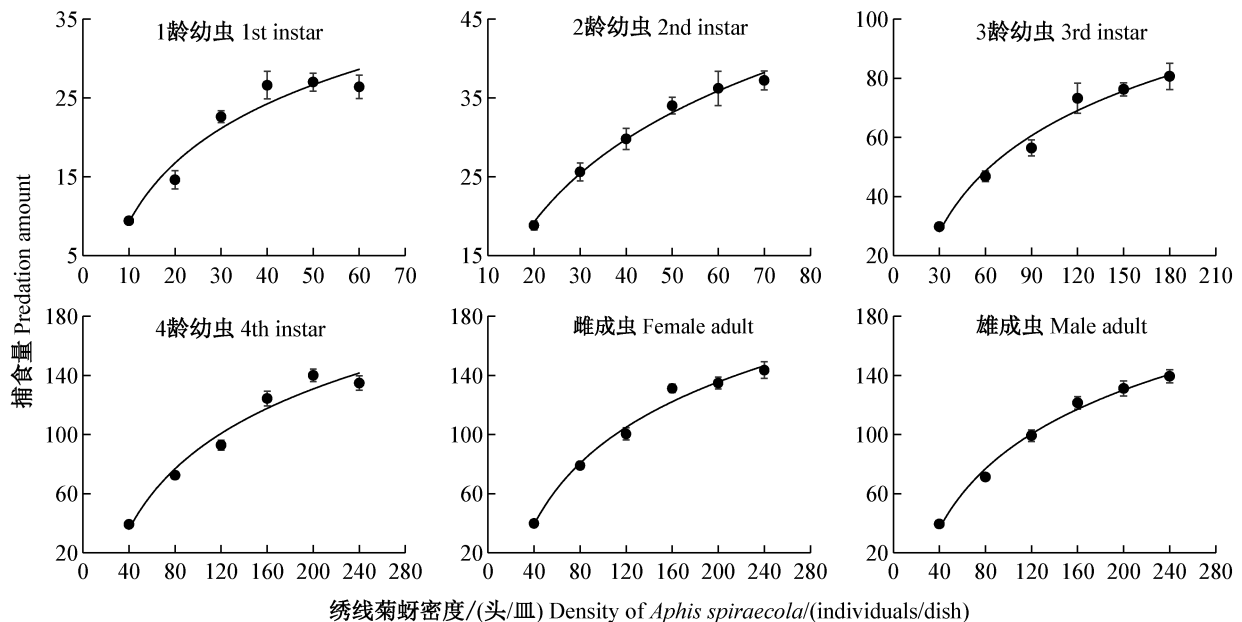


图1 不同虫态异色瓢虫对绣线菊蚜的捕食功能反应曲线

Fig. 1 Predation functional response curves of different stages of *Harmonia axyridis* to *Aphis spiraeicola*

随着虫龄的增加,异色瓢虫捕食1头猎物所消耗的时间,即处理时间逐渐降低,1龄幼虫对绣线菊蚜和胡萝卜微管蚜3~4龄若蚜的处理时间分别为0.018 d和0.023 d,均明显高于其他虫态(表1)。异色瓢虫的捕食能力(a/T_h)随着虫龄的增加而增强,雌成虫对绣线菊蚜的捕食能力最强,为411.284,其余虫态的捕食能力大小依次为4龄幼虫(394.175)>雄成虫(375.695)>3龄幼虫(163.999)>2龄幼虫(93.491)>1龄幼虫(61.773);而雄成虫对胡萝卜微管

蚜的捕食能力最强,为356.403,其余虫态的捕食能力大小依次为雌成虫(342.066)>4龄幼虫(296.112)>3龄幼虫(167.011)>2龄幼虫(90.930)>1龄幼虫(40.685)(表1)。异色瓢虫4龄幼虫对绣线菊蚜的日最大捕食量最高,为362.657头,其余虫态的日最大捕食量大小依次为雌成虫(351.624头)>雄成虫(336.078头)>3龄幼虫(139.513头)>2龄幼虫(77.262头)>1龄幼虫(57.730头);而雄成虫对胡萝卜微管蚜的日最大捕食量最高,为393.324头,其余

虫态的日最大捕食量大小依次为雌成虫(326.288头)>4龄幼虫(260.086头)>3龄幼虫(131.983头)>2龄幼虫(92.189头)>1龄幼虫(51.296头)(表1)。异色瓢虫2龄幼虫对绣线菊蚜的瞬时攻击率最大,为1.231,其余虫态的瞬间攻击率大小依次为3龄幼虫(1.179)>

雌成虫(1.173)>雄成虫(1.121)>4龄幼虫(1.091)>1龄幼虫(1.080);而3龄幼虫对胡萝卜微管蚜的瞬时攻击率最大,为1.277,其余虫态的瞬间攻击率大小依次为4龄幼虫(1.138)>雌成虫(1.051)>2龄幼虫(1.020)>雄成虫(0.924)>1龄幼虫(0.892)(表1)。

