

吡虫啉对异色瓢虫种群控害功能的影响*

王佳佳^{1**} 付雪^{1,2} 王雪¹ 马艳龙¹ 叶乐夫^{1***}

(1. 东北农业大学农学院, 哈尔滨 150030; 2. 黑龙江大学农业资源与环境学院, 哈尔滨 150080)

摘要 【目的】杀虫剂对天敌的非致死效应是杀虫剂安全性评估的重要内容。【方法】本研究以吡虫啉亚致死浓度处理的大豆蚜 *Aphis glycines* 饲喂异色瓢虫 *Harmonia axyridis*, 测定了异色瓢虫的发育历期、存活率、蛹重和捕食功能反应。【结果】异色瓢虫 G_0 代不论从哪个龄期开始饲喂毒蚜, $LC_{25}(W)$ 处理各龄期其发育均显著延长, 且未成熟期 (1 龄至成虫) 显著延长, 蛹重和存活率显著降低; 异色瓢虫 G_0 代从 1 龄、3 龄和 4 龄开始饲喂毒蚜, 显著延长 G_1 代的 3 龄龄期, 显著缩短 G_1 代的 4 龄龄期; G_0 代从 4 龄开始饲喂毒蚜, 显著延长 G_1 代 1-3 龄的发育历期; G_0 代不论从哪个龄期开始饲喂毒蚜, G_1 代蛹重都显著降低, G_1 代幼虫存活率无显著的变化; 异色瓢虫对 LC_{25} 处理的 2 龄、3 龄和 4 龄幼虫的最大捕食量显著降低, 其余组无显著变化。【结论】吡虫啉亚致死浓度对异色瓢虫 G_0 代和 G_1 代的生长发育均产生影响, 且影响异色瓢虫的捕食能力, 从而影响异色瓢虫种群的控害功能, 这种杀虫剂对非靶标天敌昆虫的非致死效应需要在杀虫剂的安全性评估中予以考虑。

关键词 吡虫啉; 异色瓢虫; 亚致死浓度; 生长发育; 捕食功能反应

Effect of imidacloprid on *Harmonia axyridis*, a biological control for pest insects

WANG Jia-Jia^{1**} FU Xue^{1,2} WANG Xue¹ MA Yan-Long¹ YE Le-Fu^{1***}

(1. College of Agriculture, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China;

2. College of Agricultural Resources and Environment, Heilongjiang University, Harbin 150080, China)

Abstract [Objectives] The non-lethal effects of pesticides on the natural enemies of pest species should be an important consideration in assessing the benefits of pesticides. [Methods] Soybean aphids treated with a sub-lethal concentration (LC_{25}) of imidacloprid were fed to *H. axyridis*, and the developmental duration, survival ratio, pupal weight and functional predatory response of different developmental stages of *H. axyridis* were measured. [Results] (1) Regardless of the developmental stage of the G_0 generation of *H. axyridis* that was fed imidacloprid treated aphids, their development duration was significantly prolonged and their pupal weight and survival ratio were significantly reduced. (2) Irrespective of whether the 1st, 3rd or 4th instar of the G_0 generation was the first to feed on imidacloprid treated aphids, the 3rd instar period of the G_1 generation was significantly extended, and the 4th instar period was significantly shortened. When the 4th instar of the G_0 generation was the first to feed on imidacloprid treated aphids, the developmental duration of the G_1 generation was significantly extended from the 1st to the 3rd instar. Irrespective of the stage at which the G_0 generation began to feed on imidacloprid treated aphids, the pupal weight of the G_1 was significantly reduced, although the survival ratio of G_1 larvae did not change significantly. (3) Feeding *H. axyridis* imidacloprid treated aphids significantly reduced the maximum predation rate of the 2nd, 3rd and 4th instars, but there was no significant change in that of 1st instar larvae or adults. [Conclusion] Feeding *H. axyridis* aphids

*资助项目 Supported projects: 黑龙江省省属高等学校基本科研业务费基础研究项目“北方寒地异色瓢虫辅助越冬增强早春控害功能的研究”(KJCX201820); 国家现代农业产业技术体系建设专项(CARS-04); 东北农业大学“学术骨干”项目(518501); 国家重点研发计划“粮食丰产增效科技创新”重点专项“黑龙江省春玉米、粳稻丰产增效模式构建与超高产关键技术研究”课题(2017YFD0300506); 国家自然科学基金青年项目(31100304)

**第一作者 First author, E-mail: 1481143303@qq.com

***通讯作者 Corresponding author, E-mail: yelefuneau@foxmail.com

收稿日期 Received: 2019-06-04; 接受日期 Accepted: 2019-09-02

containing a sub-lethal concentration of imidacloprid affected the growth and development of the G_0 and G_1 generations, and also affected their predatory ability, thus affecting the effectiveness of the *H. axyridis* as a biological control. Non-lethal effects on non-target insects should be considered when assessing the suitability of insecticides.

Key words imidacloprid; *Harmonia axyridis*; sub-lethal concentration; growth and development; preying functional responses

大豆蚜 *Aphis glycines* 是大豆的主要害虫之一,在世界各地都有分布,特别是在我国东北地区发生较为严重。大豆蚜通过吸食汁液危害大豆苗(王素云等,1994),在大发生年份可造成大豆生产的严重损失(孙博等,2000)。异色瓢虫 *Harmonia axyridis*, 属鞘翅目(Coleoptera), 是一种重要的捕食性天敌昆虫,能够取食蚜虫、蓟马和叶蝉以及多种鳞翅目昆虫幼虫及蛹(Koch, 2003; 王甦等,2007)。在农业生产上,化学防治法在蚜虫综合治理中仍占主导地位,使用化学农药防治目标害虫的同时,害虫天敌也受到影响。在农业生态系统中施用杀虫剂,作为非靶标生物的天敌,尤其是幼虫就有可能接触到杀虫剂,虽然通常不足以致死,却会干扰其生长发育和繁殖,这种现象被称为昆虫钝态(古德就等,1991)。亚致死剂量的杀虫剂对害虫天敌的钝化作用是成功实施害虫综合防治方案所要考虑的因素之一。相关研究已评估了 β -氰菊酯对捕食性瓢虫的亚致死作用,研究发现产卵前期明显缩短,产卵期明显延长,净生殖率显著提高(Xiao *et al.*, 2016)。亚致死浓度的氯虫苯甲酰胺延长了异色瓢虫2龄、4龄幼虫及蛹的发育时间,降低成虫的寿命和繁殖力,延长产卵期,降低内禀增长率和周限增长率(Nawaz, 2017)。烟碱类杀虫剂对异色瓢虫相对较安全,不会影响异色瓢虫的搜索行为(朱承美等;2012)。

