

四氯虫酰胺亚致死胁迫对胡瓜新小绥螨捕食效能的影响*

李亚迎^{1**} 刘明秀^{1**} 宋雪纯¹ 李士家¹ 马方芳¹
张开军¹ 相 栋² 陈翰秋² 尼玛玉珍^{2***} 刘 怀^{1***}

(1. 西南大学植物保护学院, 昆虫学及害虫控制工程重庆市重点实验室, 长江上游农业生物安全与绿色生产教育部重点实验室, 重庆 400715; 2. 西藏自治区农牧科学院蔬菜研究所, 拉萨 850032)

摘 要 【目的】本研究旨在研究亚致死浓度四氯虫酰胺对胡瓜新小绥螨 *Neoseiulus cucumeris* (Oudemans) 捕食作用的影响, 进而评价其对天敌捕食螨的安全性。【方法】在实验室内条件下, 采用叶片残毒法和二次中毒法进行四氯虫酰胺对胡瓜新小绥螨雌成螨的毒力测定, 并测定亚致死剂量 (LC_{15} 、 LC_{30}) 的四氯虫酰胺对胡瓜新小绥螨雌成螨取食柑橘始叶螨 *Eotetranychus kankitus* (Ehara) 的捕食量、捕食功能反应及捕食速率的影响。【结果】叶片残毒法和二次中毒法测定四氯虫酰胺对胡瓜新小绥螨的 LC_{50} 分别为 400.29 和 $3.86 \times 10^5 \mu\text{g/mL}$ 。亚致死剂量的四氯虫酰胺处理下胡瓜新小绥螨对柑橘始叶螨各个螨态的功能反应类型均为 Holling-II, 但其参数发生改变, 其对叶螨的最大日捕食量降低, 处理猎物的时间延长。此外, 在亚致死剂量四氯虫酰胺胁迫下, 胡瓜新小绥螨对柑橘始叶螨的捕食量和捕食速率均降低。【结论】四氯虫酰胺对胡瓜新小绥螨存在副作用, 影响捕食螨的控害能力, 与捕食螨联合使用时应间隔一定的安全期后再释放天敌捕食螨。

关键词 胡瓜新小绥螨; 四氯虫酰胺; 亚致死效应; 捕食功能反应; 捕食速率

Sublethal effect of tetrachlorantraniliprole on the predatory capacity of *Neoseiulus cucumeri*

LI Ya-Ying^{1**} LIU Ming-Xiu^{1**} SONG Xue-Chun¹ LI Shi-Jia¹ MA Fang-Fang¹
ZHANG Kai-Jun¹ XIANG Dong² CHEN Han-Qiu² NIMA Yu-Zhen^{2***} LIU Huai^{1***}

(1. Key Laboratory of Entomology and Pest Control Engineering, College of Plant Protection, Southwest University, Key Laboratory of Agricultural Biosafety and Green Production of Upper Yangtze River, Chongqing 400715, China;
2. Institute of Vegetable, Xizang Academy of Agriculture and Animal Husbandry Sciences, Lhasa 850032, China)

Abstract 【Aim】 This study investigates the sublethal effects of tetrachlorantraniliprole on the predatory efficacy of *Neoseiulus cucumeris* (Oudemans), a known predator of citrus the yellow mite. The safety of tetrachlorantraniliprole for these predatory mites was also evaluated. 【Methods】 The toxicity of tetrachlorantraniliprole on *N. cucumeris* was assessed under laboratory conditions using the leaf-dip method and the secondary poisoning phenomenon method. Additionally, the influence of sublethal doses of tetrachlorantraniliprole (LC_{15} and LC_{30} , with water as a control) on the prey consumption, functional response, and predatory rate of female *N. cucumeris* preying on *Eotetranychus kankitus* (Ehara) was determined. 【Results】 The LC_{50} of tetrachlorantraniliprole on *N. cucumeris*, based on the leaf residue method and the secondary poisoning phenomenon methods, was 400.289 and $3.86 \times 10^5 \mu\text{g/mL}$, respectively. The functional response type of female *N. cucumeris* to *E. kankitus* was not affected by exposure to sublethal concentrations of tetrachlorantraniliprole and remained at Holling-II.

*资助项目 Supported projects: 重庆市现代山地特色高效农业蔬菜产业技术体系项目 (2020[4-6]); 中央高校基本科研业务费 (SWU-KQ22019); 西藏自治区科技项目 (XZ202101ZY0006N)

**共同第一作者 Co-first authors, E-mail: liyaying@swu.edu.cn; lmx0044@126.com

***共同通讯作者 Co-corresponding authors, E-mail: 2303388920@qq.com; liuhuai@swu.edu.cn

收稿日期 Received: 2023-02-28; 接受日期 Accepted: 2023-05-29

However, exposure of *N. cucumeris* to sublethal concentrations of tetrachlorantraniliprole resulted in increased prey handling time and a decrease in the maximum daily prey consumption. Furthermore, when exposed to sublethal concentrations of tetrachlorantraniliprole, the consumption and predation rate of *N. cucumeris* on *E. kankitus* significantly decreased.

[Conclusion] The findings of this study indicate that tetrachlorantraniliprole has a negative effect on the predatory capacity of *N. cucumeris*. Therefore, a certain safety interval should be maintained when releasing *N. cucumeris* in conjunction with the use of tetrachlorantraniliprole.

