朝鲜弯叶毛瓢虫对桧柏臀纹粉蚧的捕食作用*

王宇欣[1,2**] 仲 丽[2] 仇兰芬[2] 车少臣[2] 李 广[2] 夏 菲[2] 魏建荣[1***]

（1. 河北大学生命科学学院，生物互作基础学科研究中心，保定 071002；
2. 北京市园林绿化科学研究院，园林绿地生态功能评价与调控技术北京市重点实验室，北京 100102）

摘 要 【**目的**】桧柏臀纹粉蚧 *Planococcus vovae* 是近年在圆柏、龙柏等柏科植物上发现的重要害虫，朝鲜弯叶毛瓢虫 *Nephus* (*Bipunctatus*) *koreanus* 是其主要天敌昆虫。本研究旨在明确朝鲜弯叶毛瓢虫对桧柏臀纹粉蚧的捕食作用和生物防治潜能。【**方法**】在人工气候条件下[（26±1）℃，相对湿度 70%±5%，光周期 14L∶10D]测定朝鲜弯叶毛瓢虫 2-4 龄幼虫和成虫对不同虫态和龄期桧柏臀纹粉蚧的捕食功能反应、搜寻效应以及自身密度干扰反应。【**结果**】朝鲜弯叶毛瓢虫 2-4 龄幼虫和成虫对不同虫态和龄期粉蚧的捕食量在一定范围内随着猎物密度增加而增大，均符合 HollingⅡ圆盘方程；瓢虫成虫对粉蚧 1-3 龄若虫和成虫的捕食能力（a/T_h）最强，分别为 163.8、97.7、59.4 和 39.9 头，日最大捕食量（$1/T_h$）分别为 134.9、78.1、48.8 和 32.0 头/d；瓢虫 4 龄、3 龄和 2 龄幼虫次之。朝鲜弯叶毛瓢虫 2-4 龄幼虫和成虫对不同虫态和龄期粉蚧的搜寻效应均随猎物密度升高而下降，且龄期越高搜寻效应越高。朝鲜弯叶毛瓢虫对桧柏臀纹粉蚧的捕食作用存在种内干扰反应，当不同虫态和龄期粉蚧密度一定时，瓢虫 2-4 龄幼虫和成虫对粉蚧的捕食率随自身密度升高而下降，该干扰反应符合 Hassell 模型方程。【**结论**】朝鲜弯叶毛瓢虫对桧柏臀纹粉蚧具有较强的生物防治潜能。

关键词 朝鲜弯叶毛瓢虫；桧柏臀纹粉蚧；生物防治；捕食功能；搜寻效应；自身密度干扰反应

The predatory functional response of *Nephus* (*Bipunctatus*) *koreanus* to *Planococcus vovae*

WANG Yu-Xin[1,2**] ZHONG Li[2] QIU Lan-Fen[2] CHE Shao-Chen[2]
LI Guang[2] XIA Fei[2] WEI Jian-Rong[1***]

(1. Basic Discipline Research Center for Biological Interactions, College of Life Sciences, Hebei University, Baoding 071002, China; 2. Beijing Key Laboratory of Ecological Function Assessment and Regulation Technology of Green Space, Beijing Academy of Forestry and Landscape Architecture, Beijing 100102, China)

Abstract [Aim] *Planococcus vovae* is an important insect pest found on cypress plants such as *Juniperus chinensis* and *Sabina chinensis* in recent years. A ladybug *Nephus* (*Bipunctatus*) *koreanus* is its main predator. To clarify the potential of *N. koreanus* as a biological control agent for *P. vovae.* **[Methods]** We measured the predatory functional response, searching efficiency, and self-density interference response of *N. koreanus* 2nd-4th instar larvae and adults against different stages and ages of *P. vovae* under (26 ± 1) ℃, relative humidity 70% ± 5%, L∶D=14∶10. **[Results]** The predation quantities on different stages and ages of *P. vovae* by *N. koreanus* 2nd-4th instar larvae and adults increased within a certain range as prey density increasing, and the predation functional responses all followed the Holling Ⅱ model. The predatory ability (a/T_h) of the *N. koreanus* adults against the *P. vovae* was greater than that of the 2nd-4th instar larvae, with 163.8, 97.7, 59.4, and 39.9 individuals respectively, and the maximum daily predation ($1/T_h$) was 134.9, 78.1, 48.8, and 32.0 ind./day, respectively, and followed by *N. koreanus* 4th instar larvae, 3rd instar larvae, and 2nd instar larvae. The searching efficiency of *N. koreanus* 2nd-4th instar larvae and adults on different stages and ages of *P. vovae* decreased with the prey density increase, and the higher the larval

*资助项目 Supported projects：园林绿地生态功能评价与调控技术北京市重点实验室开放课题（二期）（STZD202402）；园林绿地生态功能评价与调控技术北京市重点实验室开放课题（YKYZD202504）

**第一作者 First author，E-mail：xin10292022@163.com

***通讯作者 Corresponding author，E-mail：weijr@hbu.edu.cn

收稿日期 Received：2024-08-08；接受日期 Accepted：2024-09-30

age, the higher the search effect was. The predatory effect of *N. koreanus* on *P.* vovae exhibits an intraspecific interference response. When the density of *P. vovae* remains constant at different stages and ages, the predatory rate of *N. koreanus* 2nd-4th instar larvae and adults on *P. vovae* decreases with their own density increase. This interference response conforms to the Hassell model equation. **[Conclusion]** *N. koreanus* has strong biological control potential against *P. vovae*.

Key words *Nephus* (*Bipunctatus*) *koreanus*; *Planococcus vovae*; biological control; predation functional; searching efficiency; self-density interference response

桧柏臀纹粉蚧 *Planococcus vovae*，属半翅目 Hemiptera 蚧次目 Coccomorpha 粉蚧科 Pseudococcidae，是近年来新入侵我国的危险性害虫（武三安等, 2023）。目前已知危害 20 多种柏科植物（CABI, 2021），以若虫和雌成虫吸食植物汁液，使受害植株枝条和针叶黄化干枯，长势衰弱，其分泌的蜜露极易引发煤污病，当虫口密度大时会形成厚的白色蜡质层，影响植物光合作用，严重时导致受害树整株枯死（Ülgentürk *et al.*, 2004; Graora *et al.*, 2014）。该虫原产于欧洲地区（Cox and Ben-Dov, 1986; Watson *et al.*, 1990; Beltrà *et al.*, 2012; Çiftci and Bolu, 2021），我国于 2020 年首次在河北省廊坊市发现（袁芳芳和魏嘉辉, 2022），2020-2024 年在北京市也发现该虫大量为害。

目前对介壳虫类害虫的防治仍以化学防治为主（Karamaouna *et al.*, 2013; Mruthunjayaswamy *et al.*, 2019）。盲目用药不仅药效差，而且还会因施药不科学致使害虫逐渐对其产生抗药性，并易造成环境污染和杀伤天敌（王德森等, 2011; 何佳春等, 2024）。因此，寻找有效的生物防治方法是当前介壳类害虫防治的重要策略。利用天敌控制害虫，是一种安全、环保、可持续的方法，尤其适合城镇园林绿化植物病虫害的防治（王亚南等, 2022）。因此，寻找有效的天敌对桧柏臀纹粉蚧绿色防控具有重要意义。

在野外调查过程中，作者团队在受害树上发现一种捕食性瓢虫，经鉴定为朝鲜弯叶毛瓢虫 *Nephus* (*Bipunctatus*) *koreanus*。该瓢虫为鞘翅目 Coleoptera，瓢虫科 Coccinellidae，弯叶毛瓢虫属 *Nephus*，最早发现于朝鲜，在其他国家暂无记录。成虫体宽椭圆形，基色黑色，鞘翅后缘和前胸背板前缘褐色，每个鞘翅上有 1 个大的褐色斑点，几乎达到鞘翅中部。触角和下颚须浅色，足从腿节以下为黄色。细毛浅色，半直立，在鞘翅后半部分明显朝向边缘。