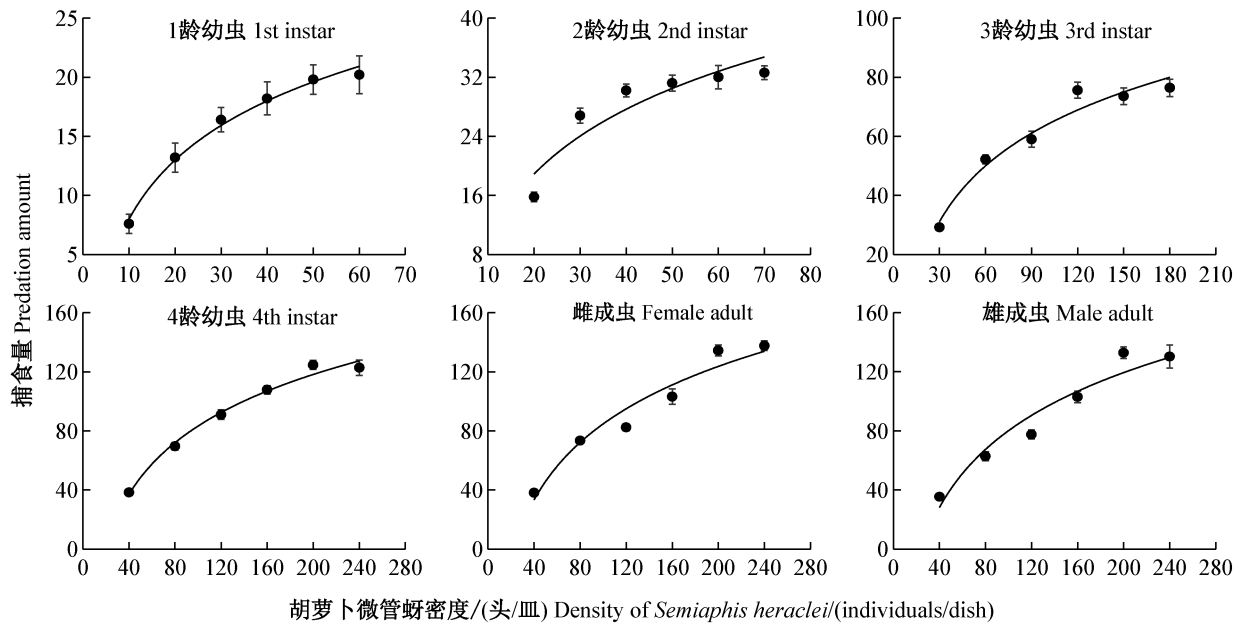


图2 不同虫态异色瓢虫对胡萝卜微管蚜的捕食功能反应曲线

Fig. 2 Predation functional response curves of different stages of *Harmonia axyridis* to *Semiaphis heraclei*

表1 不同虫态异色瓢虫对绣线菊蚜和胡萝卜微管蚜的捕食功能反应参数

Table 1 Parameter estimates of the random predation equation for different stages of *Harmonia axyridis* preying on *Aphis spiraeicola* and *Semiaphis heraclei*

蚜虫 Aphid	异色瓢虫 <i>Harmonia axyridis</i>	功能反应模型 Functional response model	瞬时攻击率 Instantaneous attack rate (a)	处理时间 Handling time/d (T_h)	捕食能力 Predation ability (a/T_h)	日最大捕食量 Maximum consumption ($1/T_h$)	R^2	χ^2
绣线菊蚜 <i>Aphis spiraeicola</i>	1龄幼虫 1st instar	$N_a=1.079N/(1+0.018N)$	1.079	0.018	61.773	57.730	0.937	0.914
	2龄幼虫 2nd instar	$N_a=1.231N/(1+0.014N)$	1.231	0.014	93.491	77.262	0.991	0.088
	3龄幼虫 3rd instar	$N_a=1.179N/(1+0.007N)$	1.179	0.007	163.999	139.513	0.979	0.489
	4龄幼虫 4th instar	$N_a=1.091N/(1+0.003N)$	1.091	0.003	394.175	362.657	0.966	2.272
	雌成虫 Female adult	$N_a=1.173N/(1+0.003N)$	1.173	0.003	411.284	351.624	0.986	2.026
胡萝卜微管蚜 <i>Semiaphis heraclei</i>	雄成虫 Male adult	$N_a=1.121N/(1+0.003N)$	1.121	0.003	375.695	336.078	0.992	0.755
	1龄幼虫 1st instar	$N_a=0.892N/(1+0.023N)$	0.892	0.023	40.685	51.296	0.991	0.100
	2龄幼虫 2nd instar	$N_a=1.020N/(1+0.011N)$	1.020	0.011	90.930	92.189	0.855	1.834
	3龄幼虫 3rd instar	$N_a=1.277N/(1+0.008N)$	1.277	0.008	167.011	131.983	0.958	1.325
	4龄幼虫 4th instar	$N_a=1.138N/(1+0.004N)$	1.138	0.004	296.112	260.086	0.987	0.841
	雌成虫 Female adult	$N_a=1.051N/(1+0.003N)$	1.051	0.003	342.066	326.288	0.948	2.346
	雄成虫 Male adult	$N_a=0.924N/(1+0.003N)$	0.924	0.003	356.403	393.324	0.942	2.056

N_a : 被捕食猎物数量; N_i : 猎物密度。 N_a : Number of preys consumed; N_i : density of prey.

