

亚致死浓度吡蚜酮对黑肩绿盲蝽子代的影响^{*}

张圆圆^{**} 张傲雪 徐 刚 刘 芳^{***} 杨国庆^{***}

(扬州大学, 植物保护学院, 扬州 225009)

摘 要 【目的】吡蚜酮广泛应用于稻田飞虱的防治, 本文旨在研究亚致死浓度吡蚜酮对褐飞虱天敌黑肩绿盲蝽子代的影响, 评价吡蚜酮对黑肩绿盲蝽的安全性。【方法】试验采用滤膜法, 以亚致死剂量 LC_{20} 处理黑肩绿盲蝽若虫, 待其羽化后, 评价 4 组交配组合 ($\text{♀}_{\text{Control}} \times \text{♂}_{\text{Control}}$ 、 $\text{♀}_{\text{Pymetrozine}} \times \text{♂}_{\text{Control}}$ 、 $\text{♀}_{\text{Control}} \times \text{♂}_{\text{Pymetrozine}}$ 、 $\text{♀}_{\text{Pymetrozine}} \times \text{♂}_{\text{Pymetrozine}}$) 产生的子代在对水稻植株选择行为、捕食量、生殖力、成虫寿命等方面的变化。【结果】亚致死浓度吡蚜酮处理对黑肩绿盲蝽子代在褐飞虱危害的水稻植株和健康水稻植株之间的选择性、成虫寿命、生殖力及卵黄原蛋白的相对表达量无明显影响; 褐飞虱密度较高时, $\text{♀}_{\text{Pymetrozine}} \times \text{♂}_{\text{Pymetrozine}}$ 处理组黑肩绿盲蝽子代的捕食量显著增加, 较 $\text{♀}_{\text{Control}} \times \text{♂}_{\text{Pymetrozine}}$ 处理组及 $\text{♀}_{\text{Control}} \times \text{♂}_{\text{Control}}$ 对照组分别高 20.4%、28.9%。【结论】本实验未发现吡蚜酮对黑肩绿盲蝽子代具有生殖和寿命等方面的不利的亚致死效应, 且亚致死浓度吡蚜酮处理在一定程度上会增加黑肩绿盲蝽子代的捕食能力以及对褐飞虱的控害效能, 本研究结果对研发稻田化学防治与生物防治相协调的可持续性综合防控策略具有一定指导的意义。

关键词 黑肩绿盲蝽; 亚致死效应; 吡蚜酮; 捕食功能反应; 生殖

Sublethal effects of pymetrozine on the offspring of *Cyrtorhinus lividipennis* (Hemiptera: Miridae)

ZHANG Yuan-Yuan^{**} ZHANG Ao-Xue XU Gang LIU Fang^{***} YANG Guo-Qing^{***}

(College of Plant Protection, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China)

Abstract [Objectives] To determine the effects of sublethal concentrations of pymetrozine, which is widely used to control planthoppers in rice fields, on the offspring of *Cyrtorhinus lividipennis*, a natural enemy of brown planthopper (*Nilaparvata lugens* Stål, BPH). [Methods] The filter membrane method was used to treat *C. lividipennis* nymphs with a sublethal dose LC_{20} of pymetrozine. The tendency of nymphs to orientate towards rice plants infested with *N. lugens* eggs, their predation rate, fertility, longevity, and the relative expression of V_g (vitellogenin) in offspring treated with sublethal concentrations of pymetrozine, were measured. [Results] The selectivity of *C. lividipennis* for rice plants damaged by *N. lugens* vs healthy rice plants, adult longevity, fecundity and the relative expression of V_g in offspring, were not significantly affected by exposure to sublethal concentrations of pymetrozine. When the density of *N. lugens* was high, the predatory capacity of the offspring of the $\text{♀}_{\text{Pymetrozine}} \times \text{♂}_{\text{Pymetrozine}}$ treatment group significantly increased to 20.4 % and 28.9 % higher than that of the $\text{♀}_{\text{Control}} \times \text{♂}_{\text{Pymetrozine}}$ treatment and control ($\text{♀}_{\text{Control}} \times \text{♂}_{\text{Control}}$) groups, respectively. [Conclusion] Exposure to a sublethal dose of pymetrozine has no adverse effect of on reproduction and longevity of the offspring of *C. lividipennis*. In fact, a sublethal concentration of pymetrozine actually increased the capacity of offspring to prey on *N. lugens*. These results lay benefit the development of sustainable, integrated, control strategies for *N. lugens* incorporating both chemical and biological control in rice fields.

Key words *Cyrtorhinus lividipennis*; sublethal effects; pymetrozine; predatory functional response; reproduction

*资助项目 Supported projects: 科技部“粮食丰产增效科技创新”重点专项(2016YFD0300706)

**第一作者 First author, E-mail: zhangyuanyuan182@126.com

***共同通讯作者 Co-corresponding authors, E-mail: liufang@yzu.edu.cn; gqyang@yzu.edu.cn

收稿日期 Received: 2022-06-06; 接受日期 Accepted: 2022-08-19

农药作为重要的植保生产资料,是用于防治农业害虫的重要手段。然而,杀虫剂的广泛应用导致了害虫抗药性的发展和再猖獗,同时还造成对天敌昆虫的伤害(Preetha *et al.*, 2010; Wu *et al.*, 2021)。杀虫剂应用于田间后,随着时间的推移或个体接触药量的差异,最初用于控制害虫的杀虫剂浓度下降,直至达到亚致死水平,导致对环境中的生物产生亚致死效应,其中包括取食行为的变化、繁殖力的改变和对生长发育的影响等(Wang *et al.*, 2008; Zhang *et al.*, 2021)。这些亚致死效应不仅针对害虫,也作用于害虫的天敌。例如,亚致死浓度的噻虫啉处理后,麦二叉蚜 *Schizaphis graminum* 与其捕食性天敌多异瓢虫 *Hippodamia variegata* 的产卵量均显著降低,若虫的发育历期延长(Aeinehchi *et al.*, 2021)。此外,亚致死浓度杀虫剂处理还可引起天敌昆虫捕食量降低及寿命缩短等不利影响(Natasa *et al.*, 2017; Sheng *et al.*, 2022)。然而,一些亚致死剂量的杀虫剂也可以诱导天敌昆虫产生积极的效应,例如产卵量增加、捕食量增大以及种群增长等(Chen *et al.*, 2012; Xiao *et al.*, 2016; 陆炜炜, 2017)。

