

异色瓢虫对栗斑蚜的捕食作用

陈文书^{1,2,3}, 梁一鸣^{1,2}, 高朋^{1,2}, 温晓蕾^{1,2},
齐慧霞^{1,2}, 姚姮², 高素红^{1,2*}

(1. 板栗产业技术教育部工程研究中心, 河北秦皇岛 066000; 2. 河北科技师范学院农学与生物科技学院/河北省作物逆境生物学重点实验室(筹), 河北昌黎 066600; 3. 涪源县职业技术教育中心, 河北涪源 076550)

摘要: 为明确异色瓢虫 *Harmonia axyridis* 对栗斑蚜 *Tuberculatus castanocallis* 的控害潜能, 室内研究了异色瓢虫对栗斑蚜的捕食功能反应、寻找效应和干扰反应。结果表明: 异色瓢虫对栗斑蚜的捕食功能反应均符合 Holling-II模型。异色瓢虫对栗斑蚜的日最大理论捕食量由大到小的排列顺序为 4 龄幼虫 (447.97 头)、雌成虫 (387.53 头)、雄成虫 (379.73 头)、3 龄幼虫 (243.45 头)、2 龄幼虫 (122.75 头) 和 1 龄幼虫 (62.62 头)。异色瓢虫的寻找效应随着栗斑蚜密度的增加而降低。异色瓢虫随着自身密度的增加单头捕食量和捕食作用率逐渐减少, 分摊竞争强度逐渐增大, 符合 Hassell 干扰模型, 不同虫态异色瓢虫其自身密度对栗斑蚜捕食作用均有明显的干扰效应, 其干扰系数从大到小依次为 4 龄幼虫 (0.7257)、雌成虫 (0.6907)、雄成虫 (0.6703)、3 龄幼虫 (0.6387)、2 龄幼虫 (0.3425) 和 1 龄幼虫 (0.3392)。结果表明异色瓢虫对栗斑蚜具有较好的控害潜力, 为高效利用异色瓢虫田间防治栗斑蚜提供了理论依据。

关键词: 栗斑蚜; 异色瓢虫; 捕食功能反应; 生物防治; 干扰反应

Predation ability of *Harmonia axyridis* on *Tuberculatus castanocallis*

CHEN Wen-Shu^{1,2,3}, LIANG Yi-Ming^{1,2}, GAO Peng^{1,2}, WEN Xiao-Lei^{1,2}, QI Hui-Xia^{1,2}, YAO Heng², GAO Su-Hong^{1,2*} (1. College of Agriculture and Biotechnology, Hebei Normal University of Science & Technology; Hebei Key Laboratory of Crop Stress Biology (in Preparation), Changli 066600, Hebei Province, China; 2. Technology Engineering Research Center of Chestnut Industry Technology, Ministry of Education, Qinhuangdao 066000, Hebei Province, China; 3. Guyuan County Vocational and technical education center, Hebei Guyuan County 076550)

Abstract: In order to determine the pest control potential of *Harmonia axyridis* against *Tuberculatus castanocallis*, the predation function, seeking effect and disturbance response of *H. axyridis* against *T. castanocallis* were studied in laboratory. The results showed that the *H. axyridis*'s predation function responses to *T. castanocallis* were consistent with the Holling-II model. The maximum daily theoretical predation of *H. axyridis* on *T. castanocallis* in descending order was as follows: 4th instar (447.97), Female adult (387.53), Male adult (379.73), 3rd instar (243.45), 2nd instar (113.18), and 1st instar (62.62). The seeking effect of *H. axyridis* decreased with the increase of the density of *T. castanocallis*. With the increase of its own density, the single-head predation amount and predation activity rate of *H. axyridis* gradually decreased,

基金项目: 河北省教育厅平台项目 (河北省板栗产业协同创新中心 2021-2023)

作者简介: 陈文书, 男, 硕士研究生, 主要研究方向为害虫生物防治研究, E-mail: 1244592301@qq.com

*通讯作者 Author for correspondence: 高素红, 女, 博士, 教授, 主要研究方向为昆虫与害虫防治研究, E-mail: 498395824@qq.com

收稿日期 Received: 2023-11-17; 接受日期 Accepted: 2023-12-28

and the competition intensity of allocation gradually increased, which was consistent with the Hassell interference model. The densities of *H. axyridis* of different insect states had obvious interference effects on the predation of *T. castanocallis*, and the disturbance coefficient was from large to small as the 4th instar larvae (0.7257), Female adult (0.6907), Male adult (0.6703), 3rd instar (0.6387), 2nd instar (0.3425), 1st instar (0.3392). The results showed that *H. axyridis* had a good potential to control *T. castanocallis*, and provided a theoretical basis for the efficient use of *H. axyridis* to control *T. castanocallis*.