2.2 异色瓢虫对2种蚜虫的寻找效应

异色瓢虫1~4龄幼虫和雌、雄成虫取食绣线菊

蚜时,在低密度条件下其寻找效应均为最高,分别为0.915、0.960、0.967、0.987、1.045和1.006,随着猎物

密度的逐渐增加,异色瓢虫各虫态的寻找效应逐渐下降,其中3龄幼虫的寻找效应下降趋势最大(图3)。异色瓢虫1~4龄幼虫和雌、雄成虫取食胡萝卜微管蚜时,在低密度条件下其寻找效应均为最高,分

别为0.788、0.851、1.001、0.983、0.945和0.848,且随着猎物密度的逐渐增加,异色瓢虫各虫态的寻找效应逐渐下降,其中3龄幼虫的寻找效应下降趋势也最大(图4)。

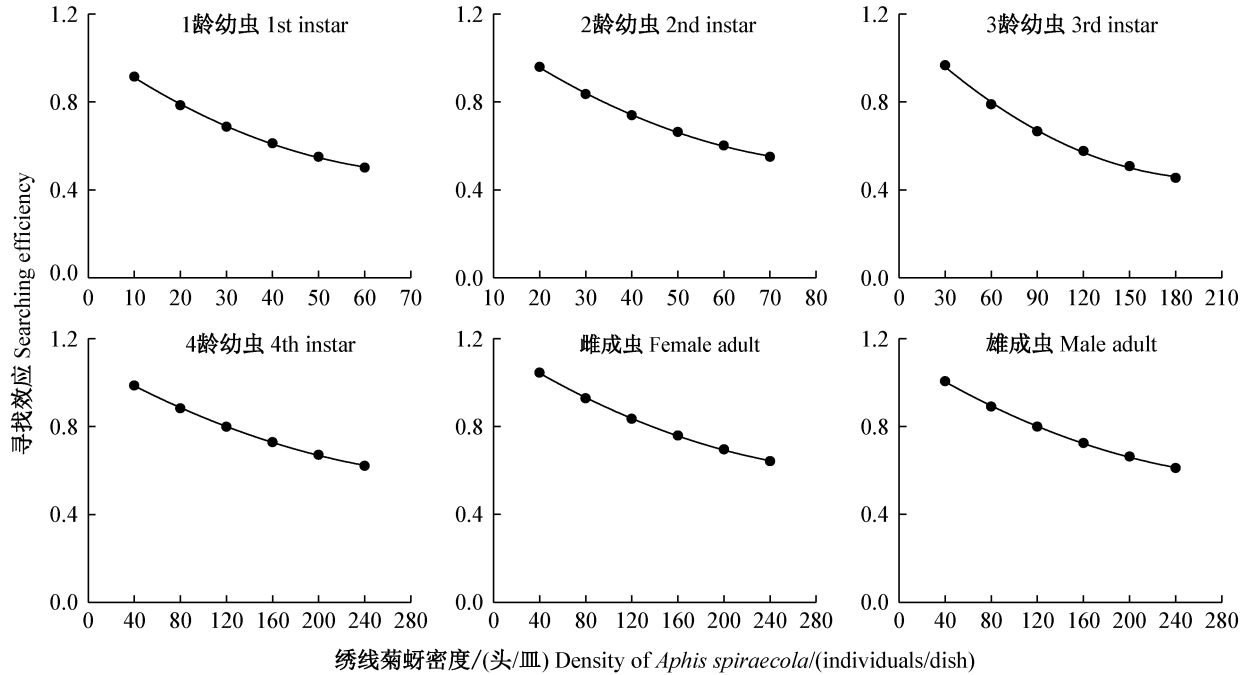


图3 不同虫态异色瓢虫捕食绣线菊蚜时的寻找效应

Fig. 3 Searching efficiency of different stages of *Harmonia axyridis* preying on *Aphis spiraeicola*