Key words *Neoseiulus cucumeris*; tetrachlorantraniliprole; sublethal effect; function response; predatory rate

我国柑橘资源丰富,优良品种繁多,是世界柑橘生产大国。但橘园各类害虫(螨)的危害,尤其是柑橘害螨(叶螨)猖獗,严重威胁我国柑橘的产量和品质。柑橘始叶螨 *Eotetranychus kankitus* (Ehara)又名柑橘黄蜘蛛,是柑橘生产过程中的一类重要害螨,主要分布于我国长江中下游和西南、华南一带。柑橘始叶螨寄主广泛、个体极小、繁殖力强、世代重叠明显,防治难度大(Ullah *et al.*, 2022)。化学防治是农业生产上控制该害螨的重要手段,但由于农药的乱用、滥用导致柑橘始叶螨的抗药性逐年增强,杀螨剂的药效大打折扣,而高毒杀虫剂的直接致死或亚致死效应也影响了橘园内自然天敌或释放应用的商品化天敌在田间的自然控制作用(De Franca *et al.*, 2017)。因此,充分了解化学药剂对天敌的安全性能更好地指导生产实践,科学合理地使用农药、释放天敌,有效地协调化学防治与生物防治。

药剂对天敌的影响主要是对天敌造成致死和亚致死效应。亚致死效应是昆虫(螨类)受药后存活个体在行为、生理、生物学等方面表现出的一些异常变化(Bantz *et al.*, 2018)。目前,药剂对天敌亚致死效应的研究已成为生物防治领域的一个热点问题(Desneux *et al.*, 2007)。Alinejad 等(2014)评价了啮螨醚对斯氏钝绥螨 *Amblyseius swirskii* (Athias-Henriot)生活史特征的亚致死效应,研究发现捕食螨的总发育时间随啮螨醚药剂浓度的增加而延长,产卵期和总产卵量随使用剂量的升高而降低。Amarasekare 等(2016)评估了5种杀虫剂和2种杀菌剂对天敌草蛉 *Chrysoperla carnea* (Stephens)和寄生蜂 *Trioxys pallidus* (Haliday)的致死和亚致死效应,研究发现7种药剂对2种天敌均存在副作用。

Cheng 等(2021)采用叶片残毒法开展了19种常用农药对捕食螨胡瓜新小绥螨 *Neoseiulus cucumeris* (Oudemans)及其猎物朱砂叶螨 *Tetranychus cinnabarinus* (Boisduval)的毒力测定试验,明确天敌捕食螨和猎物叶螨对这19种药剂的敏感性差异,为朱砂叶螨常用药剂的使用提供指导性的意见。农药对天敌捕食能力影响的亚致死效应严重制约了天敌对害虫的自然控制作用。Widiarta 等(2001)报道了在经吡虫啉处理的水稻幼苗上,天敌拟环纹豹蛛 *Pardosa pseudoannulata* (Boesenberg *et Strand*)对叶蝉成虫的捕食量显著低于未经药剂处理时的捕食量。Irigaray 等(2007)研究发现阿维菌素等几种药剂对智利小植绥螨 *Phytoseiulus persimilis* (Athias-Henriot)的捕食能力存在不利影响,进而影响其对叶螨的防控。氯虫腈酰胺、氟虫胺、螺虫胺和甲氟菌酮4种选择性杀虫剂显著降低了胡瓜新小绥螨对猎物的消耗量(You *et al.*, 2016)。高效氯氟氰菊酯显著影响了烟盲蝽 *Nesidiocoris tenuis* (Reuter)对烟粉虱 *Bemisia tabaci* (Gennadius)的觅食行为,降低了其对烟盲蝽的捕食率(Soares *et al.*, 2020)。

胡瓜新小绥螨隶属于蜱螨亚纲 Acari 寄螨目 Parasitiformes 植绥螨科 Phytoseiidae 新小绥螨属 *Neoseiulus*, 是目前生物防治领域应用最为成功的捕食性天敌之一。我国复旦大学曾在20世纪80年代从荷兰引进该螨(李美和符悦冠, 2007), 后续福建省农业科学院植物保护研究所开展了该螨的人工大量繁殖和释放技术的研究,初步解决了胡瓜新小绥螨规模化饲养和田间释放问题(Van Rijn and Tanigoshi, 1999)。目前,该螨被广泛应用于我国温室大棚、果园,用于防治黄瓜、辣椒、草莓和柑橘上的小型节肢有害生物(Sarwar *et al.*, 2009; Li *et al.*, 2017; Cheng *et al.*, 2021)。

四氯虫酰胺 (SYP-9080) 是一种新型的鱼尼丁受体抑制剂类高杀虫活性的广谱杀虫剂 (Teng *et al.*, 2020), 室内试验表明该药剂对柑橘始叶螨具有较好的杀虫活性 (马方芳等, 2013), 但该药对非靶标生物柑橘始叶螨天敌胡瓜新小绥螨的安全性及捕食控害能力尚未评价。因此, 本研究通过室内试验测定了新型广谱杀虫剂四氯虫酰胺对胡瓜新小绥螨雌成螨的毒力, 基于毒力结果评价了亚致死剂量 (LC_{15} 、 LC_{30}) 下四氯虫酰胺处理胡瓜新小绥螨捕食柑橘始叶螨过程中的生物学指标, 明确亚致死剂量四氯虫酰胺对胡瓜新小绥螨捕食能力的影响, 该研究对利用胡瓜新小绥螨开展柑橘始叶螨的生物防治具有重要的指导意义, 同时也为保护天敌、科学合理使用农药、协调化学防治和与生物防治的矛盾提供重要的参考。