Key words: *Tuberculatus castanocallis*; *Harmonia axyridis*; predatory functional response; biological control; interference response

我国作为板栗主要生产国，其种植面积广泛，截止到 2019 年其种植面积达到 30.4 万公顷，年产量为 172.94 万吨，约占全球板栗种植面积的一半（张新奇，2022；林云等，2023）。栗斑蚜 *Tuberculatus castanocallis* 是板栗树主要害虫之一。栗斑蚜属半翅目 Hemiptera 斑蚜科 Drepanosiphidae 侧棘斑蚜属 *Tuberculatus*，在我国辽宁、北京、河北、浙江等地均有发生，其分布广泛，危害较重（姜立云等，2011）。栗斑蚜在板栗嫩叶、嫩芽等部位危害，叶片出现褪绿变黄、皱缩、萎蔫等现象，使植株生长不良（张春光，2020）。栗斑蚜分泌的蜜露覆盖叶片，影响光合作用，使板栗树生长活力降低（汤新利，2019）。蚜虫类害虫繁殖能力强，发生面积大，防治困难，现如今化学防治在防治蚜虫中仍占主导地位。如果长期过量使用化学防治，必然会引起“3R”问题，对生态环境造成危害（惠婧婧等，2009）。近年来害虫生物防治受到越来越多的重视，利用捕食性天敌对害虫进行生物控制成为当今热点与未来趋势（Evans，2001）。目前有关栗斑蚜的生物防治研究国内外均未见报道。

异色瓢虫 *Harmonia axyridis*，原产地为亚洲，在我国大部分地区均有分布（吴钰薇等，2022）。具有食量大、耐性强、繁殖力强等特点，是重要的捕食性天敌昆虫（崔亚琴等，2022），在农业生产中对多种害虫具有控制效果，被广泛应用于害虫生物防治，异色瓢虫可捕食自然界中多种蚜虫、粉虱、螨类等（王小艺和沈佐锐，2002），其中在防治蚜虫上效果最为显著。据报道，异色瓢虫对胡萝卜微管蚜 *Semiaphis heraclei*、烟蚜 *Myzus persicae* 和豆蚜 *Aphis craccivora* 等蚜虫的捕食功能反应存在很大差异（张文秋等，2014；喻会平等，2018；李新兵等，2019）。系统研究异色瓢虫对猎物的捕食潜能，是其在田间应用的基础。

鉴于栗斑蚜的危害特点以及异色瓢虫的捕食特性，本研究选择了不同虫态异色瓢虫对栗斑蚜的捕食能力、寻找效应、自身密度干扰效应进行研究，以期探明异色瓢虫对栗斑蚜的防控潜力，为日后利用异色瓢虫防治栗斑蚜提供数据支撑。

1 材料与方法

1.1 供试虫源

异色瓢虫和栗斑蚜于 2023 年 5 月采自河北科技师范学院昌黎校区（园艺园林实验站板栗园）（39°42'30"N, 119°10'36"E）。采回的异色瓢虫置于人工培养箱（宁波江南仪器厂，RXZ-128A）中，

以栗斑蚜饲养，设置温度 $25^{\circ}\text{C}\pm 1^{\circ}\text{C}$ ，相对湿度 $70\%\pm 5\%$ ，光周期 16 L : 8 D。选取 1 日龄的 1~4 龄异色瓢虫幼虫和羽化当天的雌雄成虫，饥饿 24 h 后作为供试虫源。选取 2~3 龄栗斑蚜作为供试虫源。

1.2 试验方法

1.2.1 异色瓢虫对栗斑蚜的捕食功能反应

将滤纸置于直径 90 mm 和高 15 mm 培养皿中，滤纸润湿，以不滴水为宜，将板栗叶片剪成条状，放入培养皿中，向培养皿内分别引入 1 头异色瓢虫和若干栗斑蚜，测试 1 龄异色瓢虫幼虫的捕食功能反应时，栗斑蚜密度设置为 10、20、30、40、50 头；测试 2 龄和 3 龄异色瓢虫幼虫的捕食功能反应时，栗斑蚜密度设置为 20、40、60、80、100 头；测试 4 龄异色瓢虫幼虫和雌雄成虫的捕食功能反应时，栗斑蚜密度设置为 30、60、90、120、150 头（王晓琪等，2022），每个处理 5 个重复。把培养皿放入人工气候箱中，24 h 后统计观察剩余栗斑蚜数量（杨桂群等，2022）。

1.2.2 种内干扰对异色瓢虫捕食栗斑蚜的影响

将 300 头栗斑蚜置于具有板栗叶片且湿润培养皿中，向培养皿内分别引入 1、2、3、4、5 头同一虫态的异色瓢虫。异色瓢虫各龄幼虫及雌雄成虫都以此组合进行（王晓琪等，2022）。每个处理 5 个重复。把培养皿放入人工气候箱中，24 h 后统计观察剩余栗斑蚜数量。

1.3 数据统计与分析

捕食功能反应：采用 Holling-II 型圆盘方程（吴坤君等，2004）： $N_a = aT_t N_0 / (1 + aT_h N_0)$ 进行拟合，式中： a 为捕食者对猎物的瞬时攻击速率， T_h 为捕食猎物所需要的时间， N_a 为猎物被捕食数， N_0 为猎物密度， T_t 为捕食者搜寻猎物的时间，一般为 1 d， $1/T_h$ 表示捕食者日最大理论捕食量， a/T_h 表示捕食者的捕食能力。

通过 Holling-II 型圆盘方程计算出的数据，得出寻找效应方程（丁岩钦，1983）： $S = a / (1 + aT_h N_0)$ 。通过卡方检验判断，卡方公式为 $\chi^2 = \sum [(O_i - T_i)^2 / T_i]$ ，检验卡方值与临界值之间的相关性（谢宏等，2023）。