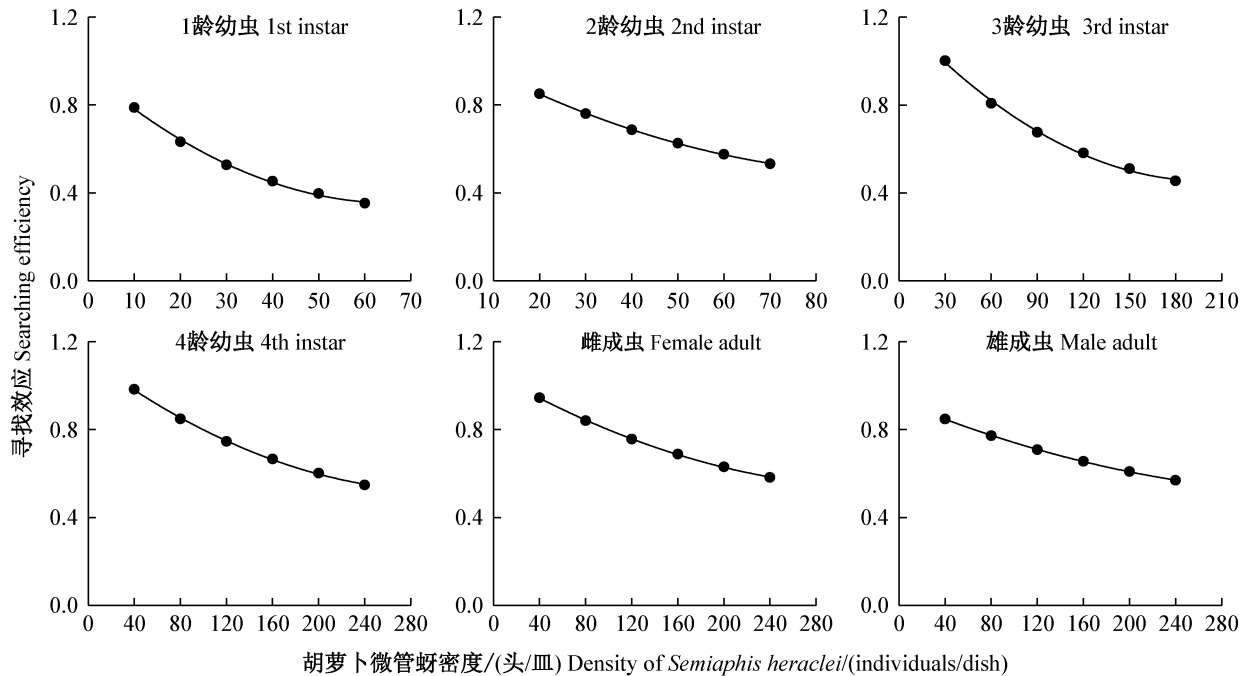


图4 不同虫态异色瓢虫捕食胡萝卜微管蚜时的寻找效应

Fig. 4 Searching efficiency of different stages of *Harmonia axyridis* preying on *Semiaphis heraclei*

2.3 异色瓢虫雌成虫对2种蚜虫的总捕食作用

在绣线菊蚜和胡萝卜微管蚜共存的情况下,异

色瓢虫雌成虫对2种蚜虫的捕食量都随着蚜虫密度的增加而增加(表2)。根据异色瓢虫雌成虫对2种

蚜虫的捕食功能反应参数,得出异色瓢虫雌成虫对2种蚜虫在不同密度下的捕食量理论值,经卡方检验 $\chi^2 < \chi^2_{(0.01,4)} = 13.277$,说明各密度下异色瓢虫雌成

虫对2种蚜虫捕食量的观察值与理论值吻合度较高,较好地模拟了异色瓢虫雌成虫对绣线菊蚜和胡萝卜微管蚜的总捕食量。

表2 异色瓢虫雌成虫在绣线菊蚜和胡萝卜微管蚜共存时对两者的捕食量

Table 2 Predation amounts of *Harmonia axyridis* female adults on coexisting *Aphis spiraeicola* and *Semiaphis heraclei*

猎物总密度/ (头/皿) Total prey density/ (individuals/ dish)	绣线菊蚜 <i>Aphis spiraeicola</i>			胡萝卜微管蚜 <i>Semiaphis heraclei</i>			总捕食量/(头/皿) Total predation amount/ (individuals/dish)	
	初始密度/ (头/皿) Initial density/ (individuals/ dish)	捕食量/(头/皿) Predation amount/ (individuals/dish)		初始密度/ (头/皿) Initial density/ (individuals/ dish)	捕食量/(头/皿) Predation amount/ (individuals/dish)		观察值 Observed value	理论值 Simulated value
		观察值 Observed value	理论值 Simulated value		观察值 Observed value	理论值 Simulated value		
60	10	9.40±0.40	10.56	50	38.40±4.58	43.15	47.80±4.98	53.71
	20	19.00±0.55	19.23	40	35.00±2.05	35.42	54.00±2.60	54.65
	30	29.80±0.20	29.59	30	26.20±2.22	26.01	59.60±2.42	55.60
	40	33.40±5.85	37.93	20	16.40±1.69	18.62	49.80±7.54	56.55
	50	48.60±0.87	47.85	10	9.80±0.20	9.65	58.40±1.07	57.50
120	20	15.00±1.67	15.58	100	73.80±7.08	76.65	88.80±8.75	92.23
	40	29.60±2.01	39.54	80	40.60±4.15	54.23	70.20±6.16	93.76
	60	54.00±2.59	62.31	60	28.60±5.00	33.00	82.60±7.59	95.30
	80	69.80±1.77	75.96	40	19.20±3.15	20.89	89.00±4.92	96.85
240	100	81.40±4.12	84.49	20	13.40±1.40	13.91	94.80±5.52	98.40
	40	33.80±1.46	34.91	200	105.40±5.11	108.87	139.20±6.57	143.79
	80	57.40±3.31	60.91	160	80.20±6.21	85.10	137.60±9.52	146.00
	120	77.20±3.77	87.76	120	53.20±2.73	60.47	130.40±6.50	148.23
	160	89.20±5.93	112.22	80	30.40±2.68	38.25	119.60±8.61	150.47
	200	106.60±4.46	123.71	40	25.00±1.82	29.01	131.60±6.28	152.72