通过前期对桧柏臀纹粉蚧种群动态及其天敌的系统调查发现，朝鲜弯叶毛瓢虫是捕食桧柏臀纹粉蚧的优势天敌，为更好地评价朝鲜弯叶毛瓢虫对桧柏臀纹粉蚧的控制作用，本研究通过测定朝鲜弯叶毛瓢虫 2-4 龄幼虫和成虫对不同虫态和龄期桧柏臀纹粉蚧的捕食效能，明确朝鲜弯叶毛瓢虫对不同密度桧柏臀纹粉蚧的捕食功能、搜寻效应及自身密度的干扰反应，建立了捕食功能反应模型和自身干扰模型，以期为释放朝鲜弯叶毛瓢虫控制桧柏臀纹粉蚧提供理论依据。

1　材料与方法

1.1 供试虫源

桧柏臀纹粉蚧：采集自北京天坛公园（39.52′43″ N，116.23′34″ E），室内用北京桧柏 *Sabina chinensis* ‘Beijingensis’在（26±1）℃，相对湿度 70%±5%，光周期 14L∶10D 条件下饲养，继代繁殖 10 代后，建立实验种群，作为供试虫源。

朝鲜弯叶毛瓢虫：采集自中国林业科学研究院（40°00′39″ N，116°24′66″ E），在室内以桧柏臀纹粉蚧作为猎物饲养，待产卵孵化后选取 2-4 龄幼虫和成虫作为试虫用于捕食试验。

1.2　试验方法

1.2.1　朝鲜弯叶毛瓢虫对桧柏臀纹粉蚧的捕食功能反应　将瓢虫 2-4 龄幼虫和成虫在试验开始前饥饿 24 h，作为供试捕食者备用。试验在塑料培养皿内（d=90 mm）进行，剪取 3-4 cm 长的新鲜桧柏枝条用湿润脱脂棉保湿，根据预实验各虫态和龄期朝鲜弯叶毛瓢虫的捕食量，每根枝条

上分别接所需虫态和龄期的桧柏臀纹粉蚧若虫，猎物密度设置见表 1。随后将饥饿处理过的各虫态和龄期瓢虫分别放进培养皿中，每个处理重复 5 次，保鲜膜密封培养皿，并用昆虫针扎少量透气孔，放入人工气候箱（宁波莱福科技有限公司 PRX - 450A 型）内培养[（26±1）℃，相对湿度 70%±5%, 光周期 14L：10D]。24 h 后，将瓢虫取出，统计培养皿中剩余粉蚧的数量。各密度分别设置空白对照，获得该密度下桧柏臀纹粉蚧的自然死亡和逃逸率，对瓢虫的捕食量进行校正。

试验结果采用 HollingⅡ型圆盘方程拟合及参数估算（Holling, 1959; 吴坤君等, 2004）。捕食功能反应公式为 $N_a = aN_0T/(1+aT_hN_0)$（丁岩钦, 1994），搜寻效应公式为 $S = a/(1 + aT_hN_0)$（丁岩钦, 1980）。式中，N_a 为捕食猎物数，S 为搜寻效应，T 为猎物暴露时间（1 d），a 为天敌捕食猎物的效率，T_h（d）为天敌捕食 1 头猎物所需时间，N_0 为猎物密度。

表 1　朝鲜弯叶毛瓢虫对桧柏臀纹粉蚧的捕食功能反应试验设计

Table 1　Experimental design of the predatory functional response of *Nephus* (*Bipunctatus*) *koreanus* to *Planococcus vovae*

朝鲜弯叶毛瓢虫虫态或龄期 *N. koreanus* stage or age	桧柏臀纹粉蚧虫态或龄期 *P. vovae* stage or age	猎物密度（头/皿） Prey density (ind./dish)
2 龄幼虫 2nd instar larva	1 龄若虫 1st instar nymph	10, 20, 30, 40, 50
	2 龄若虫 2nd instar nymph	4, 8, 12, 16, 20
	3 龄若虫 3rd instar nymph	3, 6, 9, 12, 15
	成虫 Adult	2, 4, 6, 8, 10
3 龄幼虫 3rd instar larva	1 龄若虫 1st instar nymph	15, 30, 45, 60, 75
	2 龄若虫 2nd instar nymph	10, 20, 30, 40, 50
	3 龄若虫 3rd instar nymph	6, 12, 18, 24, 30
	成虫 Adult	4, 8, 12, 16, 20
4 龄幼虫 4th instar larva	1 龄若虫 1st instar nymph	20, 40, 60, 80, 120
	2 龄若虫 2nd instar nymph	20, 30, 40, 50, 60
	3 龄若虫 3rd instar nymph	8, 16, 24, 32, 40
	成虫 Adult	6, 12, 18, 24, 30
成虫 Adult	1 龄若虫 1st instar nymph	25, 50, 75, 100, 125
	2 龄若虫 2nd instar nymph	20, 35, 50, 65, 80
	3 龄若虫 3rd instar nymph	10, 20, 30, 40, 50
	成虫 Adult	8, 14, 20, 26, 32

1.2.2　朝鲜弯叶毛瓢虫自身密度对捕食桧柏臀纹粉蚧的干扰效应　试验在塑料培养皿内（d=90 mm）进行，不同处理分别接入桧柏臀纹粉蚧 1-3 龄若虫和成虫各 300 头，方法同 1.2.1。随后按 1、2、3、4 和 5 头/皿分别将饥饿处理 24 h 后的朝鲜弯叶毛瓢虫 2-4 龄幼虫、成虫放入培养皿中，每个处理 5 次重复。用保鲜膜密封培养皿，并用昆虫针扎若干透气孔，试验在（26±1）℃，相对湿度 70%±5%, 光周期 14L：10D 下进行。24 h 后统计捕食量。

平均捕食效率 E 受捕食者自身密度 P 影响，自身密度增加时干扰效应随之增大，可用公式：$E = N_a/N_P$ 表示。拟合干扰效应模型 $E = QP^{-m}$，Q 为搜寻常数，m 为干扰系数，分摊竞争强度 $I = (E_1 - E_P)/E_1$，式中 E_1 为 1 头捕食者的平均捕食率，E_P 为 P 头捕食者时的捕食率（Hassell and Varley, 1969; 丁岩钦, 1980）。

1.3　数据分析

试验数据采用 Excel 2010 和 SPSS 26.0 统计软件进行分析处理，拟合捕食功能反应模型并进行卡方检验，由于各虫态和龄期猎物密度设置不

同（表 1 均为 5 个梯度），按梯度将其划分为 5 个等级，对原始数据进行方差齐性检验后采用 lg$x$ 进行数据转换，采用双因素方差分析，Duncan 氏新复极差法进行处理之间的差异显著性检验（P<0.05）。

2　结果与分析

2.1　朝鲜弯叶毛瓢虫对桧柏臀纹粉蚧的捕食功能反应

本实验中猎物的自然死亡率与逃逸率均趋近于 0，因此无需对捕食功能反应中的捕食量进行校正。朝鲜弯叶毛瓢虫的捕食量随桧柏臀纹粉蚧密度的增加而增大，并且随着瓢虫龄期的增大而增加，当桧柏臀纹粉蚧密度达到一定限度时，瓢虫的捕食量不再升高而是在一定范围内波动。利用 HollingⅡ圆盘方程对朝鲜弯叶毛瓢虫 2-4 龄幼虫和成虫捕食不同虫态和龄期桧柏臀纹粉蚧的实验结果进行拟合，其 R^2 均大于 0.9，表明拟合效果较好。将朝鲜弯叶毛瓢虫 2-4 龄幼虫和成虫对不同虫态和龄期桧柏臀纹粉蚧的捕食功能反应的参数 a 和 T_h 代入 HollingⅡ圆盘方程，对朝鲜弯叶毛瓢虫 2-4 龄幼虫和成虫的实际捕食量和理论捕食量进行卡方适合度检验，结果显示理论捕食量与实际捕食量无显著性差异[$\chi^2 < \chi^2_{(0.05,4)}$=9.488]，说明该反应模型较为理想（表 2）。

