

四种防治白粉病药剂对加州新小绥螨的安全系数和捕食功能影响*

谭德龙** 王 瑞 郑锦荣 王茹芳 郭金菊 曹海顺
王云龙 袁 余 吴廷全***

(广东省农业科学院设施农业研究所, 农业农村部华南都市农业重点实验室, 广州 510640)

摘 要 【目的】明确乙嘧酚、戊唑醇、腈菌唑和吡唑醚菌酯 4 种防治白粉病药剂对加州新小绥螨 *Neoseiulus californicus* (McGregor) 的安全系数和捕食功能影响, 为协同使用杀菌剂和天敌益螨提供基础依据。【方法】采用叶盘残毒法测定 4 种药剂对加州新小绥螨的急性毒性和安全系数, 以及评估 4 种药剂处理后对二斑叶螨 *Tetranychus urticae* Koch 各螨态的直接捕食量、功能反应和寻找效应影响。【结果】4 种药剂对加州新小绥螨的急性毒性均为低风险, 安全系数依次为戊唑醇 ($>3\,333.333$) $>$ 乙嘧酚 (>631.578) $>$ 腈菌唑 (563.943) $>$ 吡唑醚菌酯 (19.464)。在田间最大推荐使用浓度下, 4 种药剂处理后加州新小绥螨对二斑叶螨各螨态的功能反应均符合 Holling II 模型。乙嘧酚处理后加州新小绥螨对二斑叶螨各螨态的直接捕食量、捕食功能和寻找效应无影响, 戊唑醇在较大猎物密度下降低了加州新小绥螨捕食二斑叶螨卵和前若螨量, 腈菌唑降低了其捕食卵、前若螨和成螨量, 吡唑醚菌酯降低了其捕食各螨态量。戊唑醇、腈菌唑和吡唑醚菌酯对加州新小绥螨的捕食功能产生消极影响, 随着处理猎物时间的增加, 最大捕食量和捕食能力均表现降低。其中, 戊唑醇降低对二斑叶螨卵 (21.21%) 和前若螨 (26.80%) 的捕食能力, 腈菌唑处理降低对二斑叶螨卵 (27.89%)、前若螨 (40.06%) 和成螨 (42.60%) 的捕食能力, 吡唑醚菌酯处理降低对二斑叶螨卵 (30.90%)、幼螨 (64.63%)、前若螨 (65.26%)、后若螨 (40.67%) 和成螨 (48.91%) 的捕食能力。吡唑醚菌酯的寻找效应降低程度最大, 其次是腈菌唑和戊唑醇。【结论】利用加州新小绥螨控制害螨需注意选择性使用防治白粉病杀菌剂, 优先建议使用乙嘧酚, 少用或注意使用戊唑醇和腈菌唑, 慎用吡唑醚菌酯。

关键词 加州新小绥螨; 病虫协同防治; 设施农业; 白粉病; 捕食功能

The effects of four powdery mildew fungicides on the safety coefficient and predation behavior of *Neoseiulus californicus* (McGregor) (Acari: Phytoseiidae)

TAN De-Long** WANG Rui ZHENG Jin-Rong WANG Ru-Fang GUO Jin-Ju
CAO Hai-Shun WANG Yun-Long YUAN Yu WU Ting-Quan***

(Institute of Facility Agriculture, Guangdong Academy of Agricultural Science; Key Laboratory of Urban Agriculture in South China, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Guangzhou 510640, China)

Abstract [Aim] To determine the effects of four powdery mildew fungicides, ethirimol, tebuconazole, myclobutanil and pyraclostrobin, on the safety coefficient and predation behavior of *Neoseiulus californicus* (McGregor) (Acari: Phytoseiidae). The findings of this study will establish an experimental foundation for the combined application of fungicides and predatory mites. [Methods] The acute toxicity and safety coefficient of four fungicides on *N. californicus* were determined using the leaf disk residual toxicity method. The direct predation, functional response, and search rate of *N. californicus* on *Tetranychus*