水稻是世界上最重要的粮食作物之一,在以亚洲为主的多个国家广泛种植,然而,大面积的种植使水稻不断受到各种生物和非生物胁迫的威胁,尤其是水稻害虫的为害(Chen *et al.*, 2022)。稻飞虱是发生在亚洲水稻上的重要害虫,其中,褐飞虱 *Nilaparvata lugens* 是我国主要稻区为害最为严重的稻飞虱,通过刺吸韧皮部汁液对水稻造成直接伤害,也可通过传播病毒病造成水稻间接伤害,造成巨大的经济损失(Hu *et al.*, 2004; Wu *et al.*, 2021)。黑肩绿盲蝽 *Cyrtorhinus lividipennis* 属于半翅目盲蝽科,是热带和亚热带稻区刺吸式害虫的重要捕食者,主要取食褐飞虱、白背飞虱及叶蝉等水稻害虫的卵及若虫(Lou and Cheng, 2003; Zhu *et al.*, 2020)。因其具有分布广及捕食率高等特点,黑肩绿盲蝽常被用作主要的天敌昆虫来防治褐飞虱,并在水稻害虫综合治理中起到关键作用(Preetha *et al.*, 2010; Zhang *et al.*, 2015)。近年来,杀虫剂对黑肩绿

盲蝽的亚致死效应成为研究热点。研究表明,一些亚致死浓度的杀虫剂可导致黑肩绿盲蝽捕食量降低等不利影响(王召等, 2012; Zhang *et al.*, 2015)。然而,不少杀虫剂施用后对黑肩绿盲蝽产生例如刺激生殖等有利的亚致死效应,包括吡蚜酮、吡虫啉、溴氰菊酯、氯虫苯甲酰胺、三唑磷、阿维菌素和印楝素等(陆炜炜, 2017; Lu *et al.*, 2017; Dai *et al.*, 2019)。不过,目前大多数的研究都忽略了杀虫剂对黑肩绿盲蝽子代的亚致死效应。

吡蚜酮(Pymetrozine)作为一种吡啶甲亚胺类杀虫剂,被广泛用于防治褐飞虱等半翅目害虫(Harrewijn and Kayser, 1997; Joseph *et al.*, 2010)。有大量研究表明,吡蚜酮对多种天敌昆虫相对安全,包括阿尔蚜茧蜂 *Aphidius ervi*、草蛉 *Chrysoperla externa*、黑刺益蝽 *Podisus nigrispinus* 及瓢虫 *Tenuisvalvae notata* 等(Jansen *et al.*, 2011; Barbosa *et al.*, 2018; Barros *et al.*, 2018; Machado *et al.*, 2019)。之前的研究发现,亚致死浓度吡蚜酮处理能够刺激褐飞虱重要捕食者黑肩绿盲蝽母代的生殖,并且未对其母代捕食量产生不利影响(Zhang *et al.*, 2015; 陆炜炜, 2017),这表明亚致死浓度吡蚜酮不仅没有对黑肩绿盲蝽产生明显的副作用,反而有利于子代种群数量的增加,但是否对子代也有类似影响,有待探究。因此,本研究拟通过测定亚致死浓度吡蚜酮处理黑肩绿盲蝽后其子代对水稻植株选择行为、捕食量和成虫生殖等指标的变化,评价吡蚜酮对黑肩绿盲蝽子代的亚致死效应,为稻田化学防治与生物防控的协同使用提供理论依据,对水稻害虫绿色防控具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 供试昆虫与农药

供试昆虫:褐飞虱初始虫源采自扬州市郊区(东经 119°, 北纬 32°),后由本实验室连续多代饲养于水稻品种 II 优 118 上。饲养温度为(27±1)℃,相对湿度为 70%±5%,光周期 L:D=16:8。黑肩绿盲蝽初始虫源采自中国水稻研

究所, 并维持在饲养着褐飞虱的水稻品种 II 优 118 上 (Zhang *et al.*, 2015)。

供试农药: 吡蚜酮 (98%) 原药购于江苏克胜集团股份有限公司, 实验时以 N,N-二甲基甲酰胺作为助剂溶解。依据预试验结果, 采用浸苗法测定吡蚜酮杀虫剂对黑肩绿盲蝽 3 龄若虫的毒力, 选用吡蚜酮 $LC_{20}=179.45 \text{ mg a.i./L}$ (陆炜炜, 2017) 作为本试验处理剂量。

1.2 亚致死浓度吡蚜酮对黑肩绿盲蝽的处理

试验采用药膜法 (Wang *et al.*, 2008), 使用亚致死浓度吡蚜酮处理黑肩绿盲蝽 3 龄若虫, 以助剂 N,N-二甲基甲酰胺作为对照。取 1 mL 亚致死浓度吡蚜酮添加至指形管内 (20 mm×95 mm), 待其自然晾干形成药膜后, 移入黑肩绿盲蝽 3 龄若虫。处理 3 h 后, 挑选存活状况良好的黑肩绿盲蝽个体饲养至 5 龄, 待其羽化后设计 4 组交配组合: (1) 未处理雌虫与未处理雄虫 ($\text{♀}_{\text{Control}} \times \text{♂}_{\text{Control}}$); (2) 药剂处理雌虫和未处理雄虫 ($\text{♀}_{\text{Pymetrozine}} \times \text{♂}_{\text{Control}}$); (3) 未处理雌虫与药剂处理雄虫 ($\text{♀}_{\text{Control}} \times \text{♂}_{\text{Pymetrozine}}$); (4) 药剂处理雌虫和药剂处理雄虫 ($\text{♀}_{\text{Pymetrozine}} \times \text{♂}_{\text{Pymetrozine}}$); 对照组为未处理雌虫与未处理雄虫 ($\text{♀}_{\text{Control}} \times \text{♂}_{\text{Control}}$), 并将 4 种交配组合产生的 F_1 代饲养至羽化。

1.3 亚致死浓度吡蚜酮对黑肩绿盲蝽子代对水稻植株选择行为的影响

将 100 头褐飞虱雌成虫接入装有健康生长的 II 优 118 水稻苗的塑料杯中, 置于饲养温度为 $(27 \pm 1)^\circ\text{C}$, 相对湿度 RH 为 $70\% \pm 5\%$, 光周期 L:D=16:8 的人工气候箱室中饲养, 48 h 后移除褐飞虱, 得到带褐飞虱卵的稻苗。对照组为不接入褐飞虱的健康水稻苗。使用“Y”型嗅觉仪测定黑肩绿盲蝽对 2 种稻苗的选择性。将供试的两对气味源分别置于气味瓶内, 并与“Y”型嗅觉仪相连, 从上述交配组合产生的 F_1 代黑肩绿盲蝽 5 龄若虫中各取 20 头置于横臂中间的正方形接虫口 (1 cm×1 cm) 中供试, 每组合重复 5 次。接虫后 3 h 观察嗅觉仪不同区域试虫数量, 靠近气泵处横臂管接虫口两侧 1 cm 范围内的试虫记为无反应试虫, 而靠近气味瓶两处玻璃管