捕食功能反应是捕食者个体在不同猎物密度时的捕食率,它决定了捕食性天敌调节猎物种群的功能。一般有三种类型的曲线用来模拟天敌捕食功能反应(Holling, 1959),异色瓢虫各个阶段对猎物的捕食功能反应属于Type II,也有少数是属于Type III(Yushan, 1989)。这些研究中,有关异色瓢虫对不同蚜虫的捕食功能反应的研究较多。异色瓢虫对麦蚜(Wheat aphid)(郭

丽娜和王洪平,2008)、豆蚜 *Aphis craccivora* Koch(张文秋等,2014)、桃蚜 *Myzus persicae* (Sulzer)(李英梅,2015)、瓜蚜 *Aphis gossypii* Glover(Sharma *et al.*, 2017)、胡萝卜微管蚜 *Semiaphis heraclei* (Takahashi)(张晓曼等,2015)和枸杞木虱 *Poratrioza sinica* Yang&Li(马宝旭等,2018; Huang *et al.*, 2019)的捕食功能反应均符合Holling II型方程,异色瓢虫成虫对枸杞木虱的捕食作用受种内干扰和自身密度的影响(巫鹏翔等,2017)。异色瓢虫各龄期幼虫对枸杞木虱4种虫态的捕食量存在显著差异,在枸杞木虱密度相同的条件下,异色瓢虫4龄幼虫的日捕食量最大。然而,关于杀虫剂对异色瓢虫捕食功能影响的研究尚未见报道。

在害虫治理中因化学杀虫剂速效、方便、简单和经济的特点被广泛使用,甚至在特别强调生态环境保护的今天,仍然不得不承认它是害虫综合治理中的重要手段,但不合理的使用会破坏有害生物及天敌种群的自然调控,影响生态系统的平衡。合理使用杀虫剂、协调化学防治与生物防治对天敌自然控害功能的发挥具有重要的作用。关于杀虫剂对害虫影响的研究较多,而对天敌的影响报道还很少,本文研究了取食吡虫啉处理的大豆蚜对异色瓢虫的生长发育、存活率和捕食功能的影响,以期明确异色瓢虫在杀虫剂作用下的种群控害能力的变化。

1 材料与方法

1.1 供试虫源

大豆蚜为室内大豆苗(东农46)饲养多年且未使用任何农药的品系。异色瓢虫卵购于福建艳璇生物防治技术有限公司,在人工气候箱内孵化并以大豆蚜饲养。饲养条件为:温度25℃、RH 70%、光周期14L:10D。

1.2 仪器与农药

1.2.1 仪器 HPG-280HX 人工气候箱, 哈尔滨市东联电子科技开发有限公司; XJ220A-SCS 电子天平, 上海天美天平仪器有限公司; MOTIC SMZ-140 SERIES 连续变倍体显微镜, 深圳市宝安区福永街道办福海大道新和新兴工业园。

1.2.2 农药 吡虫啉 (Imidacloprid, 70% 剂型水分散粒剂), 德国作物科学 (中国) 有限公司。

1.3 生物测定方法

亚致死浓度 (LC_{25}) 的测定采用浸渍法 (韩晓莉, 2007), 将 70% 吡虫啉原药配成 1% 母液, 然后用蒸馏水稀释成 5 个系列浓度, 以蒸馏水为对照, 将带有蚜虫的大豆叶完全浸在药液中 10 s, 然后用镊子取出, 用滤纸吸去叶片上残留的药液, 再置于垫保湿滤纸的 9 cm 培养皿中, 皿上扎小孔, 置于培养箱中, 24 h 后在显微镜下检查蚜虫死亡数, 以细小的毛笔轻轻触虫体完全不动者为死亡。每浓度至少处理 60 头试虫, 每个处理重复 5 次, 毒力测定结果用 DPS7.05 处理, 求出 LC_{25} 值。

1.4 试验方法

1.4.1 单次饲喂毒蚜 LC_{25} 的异色瓢虫幼虫发育历期和蛹重 通过预试验得 LC_{25} 为 0.11 mg/L, 将有足够大豆蚜的叶片完全浸在此浓度的药液中 10 s, 然后用镊子取出, 用滤纸吸去叶片上残留的药液, 再置于有湿润脱脂棉球的 9 cm 培养皿中, 皿上扎小孔, 置于培养箱中, 24 h 后置于干净的培养皿中, 每皿引入一头 1 龄、2 龄、3 龄或 4 龄幼虫, 异色瓢虫幼虫取食毒蚜 24 h 后再置于干净的培养皿中。对照组无药剂处理, 每日更换新叶片及补充足够的无药剂处理的大豆蚜。每处理重复 30 次。每日 8:00, 14:00, 20:00 观察各期幼虫存活率、生长发育历期、蛹期称量蛹重, 成虫期鉴定斑型及雌雄。直至成虫, 把每个处理下的成虫随机配对产卵, 卵孵化后对应的挑取每个处理下的第 2 代幼虫 30 头, 每日 8:00, 14:00, 20:00 观察各期幼虫存活率、生长发育历期, 蛹期称量蛹重, 成虫期鉴定斑型及雌雄。

1.4.2 每日饲喂毒蚜 $LC_{25}(W)$ 的异色瓢虫幼虫发育历期和蛹重 方法同 1.4.1, 不同的是每日补充足够的毒蚜。

1.4.3 捕食功能反应 对照组: 在 9 cm 的培养皿中放入有足够大豆蚜的叶片, 棉球保湿, 每皿接入一头 1 龄、2 龄、3 龄、4 龄幼虫或成虫, 用膜封口, 皿上扎小孔, 置于培养箱中, 24 h 后取出置于新的培养皿中, 总共饥饿 24 h (1 龄除外)。

试验组: 在 9 cm 的培养皿中, 每皿接入一头 1 龄、2 龄、3 龄、4 龄幼虫或成虫, 饲喂足够的毒蚜 (毒蚜处理方法同 1.4.1) 24 h, 之后操作同对照组。

人工挑取高龄若蚜, 设置 6 个蚜虫密度梯度, 5 次重复, 用膜封口, 皿上扎小孔, 置于培养箱中, 24 h 后记录剩余蚜虫数。饲喂异色瓢虫 1 龄、2 龄、3 龄、4 龄幼虫和成虫的蚜虫密度梯度分别为 5、10、15、20、30、40 头; 20、40、60、80、100、120 头; 20、40、60、80、100、120 头; 80、100、120、140、160、180 头; 80、100、120、140、160、180 头 (马宝旭等, 2018; 喻会平等, 2018)。