1 材料与方法

1.1 供试螨源

供试胡瓜新小绥螨引自中国农业科学院植物保护研究所, 引入后采用海绵水盆法饲养于人工气候箱 (LAC-250HPY-T, 上海龙跃仪器设备有限公司) 内, 以椭圆食粉螨 *Aleuroglyphus ovatus* (Toupeau) 为猎物建立试验种群。供试柑橘始叶螨采自四川省安岳县柠檬树, 在实验室单头纯化饲养, 以柑橘叶为寄主建立试验种群。人工气候箱条件设置为温度 (25 ± 1) $^{\circ}\text{C}$ 、相对湿度 $75\%\pm 5\%$ 、光周期 14L: 10D。

1.2 供试药剂

四氯虫酰胺 10% 悬浮剂, 由沈阳化工研究院有限公司提供。

1.3 四氯虫酰胺对胡瓜新小绥螨雌成螨的毒力测定

药剂四氯虫酰胺对胡瓜新小绥螨雌成螨的毒力测定采用改进后的叶片残毒法和二次中毒法进行。叶片残毒法: 在预试验确定药剂使用浓度范围的基础上, 准确量取一定量的四氯虫酰胺, 用清水将其稀释成 5-7 个浓度梯度。将直径

为 2 cm 的柑橘叶片在药液中浸渍 5 s 后阴干, 置于培养皿内 (直径 9 cm) 浸透双蒸水的海绵上, 并在叶片周围环绕湿润的脱脂棉防止捕食螨逃逸。用 0 号毛笔挑取羽化后 1-2 日龄的胡瓜新小绥螨雌成螨到柑橘叶片上, 每叶片接入雌成螨 10 头, 每个浓度重复 4 次, 以清水为对照。然后, 将培养皿置于人工气候箱 (温度 (25 ± 1) $^{\circ}\text{C}$ 、RH75% $\pm 5\%$, 光周期 14L: 10D), 24 h 后在双目解剖镜下检查死亡螨数, 以毛笔轻触碰螨体, 没有反应的判定为死亡 (孟和生, 2002)。二次中毒法: 用直径 9 cm 培养皿, 制作柑橘叶碟。在叶碟上引入 30 头柑橘始叶螨雌成螨, 用塔氏喷雾器在叶片上喷洒相应浓度的药液 1 mL, 随后在各处理上接入 10 头羽化后 1-2 日龄胡瓜新小绥螨雌成螨, 让其捕食经药液处理过的柑橘始叶螨, 每浓度重复 4 次, 以清水为对照。此后, 将叶碟置于人工气候箱 (温度 (25 ± 1) $^{\circ}\text{C}$, RH75% $\pm 5\%$, 光周期 14L: 10D), 24 h 观察记录胡瓜新小绥螨的死、活螨数 (张艳璇等, 2011)。

1.4 亚致死剂量四氯虫酰胺对胡瓜新小绥螨雌成螨捕食功能反应的影响

挑取羽化后 1-2 日龄的胡瓜新小绥螨雌成螨, 采用叶片残毒法以四氯虫酰胺 LC_{15} 、 LC_{30} 的剂量进行预处理 (清水为对照) 24 h, 预处理期间以柑橘始叶螨幼若螨为猎物进行饲喂。24 h 后挑取经过药剂亚致死剂量处理后存活且能正常爬行的胡瓜新小绥螨, 测定其捕食作用。

制作直径为 2 cm 的柑橘叶碟, 设置并挑取柑橘始叶螨密度分别为: 卵 10、20、30、40、50 粒, 幼螨 10、20、30、40、50 头, 若螨 10、15、20、25、30 头, 雌成螨 10、15、20、25、30 头。此后, 分别于不同螨态不同密度的叶碟上接入 LC_{15} 、 LC_{30} 亚致死剂量药剂或清水处理过的胡瓜新小绥螨雌成螨 1 头。24 h 后观察记录胡瓜新小绥螨对柑橘始叶螨的捕食数量。每处理重复 6 次。

1.5 亚致死剂量四氯虫酰胺对胡瓜新小绥螨雌成螨捕食速率的影响

从柑橘始叶螨饲养区域挑取柑橘始叶螨卵、

幼螨、若螨和雌成螨各螨态 30 头分别置于直径 2 cm 的柑橘叶碟上, 每叶碟上分别接入 LC₁₅ 和 LC₃₀ 亚致死剂量药剂(亚致死剂量药剂处理捕食螨的方法同 1.4) 或清水处理过的胡瓜新小绥螨雌成螨一头。在捕食螨捕食处理的第 4、8、12、16、24 小时观察记录胡瓜新小绥螨对柑橘始叶螨的捕食量, 用于计算捕食速率。捕食速率的计算公式为: 捕食速率=捕食量/捕食时间。

1.6 数据分析

试验数据采用 SPSS 21.0 软件进行分析。采用单因素方差分析 (One-way ANOVA, LSD, $P < 0.05$) 对同一猎物密度不同四氯虫酰胺处理剂量下胡瓜新小绥螨对柑橘始叶螨的捕食量, 及同一时间不同四氯虫酰胺处理剂量下胡瓜新小绥螨对柑橘始叶螨的捕食速率差异进行比较分析。

胡瓜新小绥螨对柑橘始叶螨的功能反应采

用 Holling- II 型公式进行拟合计算, 该圆盘方程为 $N_a=a'TN_0/(1+a'T_hN_0)$ 。其中, N_a 为柑橘始叶螨实际被取食量, N_0 为猎物初始密度, T 为试验所用时间, a' 为捕食螨对猎物的瞬时攻击率, T_h 为巴氏新小绥螨处理一头柑橘始叶螨若螨所需时间。图形绘制采用 GraphPad Prism 8.0 软件。