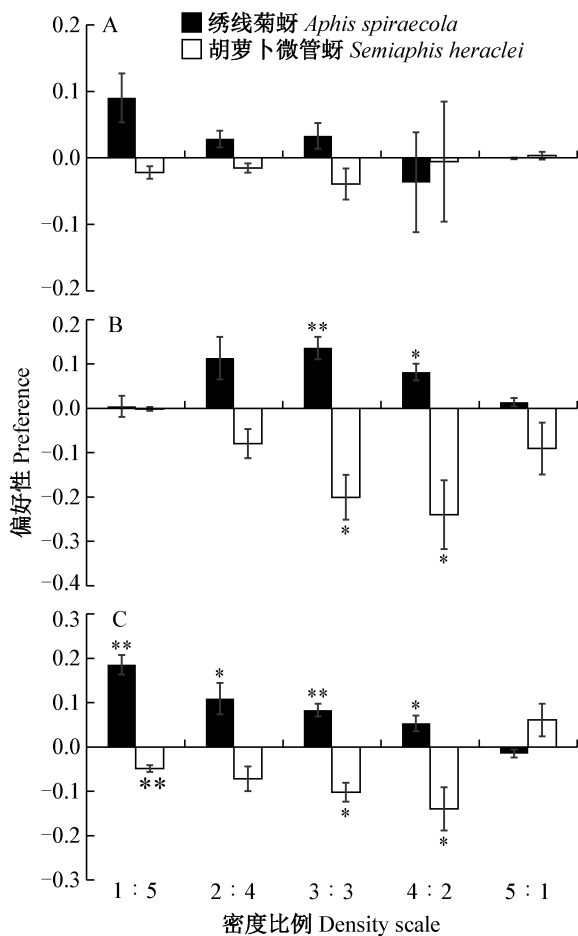
2.4 异色瓢虫雌成虫对2种蚜虫的选择偏好

当绣线菊蚜和胡萝卜微管蚜共存时,在低密度(60头/皿)条件下,异色瓢虫雌成虫对2种蚜虫的偏好性均无显著差异,表明此时异色瓢虫雌成虫对2种蚜虫均无显著偏好性(图5-A);在中密度(120头/皿)条件下,当绣线菊蚜与胡萝卜微管蚜的密度比例为1:5、2:4和5:1时,异色瓢虫雌成虫对2种蚜虫均无显著偏好性,而当绣线菊蚜与胡萝卜微管蚜的密度比例为3:3和4:2时,异色瓢虫雌成虫对绣线菊蚜表现出显著的偏好性($P < 0.05$),对胡萝卜微管蚜表现出显著的负偏好性($P < 0.05$;图5-B);在高密度(240头/皿)条件下,当绣线菊蚜与胡萝卜微管蚜的密度比例为1:5、3:3和4:2时,异色瓢虫雌成虫对绣线菊蚜表现出显著的偏好性($P < 0.05$),对胡萝卜微管蚜表现出显著的负偏好性($P < 0.05$),而当绣线菊蚜与胡萝卜微管蚜的密度比例为2:4时,异色瓢虫雌成虫对绣线菊蚜表现出显著的偏好性($P < 0.05$),对胡萝卜微管蚜无显著负偏好性(图5-C)。

3 讨论

由于苹果树生育期较长,与一年生作物所处的生态系统相比,苹果园的生态系统相对较稳定,有利于自然天敌的生存并能持续发挥控害作用(Demesthas et al., 2017; 姜莉莉等, 2021)。但是,我国大多数的苹果园以清耕为主,这种传统模式导致果园生态系统服务功能较弱,加之大量、不合理地使用化学药剂,果园中害虫发生严重,自然天敌种群相对较少(王艳廷等, 2015; 李丽莉等, 2021)。在苹果园中种植功能植物能够增加果园中的生物多样性,为天敌提供多样化的食物来源和良好的栖息环境,增加天敌的种类和数量,充分发挥其控害功能(Cai et al., 2021; Zhang et al., 2022)。蛇床草为伞形科蛇床属的一年生草本植物,可涵养大量捕食性天敌,近年来应用于小麦、玉米、棉花、花生、苹果和梨等农田或果园对主要害虫进行生态调控,效果显著(杨泉峰等, 2020)。Cai et al. (2020; 2021)研究发现在苹果园种

植蛇床草,通过蛇床草植株中的挥发物组分对二乙苯和邻二乙苯可吸引大量的异色瓢虫,蛇床草的花粉、花蜜以及其上的胡萝卜微管蚜能为异色瓢虫提供丰富的食物资源,使得苹果-蛇床草微景观中异色瓢虫种群数量显著提高;此外,通过铷元素标记方法对异色瓢虫在微景观中的转移扩散进行定量追踪,发现苹果树上2/3的异色瓢虫是从蛇床草上转移而来。因此,对于异色瓢虫而言,在微景观中有绣线菊蚜和胡萝卜微管蚜2种猎物存在。



A、B、C: 总密度分别为 60、120 和 240 头/皿。A, B, C: Total density were 60, 120 and 240 individuals per dish, respectively.

图5 异色瓢虫雌成虫对绣线菊蚜和胡萝卜微管蚜共存时的偏好性

Fig. 5 The preference of *Harmonia axyridis* female adults for coexisting *Aphis spiraeicola* and *Semiaphis heraclei*

图中数据为平均数±标准误。*和**表示经 *t* 测验法检验差异显著 ($P<0.05$) 和极显著 ($P<0.01$)。Data in the figure are mean±SE. * or ** indicates significant difference by *t* test ($P<0.05$ or $P<0.01$).