*资助项目 Supported projects: 广东省重点领域研发计划项目 (2018B020202006); 国家自然科学基金项目 (32272713); 广东省农业科学院新兴学科团队项目 (202129TD); 广东省农业科学院协同创新中心项目 (XTXM202203)

**第一作者 First author, E-mail: tandelong@gdaas.cn

***通讯作者 Corresponding author, E-mail: tingquanwu@sina.com

收稿日期 Received: 2023-05-12; 接受日期 Accepted: 2023-09-06

urticae Koch was assessed following treatment with ethirimol, tebuconazole, myclobutanil and pyraclostrobin. **[Results]** The acute toxicities of the four fungicides to *N. californicus* were all low, with tebuconazole, ethirimol, myclobutanil, and pyraclostrobin, having safety coefficients of >3 333.333, >631.578, 563.943 and 19.464, respectively. Following treatment with the four fungicides at the maximum recommended field dose, the functional responses of each *N. californicus* mite preying on *T. urticae* remained at Holling's Type II. There was no effect of ethirimol treatment on the direct predation amount, predation function, or search rate of *N. californicus* on *T. urticae*. At higher prey densities, tebuconazole treatment resulted in reduced eggs and protonymph predation. Myclobutanil treatment reduced predation of eggs, protonymph mites, and adult mites, whereas pyraclostrobin treatment reduced predation of all mite developmental stages. The predation function of *N. californicus* was negatively affected by the effects of tebuconazole, myclobutanil and pyraclostrobin, which increased prey handling time and decreased the maximum predatory amount and predation capacity. Tebuconazole treatment reduced predation of *T. urticae* eggs and protonymphs by 21.21% and 26.80%, respectively. Myclobutanil treatment reduced *T. urticae* egg, protonymph, and adult predation by 27.89%, 40.06%, and 42.60%, respectively. Finally, Pyraclostrobin treatment reduced *T. urticae* egg, larva, protonymph, deutonymph, and adult predation by 30.90 %, 64.63%, 65.26%, 40.67% and 48.91%, respectively. Pyraclostrobin treatment was the most effective at reducing *N. californicus* search rate, followed by myclobutanil and tebuconazole. **[Conclusion]** Selective use of fungicides to control powdery mildew should be emphasized when using *N. californicus* to manage *T. urticae*. Based on the findings of this study we recommend prioritizing the use of ethirimol, while tebuconazole and myclobutanil should be used with caution, and pyraclostrobin should only be used with careful consideration.

Key words *Neoseiulus californicus* (McGregor); cooperative control of pests and diseases; facility agriculture; powdery mildew; functional response

加州新小绥螨 *Neoseiulus californicus* (McGregor) 隶属于蛛形纲 Arachnida, 寄生螨目 Parasitiformes, 植绥螨科 Phytoseiidae, 新小绥属 *Neoseiulus*, 对二斑叶螨 *Tetranychus urticae* Koch、柑橘全爪螨 *Panonychus citri* (McGregor)、朱砂叶螨 *Tetranychus cinnabarinus* (Boisduval) 和西花蓟马 *Frankliniella occidentalis* (Pergande) 等害螨害虫控制效果良好, 具有温湿度适应范围广、耐饥饿能力强、对杀螨剂有一定抗性、种群易建立及能在害螨结网内生活捕猎的特点, 国内外都有开发为天敌商品 (McMurtry *et al.*, 2013; Tusset *et al.*, 2016; 贾静静等, 2019a, 2019b; 王蔓等, 2019; 吴佳蔚和李庆, 2019; 黄婕等, 2020), 是一种优异的捕食性天敌。

二斑叶螨和白粉病 (Powdery mildew) 是设施棚室的主要螨害和病害, 研究团队在北京、山东、江苏、广西和广东等地发现二者往往同时为害作物 (图 1)。二斑叶螨个体小、繁殖快、寄主广泛、适应性强, 对化学农药快速产生抗性, 在设施棚室内防治不当易短时间内快速大量增殖, 造成作物品质下降和减产 (洪晓月等,