种内干扰采用 Hassell II 干扰反应模型 $E = QP^{-m}$ 拟合种内干扰对猎物捕食率的影响，其中 E 为捕食率， Q 为搜索常数， P 为捕食者密度， m 为干扰系数（Hassell and Varley, 1969）。

分摊竞争强度为 $I = (E_1 - E_P) / E_1$ ，式中 I 为分摊竞争强度， E_1 、 E_P 分别表示 1 头和 P 头天敌的捕食作用率（邹运鼎等，1996）。

试验数据使用 Excel 2016 分析统计和 Origin 2021 作图。

2 结果与分析

2.1 异色瓢虫对栗斑蚜的捕食功能反应

异色瓢虫对栗斑蚜的实际捕食量随着栗斑蚜密度增加而增加，捕食速率则逐渐减慢，这与 Holling-II 模型相符（图 1）。将所得模型经卡方 (χ^2) 检验，卡方值在 0.20 和 2.49 之间，所有卡方值均小于 $\chi^2_{(4, 0.05)} = 9.49$ ($P > 0.05$)，通过卡方检验得出异色瓢虫对栗斑蚜的捕食功能反应属于 Holling-II 模型。

异色瓢虫对栗斑蚜的捕食功能反应中（表 1），4 龄异色瓢虫幼虫对栗斑蚜瞬时攻击率最高，为 1.0564，1 龄异色瓢虫幼虫对栗斑蚜的瞬时攻击率最低，为 0.5981。捕食效能从高到低的排列顺序 4 龄幼虫（473.21 头），雌成虫（369.37 头），雄成虫（343.96 头），3 龄幼虫（188.49 头），2 龄幼虫（74.71 头），1 龄幼虫（37.46 头）。异色瓢虫的日最大捕食量从大到小的排列顺序 4 龄幼虫（447.97 头），雌成虫（387.53 头），雄成虫（379.73 头），3 龄幼虫（243.45 头），2 龄幼虫（122.75 头），1 龄幼虫（62.62 头）。

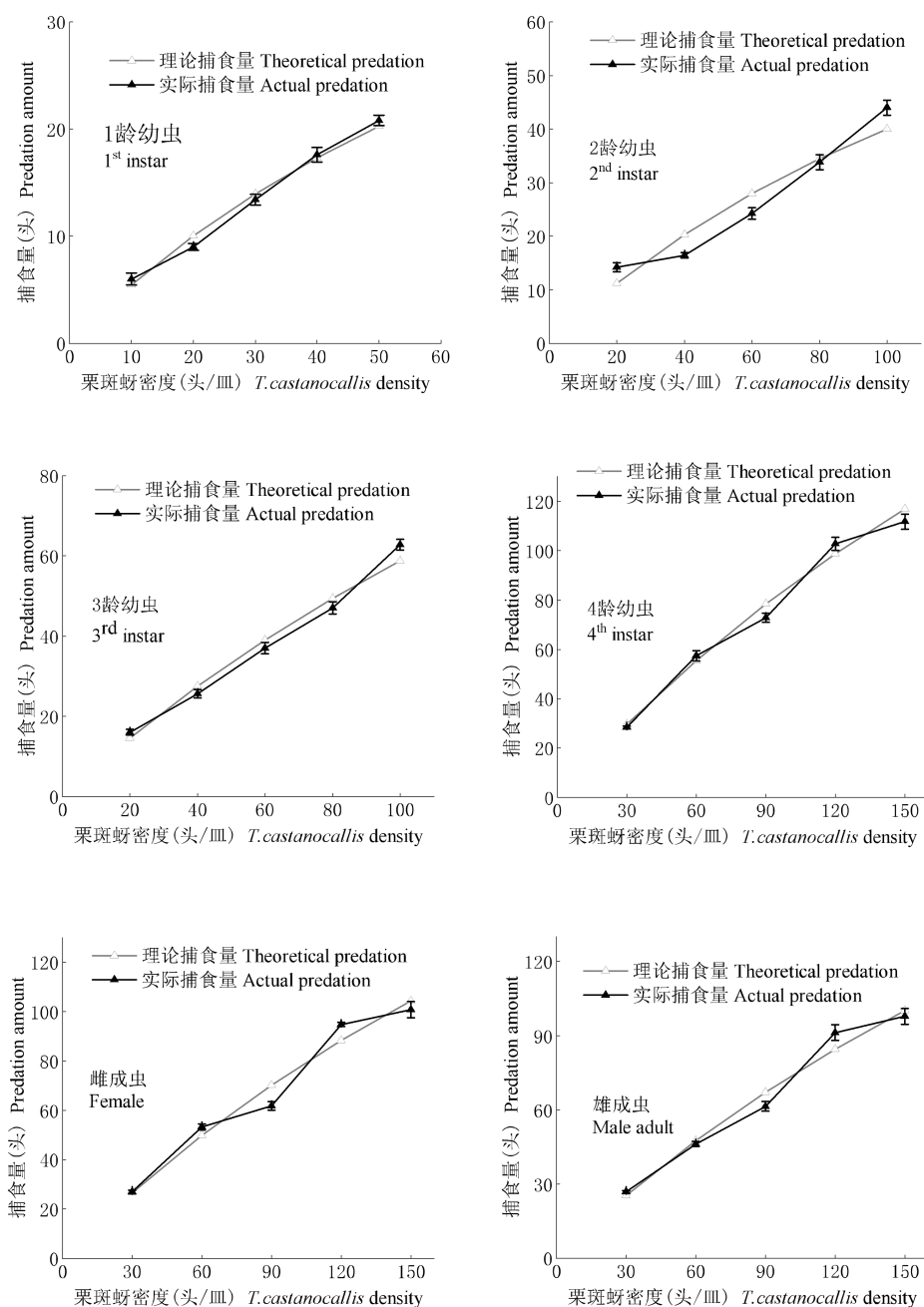


图 1 异色瓢虫对栗斑蚜的捕食功能反应

Fig. 1 Predatory functional response of *Harmonia axyridis* to *Tuberculatus castanocallis*