(超过接虫口 1 cm 范围) 的试虫分别记为对某一稻苗反应的试虫。

1.4 亚致死浓度吡蚜酮对黑肩绿盲蝽子代捕食量的影响

在装有水稻苗的塑料杯 (直径 7.6 cm, 高 7.6 cm) 中进行上述交配组合产生的 F_1 代黑肩绿盲蝽捕食量测定, 以 1-2 龄低龄褐飞虱若虫为猎物, 密度设置为每杯 5、10、20、30、40 和 50 头。每杯移入 1 头经 24 h 饥饿处理的初羽化黑肩绿盲蝽雌成虫, 处理后置于 1.3 所述条件的人工气候箱内饲养。24 h 后移除黑肩绿盲蝽, 并检查褐飞虱被捕食数量 (被捕食的褐飞虱若虫呈现虫体萎缩现象)。每杯为一个重复, 每个处理重复 10 次。

为确定亚致死浓度吡蚜酮处理后, 不同交配组合产生的 F_1 代黑肩绿盲蝽对褐飞虱若虫的捕食功能反应, 利用功能反应模型方程与上述统计的捕食量进行拟合。Holling II 型功能反应模型为 $N_a = aNT_r / (1 + aT_hN)$ (Holling, 1959), 式中 N_a 为捕食数量 (头), a 为瞬时攻击率, N 为猎物密度 (头), T_r 为试验观察时间 (本实验为 1 d), T_h 为处置猎物时间 (d)。

1.5 亚致死浓度吡蚜酮对黑肩绿盲蝽子代生殖力和成虫寿命的影响

将上述交配组合产生的 F_1 代初羽化的黑肩绿盲蝽的成虫进行配对 (雌雄比为 1:1), 分别饲养于玻璃杯中, 每杯内放置含褐飞虱产卵 2 d 的水稻苗。为测定产卵前期, 在接虫后 3 d 内, 每天更换水稻苗。其后每 3 d 更换一次水稻苗, 将已经产卵的稻苗继续保留 10 d 后统计孵化数, 并在显微镜下解剖水稻苗统计未孵化的卵粒数, 计算总产卵量。同时, 每日记录黑肩绿盲蝽的存活情况, 直至成虫自然死亡。4 种交配组合 F_1 代成虫独立配对, 每个组合重复 20 次。

1.6 亚致死浓度吡蚜酮对黑肩绿盲蝽子代 V_g 相对表达量的影响

1.6.1 总 RNA 的提取和 cDNA 的合成

利用 TRIzol 试剂 (Invitrogen, USA) 提取上述交配组

合产生的 F₁ 代初羽化 1 d 的雌成虫的总 RNA，具体提取方法参照 Zhu 等（2020）的试验方法。使用 NanoDrop 2000（Thermo Fisher, USA）测定 RNA 的浓度和纯度后，置于 -70℃ 保存。按照 TaKaRa PrimeScript™ RT reagent Kit with gDNA Eraser（Perfect Real Time）说明书进行反转录，合成 cDNA，并置于 -20℃ 保存，用于后续的 qRT-PCR 检测。

1.6.2 qRT-PCR 使用 SYBR® Premix Ex Taq™II 试剂说明书进行 qRT-PCR 检测，荧光定量的引物序列见表 1。反应采用 CFX-96 实时荧光定量 PCR 系统，具体的反应体系及程序参照 Zhu 等（2020）的试验方法。每个处理重复 3 次，使用 2^{-ΔΔC_t} 方法（Livak and Schmittgen, 2001）分析实验结果，以 *β-actin* 为内参基因（Zhu *et al.*, 2020）。

表 1 本研究所用引物
Table 1 Primers used in this study

引物 Primers	引物序列 (5'-3') Primer sequence (5'-3')
<i>V_g</i> -F	TCAAGAGGAACGAAACCACCG
<i>V_g</i> -R	GGCGTAGCCCAATCAAGAGC
<i>β-actin</i> -F	CCGTCCCCATCTATGAAGGTT
<i>β-actin</i> -R	GCGGTCGTCGAAGGAGTAAC

1.7 数据分析

试验数据使用 DPS 软件进行方差分析。捕食功能反应方程参数参考吴坤君等（2004）进行估算，利用非线性回归进行拟合（陈苏怡等，2022）。水稻植株选择行为的数据用 Student's *t*-检验进行比较，黑肩绿盲蝽捕食量、成虫寿命、产卵前期、单雌产卵量、孵化率、成虫寿命和 *V_g* 相对表达量均采用单因素数据方差分析（ANOVA），Duncan's 进行多重比较。并用 GraphPad Prism 7.0 软件制图。

2 结果与分析

2.1 亚致死浓度吡蚜酮对黑肩绿盲蝽子代水稻植株选择行为的影响

选择行为测定结果表明，亚致死浓度吡蚜酮处理后 3 种不同交配组合及对照组的黑肩绿盲蝽的子代均明显趋于选择具褐飞虱卵的稻株（表 2）。

2.2 亚致死浓度吡蚜酮对黑肩绿盲蝽子代捕食量的影响

不同猎物密度下的各交配组合黑肩绿盲蝽子代的捕食量测定结果如图 1 所示，各组黑肩绿盲蝽子代的捕食量随猎物密度的增大呈升高的

表 2 亚致死浓度吡蚜酮对黑肩绿盲蝽子代选择行为的影响
Table 2 Effects of sublethal concentration of pymetrozine on the orientation behavior of the offspring of *Cyrtorhinus lividipennis*

处理 Treatments	趋向不同气味源的黑肩绿盲蝽比例（%） Proportion of <i>C. lividipennis</i> preferring to different odors (%)		无反应黑肩绿盲蝽比例（%） Proportion of no-response <i>C. lividipennis</i> (%)	<i>t</i> -值及其显著性 <i>t</i> -value and significance
	具褐飞虱卵的稻株 Rice plants with brown planthopper eggs	健康无卵稻株 Healthy rice plants without eggs		
♀ 对照 × ♂ 对照 ♀ Control × ♂ Control	69.0±4.2	22.0±2.7	9.0±4.2	21.0***
♀ 对照 × ♂ 吡蚜酮 ♀ Control × ♂ Pymetrozine	68.0±5.7	23.0±4.5	9.0±4.2	13.9***
♀ 吡蚜酮 × ♂ 对照 ♀ Pymetrozine × ♂ Control	74.0±6.5	17.0±6.7	9.0±2.2	13.6***
♀ 吡蚜酮 × ♂ 吡蚜酮 ♀ Pymetrozine × ♂ Pymetrozine	69.0±4.2	20.0±5.0	11.0±2.2	16.8***

表中数据为平均值±标准差，***表示经 *t*-测验法检验在 *P*<0.001 水平差异显著。
The data in the table are mean ± SD. *** indicates significant differences at 0.001 level by *t*-test.