1.5 数据处理与分析

以上数据结果均采用 DPS7.05 数据处理软件进行统计分析, 用 Excel 2010 作图。采用单因素方差分析 LSD 法分析不同处理的毒蚜饲喂异色瓢虫后的发育历期、存活率和捕食功能反应的数据, 并进行显著性检验 ($P < 0.05$)。捕食功能反应采用 Holling 型 (Holling, 1959; 金开正, 1994) 圆盘方程 $N_a = a T_n / (1 + a T_h N)$ 进行拟合, 式中 N_a 为猎物被捕食数, N 表示猎物密度, a 表示瞬时攻击率, T 表示猎物暴露给捕食者的时间, T_h 为捕食 1 头猎物所耗时间。

2 结果与分析

2.1 G_0 代异色瓢虫发育历期和蛹重

G_0 代从 1 龄开始饲喂毒蚜, LC_{25} 处理组延长了 2 龄的发育历期 ($F_{2, 69} = 9.787$, $P = 0.000$, 1.5 倍), 蛹重显著降低 ($F_{2, 51} = 45.995$, $P = 0.000$)

(表 1); 从 4 龄开始饲喂毒蚜, LC_{25} 处理组延长了 4 龄的发育历期 ($F_{2,49}=14.230$, $P=0.000$, 1.3 倍), 蛹重显著降低 ($F_{2,49}=152.825$, $P=0.000$); 总体来看, 不论从哪个龄期开始饲喂毒蚜, $LC_{25}(W)$ 处理组都显著延长了其发育历期, 为对照的 1.31-1.43 倍 (1.43 倍、1.36 倍、1.3 倍、1 倍和 1.39 倍), 且总发育历期也显著延长 ($P<0.05$), 蛹重显著降低 ($P<0.05$)。 G_0 代从 1 龄、2 龄和 3 龄开始饲喂毒蚜, 异色瓢虫的总发育历期 LC_{25} 处理组无显著差异 (图 1), $LC_{25}(W)$ 处理组显著延长 ($F_{2,45}=5.838$, $P=0.005$ 6; $F_{2,45}=13.745$, $P=0.000$; $F_{2,45}=13.257$, $P=0.000$), 为对照组的 1.2-1.3 倍 (1.2 倍、1.3 倍和 1.3 倍); G_0 代从 4 龄开始饲喂毒蚜, 异色瓢虫总发育历期 LC_{25} 处理组显著延长 ($F_{2,46}=12.753$, $P=0.000$ 8, 1.1 倍)。

表 1 亚致死浓度吡虫啉处理大豆蚜对 G_0 代异色瓢虫发育历期和蛹重的影响
Table 1 Effects of sub-lethal concentration of imidacloprid on the developmental duration and pupal weight of *Harmonia axyridis* (G_0) treated with imidacloprid

用药时期 Pesticide treatment stage	处理 Treatment	发育历期 (d) Developmental duration						蛹重(g) Pupal weight
		1 龄	2 龄	3 龄	4 龄	预蛹	蛹	
		1st-instar	2nd-instar	3rd-instar	4th-instar	Pre-pupal	Pupae	
1 龄 1st-instar	CK	1.86±0.09b	1.57±0.13b	2.71±0.14b	6.33±0.16b	1.06±0.04b	4.91±0.05a	0.034 2±0.000 7a
	LC_{25}	1.58±0.08b	2.36±0.15a	3.03±0.21b	6.08±0.23b	1.03±0.04b	4.83±0.13a	0.026 7±0.000 5b
	$LC_{25}(W)$	2.66±0.17a	2.18±0.14a	4.39±0.32a	8.00±2.00a	1.38±0.38a	4.50±0.00a	0.022 3±0.000 0b
2 龄 2nd-instar	CK		2.00±0.10b	2.80±0.12b	5.87±0.26b	1.08±0.05b	4.84±0.07ab	0.033 2±0.0006a
	LC_{25}		2.16±0.15b	2.92±0.18b	6.36±0.25b	0.92±0.03b	4.93±0.08a	0.026 7±0.000 6a
	$LC_{25}(W)$		2.72±0.21a	4.09±0.23a	10.25±1.25a	1.25±0.25a	4.38±0.13b	0.023 9±0.002 4b
3 龄 3rd-instar	CK			2.92±0.07b	5.55±0.17b	1.00±0.02b	4.57±0.05a	0.032 4±0.000 5a
	LC_{25}			3.10±0.14b	6.64±0.39b	1.02±0.04b	4.81±0.06a	0.027 6±0.000 8b
	$LC_{25}(W)$			3.83±0.39a	8.67±0.33a	1.00±0.00b	4.88±0.13a	0.026 1±0.000 5b
4 龄 4th-instar	CK				5.35±0.19b	1.04±0.04b	4.59±0.10a	0.034 1±0.000 5a
	LC_{25}				6.88±0.27a	0.97±0.04b	4.56±0.04a	0.026 1±0.000 6b
	$LC_{25}(W)$				7.42±0.58a	—	—	—

表中数据为平均值±标准误; 数据后标有不同小写字母表示在 $P<0.05$ 水平差异显著 (LSD 法)。下表同。
Data in the table are mean±SE, and followed by different lowercase letters indicate significant difference at the 0.05 level (LSD method). The same below.

2.2 G_0 代异色瓢虫存活率

G_0 代从 1 龄开始饲喂毒蚜, LC_{25} 处理组和 $LC_{25}(W)$ 处理组对于从 2 龄-蛹期的存活率都显著低于对照组 ($F_{2,36}=60.686$, $P<0.05$) (表 2), LC_{25} 处理组的存活率分别为对照组的 0.63-0.83 倍 (0.83 倍、0.67 倍、0.67 倍、0.67 倍和 0.63 倍), $LC_{25}(W)$ 处理组的存活率为对照组的 0.03-0.63 倍 (0.63 倍、0.33 倍、0.03 倍、0.03 倍和 0.03 倍); G_0 代从 2 龄开始饲喂毒蚜, LC_{25} 处理组的 4 龄-蛹期的存活率显著低于对照组 ($F_{2,35}=17.077$,

$P=0.003$), 为对照组的 0.68-0.73 倍 (0.68 倍、0.73 倍和 0.73 倍), $LC_{25}(W)$ 处理组的 2 龄-蛹期的存活率显著低于对照组 ($F_{2,35}=17.077$, $P=0.000$), 为对照组的 0.07-0.77 倍 (0.77 倍、0.43 倍、0.07 倍、0.08 倍和 0.08 倍); G_0 代从 3 龄开始饲喂毒蚜, LC_{25} 处理组的 4 龄-蛹期的存活率显著低于对照组 ($F_{2,30}=220.928$, $P=0.000$), 为对照组的 0.73-0.83 倍 (0.83 倍、0.83 倍和 0.73 倍), $LC_{25}(W)$ 处理组的 3 龄-蛹期的存活率显著低于对照组 ($F_{2,30}=220.928$, $P=0.000$), 分别为