2 结果与分析

2.1 四氯虫酰胺对胡瓜新小绥螨雌成螨的毒力测定

由表 1 可知, 叶片残毒法测得四氯虫酰胺对胡瓜新小绥螨的 LC₅₀ 为 400.29 $\mu\text{g/mL}$, 胡瓜新小绥螨捕食经四氯虫酰胺药液处理过的柑橘始叶螨的 LC₅₀ 毒力结果为 $3.86\times10^5 \mu\text{g/mL}$ 。四氯虫酰胺田间推荐使用浓度 100-133 $\mu\text{g/mL}$, 研究结果明确田间推荐浓度的四氯虫酰胺对胡瓜新小绥螨直接致死作用较低。

表 1 四氯虫酰胺对胡瓜新小绥螨雌成螨的室内毒力测定

Table 1 The toxicity of tetrachlorantraniliprole to adult females of *Neoseiulus cucumeris*

捕食者 Predator	方法 Method	毒力方程 LC-P line	P 值 P-value	相关系数 R Correlation coefficient	LC ₅₀ ($\mu\text{g/mL}$)
胡瓜新小绥螨 <i>N. cucumeris</i>	叶片残毒法 The leaf-dip method	$y=1.35x - 3.50$	0.008	0.98	400.29
	二次中毒法 The secondary poisoning phenomenon method	$y=0.66x - 3.69$	0.005	0.95	3.86×10^5

2.2 亚致死剂量四氯虫酰胺对胡瓜新小绥螨雌成螨捕食功能反应的影响

四氯虫酰胺不同亚致死剂量处理胡瓜新小绥螨对柑橘始叶螨各螨态不同猎物密度下的捕食量结果见图 1。从图 1 可知, 胡瓜新小绥螨对柑橘始叶螨幼螨的捕食量最大(图 1: B), 其次是若螨(图 1: C)、雌成螨(图 1: D)、卵(图 1: A)。随着猎物密度上升, 胡瓜新小绥螨对柑橘始叶螨各螨态的捕食量也迅速上升, 当猎物密度达到 30 头以后, 捕食量趋于平缓, 经拟合发现胡瓜新小绥螨对柑橘始叶螨各螨态捕食功能反应模型均符合 Holling-II 型(表 2)。

四氯虫酰胺亚致死剂量处理胡瓜新小绥螨对柑橘始叶螨的捕食有一定的影响。其中, 当胡瓜新小绥螨捕食幼螨时, 在猎物密度为 20 ($F = 5.886$, $P = 0.013$) 和 30 头/叶 ($F = 71.969$, $P < 0.001$) 时, 对照组捕食螨的捕食量显著高于药剂亚致死剂量处理组, 且在猎物密度为 40 ($F = 171.196$, $P < 0.001$) 和 50 头/叶 ($F = 83.382$, $P < 0.001$) 时, 随着处理药剂浓度增加, 捕食螨对叶螨的捕食量显著降低; 捕食若螨时, 在猎物密度为 15 头/叶时, 对照组捕食螨的捕食量显著高于经四氯虫酰胺 LC₃₀ 亚致死剂量处理的捕食螨捕食量 ($P = 0.009$), 在猎物密度为 20 头/每叶时, 对照组捕食螨的捕食量显著高于药剂亚致死剂量处理组 ($F = 12.246$, $P = 0.001$), 其他猎

物密度下, 药剂亚致死剂量处理与清水对照相比胡瓜新小绥螨的捕食量有所下降但无显著性差异 (10 头/叶: $F = 1.912$, $P = 0.182$; 25 头/叶: $F = 1.408$, $P = 0.275$; 30 头/叶: $F = 1.854$, $P = 0.191$); 捕食雌成螨时, 在低猎物密度 10 ($F = 0.890$, $P = 0.431$)、15 ($F = 1.603$, $P = 0.234$)

和 20 头/叶 ($F = 1.233$, $P = 0.319$) 时, 对照组胡瓜新小绥螨的捕食量与药剂处理下的捕食量不存在显著差异, 在 25 ($P = 0.035$) 和 30 头/叶 ($P = 0.018$) 猎物密度时, 对照组捕食螨的捕食量显著高于经四氯虫酰胺 LC_{30} 亚致死剂量处理的捕食量。