研究表明，朝鲜弯叶毛瓢虫 2-4 龄幼虫和成虫分别对不同虫态和龄期桧柏臀纹粉蚧的捕食功能反应具有显著性差异，瓢虫对不同虫态、虫龄粉蚧的捕食能力从大到小依次为 1 龄若虫（F=920.570, df=99, 3, P < 0.01）、2 龄若虫（F=2 286.668, df=99, 3, P < 0.01）、3 龄若虫（F=714.988, df=99, 3, P < 0.01）和成虫（F=2 743,724, df=99, 3, P < 0.01）。不同虫态和龄期瓢虫对同一虫态和龄期粉蚧的捕食功能反应也具有显著性差异，且随着瓢虫龄期增大捕食能力逐渐增强，成虫高于幼虫（2 龄幼虫；F=2 726.233, df=99, 3, P < 0.01; 3 龄幼虫：F=928.227, df=99, 3, P < 0.01; 4 龄幼虫：F=1 101.095, df=99, 3, P < 0.01; 成虫：F=556.097, df=99, 3, P < 0.01）。2-4 龄瓢虫幼虫和成虫对桧柏臀纹粉蚧 1 龄若虫的日最大捕食量（$1/T_h$）分别为 58.5、90.3、109.0 和 134.9 头，瞬时攻击率（a）分别为 1.17、1.17、1.20 和 1.21；2-4 龄瓢虫幼虫和成虫对桧柏臀纹粉蚧 2 龄、3 龄若虫及成虫的日最大捕食量（$1/T_h$）和瞬时攻击率（a）见表 2。

2.2 朝鲜弯叶毛瓢虫对桧柏臀纹粉蚧的搜寻效应

朝鲜弯叶毛瓢虫 2-4 龄幼虫和成虫对不同虫态和龄期桧柏臀纹粉蚧的搜寻效应如表 3 所示。瓢虫 2 龄幼虫和成虫对各虫态和龄期桧柏臀纹粉蚧的搜寻效应之间差异不显著（2 龄幼虫：F=1.164, df=19, 3, P=0.238; 成虫：F=3.104, df=19, 3, P=0.067），而瓢虫 3-4 龄幼虫差异显著（3 龄幼虫 F=142.791, df=19, 3, P<0.01; 4 龄幼虫：F=70.005, df=19, 3, P<0.01）。朝鲜弯叶毛瓢虫 2-4 龄幼虫和成虫对各虫态和龄期桧柏臀纹粉蚧的搜寻效应均随着猎物密度的增大逐渐减弱，搜寻效应均大于 0.5。在供试的所有猎物密度条件下，朝鲜弯叶毛瓢虫 3 龄和 4 龄幼虫对桧柏臀纹粉蚧低龄若虫的搜寻效应均大于高龄若虫。当桧柏臀纹粉蚧 1 龄若虫的种群密度分别为 10 和 25 头/皿时，朝鲜弯叶毛瓢虫 2 龄幼虫和成虫对其搜寻效应最大，分别为 0.97 和 0.99；当桧柏臀纹粉蚧 3 龄若虫的种群密度分别为 15 和 50 头/皿时，朝鲜弯叶毛瓢虫 2 龄幼虫和成虫对其搜寻效应最小，分别为 0.56 和 0.54。

2.3　朝鲜弯叶毛瓢虫自身密度干扰反应

在捕食空间和猎物密度不变的情况下，朝鲜弯叶毛瓢虫 2-4 龄幼虫和成虫的日单头捕食量随着其自身密度的增加呈下降趋势，说明各虫态和龄期朝鲜弯叶毛瓢虫个体间，在捕食过程中存在相互干扰和竞争作用。由表 4 可知不同密度朝鲜弯叶毛瓢虫 2-4 龄幼虫和成虫分别对各虫态和龄期桧柏臀纹粉蚧的捕食效率之间差异显著（粉蚧 1 龄若虫：F=108.005; df=19, 3; P<0.01; 粉蚧 2 龄若虫：F=107.401; df=19, 3; P<0.01; 粉蚧 3 龄若虫：F=58.712; df=19, 3; P<0.01; 粉蚧 4 龄若虫 F=87.427; df=19, 3; P<0.01），同一虫态和龄期瓢

表 2　朝鲜弯叶毛瓢虫对桧柏臀纹粉蚧的捕食功能反应方程及其参数

Table 2　The equation and parameters of the predation functional response of *Nephus* (*Bipunctatus*) *koreanus* to *Planococcus vovae*

朝鲜弯叶毛瓢虫虫态或龄期 *N. koreanus* stage or age	桧柏臀纹粉蚧虫态或龄期 *P. vovae* stage or age	捕食功能方程 Functional response equation	R^2	χ^2	猎物密度（头/皿） Density of prey (ind./dish)	日均捕食量（头） Daily consumption (ind.)	处理时间 T_h（d） Handling time (d)	瞬时攻击率 a Attacking efficiency	日最大捕食量 $1/T_h$（头） Maximum daily predation (ind.)	捕食能力 a/T_h Predation capacity
2 龄幼虫 2nd instar larva	1 龄若虫 1st instar nymph	N_a=1.169N/(1+0.020N)	0.96	0.34	10	9.4±0.24 e	0.02	1.17	58.5	68.3
					20	17.4±0.40 d				
					30	23.8±0.49 c				
					40	25.8±0.37 b				
					50	27.2±0.37 a				
	2 龄若虫 2nd instar nymph	N_a=1.103N/(1+0.044N)	0.97	0.16	4	3.6±0.24 d	0.04	1.10	25.1	27.7
					8	6.8±0.20 c				
					12	9.4±0.24 b				
					16	10.2±0.20 a				
					20	10.8±0.37 a				
	3 龄若虫 3rd instar nymph	N_a=1.167N/(1+0.072N)	0.96	0.06	3	2.8±0.20 d	0.06	1.17	16.2	18.9
					6	5.0±0.32 c				
					9	6.8±0.37 b				
					12	7.4±0.24 ab				
					15	8.0±0.32 a				
	成虫 Adult	N_a=1.047N/(1+0.075N)	0.97	0.02	2	1.8±0.20 d	0.07	1.05	14.0	14.6
					4	3.2±0.20 c				
					6	4.6±0.24 b				
					8	5.2±0.20 ab				
					10	5.8±0.37 a				
3 龄幼虫 3rd instar larva	1 龄若虫 1st instar nymph	N_a=1.174N/(1+0.013N)	0.96	0.50	15	14.2±0.37 e	0.01	1.17	90.3	106.0
					30	26.6±0.51 d				
					45	35.8±0.58 c				
					60	40.0±0.32 b				
					75	41.4±0.24 a				
	2 龄若虫 2nd instar nymph	N_a=1.185N/(1+0.022N)	0.95	0.21	10	9.4±0.24 e	0.02	1.19	53.9	63.8
					20	16.8±0.37 d				
					30	22.6±0.51 c				
					40	24.8±0.37 b				
					50	26.4±0.40 a				

续表 2 (Table 2 continued)