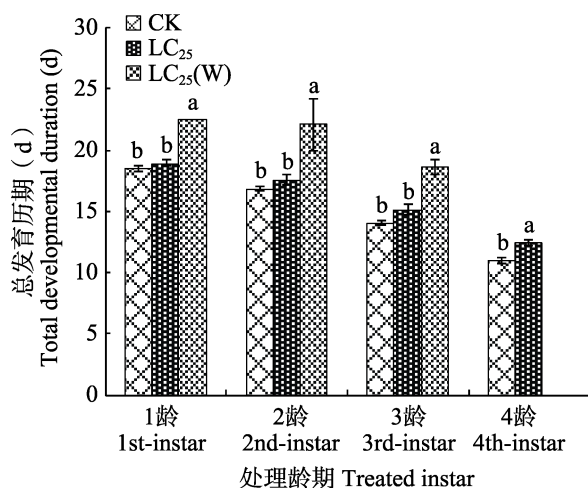


图 1 G_0 代异色瓢虫取食毒蚜后总发育历期的变化

Fig. 1 Change of total developmental duration *Harmonia axyridis* (G_0) after feeding on poison aphid
柱上标有不同小写字母表示 $P < 0.05$ 水平差异显著 (LSD 法)。下同。

Histograms with lowercase letters indicate significant difference at the 0.05 level (LSD method).
The same below.

对照组的 0.1-0.33 倍 (0.33 倍、0.1 倍、0.1 倍和 0.06 倍); G_0 代从 4 龄开始饲喂毒蚜, LC_{25} 处理组的 4 龄-蛹期的存活率显著低于对照组 ($F_{2,24} =$

920.720, $P = 0.000$), 分别为对照组的 0.60-0.63 倍 (0.63 倍、0.63 倍和 0.60 倍), $LC_{25}(W)$ 处理组的 4 龄存活率显著低于对照组 ($F_{2,24} = 920.72$, $P = 0.000$), 为对照组的 0.1 倍。

2.3 G_1 代异色瓢虫发育历期和蛹重

G_0 代从 1 龄、3 龄和 4 龄开始饲喂毒蚜, 显著延长 G_1 代的 3 龄幼虫龄期 ($F_{4,136} = 11.104$, $P = 0.000$ 1) (表 3), 为对照组的 1.17-1.33 倍 (1.17 倍、1.33 倍和 1.18 倍), 显著缩短 G_1 代的 4 龄幼虫龄期 ($F_{4,135} = 24.064$, $P = 0.000$ 1), 约为对照组的 0.75 倍 (0.75 倍、0.73 倍和 0.76 倍); G_0 代从 4 龄开始饲喂毒蚜, 显著延长了 G_1 代 1-3 龄的发育历期, G_0 代从 2 龄开始饲喂毒蚜, 显著缩短 G_1 代 1 龄龄期 ($F_{4,145} = 12.905$, $P = 0.027$), 约为对照的 0.73 倍, 延长 G_1 代幼虫预蛹期和蛹期 ($F_{4,134} = 3.848$, $P = 0.009$; $F_{4,134} = 6.810$, $P = 0.000$), 约为对照的 1.01 倍和 1.12 倍; G_0 代不论从哪个龄期开始饲喂毒蚜, G_1 代的蛹重都显著低于对照组 ($F_{4,134} = 9.311$, $P = 0.000$ 1), 约为对照组的 0.9 倍 (0.88 倍、0.93 倍、0.83 倍和 0.93 倍)。

表 2 亚致死浓度吡虫啉处理大豆蚜对 G_0 代异色瓢虫各阶段存活率的影响
Table 2 Effects of sublethal concentration of imidacloprid on survival ratio of *Harmonia axyridis* (G_0) fed on soybean aphid

用药时期 Pesticide treatment stage	处理 Treatment	存活率(%) Survival ratio					
		1 龄 1st-instar	2 龄 2nd-instar	3 龄 3rd-instar	4 龄 4th-instar	预蛹 Pre-pupal	蛹 Pupal
1 龄 1st-instar	CK	100.00%±0.00a	100.00%±0.00a	100.00%±0.00a	100.00%±0.00a	100.00%±0.00a	100.00%±0.00a
	LC_{25}	90.00%±5.77a	83.33%±3.33b	66.67%±8.82b	66.67%±8.82b	66.67%±8.82b	63.33%±8.82b
	$LC_{25}(W)$	83.33%±6.67a	63.33%±3.33c	33.33%±3.33c	3.33%±3.33c	3.33%±3.33c	3.33%±3.33c
2 龄 2nd-instar	CK		100.00%±0.00a	93.33%±3.33a	93.33%±3.33a	86.67%±3.33a	86.67%±3.33a
	LC_{25}		86.67%±8.82ab	80.00%±5.77ab	63.33%±8.82b	63.33%±8.82b	63.33%±8.82b
	$LC_{25}(W)$		76.67%±6.67bc	40.00%±15.28c	6.67%±3.33c	6.67%±3.33c	6.67%±3.33c
3 龄 3rd-instar	CK			100.00%±0.00a	100.00%±0.00a	100.00%±0.00a	100.00%±0.00a
	LC_{25}			86.67%±3.33ab	83.33%±3.33b	83.33%±3.33b	73.33%±3.33b
	$LC_{25}(W)$			33.33%±12.02c	10.00%±5.77c	10.00%±5.77c	6.67%±3.33c
4 龄 4th-instar	CK				100.00%±0.00a	100.00%±0.00a	100.00%±0.00a
	LC_{25}				63.33%±3.33b	63.33%±3.33b	60.00%±0.00b
	$LC_{25}(W)$				10.00%±5.77c	—	—

2.4 G₁ 代异色瓢虫各虫态存活率

G₀ 代不论从哪个龄期开始饲喂毒蚜, 与对照组相比, G₁ 代各幼虫的存活率均无显著的变化 (表 4)。

2.5 捕食功能反应

2.5.1 异色瓢虫各阶段捕食功能反应类型的分析 实验结果表明, 异色瓢虫捕食大豆蚜的数量与大豆蚜蚜虫密度呈负加速曲线, 符合 Holling 型功能反应模型。根据数据记录, 用 Excel 2010 作图分析, 2 龄、3 龄和 4 龄幼虫 LC₂₅ 处理组的最大捕食量显著低于对照组 ($F_{9,20}=168.98$, $P=0.001$), 分别为对照组的 0.84 倍、0.66 倍和 0.81 倍, 1 龄幼虫和成虫处理组与对照组无显著差异