表 1 异色瓢虫对栗斑蚜的捕食功能反应

Table 1 Predatory functional response of *Harmonia axyridis* to *Tuberculatus castanocallis*

供试虫态 Stage	捕食功能反应方程 Predatory functional response equation	瞬时攻击率 <i>a</i> Instantaneous attack rate	处理时间 <i>T_h</i> /d Handling time	捕食效能 (<i>a</i> / <i>T_h</i>)/头 Predation capacity	日最大捕食量 (1/ <i>T_h</i>)/头 Daily maximum prey consumed	χ^2	R^2	<i>P</i>
1 龄幼虫 1 st instar	$N_a=0.598\ 1\ N_0 / (1+0.009\ 55\ N_0)$	0.598 1	0.015 97	37.46	62.62	0.20	0.99	0.99
2 龄幼虫 2 nd instar	$N_a=0.608\ 7\ N_0 / (1+0.004\ 96\ N_0)$	0.608 7	0.008 15	74.71	122.75	2.49	0.96	0.65
3 龄幼虫 3 rd instar	$N_a=0.774\ 3\ N_0 / (1+0.003\ 18\ N_0)$	0.774 3	0.004 11	188.49	243.45	0.77	0.99	0.94
4 龄幼虫 4 th instar	$N_a=1.056\ 4\ N_0 / (1+0.002\ 36\ N_0)$	1.056 4	0.002 23	473.21	447.97	1.60	0.96	0.81
雌成虫 Female adult	$N_a=0.953\ 1\ N_0 / (1+0.002\ 46\ N_0)$	0.953 1	0.002 58	369.37	387.53	1.85	0.96	0.76
雄成虫 Male adult	$N_a=0.905\ 8\ N_0 / (1+0.002\ 38\ N_0)$	0.905 8	0.002 63	343.96	379.73	1.19	0.97	0.88

2.2 异色瓢虫对栗斑蚜的寻找效应

依据 Holling-II模型和寻找效应方程的参数值，可以得到异色瓢虫对栗斑蚜的寻找效应（图 2）。异色瓢虫的寻找效应与栗斑蚜的密度呈负相关关系，异色瓢虫寻找效应随着栗斑蚜密度增加而下降。当栗斑蚜密度相同时，寻找效应从高到低的排列顺序 4 龄幼虫、雌成虫、雄成虫、3 龄幼虫、2 龄幼虫和 1 龄幼虫。寻找效应方程见表 2。

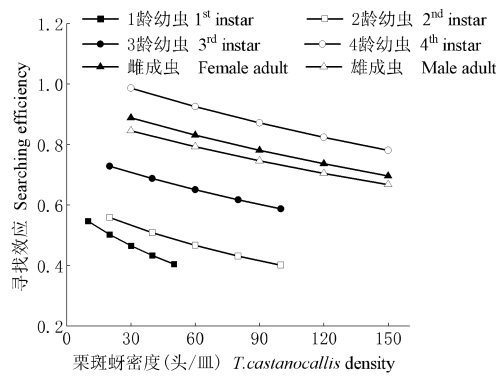


图 2 异色瓢虫对栗斑蚜的寻找效应

Fig. 2 Searching efficiency of *Harmonia axyridis* to *Tuberculatus castanocallis*

表 2 异色瓢虫对栗斑蚜的寻找效应方程

Table 2 Searching efficiency equations of *Harmonia axyridis* to *Tuberculatus castanocallis*

供试虫 Stage	寻找效应方程 Searching efficiency equations
-----------	--

1 龄幼虫 1 st instar	$S=0.598\ 1 / (1+0.598\ 1 \times 0.015\ 97\ N_0)$
2 龄幼虫 2 nd instar	$S=0.608\ 7 / (1+0.608\ 7 \times 0.008\ 15\ N_0)$
3 龄幼虫 3 rd instar	$S=0.774\ 3 / (1+0.774\ 3 \times 0.004\ 11\ N_0)$
4 龄幼虫 4 th instar	$S=1.056\ 4 / (1+1.056\ 4 \times 0.002\ 23\ N_0)$
雌成虫 Female adult	$S=0.953\ 1 / (1+0.953\ 1 \times 0.002\ 58\ N_0)$
雄成虫 Male adult	$S=0.905\ 8 / (1+0.905\ 8 \times 0.002\ 63\ N_0)$