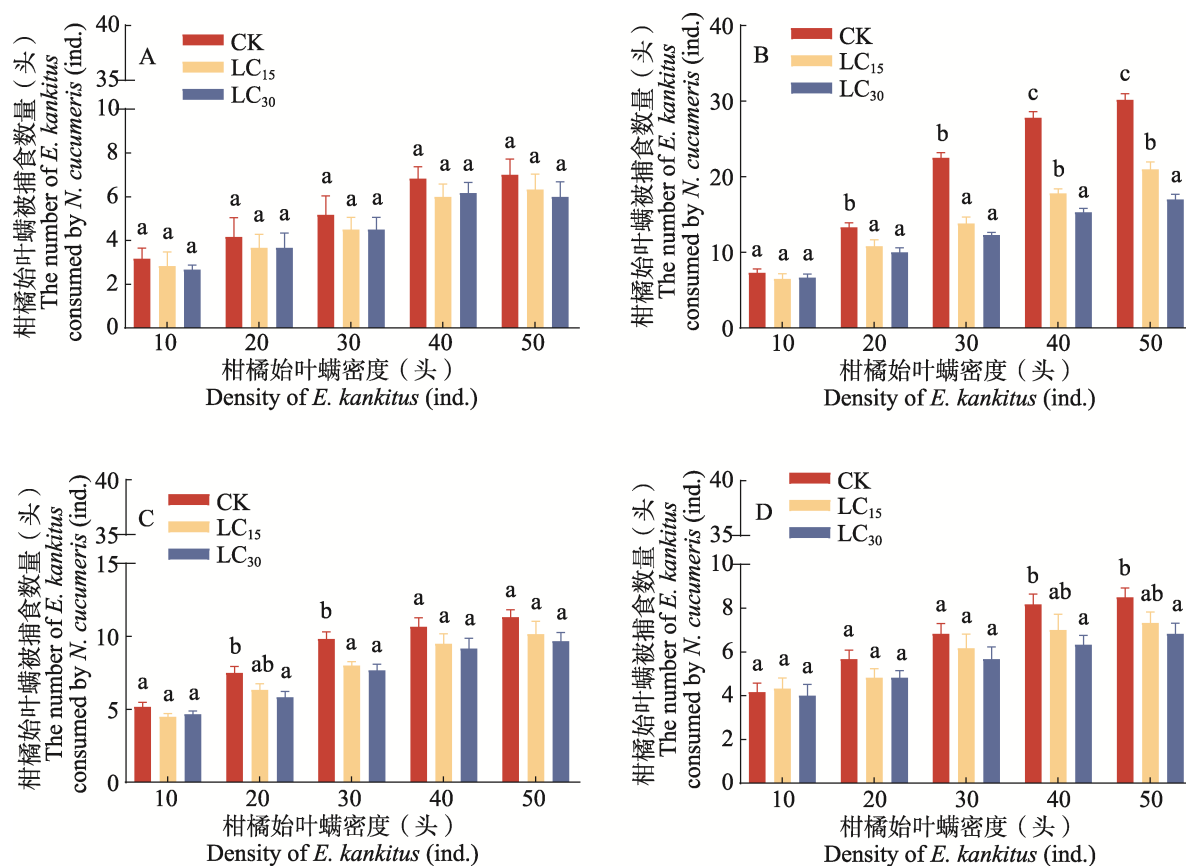


图 1 亚致死剂量的四氯虫酰胺对胡瓜新小绥螨雌成螨捕食量的影响

Fig. 1 Feeding efficiency of *Neoseiulus cucumeris* female treated by LC_{15} and LC_{30} of tetrachlorantraniliprole

A. 卵; B. 幼螨; C. 若螨; D. 雌成螨。图中数据为平均数±标准误。柱上标有不同小写字母表示存在显著性差异 ($P < 0.05$, 单因素方差分析)。下图同。

A. Egg; B. Larva; C. Nymph; D. Female. Each value represents the mean±SE, and the different lowercase letters above bars indicate significant difference ($P < 0.05$, one-way ANOVA). The same below.

各处理功能反应模型拟合结果见表 2, 四氯虫酰胺亚致死剂量处理胡瓜新小绥螨后捕食叶螨各螨态的捕食功能反应模型参数有一定的变化。结果表明, 药剂处理后胡瓜新小绥螨捕食不同螨态的柑橘始叶螨瞬时攻击率 (a') 有不同程度的影响, 当其捕食柑橘始叶螨卵和若螨时, 药剂处理后瞬时攻击率 (a') 均低于对照, 而当

其捕食幼螨及雌成螨时瞬时攻击率 (a') 有所上升。此外, 四氯虫酰胺亚致死剂量处理下的胡瓜新小绥螨对柑橘始叶螨的处理时间 (T_h) 长于对照。综合考虑瞬时攻击率 (a') 和猎物处理时间 (T_h), 发现在四氯虫酰胺亚致死剂量处理下, 胡瓜新小绥螨对柑橘始叶螨的捕食效能 (a'/T_h) 减弱。

表 2 不同亚致死剂量的四氯虫酰胺处理胡瓜新小绥螨雌成螨功能反应模型拟合结果
Table 2 Simulating results of response models of *Neoseiulus cucumeris* adult female treated by LC₁₅ and LC₃₀ sublethal dosage of tetrachlorantraniliprole

猎物螨态 Prey stage	处理剂量 Treatments	功能反应方程 Functional response equation	相关系数 R^2 Correlation coefficient	瞬时攻击率 a' Attacking rate	处理时间 T_h (h) Handling time (h)	捕食效能 a'/T_h Predation capacity	最大日捕食量 (头) N_{amax} The maximum predatory amount (ind.)
卵 Egg	CK	$N_a=0.46N_0/(1+0.05N_0)$	0.99	0.46	0.11	4.24	9.19
	LC ₁₅	$N_a=0.42N_0/(1+0.05N_0)$	0.97	0.42	0.12	3.34	8.02
	LC ₃₀	$N_a=0.38N_0/(1+0.04N_0)$	0.98	0.38	0.12	3.18	8.45
幼螨 Larva	CK	$N_a=0.75N_0/(1+0.01N_0)$	0.99	0.75	0.00	175.01	232.56
	LC ₁₅	$N_a=0.77N_0/(1+0.02N_0)$	0.99	0.77	0.02	30.81	40.16
	LC ₃₀	$N_a=0.89N_0/(1+0.04N_0)$	0.99	0.89	0.04	22.38	25.13
若螨 Nymph	CK	$N_a=0.77N_0/(1+0.02N_0)$	0.99	0.63	0.03	22.57	36.10
	LC ₁₅	$N_a=0.89N_0/(1+0.04N_0)$	0.99	0.53	0.03	16.62	31.55
	LC ₃₀	$N_a=0.58N_0/(1+0.03N_0)$	0.99	0.58	0.05	12.79	22.22
雌成螨 Female	CK	$N_a=0.53N_0/(1+0.03N_0)$	0.99	0.53	0.05	10.33	19.42
	LC ₁₅	$N_a=0.67N_0/(1+0.06N_0)$	0.97	0.67	0.09	7.51	11.26
	LC ₃₀	$N_a=0.64N_0/(1+0.06N_0)$	0.99	0.64	0.10	6.61	10.32