朝鲜弯叶毛瓢虫虫态或龄期 *N. koreanus* stage or age	桧柏臀纹粉蚧虫态或龄期 *P. vovae* stage or age	捕食功能方程 Functional response equation	R^2	χ^2	猎物密度（头/皿） Density of prey (ind./dish)	日均捕食量（头） Daily consumption (ind.)	处理时间 T_h（d） Handling time (d)	瞬时攻击率 a Attacking efficiency	日最大捕食量 $1/T_h$（头） Maximum daily predation (ind.)	捕食能力 a/T_h Predation capacity
3 龄幼虫 3rd instar larva	3 龄若虫 3rd instar nymph	N_a=1.155N/(1+0.033N)	0.96	0.17	6	5.6±0.24 d	0.03	1.16	35.0	40.4
					12	10.2±0.37 c				
					18	14.0±0.32 b				
					24	15.4±0.24 a				
					30	16.2±0.27 a				
	成虫 Adult	N_a=1.143N/(1+0.056N)	0.95	0.12	4	3.4±0.24 d	0.05	1.14	20.4	23.3
					8	6.6±0.24 c				
					12	8.8±0.37 b				
					16	9.6±0.24 ab				
					20	10.0±0.32 a				
4 龄幼虫 4th instar larva	1 龄若虫 1st instar nymph	N_a=1.199N/(1+0.011N)	0.95	0.71	20	18.8±0.37 e	0.01	1.20	109.0	130.7
					40	35.0±0.71 d				
					60	46.2±1.07 c				
					80	50.2±0.37 b				
					100	52.4±0.60 a				
	2 龄若虫 2nd instar nymph	N_a=1.582N/(1+0.031N)	0.90	0.20	20	19.0±0.32 d	0.02	1.58	51.0	80.7
					30	25.8±0.58 c				
					40	29.4±0.51 b				
					50	30.8±0.58 ab				
					60	31.6±0.51 a				
	3 龄若虫 3rd instar nymph	N_a=1.188N/(1+0.029N)	0.95	0.19	8	7.4±0.24 d	0.02	1.19	41.0	48.7
					16	13.8±0.58 c				
					24	17.6±0.51 b				
					32	19.8±0.37 a				
					40	20.6±0.40 a				
	成虫 Adult	N_a=1.172N/(1+0.038N)	0.95	0.04	6	5.6±0.24 e	0.03	1.17	30.8	36.2
					12	9.8±0.37 d				
					18	13.2±0.37 c				
					24	14.8±0.49 b				
					30	16.2±0.37 a				
成虫 Adult	1 龄若虫 1st instar nymph	N_a=1.214N/(1+0.009N)	0.95	0.51	25	23.8±0.20 e	0.01	1.21	134.9	163.8
					50	43.6±0.60 d				
					75	57.0±1.00 c				
					100	62.6±0.51 b				
					125	67.2±0.20 a				

续表 2 (Table 2 continued)

朝鲜弯叶毛瓢虫虫态或龄期 *N. koreanus* stage or age	桧柏臀纹粉蚧虫态或龄期 *P. vovae* stage or age	捕食功能方程 Functional response equation	R^2	χ^2	猎物密度（头/皿） Density of prey (ind./dish)	日均捕食量（头） Daily consumption (ind.)	处理时间 T_h（d） Handling time (d)	瞬时攻击率 a Attacking efficiency	日最大捕食量 $1/T_h$（头） Maximum daily predation (ind.)	捕食能力 a/T_h Predation capacity
成虫 Adult	2 龄若虫 2nd instar nymph	N_a=1.250N/(1+0.016N)	0.94	0.23	20	18.6±0.24 d	0.01	1.25	78.1	97.7
					35	28.6±0.51 c				
					50	26.4±0.51 b				
					65	40.6±0.93 a				
					80	41.6±0.24 a				
	3 龄若虫 3rd instar nymph	N_a=1.219N/(1+0.025N)	0.95	0.25	10	9.4±0.24 d	0.02	1.22	48.8	59.4
					20	17.2±0.37 c				
					30	21.8±0.37 b				
					40	24.8±0.20 a				
					50	25.2±0.20 a				
	成虫 Adult	N_a=1.247N/(1+0.039N)	0.94	0.09	8	7.4±0.24 d	0.03	1.25	32.0	39.9
					14	11.6±0.40 c				
					20	14.6±0.24 b				
					26	16.2±0.37 a				
					32	16.8±0.37 a				

表中数据采用双因素方差分析 Duncan 氏新复极差法进行处理之间的差异显著性检验，数据后标有不同小写字母表示差异显著（$P < 0.01$）。表 3 和表 4 同。The data in the table were processed using two-way analysis of variance, and Duncan's new multiple range test was employed to conduct significance tests on the differences between treatments，data following with different letters indicate significant difference ($P < 0.01$). The same for Tables 3 and Table 4.

表 3　朝鲜弯叶毛瓢虫对桧柏臀纹粉蚧的搜寻效应方程及参数

Table 3　The equation and parameters of the searching efficiency of *Nephus* (*Bipunctatus*) *koreanus* to *Planococcus vovae*

朝鲜弯叶毛瓢虫虫态或龄期 *N. koreanus* stage or age	桧柏臀纹粉蚧虫态或龄期 *P. vovae* stage or age	搜寻效应方程 Search effect equations	桧柏臀纹粉蚧密度（搜寻效应） *P. vovae* density (searching efficiency)
2 龄幼虫 2nd instar larva	1 龄若虫 1st instar nymph	S=1.169/(1+0.020N)	10 (0.97), 20 (0.84), 30 (0.73), 40 (0.65), 50 (0.59)
	2 龄若虫 2nd instar nymph	S=1.103/(1+0.044N)	4 (0.94), 8 (0.82), 12 (0.72), 16 (0.65), 20 (0.59)
	3 龄若虫 3rd instar nymph	S=1.167/(1+0.072N)	3 (0.96), 6 (0.82), 9 (0.71), 12 (0.63), 15 (0.56)
	成虫 Adult	S=1.047/(1+0.075N)	2 (0.91), 4 (0.81), 6 (0.72), 8 (0.65), 10 (0.60)
3 龄幼虫 3rd instar larva	1 龄若虫 1st instar nymph	S=1.174/(1+0.013N)	15 (0.98), 30 (0.85), 45 (0.74), 60 (0.66), 75 (0.59)
	2 龄若虫 2nd instar nymph	S=1.185/(1+0.022N)	10 (0.97), 20 (0.82), 30 (0.71), 40 (0.63), 50 (0.56)
	3 龄若虫 3rd instar nymph	S=1.155/(1+0.033N)	6 (0.96), 12 (0.83), 18 (0.73), 24 (0.65), 30 (0.58)
	成虫 Adult	S=1.143/(1+0.056N)	4 (0.93), 8 (0.79), 12 (0.69), 16 (0.60), 20 (0.54)
4 龄幼虫 4th instar larva	1 龄若虫 1st instar nymph	S=1.199/(1+0.011N)	20 (0.98), 40 (0.83), 60 (0.72), 80 (0.64), 100 (0.57)
	2 龄若虫 2nd instar nymph	S=1.582/(1+0.031N)	20 (0.98), 30 (0.82), 40 (0.71), 50 (0.62), 60 (0.55)
	3 龄若虫 3rd instar nymph	S=1.188/(1+0.029N)	8 (0.96), 16 (0.81), 24 (0.70), 32 (0.62), 40 (0.55)
	成虫 Adult	S=1.172/(1+0.038N)	6 (0.95), 12 (0.81), 18 (0.70), 24 (0.61), 30 (0.55)
成虫 Adult	1 龄若虫 1st instar nymph	S=1.214/(1+0.009N)	25 (0.99), 50 (0.84), 75 (0.72), 100 (0.64), 125 (0.57)
	2 龄若虫 2nd instar nymph	S=1.250/(1+0.016N)	20 (0.95), 35 (0.80), 50 (0.70), 65 (0.61), 80 (0.55)
	3 龄若虫 3rd instar nymph	S=1.219/(1+0.025N)	10 (0.98), 20 (0.81), 30 (0.70), 40 (0.61), 50 (0.54)
	成虫 Adult	S=1.247/(1+0.039N)	8 (0.95), 14 (0.81), 20 (0.70), 16 (0.62), 32 (0.56)