2.3 不同密度异色瓢虫捕食栗斑蚜的干扰反应

单头同一虫态异色瓢虫对栗斑蚜的平均捕食量和捕食作用率随着自身密度的增加而逐渐减小，而分摊竞争强度则逐步增加，说明在一定空间范围内，异色瓢虫个体间存在种内竞争和相互干扰。异色瓢虫的捕食干扰作用可用 Hassell 干扰反应模型拟合（图 3），其 R^2 值均大于 0.95，表明该模型能较好的模拟不同密度异色瓢虫对栗斑蚜干扰反应。不同虫态异色瓢虫对栗斑蚜的干扰反应方程分别为 $E_{1\text{ 龄}}=0.1204 P^{-0.3392}$ 、 $E_{2\text{ 龄}}=0.2145 P^{-0.3425}$ 、 $E_{3\text{ 龄}}=0.3752 P^{-0.6387}$ 、 $E_{4\text{ 龄}}=0.5824 P^{-0.7257}$ 、 $E_{\text{雌}}=0.4857 P^{-0.6907}$ 、 $E_{\text{雄}}=0.4501 P^{-0.6703}$ 。结果显示无论是异色瓢虫幼虫还是成虫都存在干扰反应（表 3），其干扰系数从大到小依此为 4 龄幼虫（0.7257），雌成虫（0.6907），雄成虫（0.6703），3 龄幼虫（0.6387），2 龄幼虫（0.3425），1 龄幼虫（0.3392）。

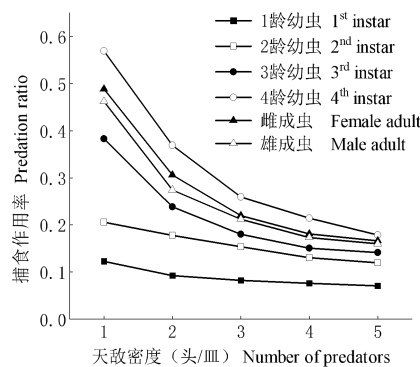


图 3 异色瓢虫自身密度对栗斑蚜的干扰作用

Fig. 3 Interference effect of self density of *Harmonia axyridis* to *Tuberculatus castanocallis*

表 3 异色瓢虫自身密度对栗斑蚜的干扰反应方程及参数估计

Table 3 Equation and parameter estimation of disturbance response of *Harmonia axyridis* to *Tuberculatus castanocallis*

供试虫态 Stage	天敌密度 (头/皿) Number of predators	平均捕食量 (头) Feeding amount	捕食作用率 E Predation ratio	分摊竞争强度 I Intensity of scrambling competition	干扰效应模型 Interference effect mode	干扰系数 m Interference coefficient	R^2
1 龄幼虫 1 st instar	1	36.80	0.1227	0.0000	$E_{1\text{ 龄}}=0.1204 P^{-0.3392}$	0.3392	0.9915
	2	27.70	0.0923	0.2473			
	3	24.67	0.0822	0.3297			
	4	22.90	0.0763	0.3777			
	5	21.08	0.0703	0.4272			

	1	61.80	0.2060	0.0000			
2 龄幼虫	2	53.40	0.1780	0.1359			
2 nd instar	3	46.20	0.1540	0.2524	$E_{2龄} = 0.2145$	$P = 0.3425$	0.3425 0.9576
	4	39.15	0.1305	0.3665			
	5	35.84	0.1195	0.4201			
3 龄幼虫	1	114.80	0.3827	0.0000			
3 rd instar	2	71.60	0.2387	0.3763			
	3	54.00	0.1800	0.5296	$E_{3龄} = 0.3752$	$P = 0.6387$	0.6387 0.9965
	4	45.15	0.1505	0.6067			
	5	42.36	0.1412	0.6310			
4 龄幼虫	1	170.80	0.5693	0.0000			
4 th instar	2	110.60	0.3687	0.3525			
	3	77.73	0.2591	0.5449	$E_{4龄} = 0.5824$	$P = 0.7257$	0.7257 0.9959
	4	64.20	0.2140	0.6241			
	5	53.52	0.1784	0.6867			
雌成虫	1	146.60	0.4887	0.0000			
Female	2	91.70	0.3057	0.3745			
adult	3	65.87	0.2196	0.5507	$E_{雌} = 0.4857$	$P = 0.6907$	0.6907 0.9978
	4	54.40	0.1813	0.6289			
	5	49.96	0.1665	0.6592			
雄成虫	1	138.60	0.4620	0.0000			
Male	2	82.20	0.2740	0.4069			
adult	3	63.67	0.2122	0.5406	$E_{雄} = 0.4501$	$P = 0.6703$	0.6703 0.9961
	4	52.05	0.1735	0.6245			
	5	48.00	0.1600	0.6537			