2.3 亚致死剂量四氯虫酰胺对胡瓜新小绥螨雌成螨捕食速率的影响

亚致死剂量的四氯虫酰胺处理胡瓜新小绥螨后对其捕食柑橘始叶螨各螨态的捕食速率的影响见图 2。药剂处理胡瓜新小绥螨显著降低其对柑橘始叶螨幼螨的捕食速率(4 h: $F = 12.423$, $P = 0.001$; 8 h: $F = 14.479$, $P < 0.001$), 且 12 h 以后随着药剂浓度的增加捕食速率显著降低(12 h: $F = 29.649$, $P < 0.001$; 16 h: $F = 20.543$, $P < 0.001$; 24 h: $F = 39.003$, $P < 0.001$); 此外, 在 24 h 时, LC₃₀ 处理的胡瓜新小绥螨雌成螨其对柑橘始叶螨雌成螨的捕食速率显著低于对照 ($P = 0.045$)。综上, 药剂处理后, 单位时间内胡瓜新小绥螨对柑橘始叶螨的捕食速率受到不同程度的影响, 其防控能力也相应的减弱。

3 讨论

本研究选用的四氯虫酰胺是一种广谱杀虫剂, 对橘园害螨柑橘始叶螨具有很好的杀灭效果, 研究四氯虫酰胺对柑橘始叶螨天敌胡瓜新小

绥螨的毒力及捕食能力的影响有重要的意义。通过叶片残毒法和二次中毒法测定四氯虫酰胺对胡瓜新小绥螨毒力效果, 结合田间使用四氯虫酰胺的推荐浓度, 明确药剂四氯虫酰胺对胡瓜新小绥螨相对安全, 且胡瓜新小绥螨取食药剂处理后的柑橘始叶螨未出现二次中毒现象。因此, 在田间喷施该药剂时, 可以认为胡瓜新小绥螨主要受到亚致死效应的影响, 可以初步认为四氯虫酰胺是防治柑橘始叶螨较为理想的药剂。但是田间环境复杂多变, 在推荐用药下使用的四氯虫酰胺具体多少浓度作用于天敌尚不得知, 后续将持续开展半田间和田间试验, 进一步明确四氯虫酰胺对胡瓜新小绥螨的作用, 找到既对害虫杀灭活性好又对天敌相对安全的剂量范围。

室内研究发现四氯虫酰胺的使用会影响胡瓜新小绥螨对柑橘始叶螨的捕食能力。前期已经有大量研究报道了化学药剂对天敌捕食能力存在副作用。亚致死剂量吡虫啉显著延长了异色瓢虫 *Harmonia axyridis* (Pallas)对蚜虫的处理时间, 降低了捕食搜寻效率和捕食量(王小艺和沈佐锐, 2002)。吡虫啉降低了加州新小绥螨

Neoseiulus californicus (McGregor)对叶螨卵的捕食量 (Poletti *et al.*, 2007)。但也存在药剂促进天敌对害虫有效防控的研究, 王智等 (2002) 研究发现小剂量杀虫剂的使用促进了拟水狼蛛 *Pirata subpiraticus* (Boesenberg & Strand)和八斑鞘腹蛛 *Coleosoma octomaculatum* (Boesenberg & Strand)的相对活力并增强其控害能力, 这可能与药剂激活天敌消化腺、神经系统的兴奋性有关。本研究中发现亚致死剂量四氯虫酰胺处理下胡

瓜新小绥螨对柑橘始叶螨各螨态的功能反应仍然符合 Holling- II 型, 但降低了胡瓜新小绥螨对柑橘始叶螨的捕食量和捕食效能 (a'/T_h), 这种捕食能力的降低可能与四氯虫酰胺的毒理学密切相关。四氯虫酰胺与非靶标生物体内的鱼尼丁受体结合并激活钙离子通道, 导致细胞内钙离子过度释放, 肌肉收缩失败, 天敌表现出禁食、无法运动等症状, 影响非靶标生物捕食能力 (黄国玉, 2022)。