图 1 作物同时被二斑叶螨与白粉病侵染 (菜豆)
Fig. 1 The simultaneous occurrence of *Tetranychus urticae* and powdery mildew on *Phaseolus vulgaris*

2013; 谭德龙等, 2021), 利用捕食螨绿色防控二斑叶螨是设施植保的主要手段。白粉病能由粉孢属 *Oidium*、白粉病菌属 *Erysiphe*、内丝白粉病菌属 *Leveillula* 和单囊壳属 *Podspheara* 等真菌感染引起 (刘铁志等, 2009; 李磊福等, 2017; 杨俊誉等, 2019; 黎豪等, 2021), 因病部覆盖白色粉状霉层得名, 从苗期到成株期都能发生, 严重影响设施栽培番茄 *Solanum lycopersicum*

Linnaeus、黄瓜 *Cucumis sativus* Linnaeus、菜豆 *Phaseolus vulgaris* Linnaeus、葡萄 *Vitis vinifera* Linnaeus 和草莓 *Fragaria ananassa* Duch 等多种作物的产量和品质,化学药剂防治是目前应用广泛且有效的防治手段(杨俊誉等,2019;郑锦荣等,2020;贾静怡等,2021)。大量的研究和实践表明,科学释放加州新小绥螨可以减少乃至不使用杀螨剂杀虫剂即获得控制二斑叶螨为害的显著效果(Fraulo and Liburd, 2007; 王蔓等, 2019; 肖榕等, 2019; 郑锦荣等, 2020), 而应对同步发生的白粉病, 化学杀菌剂防治仍是主要措施。

已有报道杀菌剂会对加州新小绥螨的安全性、生长发育和寿命等产生影响,影响大小因药剂种类不同有差异。Schmidt-Jeffris 等(2021)通过2386项观测开展荟萃分析认为对植绥螨科成螨毒力作用大小排序是杀虫剂 $\geq$ 杀螨剂/杀螨剂复配剂 $>$ 杀螨剂 $\geq$ 杀菌剂,Yoshimura 等(2022)研究了70种杀菌剂对加州新小绥螨的毒力,发现碱式硫酸铜、喹啉铜和百菌清等52种杀菌剂对该螨的成螨和卵无毒力影响,代森锰锌、丙森锌和苯菌灵等18种杀菌剂存在致死作用,胺磺铜、硫磺和代森锰锌等11种杀菌剂降低成螨的繁殖力,丙森锌和代森锰锌的残留毒性达14-21 d,甲基托布津和乙霉威+甲基托布津则能残留21-28 d。Kim 等(2018)研究发现苯菌酮、多抗霉素B和啮酰菌胺+咯菌腈对加州新小绥螨无急性毒性。de Andrade Meyer 和 Valdebenito-Sanhueza(2009)等发现克菌丹和代森锰锌对加州新小绥螨成螨有轻度危害。Silva 等(2019)研究了13种杀虫剂和杀菌剂对加州新小绥螨的毒性、繁殖和生存能力影响,发现霜脲氰+代森锰锌、四氟醚唑、氢氧化铜和硫酸铜+石灰对加州新小绥螨的毒性较高,戊唑醇、啮菌酯和代森联+吡唑醚菌酯对加州新小绥螨的毒性较低。然而防治白粉病药剂对加州新小绥螨捕食功能的影响至今尚无相关报道,以化学农药为主的白粉病防治和以释放加州新小绥螨天敌为主的害螨害虫防治是设施病虫害综合治理的重要措施,捕食功能作为天敌防治害螨的价值体现,施用白粉病杀菌剂是否对加州新小绥螨的捕食功能产生