3 结论与讨论

捕食功能反应是指每头捕食者在一定时间内的捕食量随猎物密度变化的反应，捕食功能反应作为室内研究天敌控害能力的重要途径，可以体现出天敌对猎物的捕食能力（Schenk and Bacher, 2002）。本次试验结果显示异色瓢虫对栗斑蚜具有较强的捕食能力，且捕食功能反应均符合 Holling-II 模型。这与异色瓢虫对枫杨刻蚜 *Kurisakia onigurumi* 和桃蚜 *Myzus persicae* 的捕食功能反应结果一致（张伟等, 2018；张欢欢等, 2021）。捕食效能 (a/T_h) 是捕食功能反应的重要体现，捕食效能越大，控害能力越强（牟吉元等, 1997）。试验结果显示，不同虫态异色瓢虫对栗斑蚜的捕食效能不同，其中 4 龄幼虫捕食效能最高，1 龄幼虫捕食效能最低，说明异色瓢虫 4 龄幼虫对栗斑蚜的控害能力最高，1 龄幼虫对栗斑蚜的控害能力最低，推测为 1 龄幼虫个体较小，活动能力较弱，所以控制能力较弱，这与异色瓢虫对核桃全斑蚜 *Panaphis juglandis* 和烟蚜的捕食功能反应结果一致（王媛等, 2015；郇锦瑞等, 2021）。试验结果表明异色瓢虫对栗斑蚜具有较强的防治效果。

本研究发现，单头异色瓢虫的捕食量随栗斑蚜密度的增大而增大，当栗斑蚜密度增加到一定程度时，异色瓢虫的捕食量达到最大值即日最大理论捕食量。日最大理论捕食量 ($1/T_h$) 是通过拟合的

Holling-II模型方程计算得出,不同虫态异色瓢虫日最大理论捕食量最高为4龄幼虫,最低为1龄幼虫,这与异色瓢虫对枸杞蚜虫 *Aphid sp.*和棉蚜 *Aphis gossypii* 的捕食功能反应结果一致(关晓庆, 2011; Huang *et al.*, 2019),这应该与异色瓢虫的发育时期有关,4龄幼虫需要化蛹和羽化,所以对猎物的需求量大,1龄幼虫由于刚刚孵化,所以对猎物的需求量较小(郇锦瑞等, 2021)。本次研究结果表明,雌成虫的日最大理论捕食量高于雄成虫,这与异色瓢虫对豌豆修尾蚜 *Megoura japonica* 的捕食功能反应结果一致(王海诺等, 2020),这应该与异色瓢虫雌成虫需要摄取大量营养来为繁衍后代做准备有关。

寻找效应是天敌在捕食过程中对猎物攻击的行为效应。捕食性天敌的寻找效应与猎物密度具有相关性(丁岩钦, 1983)。本次研究结果表明,异色瓢虫的寻找效应随栗斑蚜密度的增大而降低,这与异色瓢虫对异毛真胸蚜 *Euthoracaphis heterotricha* 和草地贪夜蛾 *Spodoptera frugiperda* 的寻找效应结果一致(林长春等, 2009; 刘本菊等, 2020)。

在一定空间范围内,栗斑蚜数量固定条件下,同一虫态不同密度的异色瓢虫之间表现出较强的种内干扰作用,尤其是4龄幼虫对栗斑蚜有较强的干扰作用,说明异色瓢虫个体间存在种内竞争和相互干扰,可以用Hassell干扰反应模型较好地反映出来(赵航等, 2022)。模型中随着异色瓢虫自身密度的增大,其平均捕食量和捕食率逐渐下降,这与异色瓢虫对烟蚜的结果相似(王媛等, 2015),这可能是因为天敌自身密度增大,分摊竞争强度逐渐增大,造成种内竞争及干扰增强(何万财等, 2023)。故在田间释放异色瓢虫防治栗斑蚜时,除了考虑栗斑蚜的密度外,还应考虑异色瓢虫的释放密度,以达到最佳的控害效能。

本次试验通过异色瓢虫对栗斑蚜的捕食功能反应、寻找效应和自身密度的干扰作用的研究,表明异色瓢虫对栗斑蚜具有较强的生防潜能,为在大田环境中利用异色瓢虫防治栗斑蚜提供了理论参考。但在实际生产中温湿度、光照、其它天敌的捕食竞争等因素均会影响异色瓢虫的捕食能力,因此,异色瓢虫在田间条件对栗斑蚜生防能力还有待进一步深入研究。

参考文献 (References)

- Cui YQ, Wang T, Gao J. Predatory Response of *Harmonia axyridis* to *Acyrtosiphon pisum* [J]. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 2022, 50 (1): 130-134. [崔亚琴, 王拓, 高洁. 异色瓢虫对豌豆蚜的捕食效应 [J]. 山西农业科学, 2022, 50 (1): 130-134]
- Ding XY. Mathematical model of natural predator-pest interaction system and estimation of its main parameters: Third, Estimation of main parameters in predator-prey system [J]. *Chinese Bulletin of Entomology*, 1983, 6: 284-287. [丁岩钦. 天敌-害虫作用系统中的数学模型及其主要参数的估计: 三、捕食者-猎物系统中主要参数的估计 [J]. 昆虫知识, 1983, 6: 284-287]
- Evans EW. Insect predator-prey dynamics: Ladybird beetles and biological control [J]. *Ecological Society of America*, 2001, 82 (3): 905-906.
- Guan XQ. The predation functional response and selection of *Leis axyridis* against Aphid [J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2011, 50 (12): 2442-2445. [关晓庆. 异色瓢虫对枸杞蚜虫的捕食功能反应及选择 [J]. 湖北农业科学, 2011, 50 (12): 2442-2445]
- Hassell MP, Varley GC. New induction population model for insect parasitism and its bearing on biological control [J]. *Nature*, 1969, 223 (5211): 1113-1137.
- He WC, Ye QQ, Wang FF. Predatory Responses of *Cheilomenes sexmaculata* to *Diaphorina citri* [J]. *Chinese Journal of Biological Control*, 2023, 39 (3): 514-522. [何万财, 叶青青, 王飞凤, 等. 六斑月瓢虫对柑橘木虱的捕食作用 [J]. 中国生物防治学报, 2023, 39 (3): 514-522]
- Huang Z, Qureshi J, Zhou X, *et al.* Predation and functional response of the multi-coloured Asian ladybeetle (*Harmonia axyridis*) on the adult Asian citrus psyllid (*Diaphorina citri*) [J]. *Biocontrol Science and Technology*, 2019, 29 (3): 293-307.
- Hui JJ, Liu CZ, Meng YF, *et al.* Sublethal effects of imidacloprid to *Acyrtosiphon pisum* [J]. *Plant Protection*, 2009, 35 (5): 86-88. [惠婧婧, 刘长仲,