虫对不同虫龄粉蚧的捕食效率从大到小依次为 1 龄若虫、2 龄若虫、3 龄若虫和成虫。在相同朝鲜弯叶毛瓢虫密度条件下，2 龄瓢虫幼虫日单头捕食量和捕食效率最低；而成虫日单头捕食量和捕食效率最高（表 4）。随着天敌密度的增大，分摊竞争强度逐渐增强，当朝鲜弯叶毛瓢虫密度为 5 头/皿时，其分担的竞争强度最大。猎物虫态和龄期选择的结果也表明，不同龄期朝鲜弯叶毛瓢虫捕食桧柏臀纹粉蚧低龄若虫的数量更多，这可能因为桧柏臀纹粉蚧低龄若虫个体较小，朝鲜弯叶毛瓢虫需要捕食更多的猎物才能维持基本的营养。

表 4　不同密度朝鲜弯叶毛瓢虫对捕食桧柏臀纹粉蚧的影响

Table 4　Affection of different densities of *Nephus* (*Bipunctatus*) *koreanus* on prey efficiency to *Planococcus vovae*

朝鲜弯叶毛瓢虫虫态或龄期 *N. koreanus* stage or age	桧柏臀纹粉蚧虫态或龄期 *P. vovae* stage or age	捕食者密度（头/皿） Density of predator (ind./dish)	日均捕食量（头） Daily consumption (ind.)	平均捕食效率 Predation rate	干扰系数 *m* Interference coefficient	搜索系数 *Q* Search coefficient	种内干扰方程 Intraspecific interference equation	分摊竞争强度 *I* Intensity of scramble competition
2 龄幼虫 2nd instar larva	1 龄若虫 1st instar nymph	1	25.2±0.37 a	0.08	0.34	0.08	$E=0.083P^{-0.34}$	0.00
		2	19.4±0.51 b	0.07				0.21
		3	16.8±0.37 c	0.07				0.31
		4	15.8±0.37 c	0.05				0.38
		5	14.5±0.24 d	0.05				0.42
	2 龄若虫 2nd instar nymph	1	12.4±0.51 a	0.04	0.42	0.04	$E=0.042P^{-0.421}$	0.00
		2	9.4±0.51 b	0.03				0.25
		3	8.0±0.32 c	0.03				0.37
		4	7.0±0.32 cd	0.02				0.44
		5	6.3±0.40 d	0.02				0.49
	3 龄若虫 3rd instar nymph	1	8.2±0.37 a	0.03	0.41	0.03	$E=0.028P^{-0.409}$	0.00
		2	6.6±0.24 b	0.02				0.25
		3	5.6±0.24 c	0.02				0.36
		4	4.8±0.37 cd	0.02				0.43
		5	4.2±0.37 d	0.01				0.48
	成虫 Adult	1	5.6±0.24 a	0.02	0.47	0.02	$E=0.019P^{-0.474}$	0.00
		2	4.4±0.24 b	0.02				0.28
		3	3.6±0.24 c	0.01				0.41
		4	3.0±0.00 d	0.01				0.48
		5	2.6±0.24 d	0.01				0.53
3 龄幼虫 3rd instar larva	1 龄若虫 1st instar nymph	1	41.8±0.27 a	0.14	0.34	0.13	$E=0.134P^{-0.341}$	0.00
		2	30.4±0.51 b	0.10				0.21
		3	26.8±0.37 c	0.09				0.31
		4	25.2±0.37 d	0.08				0.38
		5	24.3±0.37 d	0.08				0.42
	2 龄若虫 2nd instar nymph	1	26.4±0.24 a	0.09	0.34	0.09	$E=0.087P^{-0.335}$	0.00
		2	20.6±0.51 b	0.07				0.21
		3	17.8±0.37 c	0.06				0.31
		4	16.6±0.24 d	0.06				0.37
		5	15.4±0.51 e	0.05				0.42

续表 4 (Table 4 continued)

朝鲜弯叶毛瓢虫虫态或龄期 *N. koreanus* stage or age	桧柏臀纹粉蚧虫态或龄期 *P. vovae* stage or age	捕食者密度（头/皿） Density of predator (ind./dish)	日均捕食量（头） Daily consumption (ind.)	平均捕食效率 Predation rate	干扰系数 *m* Interference coefficient	搜索系数 *Q* Search coefficient	种内干扰方程 Intraspecific interference equation	分摊竞争强度 *I* Intensity of scramble competition
3 龄幼虫 3rd instar larva	3 龄若虫 3rd instar nymph	1	16.4±0.24 a	0.06	0.41	0.05	$E=0.054P^{-0.412}$	0.00
		2	12.2±0.20 b	0.04				0.25
		3	10.8±0.37 c	0.04				0.36
		4	9.2±0.20 d	0.03				0.44
		5	8.4±0.51 e	0.03				0.49
	成虫 Adult	1	10.2±0.37 a	0.03	0.52	0.04	$E=0.035P^{-0.515}$	0.00
		2	7.8±0.27 b	0.03				0.30
		3	6.4±0.24 c	0.02				0.43
		4	5.2±0.20 d	0.02				0.51
		5	4.4±0.24 d	0.02				0.56
4 龄幼虫 4th instar larva	1 龄若虫 1st instar nymph	1	50.8±0.37 a	0.17	0.33	0.16	$E=0.157P^{-0.33}$	0.00
		2	33.6±0.24 b	0.11				0.20
		3	31.6±0.40 c	0.11				0.30
		4	30.4±0.24 c	0.10				0.37
		5	29.5±0.37 d	0.10				0.41
	2 龄若虫 2nd instar nymph	1	32.2±0.37 a	0.11	0.31	0.10	$E=0.103P^{-0.31}$	0.00
		2	23.2±0.37 b	0.08				0.19
		3	21.4±0.40 c	0.07				0.29
		4	10.2±0.20 cd	0.07				0.35
		5	19.4±0.68 d	0.07				0.39
	3 龄若虫 3rd instar nymph	1	20.4±0.24 a	0.07	0.25	0.07	$E=0.067P^{-0.25}$	0.00
		2	16.4±0.24 b	0.06				0.16
		3	15.2±0.20 c	0.05				0.24
		4	14.2±0.37 d	0.05				0.29
		5	13.6±0.40 d	0.05				0.33
	成虫 Adult	1	15.4±0.24 a	0.05	0.34	0.05	$E=0.052P^{-0.344}$	0.00
		2	12.2±0.58 b	0.04				0.21
		3	10.8±0.37 c	0.04				0.32
		4	9.6±0.24 d	0.03				0.38
		5	8.8±0.20 d	0.03				0.43
成虫 Adult	1 龄若虫 1st instar nymph	1	64.6±0.81 a	0.215	0.33	0.20	$E=0.204P^{-0.327}$	0.00
		2	45.4±0.51 b	0.151				0.20
		3	40.4±0.24 c	0.135				0.30
		4	39.6±0.51 c	0.132				0.36
		5	38.0±0.45d	0.127				0.41

续表 4 (Table 4 continued)

朝鲜弯叶毛瓢虫虫态或龄期 *N. koreanus* stage or age	桧柏臀纹粉蚧虫态或龄期 *P. vovae* stage or age	捕食者密度（头/皿） Density of predator (ind./dish)	日均捕食量（头） Daily consumption (ind.)	平均捕食效率 Predation rate	干扰系数 *m* Interference coefficient	搜索系数 *Q* Search coefficient	种内干扰方程 Intraspecific interference equation	分摊竞争强度 *I* Intensity of scramble competition
成虫 Adult	2 龄若虫 2nd instar nymph	1	41.2±0.66 a	0.137	0.36	0.13	$E=0.132P^{-0.355}$	0.00
		2	29.6±0.40 b	0.099				0.22
		3	26.2±0.58 c	0.087				0.32
		4	24.2±0.37 d	0.081				0.39
		5	23.4±0.51 d	0.078				0.44
	3 龄若虫 3rd instar nymph	1	25.8±0.37 a	0.086	0.32	0.09	$E=0.085P^{-0.324}$	0.00
		2	20.2±0.37 b	0.067				0.20
		3	17.8±0.37 c	0.059				0.30
		4	16.2±0.37 c	0.054				0.36
		5	15.4±0.51 d	0.051				0.41
	成虫 Adult	1	16.6±0.40 a	0.055	0.43	0.06	$E=0.056P^{-0.431}$	0.00
		2	12.8±0.37 b	0.043				0.26
		3	10.2±0.37 b	0.034				0.38
		4	9.2±0.58 cd	0.031				0.45
		5	8.4±0.51 d	0.028				0.50

各处理中的猎物均为 300 头。There were 300 individuals of *Planococcus vovae* for each treatment.