(表 5)。
2.5.2 各处理异色瓢虫不同虫态的捕食量 异色瓢虫 1-4 龄幼虫对照组的捕食量均随蚜虫密度的增加而增加, 增加到一定程度趋于稳定; 药剂处理组 2 龄幼虫的捕食量与对照组趋势一致, 其他龄期的捕食量随蚜虫密度的增加而减少 (图 2: A-D)。

异色瓢虫 1 龄幼虫当蚜虫密度为 40 头/皿时, 处理组显著低于对照组 ($F_{11,48}=16.038$, $P=0.0001$, 0.73 倍), 2 龄幼虫当蚜虫密度为 60 和 100 头/皿时, 处理组显著低于对照组 ($F_{11,48}=17.609$, $P=0.0001$), 均为对照的 0.67 倍, 3 龄幼虫当蚜虫密度为 60、80、100 和 120 头/皿时, 处理组显著低于对照组 ($F_{11,48}=42.684$, $P=0.0001$,

表 3 亚致死浓度吡虫啉处理大豆蚜对 G₁ 代异色瓢虫各虫态发育历期和蛹重的影响
Table 3 Effects of sub-lethal dose of imidacloprid on the developmental duration and pupal weight of *Harmonia axyridis* (G₁) fed on soybean aphids treated with imidacloprid

用药时期 Pesticide treatment stage	发育历期 (d) Developmental duration						蛹重 (g) Pupal weight
	1 龄 1st-instar	2 龄 2nd-instar	3 龄 3rd-instar	4 龄 4th-instar	预蛹 Pre-pupal	蛹 Pupal	
CK	2.62±0.13bc	1.91±0.11b	2.45±0.12c	6.21±0.26a	0.99±0.04b	4.64±0.06b	0.032 0±0.000 8a
1 龄 1st-instar	2.75±0.25b	2.09±0.11b	2.87±0.12b	4.64±0.13b	0.98±0.01b	4.67±0.06b	0.028 1±0.000 6bc
2 龄 2nd-instar	1.92±0.08d	1.85±0.07b	2.24±0.08c	6.03±0.14a	1.11±0.05a	5.20±0.07a	0.029 6±0.000 7b
3 龄 3rd-instar	2.05±0.15cd	1.98±0.10b	3.25±0.11a	4.54±0.12b	0.96±0.02b	4.81±0.14b	0.026 6±0.000 5c
4 龄 4th-instar	3.93±0.37a	2.80±0.16a	2.88±0.16b	4.74±0.11b	0.96±0.03b	4.77±0.08b	0.029 7±0.000 8b

表 4 亚致死浓度吡虫啉处理大豆蚜对 G₁ 代异色瓢虫各虫态存活率的影响
Table 4 Effect of sublethal concentration of imidacloprid on survival ratio of each stage of *Harmonia axyridis* (G₁) fed on soybean aphids treated with imidacloprid

用药时期 Pesticide treatment stage	存活率 (%) Survival ratio					
	1 龄 1st-instar	2 龄 2nd-instar	3 龄 3rd-instar	4 龄 4th-instar	预蛹 Pre-pupal	蛹 Pupae
CK	100.00%±0.00a	100.00%±0.00a	100.00%±0.00a	100.00%±0.00a	100.00%±0.00a	100.00%±0.00a
1 龄 1st-instar	100.00%±0.00a	96.67%±3.33a	86.67%±6.67a	83.33%±8.82a	83.33%±8.82a	73.33%±8.82ab
2 龄 2nd-instar	100.00%±0.00a	100.00%±0.00a	96.67%±3.33a	96.67%±3.33a	93.33%±3.33a	90.00%±0.00a
3 龄 3rd-instar	100.00%±0.00a	93.33%±6.67a	93.33%±6.67a	93.33%±6.67a	93.33%±6.67a	93.33%±6.67a
4 龄 4th-instar	100.00%±0.00a	100.00%±0.00a	93.33%±6.67a	93.33%±6.67a	93.33%±6.67a	93.33%±6.67a

表 5 异色瓢虫各阶段对大豆蚜的捕食功能反应

Table 5 Functional response of *Harmonia axyridis* at different stage fed on soybean aphids

虫态 Stage	处理 Treatment	R^2	Holling- 圆盘方程	最大捕食量 (头) Maximum preying number (individual)
			Holling- Disk equation	
1 龄 1st-instar	CK	0.947 4	$N_a=1.148\ 8N/(1+0.042\ 3N)$	23 ^a
	LC ₂₅	0.937 9	$N_a=0.805\ 7N/(1+0.004\ 8N)$	23 ^a
2 龄 2nd-instar	CK	0.967 5	$N_a=0.817\ 9N/(1+0.003\ 6N)$	75 ^a
	LC ₂₅	0.896 0	$N_a=0.995\ 4N/(1+0.011\ 5N)$	63 ^b
3 龄 3rd-instar	CK	0.997 5	$N_a=0.970\ 0N/(1+0.001\ 0N)$	104 ^a
	LC ₂₅	0.998 5	$N_a=1.069\ 5N/(1+0.011\ 3N)$	68d ^b
4 龄 4th-instar	CK	0.989 5	$N_a=0.944\ 6N/(1+0.000\ 4N)$	152 ^a
	LC ₂₅	0.833 0	$N_a=1.160\ 8N/(1+0.004\ 5N)$	122 ^b
成虫 Adult	CK	0.906 2	$N_a=0.997\ 3N/(1+0.001\ 0N)$	154 ^a
	LC ₂₅	0.885 9	$N_a=0.859\ 4N/(1+0.000\ 3N)$	149 ^a