影响,应当纳入综合防治考量。

腈菌唑、戊唑醇、吡唑醚菌酯和乙嘧酚是4种常用的白粉病防治药剂,防治性能通过国家农药登记,考虑到加州新小绥螨控制二斑叶螨和杀菌剂防治白粉病的协同需要,本研究评价腈菌唑、戊唑醇、吡唑醚菌酯和乙嘧酚4种药剂对加州新小绥螨的安全系数,测定对其捕食量和功能反应的影响,为合理选择杀菌剂协同使用捕食螨防治作物病虫(螨)害提供基础依据。

1 材料与方法

1.1 供试螨源、饲养环境和试验材料

加州新小绥螨购自嘉禾源硕生态科技有限公司,参考《植绥螨系统学及其对有害生物的治理》(吴伟南和方小端,2021)经制作玻片标本鉴定,实验室内饲养繁育超20代,期间没有接触任何农药药剂,挑选健康活跃且个体大小一致的雌成螨用于试验。

二斑叶螨由广东省农业科学院植物保护研究所提供,在实验室内饲养繁育超过50代,期间没有接触任何农药药剂。二斑叶螨各螨态获取方法,挑取健康活跃且个体大小一致的雌成螨在干净菜豆叶片,24 h后保留产下的大小一致、饱满和半透明的螨卵,剔除其他螨态;二斑叶螨幼螨由上述方法卵发育而来,剔除其他螨态;二斑叶螨前若螨由上述方法的幼螨发育蜕皮而来,剔除其他螨态;后若螨和成螨依此获得;交配后雌成螨,由前述成螨挑取雌、雄成螨各一头,单独结对饲养,待雌成螨产卵后为交配后雌成螨。

加州新小绥螨和二斑叶螨在人工气候箱(HSR-1500BE-LED,南京金恒实验仪器厂)饲养,温度(25 $\pm$ 1) $^{\circ}\text{C}$,相对湿度60%-70%,光周期16L:8D,二者隔离饲养,彼此无接触;观测、挑取在体视镜下操作(SMZ1270,尼康仪器(上海)有限公司;SMZ171,麦克奥迪实业集团有限公司)。

供试叶片为菜豆 *Phaseolus vulgaris* Linnaeus,鲁农种生许字(2004)第0400022号,采用大田

栽培菜豆苗, 供试叶片标准为健康、完整和大小一致(约 60 cm²), 栽培过程中不使用任何农药。

1.2 供试药剂

25%乙嘧酚悬浮剂(PD20131929), 推荐使用浓度 65-95 mL/667 m² (江西禾益化工股份有限公司)。430 g/L 戊唑醇悬浮剂(PD20110287), 推荐使用浓度 15-18 mL/667 m² (拜耳作物科学(中国)有限公司)。40%腈菌唑可湿性粉剂(PD20070199), 推荐使用浓度 6 000-8 000 倍液(科迪华农业科技有限责任公司)。250 g/L 吡唑醚菌酯悬浮剂(PD20152385), 推荐使用浓度 20-40 mL/667 m² [巴斯夫植物保护(江苏)有限公司]。

1.3 试验环境

试验在温度为恒温(25±1)℃, 相对湿度 60%-70%, 光周期 16L:8D 的条件下进行, 在体视显微镜下操作和观察。

1.4 供试药剂对加州新小绥螨的急性毒性和安全系数测定

基于预实验数据, 用实验室纯净水稀释处理组供试药剂至 7 个浓度梯度, 腈菌唑处理为 3 125.00、6 250.00、12 500.00、25 000.00、50 000.00、100 000.00 和 200 000.00 mg/L, 戊唑醇处理为 67 187.50、134 375.00、268 750.00、537 500.00、1 075 000.00、2 150 000.00 和 4 300 000.00 mg/L, 吡唑醚菌酯处理为 390.63、781.25、1 562.50、3 215.00、6 250.00、12 500.00 和 25 000.00 mg/L, 乙嘧酚处理为 3 007.81、6 015.63、12 031.25、24 062.50、48 125.00、96 250.00 和 192 500.00 mg/L。参照 Alinejad 等(2014)和宋子伟等(2014)的叶片残毒法并改进, 将菜豆叶片裁成叶面直径为 30 mm 的叶盘, 浸入处理药液 10 s 后平放在吸水海绵上, 周围用细条无纺布包好, 为叶片提供水分并防止加州新小绥螨外逃, 待叶盘上药液晾干后接入 30 头加州新小绥螨雌成螨, 吸水海绵置于盛水的方形塑料盒, 增加纯净水保证水面略低于叶片高度, 24 h 后记录供试螨体死亡个数, 拟合毒力回归方程。