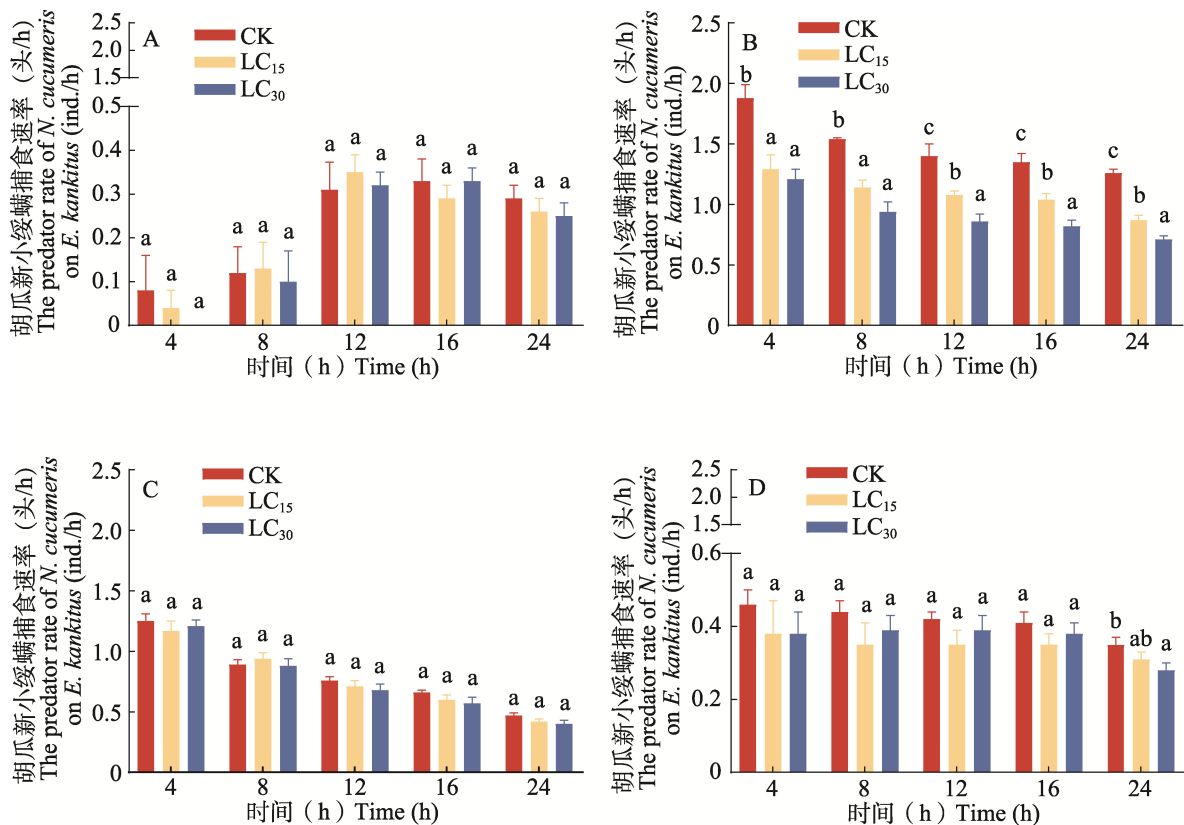


图 2 亚致死剂量的四氯虫酰胺对胡瓜新小绥螨雌成螨捕食柑橘始叶螨捕食速率的影响

Fig. 2 Predatory rates of *Neoseiulus cucumeris* adult females treated by LC₁₅ and LC₃₀ of tetrachlorantraniliprole when fed on *Eotetranychus kankitus*

A. 卵; B. 幼螨; C. 若螨; D. 雌成螨。

A. Egg; B. Larva; C. Nymph; D. Female.

亚致死效应对猎物和天敌的影响是多方面的。农药对天敌亚致死效应的影响除了直接影响其对靶标生物的控制作用, 还会影响天敌的生长发育、繁殖、寄主定位、取食等生物生态学行为。研究报道亚致死剂量的新烟碱类杀虫剂影响天敌寄生蜂的觅食和产卵, 进而影响寄生蜂种群的

维持 (Cloyd and Bethke, 2011)。Ouyang 等 (2018) 利用两性生命表技术研究发现亚致死浓度的乙唑螨腈 (SYP-9625) 可以抑制朱砂叶螨种群的增长, 而对加州新小绥螨种群增长无显著影响, 明确乙唑螨腈在防控叶螨的发生具有一定的应用潜力。Xiao 等 (2016) 利用两性生命表评估

高效氯氰菊酯对异色瓢虫的亚致死作用, 研究发现亚致死浓度的高效氯氰菊酯处理异色瓢虫时, 其繁殖率增加, 明确亚致死浓度的高效氯氰菊酯促进了异色瓢虫种群的定殖和扩张。因此, 为充分了解四氯虫酰胺对天敌的亚致死效应, 后续还应测定四氯虫酰胺对胡瓜新小绥螨生长发育和繁殖等生物生态学指标的影响。此外, 柑桔园的危害螨及天敌种类众多, 药剂对柑橘始叶螨高毒未必对其他害虫(螨)高毒, 对胡瓜新小绥螨安全也不一定对其他种类的天敌安全, 因此后续可开展其对橘园其他害虫(螨)的毒力及天敌安全性的评估工作, 为橘园害虫、害螨的可持续控制提供更为坚实的理论依据。

参考文献 (References)