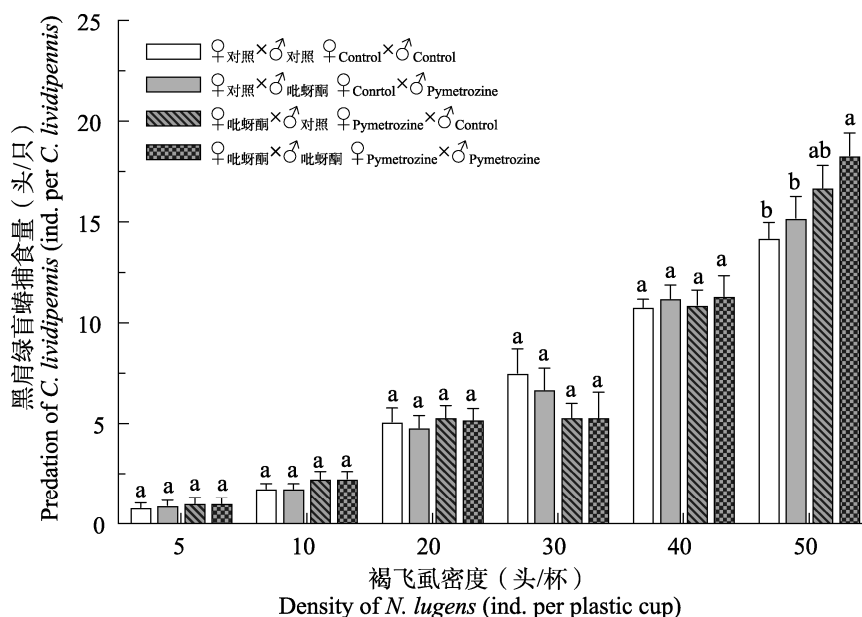


图 1 亚致死浓度吡蚜酮对子代黑肩绿盲蝽捕食量的影响

Fig. 1 Effects of sublethal concentration of pymetrozine on preying number of the offspring of *Cyrtorhinus lividipennis*

数据为平均数±标准差, 柱上标有不同小写字母表示经 LSD 法多重比较后不同处理间在 0.05 水平上差异显著。下图同。

Data are mean±SD. Histograms with different letters indicate significant differences at 0.05 level between different treatments after multiple comparisons by LSD. The same below.

趋势。与对照组相比, 亚致死浓度吡蚜酮处理后 3 种交配组合产生的黑肩绿盲蝽子代的捕食量在褐飞虱密度 5-40 头/杯范围内均无显著差异 (分别为 $F=0.11$, $P=0.95$; $F=0.85$, $P=0.48$; $F=0.12$, $P=0.95$; $F=0.12$, $P=0.40$), 而在在褐飞虱密度 50 头/杯时, $\text{♀Pymetrozine} \times \text{♂Pymetrozine}$ 处理组黑肩绿盲蝽子代的捕食量与 $\text{♀Control} \times \text{♂Pymetrozine}$ 处理组和对照相比存在显著差异 ($F=0.13$, $P<0.05$), 分别显著提高了 20.4% 和 28.9%。

根据 Holling II 方程拟合得到的亚致死浓度吡蚜酮处理黑肩绿盲蝽后其子代对褐飞虱的捕食功能反应方程及相关参数如表 2 所示, 处理后各交配组合黑肩绿盲蝽子代的捕食基本符合 Holling II 型方程, 对照组拟合度最高, 为 0.890, 处理组 $\text{♀Pymetrozine} \times \text{♂Pymetrozine}$ 拟合度最低, 为 0.720。如表 3 所示, 3 个处理组的处置猎物时间 T_h 均短于对照组, 日均最大捕食量 ($1/T_h$) 和控害效能 (α/T_h) 均大于对照组, 其中 $\text{♀Pymetrozine} \times \text{♂Pymetrozine}$ 处理组处置猎物时间最短, 日均最大捕食量和控害效能值最大。

2.3 亚致死浓度吡蚜酮对黑肩绿盲蝽子代生殖力和成虫寿命的影响

从图 2 数据可以看出, 各交配组合 F_1 代的产卵前期 (图 2: A)、单雌产卵量 (图 2: B) 和卵孵化率 (图 2: C) 均无显著差异 (分别为 $F=0.30$, $P=0.82$; $F=1.14$, $P=0.34$; $F=0.46$, $P=0.71$)。各交配组合 F_1 代成虫寿命 (图 2: D) 之间差异也不显著 ($F=0.76$, $P=0.52$)。

2.4 吡蚜酮亚致死浓度对子代黑肩绿盲蝽 V_g 相对表达量的影响

qRT-PCR 检测结果显示, 各交配组合黑肩绿盲蝽 F_1 代雌成虫体内 V_g 基因的相对表达量无显著差异 ($F=0.03$, $P=0.99$) (图 3)。

3 讨论与结论

植物被植食者取食后, 可能释放出虫害诱导的植物挥发物, 某些挥发性化合物则是捕食性和寄生性天敌用来定位猎物或寄主的重要线索

表 3 亚致死浓度吡蚜酮处理黑肩绿盲蝽后其子代对褐飞虱的捕食功能反应模型方程 (Holling II)

Table 3 Predatory functional response model equations of *Cyrtorhinus lividipennis* offspring to *Nilaparvata lugens* after sublethal concentration of pymetrozine treatment (Holling II)