每个处理重复 4 次, 以纯净水为对照组, 若对照组死亡率大于 10%, 则该试验无效。校正死亡率(%)=(处理死亡率-对照死亡率)/(1-对照死亡率)×100。

根据《化学农药环境安全评价试验准则》, 农药安全性划分为 4 个等级: 极高风险性, 安全系数≤0.05; 高风险性, 0.05<安全系数≤0.5; 中风险性, 0.5<安全系数≤5; 低风险性, 安全系数>5(黄婕等, 2019)。安全系数=LC₅₀/田间最大推荐使用浓度。

1.5 供试药剂对加州新小绥螨捕食功能反应的影响

1.5.1 饥饿处理 参考张誉心等(2021)的方法, 取 2 mL 离心管, 用细小针头在管盖中央戳 2-3 个小孔, 待单头经药剂处理的加州新小绥螨交配后雌成螨被挑入管中后, 将裁剪后的干净滤纸紧贴于管口处, 使管盖同滤纸一起盖下, 利用注射器穿过小孔将水注射到滤纸上, 以达到保湿的目的。之后将处理好的离心管均斜置在铺有湿棉花的培养皿中, 防止清水渗出滤纸后倒流打湿虫体及叶片, 并放在人工气候箱中继续饥饿培养 24 h。每处理重复 4 次, 以纯净水为空白对照组。

1.5.2 功能反应测定 将干净菜豆叶裁剪为直径 30 mm 的叶片圆盘, 平放在吸水海绵上, 周围用细条无纺布包好, 为叶片提供水分并防止加州新小绥螨和二斑叶螨外逃, 吸水海绵置于盛水的方形塑料盒, 每 2 d 增加清水保证水面略低于叶片高度。二斑叶螨各螨态分别设置 5 个密度梯度。基于预实验数据, 二斑叶螨卵密度分别为 10、15、20、25 和 30 粒; 幼螨和前若螨密度梯度分别均设置为 5、10、15、20 和 25 头/叶; 后若螨密度梯度设置为 4、8、12、16 和 20 头/叶; 成螨密度为 2、4、6、8 和 10 头/叶。用细毛笔将不同密度的二斑叶螨各螨态分别接入叶片圆盘, 再向叶片圆盘接入 1 头经药剂处理并饥饿 24 h 的加州新小绥螨交配后雌成螨, 24 h 后观察记录被捕食的二斑叶螨各螨态数量。每处理重复 4 次。

使用 Juliano(2001)提出的 Logistic 回归法确定功能反应曲线的类型, 即以猎物被捕食的比例与猎物的初始密度进行回归分析(李定旭等,

2007; 施琳琳等, 2022)。

$$\frac{N_a}{N_0} = \frac{\exp(P_0 + P_1 N_0 + P_2 N_0^2 + P_3 N_0^3)}{1 + \exp(P_0 + P_1 N_0 + P_2 N_0^2 + P_3 N_0^3)} \quad (1)$$

公式(1)中, N_a 为被捕食的猎物数量, N_0 为猎物的初始密度, P_0 、 P_1 、 P_2 和 P_3 为参数, 参数估计采用最大似然估计。判定功能反应曲线类型的标准: $P_1=0$ 为 I 型功能反应; $P_1<0$ 为 II 型功能反应; $P_1>0$ 且 $P_2<0$ 则为 III 型功能反应。