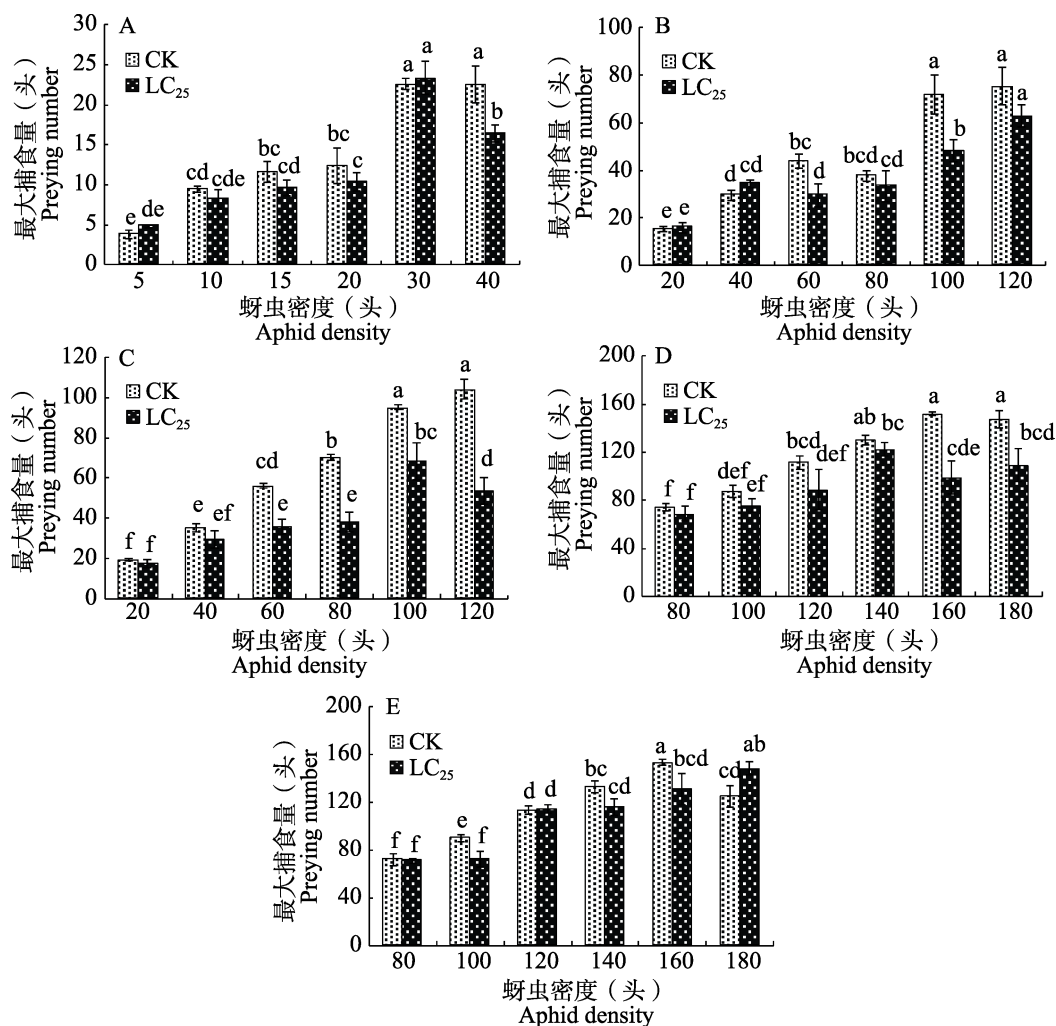


图 2 不同虫态的异色瓢虫对蚜虫的捕食量

Fig. 2 Preying number of *Harmonia axyridis* at different stages to aphids

A-D. 异色瓢虫 1-4 龄幼虫的捕食量; E. 异色瓢虫成虫的捕食量。

A-D. Preying number of *Harmonia axyridis* at 1st-4th instar; E. Preying number of *Harmonia axyridis* adult.

0.64 倍、0.43 倍、0.72 倍和 0.51 倍), 4 龄幼虫当蚜虫密度为 160 和 180 头/皿时, 处理组显著低于对照组 ($F_{11,48}=10.585$, $P=0.0001$, 0.66 倍和 0.74 倍), 其他蚜虫密度梯度下异色瓢虫的捕食量无显著变化。

成虫对照组的捕食量随着蚜虫密度的增加先增加后降低, 最大捕食量达到 153.6 头; 药剂处理组的捕食量随着蚜虫密度的增加而增加, 最大捕食量为 149 头 (图 2:E)。当蚜虫密度为 100 头/皿和 160 头/皿, 处理组显著低于对照组 ($F_{11,48}=22.711$, $P=0.0001$, 0.80 倍和 0.85 倍); 当蚜虫密度为 180 头/皿, 处理组显著高于对照组 ($F_{11,48}=22.711$, $P=0.0001$, 1.2 倍), 其他蚜虫密度梯度下无显著变化。

3 讨论

在现代农业害虫管理中, 人们重视化学防治和生物防治的协同作用。使用杀虫剂对保护作物和提高生产力很重要。然而, 农药可能对人类健康或环境造成不利影响, 这取决于接触水平 (袁善奎等, 2018)。由于各国在植物保护方面有不同的要求、准则和法律限制, 全世界的农药立法大不相同 (Handford, 2015)。在农业生产上, 使用化学农药防治目标害虫的同时, 害虫天敌也遭受伤亡。以往, 大多都是关于化学农药对害虫的研究, 用致死中浓度 LC_{50} 去评价农药对害虫的致死效应, 而低于 LC_{50} 的亚致死浓度对天敌昆虫的影响的研究相对较少, 尤其是亚致死浓度对天敌昆虫捕食功能的研究甚少。相关研究表明, 亚致死剂量杀虫剂如噻虫啉、吡虫啉、阿维菌素和烯啶虫胺, 可延长萝卜蚜 *Lipaphis erysimi* 的发育历期, 并降低其产仔数量 (李昭等, 2018)。亚致死浓度的吡虫啉显著抑制豌豆蚜 *Acyrtosiphon pisum* F_0 代的繁殖力, 缩短其寿命, 延长 F_1 代发育历期 (慧倩倩等, 2009)。日本通草蛉 *Chrysoperla nipponensis* (Okamoto) 幼虫经不同剂量吡虫啉处理后, 幼虫和蛹的发育历期均延长, 蛹重降低和羽化率降低, 雌虫产卵前期延长, 产卵量和寿命减少, 内禀增长力 (R_m)

净繁殖率 (R_0) 和周限增长率 (λ) 均显著降低, 平均世代历期 (T) 和种群加倍时间 (D_t) 显著延长。因此, 吡虫啉亚致死剂量对日本通草蛉种群的增长具有抑制作用 (刘中芳等, 2016)。杨航等 (2017) 研究了噻虫啉对白背飞虱 *Sogatella furcifera* (Horváth) 种群繁殖力的亚致死效应, 表明噻虫啉亚致死浓度胁迫可抑制白背飞虱的种群增长。综合以上研究表明, 杀虫剂的亚致死效应会影响昆虫的种群增长。上述研究结果与本研究结果一致, 异色瓢虫取食经过亚致死浓度吡虫啉处理的大豆蚜后, 对于 G_0 代, 总体来看, 不论从哪个龄期开始饲喂毒蚜, 均明显延长了 G_0 代的发育历期和降低蛹重; 药剂对存活率也有一定影响, 说明亚致死浓度的吡虫啉对第三营养级的异色瓢虫的胃毒作用较大。 G_0 代从 1 龄、3 龄和 4 龄开始饲喂毒蚜, G_1 代 3 龄幼虫期显著延长, 4 龄幼虫期显著缩短; G_0 代从 4 龄开始饲喂毒蚜, G_1 代 1-3 龄的发育期延长; 全部的处理组, G_1 代蛹重均降低, 而幼虫各龄期存活率无显著变化, 这可能是因为异色瓢虫受药量低, 耐药性强, 加之中毒后逐渐恢复。