3 讨论

捕食作用是一个重要的生物学过程，对昆虫种群数量变动具有重要影响，也对害虫的防治和益虫的开发利用具有重要意义（Okuyama, 2012; 周军辉等, 2020）。捕食功能反应是衡量天敌捕食有效性和评估天敌捕食潜力的一种常用手段（Holling, 1965; Xue *et al*., 2009; Batool *et al*., 2014; Wu *et al*., 2018; Shahpouri *et al*., 2019; 赵英杰等, 2019），可以反映捕食者对猎物的搜寻效率、处理时间、攻击率以及猎物密度对其捕食量的影响，对于探究捕食性天敌的最优控害效果具有重要意义。在捕食时，天敌自身密度的干扰作用，也会对捕食效率产生影响（段雪莹等, 2021）。桧柏臀纹粉蚧自 2020 年在北京地区暴发性成灾以来，已成为当地为害严重的新发害虫。野外调查发现朝鲜弯叶毛瓢虫是桧柏臀纹粉蚧的重要捕食性天敌，对桧柏臀纹粉蚧的捕食能力强，具有较强的控害作用，对桧柏臀纹粉蚧的生物防治意义重大。

本研究通过对朝鲜弯叶毛瓢虫捕食桧柏臀纹粉蚧能力的测定，发现朝鲜弯叶毛瓢虫 2-4 龄幼虫和成虫对不同虫态和龄期桧柏臀纹粉蚧的捕食功能反应均符合 HollingⅡ圆盘方程，这与多异瓢虫 *Hippodamia variegata* 对核桃黑斑蚜 *Chromaphis juglandicola*（王巧等, 2023）、龟纹瓢虫 *Propylaea japonica* 对柑橘木虱 *Diaphorina citri*（周军辉等, 2020）、异色瓢虫 *Harmonia axyridis* 对烟蚜 *Myzus persicae*（王媛等, 2015）、异色瓢虫对核桃全斑蚜 *Panaphis juglandis*（邰锦瑞等, 2021）等其他瓢虫对猎物的捕食功能反应结果一致。

朝鲜弯叶毛瓢虫的捕食量随着桧柏臀纹粉蚧密度的增大而增大，且在猎物达到一定的密度后，瓢虫捕食量增速逐渐减缓。朝鲜弯叶毛瓢虫 2-4 龄幼虫和成虫对不同虫龄桧柏臀纹粉蚧表现不同程度的捕食效能，其中瓢虫成虫对桧柏臀纹粉蚧 1-3 龄若虫和成虫的捕食能力最强，瞬时攻击率分别为 1.21、1.25、1.22 和 1.25，日最大捕食量为 134.9、78.1、48.8、32.0 头/d，这与黑襟毛瓢虫 *Scymnus* (*Neopullus*) *hoffmanni* 捕食莲缢管蚜 *Rhopalosiphum nymphaeae* 结果相似（文扬等, 2022），究其原因可能是由于朝鲜弯叶毛瓢虫的成虫活动能力强于幼虫，使自身捕食能力提升，因此利用朝鲜弯叶毛瓢虫防治桧柏臀纹粉蚧时，应充分发挥其成虫的捕食作用。由于初孵 1 龄朝鲜弯叶毛瓢虫幼虫孵化后需要补充能量，如果进行短期饥饿，死亡率较高，且 1 龄幼虫行动能力较弱，对桧柏臀纹粉蚧的捕食能力较低，所以本文并未对 1 龄幼虫捕食功能反应进行记录，而从 2 龄幼虫开始。随朝鲜弯叶毛瓢虫龄期增加，天敌对桧柏臀纹粉蚧的捕食能力逐渐增强。

朝鲜弯叶毛瓢虫对桧柏臀纹粉蚧的捕食效能随猎物虫龄的增大而降低；六斑月瓢虫 *Menochilus sexmaculata* 对普通大蓟马 *Megalurothrips usitatus* 低龄幼虫的捕食效果显著高于高龄幼虫（李盼等, 2022），说明天敌昆虫的捕食能力受限于猎物的自身情况，究其原因可能是桧柏臀纹粉蚧成虫的分泌物具有更强的黏性，对寄主植物的粘附更强，体表蜡质层较厚，导致瓢虫在取食时耗费更多时间处理猎物，捕食量下降。

捕食者在捕食过程中搜寻猎物的行为效应称为搜寻效应（丁岩钦, 1980）。已有研究表明，捕食性昆虫的搜寻效应与猎物密度之间存在显著的负相关关系（李子园等, 2021; 杨桂群等, 2022; 覃江梅等, 2023）。本研究发现随着猎物密度的增加，朝鲜弯叶毛瓢虫对桧柏臀纹粉蚧的搜寻效应逐渐降低，这与六斑月瓢虫捕食黄胸蓟马 *Thrips hawaiiensis* 若虫（李善光等, 2020）的搜寻效应结果相似，说明随猎物密度的增大，捕食者对猎物的搜寻时间减少，捕食效率随之提高。

本研究结果表明，当桧柏臀纹粉蚧密度和捕食空间一定的情况下，随着朝鲜弯叶毛瓢虫密度的增加，其日捕食率逐渐降低，说明朝鲜弯叶毛瓢虫对桧柏臀纹粉蚧的捕食效应存在种内竞争和自我干扰作用。朝鲜弯叶毛瓢虫 2-4 龄幼虫和成虫对不同虫龄桧柏臀纹粉蚧的平均捕食量与捕食者自身密度呈负相关，不同密度的同一虫态和龄期瓢虫对各虫态和龄期粉蚧的捕食效率差

异显著，这和六斑月瓢虫捕食柑橘木虱（何万财等，2023）及异色瓢虫捕食柴胡明蚜 *Hyadaphis bupleuri*（王晓琪等，2022）的密度干扰作用结果一致。

由于本试验是在实验室条件下完成，因此不能精确地反映天敌在田间释放后对害虫的防治能力。自然环境中还存在许多影响朝鲜弯叶毛瓢虫对桧柏臀纹粉蚧捕食能力的因素，如环境温度、湿度、猎物数量、捕食者饥饿程度、其他捕食者的竞争以及其他因素的干扰等（Li *et al*., 2007; Stathas *et al*., 2011; Rocca *et al*., 2017; Islam *et al*., 2021; 崔晓宁等, 2023）。此外，朝鲜弯叶毛瓢虫具有同类互相残杀的习性，尤其是在缺乏食物的恶劣条件下，因此在田间释放朝鲜弯叶毛瓢虫防治桧柏臀纹粉蚧时，还应综合考虑天敌的释放密度、虫态与时间，以确保达到较好的防控效果。

本研究初步明确了朝鲜弯叶毛瓢虫捕食桧柏臀纹粉蚧的功能反应、搜寻效应与干扰反应，结果表明朝鲜弯叶毛瓢虫对桧柏臀纹粉蚧有较强的生物防治潜能。下一步将对瓢虫繁殖、储运与释放技术进行研发，并通过田间试验，系统评估朝鲜弯叶毛瓢虫对桧柏臀纹粉蚧的捕食及防控效果，建立一套针对桧柏臀纹粉蚧的绿色控制技术，从而推动田间化学农药减施。

参考文献 (References)

Batool A, Abdullah K, Rashid MU, Khattak MK, 2014. Effect of prey density on biology and functional response of *Chrysoperla carnea* (Stephens) (Neuroptera: Chrysopidae). *Pakistan Journal of Zoology*, 46(1): 129–137.