天敌昆虫对猎物的捕食功能反应是衡量天敌捕食能力的重要指标之一,也是天敌昆虫控害能力的

重要评价依据(王庆森等,2014)。在本研究中,各虫态异色瓢虫对苹果-蛇床草微景观中2种蚜虫的捕食功能反应均符合 Holling II型圆盘方程,与异色瓢虫对绣线菊蚜(孙丽娟等,2012;方寅昊等,2013;朱冠雄,2019)的捕食功能反应结果一致,也与异色瓢虫对胡萝卜微管蚜(张晓曼等,2015;李新兵等,2019)的捕食功能反应结果一致。本研究结果显示,各虫态异色瓢虫对2种蚜虫的捕食能力随着捕食者虫龄的增长而增加,其中雌成虫对绣线菊蚜的捕食能力最强,雄成虫对胡萝卜微管蚜的捕食能力最强,因此利用异色瓢虫防治绣线菊蚜时,应充分发挥其成虫的捕食作用。各虫态异色瓢虫取食绣线菊蚜和胡萝卜微管蚜时的寻找效应都随着猎物密度的增加而呈现下降趋势,说明在猎物较少的情况下,异色瓢虫的寻找能力更强;而在猎物充足的情况下,异色瓢虫寻找猎物的能力相对较弱,这与方寅昊等(2013)和单彬等(2017)研究认为瓢虫对蚜虫的寻找效应随蚜虫密度的增加而降低的结果一致。

异色瓢虫是广食性的捕食性天敌,能捕食蚜虫、叶螨和介壳虫等重要农业害虫(巫鹏翔等,2017)。而了解异色瓢虫对于不同猎物的捕食偏好性,可以更好地指导其在生物防治中的应用。绣线菊蚜的寄主为苹果树,胡萝卜微管蚜的寄主为蛇床草,在苹果树行间种植蛇床草形成的微景观中2种蚜虫同时存在,研究异色瓢虫对这2种蚜虫的捕食偏好可以评估在果园种植蛇床草能否对异色瓢虫控制绣线菊蚜起到增效作用。本研究结果表明,当绣线菊蚜和胡萝卜微管蚜的总密度为60头/皿(低密度)时,异色瓢虫对2种蚜虫均无显著偏好性。究其原因主要是猎物总密度太少,不足以达到异色瓢虫的正常捕食量,未体现出偏好性。当绣线菊蚜和胡萝卜微管蚜总密度为120头/皿(中密度)时,根据异色瓢虫对2种蚜虫的捕食功能反应结果,猎物总量基本能满足异色瓢虫的日捕食量,在绣线菊蚜和胡萝卜微管蚜数量相当或绣线菊蚜数量稍多于胡萝卜微管蚜时,异色瓢虫成虫对绣线菊蚜表现出显著的偏好性,而对胡萝卜微管蚜表现出显著的负偏好性。当绣线菊蚜和胡萝卜微管蚜总密度为240头/皿(高密度)时,即猎物充足的情况下,绣线菊蚜与胡萝卜微管蚜的密度比例为1:5、2:4、3:3、4:2时异色瓢虫对绣线菊蚜均表现出显著的偏好性,对胡萝卜微管蚜均表现出显著的负偏好性。荆英等(2004)发现当烟粉虱 *Bemisia tabaci* 和红蜘蛛 *Tetranychusnr fijiensis* 这2种猎物共存时,在总密度较低条件下小黑瓢虫 *Del-*

*phastus catalinae*对烟粉虱卵未表现出显著的偏好性,而在总密度较高条件下则对其表现出显著的偏好性;杜军利等(2015)发现当红色型和绿色型豌豆蚜共存时,异色瓢虫在低密度及中密度条件下对红色型豌豆蚜均未表现出偏好性,但在高密度条件下对红色型豌豆蚜则表现出正偏好性。

在苹果园果树行间种植蛇床草,果树上绣线菊蚜种群数量显著低于清耕区,异色瓢虫种群数量显著高于清耕区,表明异色瓢虫对于控制绣线菊蚜种群具有重要作用(Cai et al., 2021)。在实验室条件下,当胡萝卜微管蚜和绣线菊蚜共存的总密度较大时,异色瓢虫雌成虫对绣线菊蚜具有显著的偏好性,研究结果对利用功能植物蛇床草涵养异色瓢虫控制苹果树绣线菊蚜提供了参考依据。但是,捕食性天敌对多种猎物的选择捕食是一个复杂的过程,尤其在田间生态系统中其捕食效能受到多种因素的影响,如天气情况、寄主植物、猎物种类和种间竞争等(Li et al., 2007; 周军辉等, 2020)。因此,在农业生态系统中多因素环境对异色瓢虫捕食偏好的影响还需进一步深入研究。

参 考 文 献 (References)