- 孟银凤, 等. 瓢虫对豌豆蚜的亚致死效应 [J]. 植物保护, 2009, 35 (5): 86-88]
- Jiang LY, Qiao GX, Zhang GX, *et al.* Aphid of Northeast China [M]. Beijing: Science Press, 2011: 314-315. [姜立云, 乔格侠, 张广学, 等. 东北农林蚜虫志 [M]. 北京: 科学出版社, 2011: 314-315]
- Li XB, Han SP, Liang C, *et al.* Functional response of *Harmonia axyridis* (Pallas) adults to *Semiaphis heraclei* (Takahashi) [J]. *China Plant Protection*, 2019, 39 (2): 61-63. [李新兵, 韩世鹏, 梁超, 等. 异色瓢虫成虫对胡萝卜微管蚜的捕食作用 [J]. 中国植保导刊, 2019, 39 (2): 61-63]
- Lin CC, Chen GH, Tao M, *et al.* Study of the predation functional responses of *Harmonia axyridis* Pallas to *Euthoracaphis heterotricha* Ghosh and Raychaudhuri [J]. *Journal of Yunnan Agricultural University* (Natural Science), 2009, 24 (3): 364-368. [林长春, 陈国华, 陶玫, 等. 异色瓢虫对异毛真胸蚜的捕食功能反应研究 [J]. 云南农业大学学报, 2009, 24 (3): 364-368]
- Lin Y, Yan SL, Fang HY, *et al.* Research progress on comprehensive utilization of chestnut (*Castanea mollissima*) [J]. *Hubei Forestry Science and Technology*, 2023, 52 (1): 54-58, 62. [林云, 晏绍良, 方洪元, 等. 板栗综合利用研究进展 [J]. 湖北林业科技, 2023, 52 (1): 54-58, 62]
- Liu BJ, Qin DQ, Zhou Y, *et al.* Observation and evaluation of predatory behavior of *Harmonia axyridis* on *Spodoptera frugiperda* [J]. *Journal of South China Agricultural University*, 2020, 41 (1): 28-33. [刘本菊, 秦得强, 周游, 等. 异色瓢虫对草地贪夜蛾的捕食行为观察与评价 [J]. 华南农业大学学报, 2020, 41 (1): 28-33]
- Mu JY, Xu HF, Li HG. *Insect Ecology and Agricultural Pest Forecasting* [M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 1997: 56-57. [牟吉元, 徐洪富, 李火苟. 昆虫生态与农业害虫预测预报 [M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1997: 56-57]
- Schenk D, Bacher S. Functional response of a generalist insect predator to one of its prey species in the field [J]. *Journal of Animal Ecology*, 2002, 71: 524-531]
- Tai JY, Liu SQ, Gao GZ. Predatory functional response of different stages of *Harmonia axyridis* Pallas on *Panaphis juglandis* Goeze [J]. *Chinese Journal of Biological Control*, 2021, 37 (6): 1338-1343. [邵锦瑞, 刘思琪, 高桂珍. 不同龄期异色瓢虫对核桃全斑蚜的捕食功能反应 [J]. 中国生物防治学报, 2021, 37 (6): 1338-1343]
- Tang XL. Identification and control of major leaf-eating pests in Yanshan chestnut [J]. *Hebei Fruits*, 2019, 2: 32-33. [汤新利. 燕山板栗主要食叶害虫的识别与防治 [J]. 河北果树, 2019, 2: 32-33]
- Wang HN, Geng S, Yi CQ, *et al.* Predation of *Harmonia axyridis* Pallas adults to *Megoura japonica* Matsumura [J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2020, 59 (10): 81-83. [王海诺, 耿硕, 羿超群, 等. 异色瓢虫成虫对豌豆修尾蚜的捕食作用 [J]. 湖北农业科学, 2020, 59 (10): 81-83]
- Wang XQ, Zhou YY, Feng CY, *et al.* Predatory functional response of *Harmonia axyridis* Pallas to *Hyadaphis bupleuri* Börne [J]. *Plant Protection*, 2022, 48 (3): 211-215. [王晓琪, 周亚媛, 冯朝阳, 等. 异色瓢虫对柴胡明蚜的捕食作用 [J]. 植物保护, 2022, 48 (3): 211-215]
- Wang XY, Shen ZR. Progress of applied research on multicolored Asian ladybird beetle [J]. *Chinese Bulletin of Entomology*, 2002, 4: 255-261. [王小艺, 沈佐锐. 异色瓢虫的应用研究概况 [J]. 昆虫知识, 2002, 4: 255-261]
- Wang Y, Chen Y, Zhang ZY, *et al.* Study on preying potential of different stages of nymphs and adults of *Harmonia axyridis* Pallas on *Myzus persicae* (Sulzer) [J]. *Journal of Environmental Entomology*, 2015, 37 (5): 1075-1080. [王媛, 陈越, 张拯研, 等. 不同龄期异色瓢虫对烟蚜的捕食潜能研究 [J]. 环境昆虫学报, 2015, 37 (5): 1075-1080]
- Wu KJ, Sheng QF, Gong PY. Equation of predator functional response and estimation of the parameters in it [J]. *Chinese Bulletin of Entomology*, 2004, 3: 267-269. [吴坤君, 盛承发, 龚佩瑜. 捕食性昆虫的功能反应方程及其参数的估算 [J]. 昆虫知识, 2004, 3: 267-269]
- Wu XW, Zheng LH, Gao P, *et al.* Research progress on bioecology and application of *Harmonia axyridis* [J]. *Heilongjiang Agricultural Sciences*, 2022, 10: 109-114. [吴钰薇, 郑林浩, 高鹏, 等. 异色瓢虫生物生态学及其应用研究进展 [J]. 黑龙江农业科学, 2022, 10: 109-114]
- Xian H, Zhang WB, Zhang ZD, *et al.* Predatory Functional Response of *Harmonia axyridis* to *Melanaphis sacchari* [J]. *Horticulture & Seed*, 2023, 43 (1): 96-98. [谢宏, 张文斌, 张兆冬, 等. 异色瓢虫对高粱蚜的捕食功能反应 [J]. 园艺与种苗, 2023, 43 (1): 96-98]
- Yang GQ, Fan W, Zhang Q, *et al.* Predatory function of *Harmonia axyridis* and *Propylea japonica* larvae to young larvae of *Tuta absoluta* [J]. *Chinese Journal of Biological Control*, 2022, 38 (4): 959-966. [杨桂群, 范苇, 张倩, 等. 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 [J]. 中国生物防治学报, 2022, 38 (4): 959-966]
- Yu HP, Wang Z, Long GY, *et al.* The predatory functional response of *Harmonia axyridis* in different insect states to three aphids [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2018, 46 (18): 86-90. [喻会平, 王召, 龙贵云, 等. 不同虫态异色瓢虫对3种蚜虫的捕食功能反应 [J]. 江苏农业科学, 2018, 46 (18): 86-90]
- Zhang CG. Identification and control of common stinging and sucking pests in chestnut [J]. *Xiandai Nongcun Keji*, 2020, 9: 36-37. [张春光. 板栗常见刺吸式害虫的识别及防治 [J]. 现代农村科技, 2020, 9: 36-37]
- Zhang HH, Wang Z, NiMa YZ, *et al.* Control potential of different geographic populations of *Harmonia axyridis* on *Myzus persicae* in Greenhouses of Lhasa [J]. *Plant Health and Medicine*, 2021, 34 (5): 53-58. [张欢欢, 旺珍, 尼玛玉珍, 等. 异色瓢虫不同地理种群对拉萨设施蔬菜桃蚜的捕食功能研究 [J]. 植物医生, 2021, 34 (5): 53-58]
- Zhang W, Ma RY, Jiang CX, *et al.* Predation response of *Harmonia axyridis* against *Kurisakia Onigurumi* [J]. *Journal of Sichuan Agricultural University*, 2018, 36 (5): 702-707. [张伟, 马若影, 蒋春先, 等. 异色瓢虫对枫杨刻蚜的捕食功能反应 [J]. 四川农业大学学报, 2018, 36 (5):