影响捕食者捕食能力的因素有很多, 包括捕食者自身的因素、温度、农药以及猎物等, 使用化学农药会影响异色瓢虫的取食能力以及生长发育历期。本研究结果表明, 异色瓢虫取食经过亚致死浓度吡虫啉处理的大豆蚜和未经过药剂处理的异色瓢虫各个阶段的捕食反应均符合 Holling II 型圆盘方程, 与前期报道的异色瓢虫取食枸杞木虱 *Poratrioza sinica* Yang & Li (马宝旭等, 2018)、苹果蚜虫绣线菊蚜 *Aphis citricola* Von der Goot 和苹果瘤蚜 *Myzus malisuctus* Matsumura (孙丽娟等, 2012) 的捕食功能反应类型一致。与未经处理的蚜虫相比, 异色瓢虫对 LC_{25} 处理的 2 龄、3 龄和 4 龄幼虫的最大捕食量显著降低, 可能是因为吡虫啉的作用使异色瓢虫自身行动缓慢, 导致捕食量降低; 而异色瓢虫 1 龄幼虫和成虫的捕食量无显著差异。这可能是由于 1 龄幼虫个体小, 取食量较小, 而成虫身体鞘翅, 灵活度不如 3 龄、4 龄幼虫对毒蚜有选择性

(马宝旭等, 2018)。另外, 在自然条件下, 异色瓢虫在捕食时, 可遇到的各个龄期的若蚜或成蚜, 而在本研究中, 根据触角、腹管和尾片的不同仅提供高龄若蚜(刘健和赵奎军, 2007), 且在人工挑选高龄若蚜时, 存在一天之内发育为成蚜产出若蚜的情况, 这对本研究结果会产生影响。为避免上述情况对本研究结果的影响, 在挑选高龄若蚜时, 请教相关专家并在镜下鉴定, 并在计数时对新产的若蚜不进行统计, 以减少试验误差。虽然本研究结果与田间实际有一定的差异, 但对评价和预测异色瓢虫种群的控害功能变化具有一定的参考价值。

总体来看, 异色瓢虫取食经过亚致死浓度吡虫啉处理的大豆蚜后, 可延长 G_0 代和 G_1 代幼虫的龄期, 降低 G_1 代存活率, G_0 代捕食猎物的能力下降。所以, 药剂的综合作用表现为异色瓢虫种群控害功能下降。药剂处理后异色瓢虫蛹重的下降, 可能导致个体的存活率和繁殖力下降, 进而影响天敌昆虫种群的密度。此外, 对北方寒地需要越冬的异色瓢虫种群而言, 瓢虫发育历期的延长可能具有更重要的影响。这对于一年只能完成 2 代发育的天敌昆虫而言, 会导致特定区域内的异色瓢虫在秋季不能发育至成虫, 而停留在幼虫阶段, 无法迁往越冬栖息地成功越冬。这导致大量个体会因食物不足而相互残食, 越冬基数明显下降, 从而影响翌年瓢虫早春的扩繁与控害效果。因此, 亚致死浓度的杀虫剂对天敌的非致死副作用不容忽视, 需要在环境评价中予以重视。

参考文献 (References)

- Gu DJ, Yu ME, Hou RH, Li ZH, 1991. Study on influence of sublethal dose of pesticide on searching behavior of aphid cocoon. *Acta Ecologica Sinica*, 11(4): 324–330. [古德就, 余明恩, 侯任环, 李哲怀, 1991. 农药亚致死剂量对菜蚜茧蜂搜索行为影响的研究. 生态学报, 11(4): 324–330.]
- Gu LN, Wang LP, 2008. Predatory response of *Harmonia axyridis* to wheat aphid and red spider. *Jouranal of Henan Agricultural Sciences*, 37(4): 72–74. [郭丽娜, 王洪平, 2008. 异色瓢虫对麦蚜和红蜘蛛的捕食功能反应. 河南农业科学, 37(4): 72–74.]
- Handford CE, Elliott CT, Campbell K, 2015. A review of the global pesticide legislation and the scale of challenge in reaching the global harmonization of food safety standards. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 11(4): 525–536.
- Holling CS, 1959. Some characteristics of simple types of predation and parasitism. *The Canadian Entomologist*, 91(7): 385–398.
- Han XL, 2007. Studies on resistance of grain aphid (*Sitobion avenae*) to neonicotinoid insecticides. Master dissertation. Hebei: Agricultural University of Hebei Province. [韩晓莉, 2007. 麦长管蚜对新烟碱类杀虫剂抗药性研究. 硕士学位论文. 河北: 河北农业大学.]
- Hui QQ, Liu CZ, Meng YF, Chen J, 2009. Sublethal effects of imidacloprid to *Acyrtosiphon pisum*. *Plant Protection*, 35(5): 86–88. [惠婧婧, 刘长仲, 孟银凤, 陈洁, 2009. 吡虫啉对豌豆蚜的亚致死效应. 植物保护, 35(5): 86–88.]
- Huang ZD, Qureshi J, Zhou XM, Pu ZX, Chen GQ, Yu JH, Zhang HY, 2019. Predation and functional response of the multi-coloured Asian ladybeetle *Harmonia axyridis* on the adult Asian citrus psyllid *Diaphorina citri*. *Biocontrol Science and Technology*, 29(3): 293–307.
- Jing KZ, 1994. A new method for fitting Holling disk equations. *Natural Enemies of Insects*, 16(4): 183–186. [金开正, 1994. Holling 圆盘方程拟合的一种新方法. 昆虫天敌, 16(4): 183–186.]
- Koch RL, 2003. The multicolored Asian lady beetle, *Harmonia axyridis*: A review of its biology, uses in biological control, and non-target impacts. *Journal of Insect Science*, 3(1): 1–16.
- Li YM, Tan Q, Zhang F, Hong B, Zhang SL, Chen ZJ, 2015. Study on the predatory function response of *Harmonia axyridis* to the cultivated peach aphid. *Journal of Environmental Entomology*, 37(5): 1081–1084. [李英梅, 谭巧, 张锋, 洪波, 张淑莲, 陈志杰, 2015. 异色瓢虫对设施栽培桃树桃蚜的捕食功能反应研究. 环境昆虫学报, 37(5): 1081–1084.]
- Li Z, Guo Y, Liu Y, Wang XP, Zhu ZH, 2018. The effects of sublethal levels of insecticide on the wing dimorphism, development and reproduction of two aphid species. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 55(5): 896–903. [李昭, 郭圆, 刘勇, 王小平, 朱智慧, 2018. 亚致死剂量杀虫剂对两种蚜虫翅型、发育和生殖的影响. 应用昆虫学报, 55(5): 896–903.]
- Liu J, Zhao KJ, 2007. Biology and control techniques of soybean aphids, *Aphis glycines*. *Chinese Bulletin of Entomology*, 44(2): 179–185. [刘健, 赵奎军, 2007. 大豆蚜的生物学防治技术. 昆虫知识, 44(2): 179–185.]
- Liu ZF, Fen YT, Gao Y, Guo XJ, Zhang PJ, Fan RJ, 2016. Effect of the lethal dose of pyridoline on the life table of the experimental