处理 Treatments	功能反应方程 Functional response equation	瞬时攻击率 (α) Instantaneous attacking rate	处理时间 (T _h)/d Handling time	日均最大捕食量 (1/ T _h) (头) Daily maximum consumption (ind.)	控害效能(α/T _h) Predation capacity	拟合度 (R ²) Fitting degree
♀对照×♂对照 ♀Control×♂Control	$N_a=0.341N/(1+0.008N)$	0.341	0.023	43.799	14.945	0.890
♀对照×♂吡蚜酮 ♀Control×♂Pymetrozine	$N_a=0.321N/(1+0.005N)$	0.321	0.016	64.227	20.627	0.836
♀吡蚜酮×♂对照 ♀Pymetrozine×♂Control	$N_a=0.339N/(1+0.005N)$	0.339	0.016	63.716	21.576	0.751
♀吡蚜酮×♂吡蚜酮 ♀Pymetrozine×♂Pymetrozine	$N_a=0.314N/(1+0.001N)$	0.314	0.004	224.946	70.706	0.720

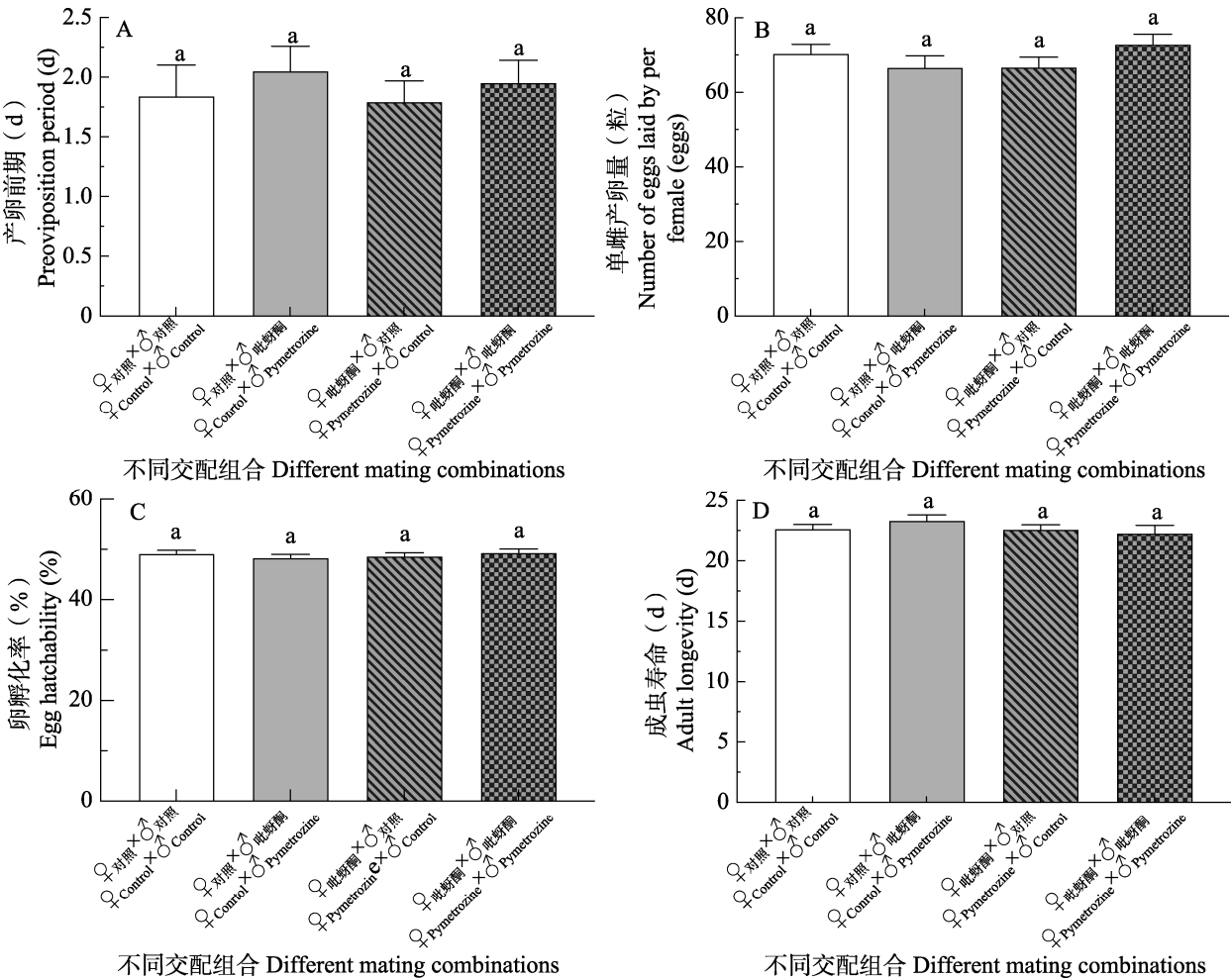


图 2 亚致死浓度吡蚜酮对子代黑肩绿盲蝽生殖力和成虫寿命的影响

Fig. 2 Effects of sublethal concentration of pymetrozine on the fecundity and longevity of the offspring of *Cyrtorhinus lividipennis*

A. 产卵前期; B. 单雌产卵量; C. 卵孵化率; D. 成虫寿命。
A. Pre-oviposition period; B. Total oviposition; C. Egg hatchability; D. Adult longevity.

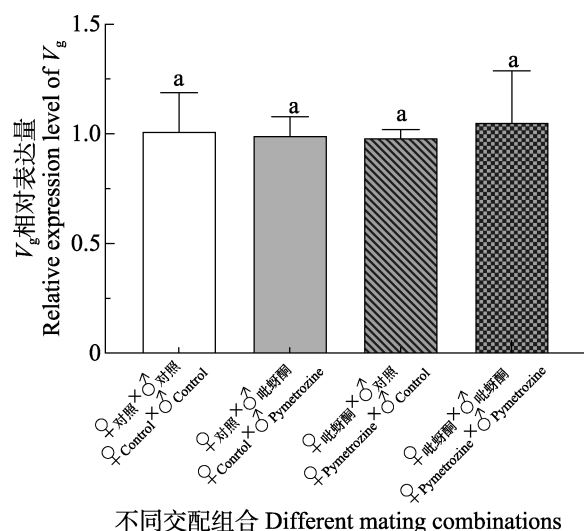


图 3 亚致死浓度吡蚜酮对子代黑肩绿盲蝽 V_g 相对表达量的影响

Fig. 3 Effects of sublethal concentration of pymetrozine on the relative expression of V_g in the offspring of *Cyrtorhinus lividipennis*