702-707]

- Zhang WQ, Guo XH, Hou ZR, *et al.* The predation functional response of *Harmonia axyridis* Pallas to *Aphis craccivora* [J]. *Journal of Environmental Entomology*, 2014, 36 (6): 965-970. [张文秋, 郭喜红, 侯峥嵘, 等. 异色瓢虫对豆蚜的捕食功能反应 [J]. 环境昆虫学报, 2014, 36 (6): 965-970]
- Zhang XQ. Study on High Quality Development of Chestnut Industry in Yanshan Reg [D]. Qinhuangdao: Hebei Normal University of Science & Technology Master Thesis, 2022. [张新奇. 燕山地区板栗产业高质量发展研究 [D]. 秦皇岛: 河北科技师范学院硕士论文, 2022]
- Zhao H, Liao XB, Gao P, *et al.* Functional response of *Eocanthecona furcellata* to the larvae of *Ostrinia furnacalis* [J]. *Journal of Environmental Entomology*, 2022, 44 (2): 422-429. [赵航, 廖贤斌, 高平, 等. 叉角厉蝽对亚洲玉米螟幼虫的捕食功能反应 [J]. 环境昆虫学报, 2022, 44 (2): 422-429]
- Zou YD, Geng JG, Chen GC, *et al.* Predation of *Harmonia axyridis* nymph on *Schizaphis graminum* [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1996, 7 (2): 197-200. [邹运鼎, 耿继光, 陈高潮, 等. 异色瓢虫若虫对麦三叉蚜的捕食作用 [J]. 应用生态学报, 1996, 7 (2): 197-200]