- Cai ZP, Ouyang F, Chen J, Yang QF, Desneux N, Xiao YL, Zhang JP, Ge F. 2021. Biological control of *Aphis spiraeicola* in apples using an insectary plant that attracts and sustains predators. *Biological Control*, 155: 104532
- Cai ZP, Ouyang F, Su JW, Zhang XR, Liu CL, Xiao YL, Zhang JP, Ge F. 2020. Attraction of adult *Harmonia axyridis* to volatiles of the insectary plant *Cnidium monnieri*. *Biological Control*, 143: 104189
- Chen X, Chen MY, Wang S, Zang LS, Xiao D. 2021. Analyses of differentially expressed genes in transcriptomes of multicolored Asian lady beetle *Harmonia axyridis* with different color patterns. *Journal of Plant Protection*, 48(6): 1341–1350 (in Chinese) [陈旭, 陈梦瑶, 王甦, 臧连生, 肖达. 2021. 不同色型异色瓢虫转录组差异表达基因分析. *植物保护学报*, 48(6): 1341–1350]
- Demestihax C, Plénet D, Génard M, Raynal C, Lescourret F. 2017. Ecosystem services in orchards. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 37(2): 1–21
- Ding YQ. 1994. *Insect mathematical ecology*. Beijing: Science Press, pp. 252–320 (in Chinese) [丁岩钦. 1994. *昆虫数学生态学*. 北京: 科学出版社, pp. 252–320]
- Du JL, Wu DG, Liu CZ. 2015. Study on predation preference of *Harmonia axyridis* (Pallas) and *Adonia variegata* (Goeze) on red and green color morph pea aphids. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 23(1): 102–109 (in Chinese) [杜军利, 武德功, 刘长仲. 2015. 异色瓢虫和多异瓢虫对两种色型豌豆蚜的捕食偏好研究. *中国生态农业学报*, 23(1): 102–109]
- Fang YH, Tao M, Ma J, Cao KQ, Chen GH, Li Q. 2013. Study of the predation functional responses of *Leis axyridis* Pallas to *Aphis citricola* Vander Goot. *Journal of Yunnan Agricultural University (Natural Science)*, 28(3): 306–309 (in Chinese) [方寅昊, 陶玫, 马钧, 曹克强, 陈国华, 李强. 2013. 异色瓢虫对绣线菊蚜捕食功能研究. *云南农业大学学报(自然科学)*, 28(3): 306–309]
- Holling CS. 1959. Some characteristics of simple types of predation and parasitism. *The Canadian Entomologist*, 91(7): 385–398
- Holling CS. 1966. The functional response of invertebrate predators to prey density. *Memoirs of the Entomological Society of Canada*, 98(S48): 5–86
- Jiang LL, Sun RH, Wu HB, Gong QT, Jiang ES. 2021. Study on biological control of *Aphis citricola* and *Tetranychus viennensis* in apple orchard. *China Fruits*, (11): 39–43 (in Chinese) [姜莉莉, 孙瑞红, 武海斌, 宫庆涛, 蒋恩顺. 2021. 苹果园绣线菊蚜和山楂叶螨的田间生物防控技术研究. *中国果树*, (11): 39–43]
- Jing Y, Huang J, Han JC, Ma RY. 2004. Selective predation of *Delphastus catalinae* (Horn) on *Bemisia tabaci* (Gennadius) and *Tetranychus fijiensis*. *Acta Ecologica Sinica*, 24(2): 292–296 (in Chinese) [荆英, 黄建, 韩巨才, 马瑞燕. 2004. 小黑瓢虫与两种猎物作用系统研究: 选择捕食作用. *生态学报*, 24(2): 292–296]
- Li C, Ding YQ, Ma SJ. 1982. Studies on predation and simulation model of dwarf spider *Erigonidium graminicolum* to cotton bollworm *Heliothis armigera* II: studies on one-predator-multi-prey species interacting system. *Acta Ecologica Sinica*, 2(4): 363–373 (in Chinese) [李超, 丁岩钦, 马世骏. 1982. 草间小黑蛛对棉铃虫幼虫的捕食作用及其模拟模型的研究 II: 捕食者-多种猎物系统的研究. *生态学报*, 2(4): 363–373]
- Li DX, Tian J, Shen ZR. 2007. Functional response of the predator *Scolothrips takahashii* to hawthorn spider mite, *Tetranychus viennensis*: effect of age and temperature. *BioControl*, 52: 41
- Li LL, Men XY, Guo WX, Qu CH, Cao HJ, Ding L, Zhu WJ, Qu ZL, Li Z, Lü SH, et al. 2021. Effects of grass-growing patterns on the population dynamics of natural enemies and management of *Aphis citricola* in apple orchards. *Chinese Journal of Biological Control*, 37(5): 885–891 (in Chinese) [李丽莉, 门兴元, 郭文秀, 曲诚怀, 曹洪建, 丁荔, 朱文君, 曲在亮, 李卓, 吕素洪, 等. 2021. 生草模式对苹果园天敌及其调控苹果绣线菊蚜作用的影响. *中国生物防治学报*, 37(5): 885–891]
- Li XB, Han SP, Liang C, Han H, Liu CX, He YZ. 2019. Functional response of *Harmonia axyridis* (Pallas) adults to *Semiaphis heraclei* (Takahashi). *China Plant Protection*, 39(2): 61–63 (in Chinese) [李新兵, 韩世鹏, 梁超, 韩慧, 刘彩霞, 何运转. 2019. 异色瓢虫成虫对胡萝卜微管蚜的捕食作用. *中国植保导刊*, 39(2): 61–63]
- Shan B, Zhang YM, Huang XZ, Chen GZ, Mao LY, Qin Q. 2017. Predatory function of *Propylaea japonica* to *Rhopalosiphum maidis*. *Agricultural Research and Application*, (3): 49–53 (in Chinese) [单彬, 张艳明, 黄秀枝, 陈冠州, 毛立彦, 覃茜. 2017. 龟纹瓢虫成虫对玉米蚜捕食作用研究. *农业研究与应用*, (3): 49–53]
- Shi ZH, Song KX, Wang JY, Li MX, Qiao HL, Guo K, Xu CQ. 2022.