(Chen *et al.*, 2021)。大量研究表明, 天敌可以识别健康植株和受植食性昆虫危害后植株的挥发性气味, 例如, 与健康植株相比, 褐飞虱为害的水稻植株释放的挥发物对黑肩绿盲蝽有显著的引诱作用 (Rapusas *et al.*, 1996; de Rijk *et al.*, 2013)。然而, 亚致死浓度的杀虫剂可能对天敌的寄主选择产生不利影响 (Liu *et al.*, 2012)。Liu 等 (2012) 研究表明与对照组相比, 亚致死浓度的吡虫啉处理后, 干扰了稻虱缨小蜂 *Anagrus nilaparvatae* 对稻飞虱为害过的稻株所释放的挥发物的识别能力, 大多数稻虱缨小蜂更偏向健康植株。Zhang 等 (2015) 发现亚致死剂量的溴氰菊酯干扰了黑肩绿盲蝽的选择行为。而 Dai 等 (2019) 研究的 3 种生物杀虫剂 (苦参碱、阿维菌素及印楝素) 均不影响黑肩绿盲蝽的选择行为。这些研究表明, 农药对天敌昆虫选择性行为的影响可能因药剂种类和天敌种类而异。此外, 这些研究大多针对暴露于化学农药的天敌当代, 甚少涉及是否对天敌下一代选择行为产生影响。本研究发现, 吡蚜酮亚致死浓度对黑肩绿盲蝽子代的选择行为无明显影响, 处理组和对照组的黑肩绿盲蝽子代均趋向于被褐飞虱为害过的的水稻植株, 与亚致死浓度吡蚜酮处理对黑肩绿盲蝽

亲本的影响一致 (Zhang *et al.*, 2015), 这表明亚致死浓度吡蚜酮对黑肩绿盲蝽母代和子代的选择性均无明显影响。

本文测定了吡蚜酮亚致死浓度处理黑肩绿盲蝽母代后, 其不同交配组合子代的捕食量, 结果表明对照组和处理组黑肩绿盲蝽子代的捕食量都随褐飞虱密度的增多呈上升趋势。本文还根据 Holling II 方程拟合得到亚致死浓度吡蚜酮处理黑肩绿盲蝽后其子代对褐飞虱的捕食功能反应方程及相关参数, 结果与黄林茂和黄寿山 (2010) 研究的捕食功能反应一致, 即捕食者黑肩绿盲蝽对被捕食者褐飞虱的捕食符合 Holling II 型方程, 捕食量在一定范围内随猎物密度的增加而增加。此外, 我们发现吡蚜酮亚致死浓度处理黑肩绿盲蝽母代后, 3 个处理组的捕食功能参数处置猎物时间 T_h 均短于对照组, 日均最大捕食量 ($1/T_h$) 和控害效能 (α/T_h) 均大于对照组, 表明亚致死浓度吡蚜酮能够增强黑肩绿盲蝽子代对褐飞虱的控制效能, 这与王智等 (2002, 2006) 研究发现低剂量杀虫双、甲胺磷和烯丙菊酯增强了拟环纹豹蛛对褐飞虱的控制效能的结果一致。杀虫剂对捕食者捕食能力的影响因捕食者和杀虫剂种类的不同而异。张誉心等 (2021) 研究表明, 加州新小绥螨 *Neoseiulus californicus* 经亚致死浓度的哒螨灵处理, 其对朱砂叶螨 *Tetranychus cinnabarinus* 的捕食能力显著降低。亚致死浓度吡蚜酮处理, 烟粉虱天敌斯氏钝绥螨 *Amblyseius swirskii* 和烟盲蝽 *Nesidiocoris tenuis* 的捕食效率显著下调, 而蚜虫天敌十一星瓢虫 *Coccinella undecimpunctata* 的捕食能力不受影响 (Susana *et al.*, 2011; Natasa *et al.*, 2017)。亚致死浓度的三唑啉和溴氰菊酯降低了黑肩绿盲蝽的捕食量, 但亚致死浓度的氯虫苯甲酰胺和吡蚜酮对其捕食能力没有影响 (Zhang *et al.*, 2015)。与黑肩绿盲蝽当代不同 (Zhang *et al.*, 2015), 本实验结果表明, 当褐飞虱密度为 50 头/杯时, ♀Pymetrozine × ♂Pymetrozine 处理组黑肩绿盲蝽子代的捕食量显著高于 ♀Control × ♂Pymetrozine 处理组及对照组。在对拟环纹豹蛛 *Pardosa Pseudoannulata* 子代的研究中也有类似结果, 即亚致死浓度吡虫

增加了拟环纹豹蛛子代的捕食量 (Chen *et al.*, 2012), 表明有些亚致死浓度杀虫剂在一定条件下能够刺激捕食者的捕食行为。然而, 我们的实验结果发现只有在猎物密度高时, 才会出现这种刺激捕食者捕食能力的现象, 其机理有待进一步的研究。

繁殖性状是种群发育的重要参数, 因此我们研究了亚致死浓度吡蚜酮对黑肩绿盲蝽子代繁殖指标的影响, 包括产卵前期、产卵量、孵化率及雌虫 V_g 表达量。本实验发现, 亚致死浓度吡蚜酮处理后, 黑肩绿盲蝽子代的产卵前期、产卵量、孵化率及雌虫 V_g 表达量与对照相比均无显著变化, 这与吡蚜酮处理后斯氏钝绥螨及十一星瓢虫的生殖力变化一致 (Susana *et al.*, 2008; Natasa *et al.*, 2017)。而陆炜炜 (2017) 报道亚致死浓度吡蚜酮处理后, 黑肩绿盲蝽当代的产卵量显著上调, 这表明亚致死浓度吡蚜酮对黑肩绿盲蝽当代生殖的影响没有传递到下一代。另外, 不同类型的杀虫剂对捕食者及其子代的繁殖能力的影响也不同。大多数亚致死浓度杀虫剂处理对捕食者子代的繁殖产生不利影响, 例如, 甲氰菊酯处理后的长角六点蓟马 *Scolothrips longicornis*、啮螨酯处理后一种捕食性螨 *Phytoseius plumifer* 和啮虫酰胺处理后的七星瓢虫 *Coccinella septempunctata*, 其子代的繁殖力都不同程度地受到农药处理的抑制 (Hamedi *et al.*, 2010; Pakyari and Enkegaard, 2013; Wu *et al.*, 2021)。然而, Xiao 等 (2016) 发现亚致死浓度的 β -氯氰菊酯处理异色瓢虫 *Harmonia axyridis* 后, 其子代产卵期和产卵量显著增加。