- Alinejad M, Kheradmand K, Fathipour Y, 2014. Sublethal effects of fenazaquin on life table parameters of the predatory mite *Amblyseius swirskii* (Acari: Phytoseiidae). *Experimental and Applied Acarology*, 64(3): 361–373.
- Amarasekare KG, Shearer PW, Mills NJ, 2016. Testing the selectivity of pesticide effects on natural enemies in laboratory bioassays. *Biological Control*, 102: 7–16.
- Bantz A, Camon J, Froger JA, Goven D, Raymond V, 2018. Exposure to sublethal doses of insecticide and their effects on insects at cellular and physiological levels. *Current Opinion in Insect Science*, 30: 73–78.
- Cheng SH, Lin RH, You Y, Lin T, Zeng ZH, Yu CH, 2021. Comparative sensitivity of *Neoseiulus cucumeris* and its prey *Tetranychus cinnabarinus*, after exposed to nineteen pesticides. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 217: 112234.
- Cloyd RA, Bethke JA, 2011. Impact of neonicotinoid insecticides on natural enemies in greenhouse and interiorscape environments. *Pest Management Science*, 67(1): 3–9.
- De Franca SM, Breda MO, Barbosa DRS, Araujo AMN, Guedes CA, 2017. The sublethal effects of insecticides in insects// Shields VDC (ed.). *Biological Control of Pest and Vector Insects*. Rijeka: IntechOpen. 23–39.
- Desneux N, Decourtaye A, Delpuech JM, 2007. The sublethal effects of pesticides on beneficial arthropods. *Annual Review of Entomology*, 52: 81–106.
- Huang GY, 2022. Resistance risk assessment and preliminary study on resistance mechanism of *Spodoptera frugiperda* to tetrachloraniliprole. Master dissertation. Wuhan: Huazhong Agricultural University. [黄国玉, 2022. 草地贪夜蛾对四氯虫酰胺的抗性风险评估及抗性机理初探. 硕士学位论文. 武汉: 华中农业大学.]
- Irigaray FJS, Zalom FG, Thompson PB, 2007. Residual toxicity of acaricides to *Galendromus occidentalis* and *Phytoseiulus persimilis* reproductive potential. *Biological Control*, 40(2): 153–159.
- Li M, Fu YG, 2007. A study on life table of the laboratory population of *Amblyseius cucumeris* (Oudemans). *Plant Protection*, 33(2): 84–87. [李美, 符悦冠, 2007. 胡瓜钝绥螨室内种群生命表研究. 植物保护, 33(2): 84–87.]
- Li YY, Liu MX, Zhou HW, Tian CB, Zhang GH, Liu YQ, Liu H, Wang JJ, 2017. Evaluation of *Neoseiulus barkeri* (Acari: Phytoseiidae) for control of *Eotetranychus kankitus* (Acari: Tetranychidae). *Journal of Economic Entomology*, 110(3): 903–914.
- Ma FF, Pei Q, Wang ZY, Liu H, 2013. Interior toxicity of SYP-9080 on *Eotetranychus kankitus* and effects on its attract to *Amblyseius cucumeris*. China Society of Plant Protection in 2013. Qingdao. 138–142. [马方芳, 裴强, 王梓英, 刘怀, 2013. SYP-9080 对柑橘始叶螨的室内毒力及其对胡瓜钝绥螨的吸引作用的影响. 中国植物保护学会第十一次全国会员代表大会暨 2013 年学术年会. 青岛. 138–142.]
- Meng HS, 2002. Comparison of the influence of two bioassay methods on the toxicity of acaricide. *Plant Protection*, 28(3): 49–51. [孟和生, 2002. 两种生测方法对杀螨剂毒力测定结果的影响比较. 植物保护, 28(3): 49–51.]
- Ouyang JQ, Tian YJ, Jiang CX, Yang QF, Wang HJ, Li Q, 2018. Laboratory assays on the effects of a novel acaricide, SYP-9625 on *Tetranychus cinnabarinus* (Boisduval) and its natural enemy, *Neoseiulus californicus* (McGregor). *PLoS ONE*, 13(11): e0199269.
- Poletti M, Maia AHN, Omoto C, 2007. Toxicity of neonicotinoid insecticides to *Neoseiulus californicus* and *Phytoseiulus macropilis* (Acari: Phytoseiidae) and their impact on functional response to *Tetranychus urticae* (Acari: Tetranychidae). *Biological Control*, 40(1): 30–36.
- Sarwar M, Wu KM, Xu XN, 2009. Evaluation of biological aspects of the predacious mite, *Neoseiulus cucumeris* (Oudemans) (Acari: Phytoseiidae) due to prey changes using selected arthropods. *International Journal of Acarology*, 35(6): 503–509.
- Soares MA, Carvalho GA, Campos MR, Passos LC, Haro MM, Lavoie AV, Biondi A, Zappalà L, Desneux N, 2020. Detrimental sublethal effects hamper the effective use of natural and chemical pesticides in combination with a key natural enemy of *Bemisia tabaci* on tomato. *Pest Management Science*, 76(11): 3551–3559.

- Teng HY, Yuan YD, Zhang TS, Chang XL, Wang DS, 2020. Evaluation of the sublethal effect of tetrachlorantraniliprole on *Spodoptera exigua* and its potential toxicity to two non-target organisms. *PLoS ONE*, 15(11): e0242052.
- Ullah MS, Kobayashi Y, Gotoh T, 2022. Development and reproductive capacity of the miyake spider mite *Eotetranychus kankitus* (Acari: Tetranychidae) at different temperatures. *Insects*, 13(10): 910.
- Van Rijn PCJ, Tanigoshi LK, 1999. Pollen as food for the predatory mites *Iphiseius degenerans* and *Neoseiulus cucumeris* (Acari: Phytoseiidae): Dietary range and life history. *Experimental & Applied Acarology*, 23(10): 785–802.
- Wang XY, Shen ZR, 2002. Effects of sublethal doses of insecticides on predation of multicolored Asian ladybird *Harmonia axyridis* (Pallas) (Coleoptera: Coccinellidae). *Acta Ecologica Sinica*, 22(12): 2278–2284. [王小艺, 沈佐锐, 2002. 亚致死剂量杀虫剂对异色瓢虫捕食作用的影响. 生态学报, 22(12): 2278–2284.]
- 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.]
- Widiarta IN, Matsumura M, Suzuki Y, Nakasuji F, 2001. Effects of sublethal doses of imidacloprid on the fecundity of green leafhoppers, *Nephotettix* spp. (Hemiptera: Cicadellidae) and their natural enemies. *Applied Entomology and Zoology*, 36(4): 501–507.
- 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.
- You Y, Lin T, Wei H, Zeng ZH, Fu JW, Liu XF, Lin RH, Zhang YX, 2016. Laboratory evaluation of the sublethal effects of four selective pesticides on the predatory mite *Neoseiulus cucumeris* (Oudemans) (Acari: Phytoseiidae). *Systematic and Applied Acarology*, 21(10): 1506.
- Zhang YX, Chen X, Lin JZ, Ji J, 2011. Toxicity of five fungicides to *Amblyseius cucumeris*. *Fujian Agricultural Science and Technology*, 2011(1): 63–66. [张艳璇, 陈霞, 林坚贞, 季洁, 2011. 5种杀菌剂对胡瓜钝绥螨的毒性测定. 福建农业科技, 2011(1): 63–66.]