- Morphological characteristics for identifying the instars of *Semiaphis heraclei*. Chinese Journal of Applied Entomology, 59(2): 457-465 (in Chinese) [史朝晖, 宋可心, 王疆越, 李梦欣, 乔海莉, 郭昆, 徐常青. 2022. 胡萝卜微管蚜孤雌蚜虫龄特征及鉴别. 应用昆虫学报, 59(2): 457-465]
- Sun LJ, Yi WX, Gu Y, Dong XL. 2012. Predatory functional response of *Harmonia axyridis* Pallas to two kinds of aphids damaging apple trees. Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica, 21(7): 39-43 (in Chinese) [孙丽娟, 衣维贤, 顾耘, 董向丽. 2012. 异色瓢虫对两种苹果蚜虫的捕食作用. 西北农业学报, 21(7): 39-43]
- Wang QS, Ju XL, Huang J. 2014. Predation functional responses of *Coccinella septempunctata* Linnaeus to *Toxoptera aurantii* (Boyer) and security evaluation of several botanical biopesticides. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 36(6): 1247-1252 (in Chinese) [王庆森, 鞠晓蕾, 黄建. 2014. 七星瓢虫对茶蚜的捕食功能反应及生物农药的安全性评价. 江西农业大学学报, 36(6): 1247-1252]
- Wang YT, Ji XH, Wu YS, Mao ZQ, Jiang YM, Peng FT, Wang ZQ, Chen XS. 2015. Research progress of cover crop in Chinese orchard. Chinese Journal of Applied Ecology, 26(6): 1892-1900 (in Chinese) [王艳廷, 冀晓昊, 吴玉森, 毛志泉, 姜远茂, 彭福田, 王志强, 陈学森. 2015. 我国果园生草的研究进展. 应用生态学报, 26(6): 1892-1900]
- Wu PX, Ma BX, Xu J, He J, Zhang R, Zhang RZ. 2017. Predation of *Paratrioza sinica* Yang & Li by *Harmonia axyridis* adults. Journal of Plant Protection, 44(4): 582-588 (in Chinese) [巫鹏翔, 马宝旭, 徐婧, 何嘉, 张蓉, 张润志. 2017. 异色瓢虫成虫对枸杞木虱的捕食作用. 植物保护学报, 44(4): 582-588]
- Xiao YL, Cai ZP, Zhang XR. 2020. Selection, configuration and application of functional plants in orchards. Chinese Journal of Applied Entomology, 57(1): 49-58 (in Chinese) [肖云丽, 蔡志平, 张兴瑞. 2020. 果园功能植物的筛选、配置及应用. 应用昆虫学报, 57(1): 49-58]
- Yang QF, Ouyang F, Men XY, Ge F. 2020. Functional plants: current uses and future research. Chinese Journal of Applied Entomology, 57(1): 41-48 (in Chinese) [杨泉峰, 欧阳芳, 门兴元, 戈峰. 2020. 功能植物的作用原理、方式及研究展望. 应用昆虫学报, 57(1): 41-48]
- Zhang CW, Chen MY, Wang YQ, Zhou H. 2021. Identification and expression analysis of cytochrome P450, antimicrobial peptide and lysozyme genes in multicolored Asian lady beetle *Harmonia axyridis* and seven-spotted lady beetle *Coccinella septempunctata*. Journal of Plant Protection, 48(6): 1351-1358 (in Chinese) [张超维, 陈梦瑶, 王亚琴, 周行. 2021. 异色瓢虫与七星瓢虫细胞色素P450、抗菌肽和溶菌酶基因的鉴定及表达分析. 植物保护学报, 48(6): 1351-1358]
- Zhang XM, Xi YM, Wang S, Luo C, Zhang F. 2015. Assessment of potential control of *Semiaphis heraclei* by *Harmonia axyridis*. Chinese Journal of Biological Control, 31(3): 317-321 (in Chinese) [张晓曼, 奚一名, 王甦, 罗晨, 张帆. 2015. 异色瓢虫对胡萝卜微管蚜防治潜能评价. 中国生物防治学报, 31(3): 317-321]
- Zhang XR, Ouyang F, Su JW, Li Z, Yuan YY, Sun YC, Sarkar SC, Xiao YL, Ge F. 2022. Intercropping flowering plants facilitate conservation, movement and biocontrol performance of predators in insecticide-free apple orchard. Agriculture, Ecosystems & Environment, 340: 108157
- Zhou JH, Li PL, Naiwuzhati Zunong, Zheng HN, Huang J, Wang ZH. 2020. Functional response and predation preference of lady beetle *Propylea japonica* to Asian citrus psyllid *Diaphorina citri*. Journal of Plant Protection, 47(5): 1062-1070 (in Chinese) [周军辉, 李鹏雷, 乃吾扎提·祖农, 郑卉娜, 黄建, 王竹红. 2020. 龟纹瓢虫对柑橘木虱的捕食功能反应及猎物偏好性. 植物保护学报, 47(5): 1062-1070]
- Zhou JZ, Chen CM. 1987. Predation of wolf spider *Lycosa pseudoannulata* to brown planthopper *Nilaparvata lugens* and simulation models there of III: selective predation. Acta Ecologica Sinica, 7(3): 228-237 (in Chinese) [周集中, 陈常铭. 1987. 拟环纹狼蛛对褐飞虱的捕食作用及其模拟模型的研究III: 选择捕食作用. 生态学报, 7(3): 228-237]
- Zhu GX. 2019. Functional response of *Harmonia axyridis* to *Eriosoma lanigerum* and *Aphis citricola*. Master thesis. Yangling: Northwest A & F University (in Chinese) [朱冠雄. 2019. 异色瓢虫对苹果绵蚜和绣线菊蚜的捕食功能反应研究. 硕士学位论文. 杨凌: 西北农林科技大学]

(责任编辑:李美娟)