亚致死浓度吡蚜酮处理后, 不同交配组合黑肩绿盲蝽子代的成虫寿命与对照组相比没有显著差异, 类似的结果见于对玉米螟赤眼蜂 *Trichogramma ostrinae* 的研究中, 其寿命不受亚致死浓度吡蚜酮的影响 (Li *et al.*, 2015)。不同的是, Sheng 等 (2022) 研究发现, 亚致死浓度辛硫磷处理斑痣悬茧蜂 *Meteorus pulchricornis* 后, 显著缩短了寿命; Wu 等 (2021) 发现亚致死剂量的啮虫酰胺可引起七星瓢虫子代寿命显著缩短。对比发现, 吡蚜酮对害虫天敌的安全性

较高, 与害虫天敌防治策略具有较好的兼容性。

综上所述, 亚致死浓度吡蚜酮对黑肩绿盲蝽子代的各项生物学指标均未产生不利影响, 并且在一定程度上增加其子代的捕食能力及控害效能, 表明作为水稻上常用的选择性杀虫剂, 吡蚜酮对黑肩绿盲蝽的安全性较好, 与该天敌的利用有较好的兼容性, 可以与有效的生物防治因子黑肩绿盲蝽联合使用, 在稻田的绿色防控中发挥作用。

参考文献 (References)

- Aeinehchi P, Naseri B, Rafiee Dastjerdi H, Nouri-Ganbalani G, Golizadeh A, 2021 Lethal and sublethal effects of thiacloprid on *Schizaphis graminum* (Rondani) (Hemiptera: Aphididae) and its predator *Hippodamia variegata* (Goeze) (Coleoptera: Coccinellidae). *Toxin Reviews*, 40(4): 1261–1271.
- Barbosa PRR, Oliveira MD, Barros EM, Michaud JP, Torres JB, 2018. Differential impacts of six insecticides on a mealybug and its coccinellid predator. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 147: 963–971.
- Barros EM, da Silva-Torres CSA, Torres JB, Rolim GG, 2018. Short-term toxicity of insecticides residues to key predators and parasitoids for pest management in cotton. *Phytoparasitica*, 46(3): 391–404.
- Chen H, Su HH, Zhang S, Jing TX, Liu Z, Yang YZ, 2021. The effect of mirid density on volatile-mediated foraging behaviour of *Apolygus lucorum* and *Peristenus spretus*. *Insects*, 12(10): 870.
- Chen S, Sun B, Shi ZY, Miao XX, Li HC, 2022. Identification of the rice genes and metabolites involved in dual resistance against brown planthopper and rice blast fungus. *Plant, Cell & Environment*, 45(6): 1914–1929.
- Chen SY, Zhao P, Shi AM, Shi PL, Cai WZ, Shi AX, Li H, 2022. The predatory functional responses of *Sycanus croceovittatus* preying on *Spodoptera frugiperda* larvae. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 59(3): 532–541. [陈苏怡, 赵萍, 史爱明, 石萍丽, 彩万志, 石安宪, 李虎, 2022. 黄带犀猎蝽对草地贪夜蛾幼虫的捕食功能反应研究. 应用昆虫学报, 59(3): 532–541.]
- Chen XQ, Xiao Y, Wu LB, Chen YF, Peng Y, 2012. Imidacloprid affects *Pardosa pseudoannulata* adults and their unexposed offspring. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 88(5): 654–658.
- Dai W, Li Y, Zhu J, Ge LQ, Yang GQ, Liu F, 2019. Selectivity and

- sublethal effects of some frequently-used biopesticides on the predator *Cyrtorhinus lividipennis* Reuter (Hemiptera: Miridae). *Journal of Integrative Agriculture*, 18(1): 124–133.
- de Rijk M, Dicke M, Poelman EH, 2013. Foraging behaviour by parasitoids in multiherbivore communities. *Animal Behaviour*, 85: 1517–1528.
- Hamed N, Fathipour Y, Saber M, 2010. Sublethal effects of fenpyroximate on life table parameters of the predatory mite *Phytoseius plumifer*. *BioControl*, 55(2): 271–278.
- Harrewijn P, Kayser H, 1997. Pymetrozine, a fast-acting and selective inhibitor of aphid feeding. *In-situ* studies with electronic monitoring of feeding behaviour. *Pesticides Science*, 49(2): 130–140.
- Holling CS, 1959. Some characteristics of simple types of predation and parasitism. *The Canadian Entomologist*, 91(7): 385–398.
- Hu G, Lu F, Zhai BP, Lu MH, Liu WC, Zhu F, Wu XW, Chen GH, Zhang XX, 2014. Outbreaks of the brown planthopper *Nilaparvata lugens* (Stål) in the Yangtze River Delta: Immigration or local reproduction? *PLoS ONE*, 9(2): e88973.
- Huang LM, Huang SS, 2010. Functional and numerical responses of the predacious plant bug on the rice brown planthopper egg. *Acta Ecologica Sinica*, 30(15): 4187–4195. [黄林茂, 黄寿山, 2010. 黑肩绿盲蝽捕食褐飞虱卵的功能与数值反应. 生态学报, 30(15): 4187–4195.]
- Jansen JP, Defrance T, Warnier AM, 2011. Side effects of flonicamide and pymetrozine on five aphid natural enemy species. *BioControl*, 56(5): 759–770.
- Joseph JR, Ameline A, Couty A, 2011. Effects on the aphid parasitoid *Aphidius ervi* of an insecticide (Plenum®, pymetrozine) specific to plant-sucking insects. *Phytoparasitica*, 39(1): 35–41.
- Li WD, Zhang PJ, Zhang JM, Lin WC, Lu YB, Gao YL, 2015. Acute and sublethal effects of neonicotinoids and pymetrozine on an important egg parasitoid, *Trichogramma ostrinae* (Hymenoptera: Trichogrammatidae). *Biocontrol Science and Technology*, 25(2): 121–131.
- Liu F, Zhang X, Gui QQ, Xu QJ, 2012. Sublethal effects of four insecticides on *Anagrus nilaparvatae* (Hymenoptera: Mymaridae), an important egg parasitoid of the rice planthopper *Nilaparvata lugens* (Homoptera: Delphacidae). *Crop Protection*, 37(1): 13–19.
- Livak KJ, Schmittgen TD, 2001. Analysis of relative gene expression data using real-time quantitative PCR and the $2^{-\Delta\Delta CT}$ method. *Methods*, 25(4): 402–408.
- Lou YG, Cheng JA, 2003. Role of rice volatiles in the foraging behaviour of the predator *Cyrtorhinus lividipennis* for the rice brown planthopper *Nilaparvata lugens*. *Biocontrol*, 48(1): 73–86.
- Lu WW, 2017. The effects of sublethal concentrations of insecticides on the reproduction of *Cyrtorhinus lividipennis*. Master dissertation. Yangzhou: Yangzhou University. [陆炜炜, 2017. 亚致死浓度杀虫剂对黑肩绿盲蝽生殖的影响. 硕士学位论文. 扬州: 扬州大学.]
- Lu WW, Xu QJ, Zhu J, Liu C, Ge LQ, Yang GQ, Liu F, 2017. Inductions of reproduction and population growth in the generalist predator *Cyrtorhinus lividipennis* (Hemiptera: Miridae) exposed to sub-lethal concentrations of insecticides. *Pest Management Science*, 73(8): 1709–1718.
- Machado AVA, Potin DM, Torres JB, Silva-Torres CSA, 2019. Selective insecticides secure natural enemies action in cotton pest management. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 184: 109669.
- Natasa F, Aris I, John S, Anastasia T, 2017. Lethal and sublethal effects of selected insecticides on commercially available natural enemies of whiteflies. *Pesticides and Beneficial Organisms*, 125: 19–27.
- Pakyari H, Enkegaard A, 2013. Lethal and sublethal effects of fenpropathrin on the biological performance of *Scolothrips longicornis* (Thysanoptera: Thripidae). *Journal of Economic Entomology*, 106(6): 2371–2377.
- Preetha G, Stanley J, Suresh S, Samiyappan R, 2010. Risk assessment of insecticides used in rice on miridbug, *Cyrtorhinus lividipennis* Reuter, the important predator of brown planthopper, *Nilaparvata lugens* (Stål). *Chemosphere*, 80(5): 498–503.
- Rapusas HR, Bottrell DG, Coll M, 1996. Intraspecific variation in chemical attraction of rice to insect predators. *Biological Control*, 6(3): 394–400.
- Sheng S, Song Y, Ahmad S, Wang J, Shao Y, Liu ZX, Wu FA, 2022. Sublethal effects of organophosphorus insecticide phoxim on patch time allocation and oviposition behavior in a parasitoid wasp *Meteorus pulchricornis*. *Bulletin of Entomological Research*, 112(1): 91–100.
- Susana C, Patricia G, Antonio OS, 2008. Effects of pirimicarb, buprofezin and pymetrozine on survival, development and reproduction of *Coccinella undecimpunctata* (Coleoptera: Coccinellidae). *Biocontrol Science and Technology*, 18(3): 307–318.
- Susana C, Antonio OS, Patricia G, 2011. Voracity of *Coccinella undecimpunctata*: Effects of insecticides when foraging in a prey/plant system. *Journal of Pest Science*, 84(3): 373–379.
- Wang XY, Yang ZQ, Shen ZR, Lu J, Xu WB, 2008. Sublethal effects of selected insecticides on fecundity and wing dimorphism of green peach aphid (Homoptera: Aphididae). *Journal of Applied Entomology*, 132(2): 135–142.