Beltrà A, Soto A, Malausa T, 2012. Molecular and morphological characterisation of Pseudococcidae surveyed on crops and ornamental plants in Spain. *Bulletin of Entomological Research*, 102(2): 165–172.

CABI, 2021. CABI compendium: *Planococcus vovae*. https://doi.org/10.1079/cabicompendium.41893.

Çiftci Ü, Bolu H, 2021. First records of Coccomorpha (Hemiptera) species in Diyarbakır, Turkey. *Journal of Entomological Science*, 56(2): 235–245.

Cox JM, Ben-Dov Y, 1986. Planococcine mealybugs of economic importance from the Mediterranean Basin and their distinction from a new African genus (Hemiptera: Pseudococcidae). *Bulletin of Entomological Research*, 76(3): 481–489.

Cui XN, Xi BX, Zhang BH, Sun YX, Hu GX, Liu YJ, Hao YN, 2023. Predatory functional response and predation preference of ladybeetle *Harmonia axyridis* to *Acyrthosiphon pisum* and *Odontothrips loti* on alfalfa. *Chinese Journal of Biological Control*, 39(1): 38–45. [崔晓宁, 席驳鑫, 张博鸿, 孙元星, 胡桂馨, 刘艳君, 郝亚楠, 2023. 异色瓢虫对苜蓿上豌豆蚜和牛角花齿蓟马的捕食效能及捕食偏好性. 中国生物防治学报, 39(1): 38–45.]

Ding YQ, 1980. Principles and Applications of Mathematical Ecology of Insect Population. Beijing: Science Press. 197–213. [丁岩钦, 1980. 昆虫种群数学生态学原理与应用. 北京: 科学出版社. 197–213.]

Ding YQ, 1994. Insect Mathematical Ecology. Beijing: Science Press. 257–304. [丁岩钦, 1994. 昆虫数学生态学. 北京: 科学出版社. 257–304.]

Duan XY, Wang YD, Zhang NZ, Gao F, Zhao ZH, 2021. Research advances in evaluation methods of predator's control of insect pests. *Journal of Plant Protection*, 48(2): 275–288. [段雪莹, 王祎丹, 张乃钊, 高峰, 赵紫华, 2021. 捕食性天敌控害能力评价方法进展. 植物保护学报, 48(2): 275–288.]

Graora D, Spasic R, Ilic S, 2014. Biology and harmfulness of *Planococcus vovae* (Nassonov) (Hemiptera: Pseudococcidae) in Belgrade area. *Pesticidi I Fitomedicina*, 29(1): 67–74.

Hassell MP, Varley GC, 1969. New inductive population model for insect parasites and its bearing on biological control. *Nature*, 223: 1133–1137.

He JC, Wang KY, Mubashar H, Wei Q, Wang PJ, Lai FX, Wang WX, Fu Q, 2024. Effects of emamectin benzoate and avermectin on the fecundity of *Nilaparvata lugens* (Hemiptera: Delphacidae) and the pest control capacity of parasitic wasp, *Anagrus nilaparvatae* (Hymenoptera: Mymaridae). *Acta Entomologica Sinica*, 67(4): 538–548. [何佳春, 王康逸, Mubashar Hussain, 魏琪, 万品俊, 赖凤香, 王渭霞, 傅强, 2024. 甲维盐与阿维菌素对褐飞虱繁殖力及天敌稻虱缨小蜂控害能力的影响. 昆虫学报, 67(4): 538–548.]

He WC, Ye QQ, Wang FF, Hu YW, Liu JH, Mao XX, Zhang RF, Wang XM, Qiu BL, Liu YT, Sang W, 2023. Predatory responses of *Cheilomenes sexmaculata* to *Diaphorina citri*. *Chinese Journal of Biological Control*, 39(3): 514–522. [何万财, 叶青青, 王飞凤, 胡玉伟, 刘金华, 毛熊兴, 张瑞峰, 王兴民, 邱宝利, 刘玉涛, 桑文, 2023. 六斑月瓢虫对柑橘木虱的捕食作用. 中国生物防治学报, 39(3): 514–522.]

Holling CS, 1959. Some characteristics of simple types of predation and parasitism. *The Canadian Entomologist*, 91(7): 385–398.

Holling CS, 1965. The functional response of predators to prey density and its role in mimicry and population regulation. *Memoirs of the Entomological Society Canada*, 97(S45): 5–60.

Islam Y, Shah FM, Xu RB, Razaq M, Miao YB, Li XH, Zhou XM, 2021. Functional response of *Harmonia axyridis* preying on *Acyrthosiphon pisum* nymphs: The effect of temperature. *Scientific Reports*, 11(1): 13565.

Karamaouna F, Kimbaris A, Michaelakis A, Papachristos D, Polissiou M, Papatsakona P, Tsora E, 2013. Insecticidal activity of plant essential oils against the vine mealybug, *Planococcus ficus*. *Journal of Insect Science*, 13: 142.

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(1): 41–61.

Li P, Zhu JX, Mo XN, Lin XM, Liu TZ, Li JH, Cai DC, 2022. The functional response of *Menochilus sexmaculata* to *Megalurothrips usitatus*. *Chinese Journal of Biological Control*, 38(1): 140–148. [李盼, 朱津贤, 莫小娜, 林幸明, 刘田振, 李金花, 蔡笃程, 2022. 六斑月瓢虫对普通大蓟马的捕食功能反应. 中国生物防治学报, 38(1): 140–148.]

Li SG, Fu BL, Qiu HY, Yang YS, Ma XT, Zhou SH, Tang LD, Zhang FP, Liu K, 2020. The predation of *Menochilus sexmaculata* (Coleoptera: Coccinellidae) to *Thrips hawaiiensis* (Thysanoptera: Thripoidae) in the laboratory. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 57(5): 1173–1180. [李善光, 付步礼, 邱海燕, 杨石有, 马晓彤, 周世豪, 唐良德, 张方平, 刘奎, 2020. 六斑月瓢虫对黄胸蓟马若虫的室内捕食作用研究. 应用昆虫学报, 57(5): 1173–1180.]

Li ZY, Zhou J, Guan YX, Chen DM, Lu YY, Chen KW, 2021. Functional response of *Mallada basalis* (Walker) (Neuroptera: Chrysopidae) on *Paracoccus marginatus* Williams and Granara de Willink (Hemiptera: Pseudococcidae). *Journal of Environmental Entomology*, 43(2): 322–328. [李子园, 周娟, 关迎雪, 程东美, 陆永跃, 陈科伟, 2021. 黄玛草蛉对木瓜粉蚧的捕食作用评价. 环境昆虫学报, 43(2): 322–328.]

Mruthunjayaswamy P, Thiruvengadam V, Kumar, JS, 2019. Detection of insecticide resistance in field populations of citrus mealybug *Planococcus citri* (Risso) (Hemiptera: Pseudococcidae). *Indian Journal of Expermental Biology*, 57(6): 435–442.

Okuyama T, 2012. Flexible components of functional responses. *Journal of Animal Ecology*, 81(1): 185–189.