- population of Japanese lacewings. *Acta Phytophylacica Sinica*, 43(6): 1014–1019. [刘中芳, 封云涛, 高越, 郭晓君, 张鹏九, 范仁俊, 2016. 吡虫啉亚致死剂量对日本通草蛉实验种群生命表的影响. 植物保护学报, 43(6): 1014–1019.]
- Ma BX, Wu PX, Xu J, He J, Zhang R, Zhang RZ, 2018. Predatory function and field suppression to *Poratioria sinica* Yang & Li (Lycium) by *Harmonia axyridis* Pallas. *Journal of Environmental Entomology*, 40(1): 70–81. [马宝旭, 巫鹏翔, 徐婧, 何嘉, 张蓉, 张润志, 2018. 异色瓢虫对枸杞木虱捕食功能及田间捕食效果. 环境昆虫学报, 40(1): 70–81.]
- Nawaz M, Cai W, Jing Z, Zhou X, Mabubu J, Hua H, 2017. Toxicity and sublethal effects of chlorantraniliprole on the development and fecundity of a non-specific predator, the multicolored Asian lady beetle, *Harmonia axyridis* (Pallas). *Chemosphere*, 178(2): 496–503.
- Sharma PL, Verma SC, Chandel RS, Shah MA, Gavkare O, 2017. Functional response of *Harmonia dimidiata* (Fab.) to melon aphid, *Aphis gossypii* Glover under laboratory conditions. *Phytoparasitica*, 45(3): 373–379.
- Sun B, Ling SB, Zhao WX, 2000. The reason analysis of soybean aphid severe occurrence and control tactics in Suihua area in 1998. *Soybean Bulletin*, (1): 8–8. [孙博, 梁书宝, 赵伟霞, 2000. 1998 年绥化地区大豆蚜大发生原因分析及防治对策. 大豆通报, (1): 8–8.]
- Sun LJ, Yi WX, Gu Y, Dong XL, 2012. Predation of two kinds of apple aphids by heterochromatic ladybugs. *Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica*, 21(7): 39–43. [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.]
- Wu PX, Ma BX, Xu J, He J, Zhang R, Zhang RZ, 2017. Predatory effect of *Harmonia axyridis* on Chinese wolfberry louse. *Acta Phytophylacica Sinica*, 44(4): 582–588. [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.]
- Wang S, Zhang RZ, Zhang F, 2007. Advances in the study of biological ecology of *Harmonia axyridis*. *Acta Ecologica Sinica*, 18(9): 2117–2126. [王甦, 张润志, 张帆, 2007. 异色瓢虫生物生态学研究进展. 生态学报, 18(9): 2117–2126.]
- Wang SY, Sun YJ, Chen RL, 1994. On the damage and control of soybean aphid to soybean. *Plant Protection Technology and the Extension*, 14(2): 5–6. [王素云, 孙雅杰, 陈瑞鹿, 1994. 大豆蚜虫对大豆的危害与防治. 植保技术与推广, 14(2): 5–6.]
- Xiao D, Zhao J, Guo X, Li S, Zhang F, Wang S, 2016. Sublethal effect of beta-cypermethrin on development and fertility of the Asian multicoloured ladybird beetle *Harmonia axyridis*. *Journal of Applied Entomology*, 140(8): 598–608.
- Yang H, Yang H, Jin DC, Dai RH, Zhou C, 2017. Sub-lethal effect of fecundity on the population fecundity of thiamethazine test. *Journal of Plant Protection*, 44(3): 509–514. [杨航, 杨洪, 金道超, 戴仁怀, 周操, 2017. 噻虫嗪对白背飞虱试验种群繁殖力的亚致死效应. 植物保护学报, 44(3): 509–514.]
- Yu HP, Wang Z, Long GY, Yang H, Dai YF, 2018. Predatory response of different stage of *Harmonia axyridis* to three species of aphids. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 46(18): 86–90. [喻会平, 王召, 龙贵云, 杨洪, 代园凤, 2018. 不同虫态异色瓢虫对 3 种蚜虫的捕食功能反应. 江苏农业科学, 46(18): 86–90.]
- Yushan H, 1989. The functional response of *Harmonia (leis) axyridis* to their prey of *Cinara* sp. *Natural Enemies of Insects*, 11(4): 164–168.
- Yuan SH, Cao BW, Zhou YM, Nong XQ, Wang YY, 2018. Guidelines for the registration of microbial, botanical and semiochemical pest control agents for plant protection and public health uses of FAO/WHO(II)—Botanical. *World Pesticides*, 40(5): 34–41. [袁善奎, 曹兵伟, 周艳明, 农向群, 王以燕, 2018. FAO/WHO 用于保护植物和公共卫生的生物农药登记指南(二)——植物源农药. 世界农药, 40(5): 34–41.]
- Zhu CM, Zhang Y, Qu AJ, 2012. Evaluation of the influence of nicotine pesticides on hunting behavior of *Harmonia axyridis*. *World Pesticides*, 34(6): 33–35. [朱承美, 张悦, 曲爱军, 2012. 烟碱类杀虫剂对异色瓢虫搜寻猎物行为影响的评价. 世界农药, 34(6): 33–35.]
- Zhang XM, Xi YM, Wang S, Luo C, Zhang F, 2015. Evaluation on the prevention and control potential of carrot microtubule aphid by *Harmonia axyridis*. *Chinese Journal of Biological Control*, 31(3): 317–321. [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 WQ, Guo XH, Hou ZR, Wang L, Yin Z, Hao SD, Guo YY, Wang JZ, Zhang ZY, 2014. Predatory function response of *Harmonia axyridis* to soybean aphid. *Journal of Environmental Entomology*, 36(6): 965–970. [张文秋, 郭喜红, 侯峥嵘, 王璐, 尹哲, 郝少东, 郭宇昕, 王进忠, 张志勇, 2014. 异色瓢虫对豆蚜的捕食功能反应. 环境昆虫学报, 36(6): 965–970.]