- Wang Z, Song DX, Zhu MS, 2006. Functional response and searching behavior to the brown planthopper, *Nilaparvata lugens* by the wolf spider, *Pardosa pseudoannulata* under low-dose chemical pesticides. *Acta Entomologica Sinica*, 49(2): 295–301. [王智, 宋大祥, 朱明生, 2006. 低剂量农药作用下拟环纹豹蛛对褐飞虱的功能反应及搜寻行为. 昆虫学报, 49(2): 295–301.]
- Wang Z, Yan HM, Wang HQ, 2002. The influence of low-dose pesticides on the insect-control power of paddyfield spiders. *Acta Ecologica Sinica*, 22(3): 346–351. [王智, 颜亨梅, 王洪全, 2002. 低剂量农药对稻田蜘蛛控虫力的影响. 生态学报, 22(3): 346–351.]
- Wang Z, Yang H, Jin DC, 2012. Effects of chlorantraniliprole on predatory capacity of *Cyrtorhinus lividipennis* (Hemiptera: Miridae). *Acta Entomologica Sinica*, 55(5): 618–624. [王召, 杨洪, 金道超, 2012. 氯虫苯甲酰胺对黑肩绿盲蝽捕食功能的影响. 昆虫学报, 55(5): 618–624.]
- Wu C, He MY, Dong FS, Xu J, Wu XH, Cai BB, Wang CB, Sun T, Zheng YQ, Liu XG, 2021. The influence of tolfenpyrad on fitness, development, and reproduction in parents and offspring of *Coccinella septempunctata*. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 210: 111875.
- Wu KJ, Sheng CF, Gong PY, 2004. Equation of predator functional response and estimation of the parameters in it. *Chinese Bulletin of Entomology*, 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 Q, Zhang G, Chen Y, Yu JL, Zhou YK, Shu ZL, Ge LQ, 2021. Seed dressing with triflumezopyrim controls brown planthopper populations by inhibiting feeding behavior, fecundity and enhancing rice plant resistance. *Pest Management Science*, 77(6): 2870–2886.
- 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.
- Zhang X, Xu QJ, Lu WW, Liu F, 2015. Sublethal effects of four synthetic insecticides on the generalist predator *Cyrtorhinus lividipennis*. *Journal of Pest Science*, 88(2): 383–392.
- Zhang YX, Jiang CX, Li Q, 2021. Effects of pyridaben on safety and predation ability of *Neoseiulus californicus* (McGregor) (Acari: Phytoseiidae). *Chinese Journal of Biological Control*, 37(4): 725–731. [张誉心, 蒋春先, 李庆, 2021. 哒螨灵对加州新小绥螨的安全性和捕食能力的影响. 中国生物防治学报, 37(4): 725–731.]
- Zhang YY, Xu G, Jiang Y, Ma C, Yang GQ, 2021. Sublethal effects of imidacloprid on fecundity, apoptosis and virus transmission in the small brown planthopper *Laodelphax striatellus*. *Insects*, 12(12): 1131.
- Zhu HW, Zheng S, Xu JM, Wu Q, Song QS, Ge LQ, 2020. The amino acid-mediated TOR pathway regulates reproductive potential and population growth in *Cyrtorhinus lividipennis* Reuter (Hemiptera: Miridae). *Frontiers in Physiology*, 11: 617237.
- Zhu J, Li Y, Tang YY, Liu JQ, Chen YY, Lv ZX, Liu F, 2020. Juvenile hormone-mediated reproduction induced by a sublethal concentration of imidacloprid in *Cyrtorhinus lividipennis* (Hemiptera: Miridae). *Journal of Asia-Pacific Entomology*, 23(1): 98–106.