Qin JM, Qin W, Cai XY, Yu YH, Chen HS, 2023. Predation of spider *Oxyopes sertatus* on fall armyworm *Spodoptera frugiperda* larvae. *Journal of Plant Protection*, 50(4): 1033–1041. [覃江梅, 覃武, 蔡晓燕, 于永浩, 陈红松, 2023. 斜纹猫蛛对草地贪夜蛾幼虫的捕食作用. 植物保护学报, 50(4): 1033–1041.]

Rocca M, Rizzo E, Greco N, Sánchez N, 2017. Intra-and interspecific interactions between aphidophagous ladybirds: The role of prey in predator coexistence. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 162(3): 284–292.

Shahpouri A, Yarahmadi F, Zandi Sohani N, 2019. Functional response of the predatory species *Orius albidipennis* Reuter (Hemiptera: Anthocoridae) to two life stages of *Bemisia tabaci* (Genn.) (Hemiptera: Aleyrodidae). *Egyptian Journal of Biological Pest Control*, 29(1): 14.

Stathas GJ, Kontodimas DC, Karamaouna F, Kampouris S, 2011. Thermal requirements and effect of temperature and prey on the development of the predator *Harmonia axyridis*. *Environmental Entomology*, 40(6): 1541–1545.

Tai JR, Liu SQ, Gao GZ, 2021. Predatory functional response of different stages of *Harmonia axyridis* Pallas on *Panaphis juglandis* Goeze. *Chinese Journal of Biological Control*, 37(6): 1338–1343. [邰锦瑞, 刘思琪, 高桂珍, 2021. 不同龄期异色瓢虫对核桃全斑蚜的捕食功能反应. 中国生物防治学报, 37(6): 1338–1343.]

Ülgentürk S, Çanakçioğlu H, Toper Kaygin A, 2004. Scale insects of the conifer trees in Turkey and their zoogeographical distribution. *Journal of Pest Science*, 77(2): 99–104.

Wang DS, Pan F, He YR, Guo XL, Chen Q, 2011. Sublethal effects of eleven insecticides of different categories on reproduction of *Trichogrammatoidea bactrae* Nagaraja (Hymenoptera: Trichogrammatidae). *Acta Entomologica Sinica*, 54(1): 56–63. [王德森, 潘飞, 何余容, 郭祥令, 陈俏, 2011. 11 种不同类型杀虫剂对卷蛾分索赤眼蜂繁殖的亚致死效应. 昆虫学报, 54(1): 56–63.]

Watson GW, Kosztarab M, Kozar F, 1990. Scale insects of central Europe. *Journal of Animal Ecology*, 59(2): 798.

Wang Q, Yang L, Pan YF, Li HQ, Lu YH, 2023. Predation of ladybeetle *Hippodamia variegata* on walnut aphid *Chromaphis juglandicola*. *Chinese Journal of Biological Control*, 39(6): 1289–1294. [王巧, 杨龙, 潘云飞, 李海强, 陆宴辉, 2023. 多异瓢虫对核桃黑斑蚜的捕食作用. 中国生物防治学报, 39(6): 1289–1294.]

Wang XQ, Zhou YY, Feng CY, Zuo C, Pu YL, He Y, 2022. Predatory functional response of *Harmonia axyridis* Pallas to *Hyadaphis bupleuri* Börner. *Plant Protection*, 48(3): 211–215. [王晓琪, 周亚媛, 冯朝阳, 左成, 卜亚莉, 何运, 2022. 异色瓢虫对柴胡明蚜的捕食作用. 植物保护, 48(3): 211–215.]

Wang Y, Chen Y, Zhang ZY, Zeng R, Xian JD, 2015. Study on preying potential of different stages of nymphs and adults of *Harmonia axyridis* Pallas on *Myzus persicae* (Sulzer). *Journal of Environmental Entomology*, 37(5): 1075–1080. [王媛, 陈越, 张

拯研, 曾嵘, 冼继东, 2015. 不同龄期异色瓢虫对烟蚜的捕食潜能研究. 环境昆虫学报, 37(5): 1075–1080.]

Wang YN, Li P, He WW, Zhang MS, Wang MQ, Mao JJ, Zhang LS, Li YY, 2022. Predation of the eggs and young larvae of *Spodoptera litura* by the third instar larvae of *Chrysopa formosa*. *Chinese Journal of Biological Control*, 38(2): 321–327. [王亚南, 李萍, 贺玮玮, 张茂森, 王孟卿, 毛建军, 张礼生, 李玉艳, 2022. 丽草蛉三龄幼虫对斜纹夜蛾卵及低龄幼虫的捕食作用. 中国生物防治学报, 38(2): 321–327.]

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.]

Wu KJ, Sheng CF, Gong PY, 2004. Equation of predator functional response and estimation of the parameters in it. *Entomological Knowledge*, 41(3): 267–269. [吴坤君, 盛承发, 龚佩瑜, 2004. 捕食性昆虫的功能反应方程及其参数的估算. 昆虫知识, 41(3): 267–269.]

Wu PX, Zhang J, Haseeb M, Yan S, Kanga L, Zhang RZ, 2018. Functional responses and intraspecific competition in the ladybird *Harmonia axyridis* (Coleoptera: Coccinellidae) provided with *Melanaphis sacchari* (Homoptera: Aphididae) as prey. *European Journal of Entomology*, 115: 232–241.

Wu SA, Li YA, Xu H, 2023. A new invasive pest in China: *Planococcus vovae* (Nassonov, 1909) (Hemiptera: Coccomorpha: Pseudococcidae). *Chinese Journal of Applied Entomology*, 60(3): 964–970. [武三安, 李宇昂, 徐晗, 2023. 一种入侵我国的新害虫——桧柏臀纹粉蚧(半翅目: 蚧次目: 粉蚧科). 应用昆虫学报, 60(3): 964–970.]

Xue Y, Bahlai CA, Frewin A, Sears MK, Schaafsma AW, Hallett RH, 2009. Predation by Coccinella septempunctata and *Harmonia axyridis* (Coleoptera: Coccinellidae) on *Aphis glycines* (Homoptera: Aphididae). *Environmental Entomology*, 38(3): 708–714.

Yang GQ, Fan W, Zhang Q, Li M, Jiang ZX, Duan P, Hu CX, Chen GH, Zhang XM, 2022. Predatory runction of *Harmonia axyridis* and *Propylea japonica* larvae to young larvae of *Tuta absoluta*. *Chinese Journal of Biological Control*, 38(4): 959–966. [杨桂群, 范苇, 张倩, 李貌, 蒋正雄, 段盼, 胡昌雄, 陈国华, 张晓明, 2022. 异色瓢虫和龟纹瓢虫幼虫对番茄潜叶蛾低龄幼虫的捕食功能反应. 中国生物防治学报, 38(4): 959–966.]

Yuan FF, Wei JH, 2022. First report and preliminary biology study of *Planococcus vovae* (Nasonov). *Plant Quarantine*, 36(3): 50–53. [袁芳芳, 魏嘉辉, 2022. 桧柏臀纹粉蚧首次发现和生物学初步研究. 植物检疫, 36(3): 50–53.]

Zhao YJ, Zheng YQ, Fu CY, Chen B, Li ZY, 2019. The predatory functional response of *Harmonia axyridi*s to the 2nd instar larvae of *Spodoptera frugiperda*. *Plant Protection*, 45(5): 75–78. [赵英杰, 郑亚强, 符成悦, 陈斌, 李正跃, 2019. 异色瓢虫对草地贪夜蛾 2 龄幼虫的捕食功能反应. 植物保护, 45(5): 75–78.]

Zhou JH, Li PL, Naiwuzhati·Zunong, Zheng HN, Huang J, Wang ZH, 2020. Functional response and predation preference of ladybeetle *Propylea japonica* to Asian citrus psyllid *Diaphorina citri*. *Journal of Plant Protection*, 47(5): 1062–1070. [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.]