根据 Logistic 回归法结果, 使用 Holling 圆盘方程对功能反应进行模型拟合, 利用 a/T_h 值来评价加州新小绥螨的捕食能力。

$$\text{Holling II 型方程, } N_a = aTN_0/(1+aT_hN_0) \quad (2)$$

公式(2)中, N_0 代表初始猎物密度, N_a 代表猎物被捕食个数, a 代表瞬间攻击系数, T 代表捕食者发现猎物的总时间, T 在本试验中默认为 1 d, T_h 则表示单头猎物被处理的时长, 即处理猎物时间, 理论最大捕食量 $N_{\max}=1/T_h$, 使用最小二乘法求得相关参数。瞬时攻击率 a 体现捕食者的攻击能力, 反映天敌的捕食效能 (Pervez and Omkar, 2005; 李玉艳等, 2021); 处理猎物时间 T_h 为天敌用于捕捉、杀死和消化猎物的总时间 (Pervez and Omkar, 2005; 李玉艳等, 2021); 捕食能力 a/T_h 为瞬时攻击率 a 与处理猎物时间 T_h 的比值, 用以衡量天敌对猎物的控制作用, 比值越大控制作用越大, 反之控制作用越小 (李宜儒等, 2019)。

$$\text{Holling III 型方程, } N_a = a \cdot \exp(-b/N_0) \quad (3)$$

公式(3)中 N_a 为相应密度下的捕食量, a 为最大捕食量, b 为捕食者的最佳寻找密度, N_0 为猎物密度, 使用最小二乘法以及回归分析求出相应参数。

1.6 对寻找效应的影响

猎物密度不同往往会使捕食者寻找猎物的时间发生变化, 具体表现在随密度增加而降低, 在捕食过程中, 天敌对猎物攻击的行为效应通常被称为寻找效应。

$$\text{寻找效应方程, } S = a/(1 + aT_hN_0) \quad (4)$$

方程(4)中, S 表示寻找效应, a 为瞬时攻击率, T_h 代表处理一只猎物的时间, N_0 为猎物初始密度 (张誉心等, 2021)。

1.7 数据统计与分析

使用“R”软件 frair 包内的函数“frair test”拟合功能反应曲线类型的多项式模型 (Juliano, 2001; 施琳琳等, 2022), 使用 IBM SPSS 26 软件进行 Duncan 氏新复极差法检验数据差异显著性、Probit 法拟合药剂毒力回归方程, 使用 Excel 2019 作图, 显著水平设定为 $P=0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 4 种防治白粉病药剂对加州新小绥螨的急性毒力和安全系数

4 种防治白粉病药剂对加州新小绥螨的急性毒力和安全系数见表 1。乙嘧酚和戊唑醇处理在使用到药剂最高浓度 (192 500 和 4 300 000 mg/L), 对加州新小绥螨的致死率低于 10%, 无法拟合毒力回归方程, 安全系数分别大于 631.578 和 3 333.000。腈菌唑对加州新小绥螨的 LC_{50} 为 37 598.103 mg/L, 安全系数 563.943。吡唑醚菌酯对加州新小绥螨的 LC_{50} 为 3 274.290 mg/L, 安全系数 19.646。4 种药剂对加州新小绥螨的安全系数属低风险性, 安全系数高低为戊唑醇>乙嘧酚>腈菌唑>吡唑醚菌酯。

4 种药剂处理最大推荐使用浓度均小于 LC_{10} , 考虑到我国农药使用要求和实际应用, 后续对加州新小绥螨捕食功能的影响使用田间最大推荐使用浓度开展试验, 以求在使用范围内最大程度明确 4 种防治白粉病药剂对加州新小绥螨捕食功能的影响。

2.2 4 种防治白粉病药剂对加州新小绥螨捕食量的直接影响

4 种防治白粉病药剂对加州新小绥螨捕食量的直接影响见表 2。田间最大推荐使用浓度下, 加州新小绥螨仍能捕食各螨态二斑叶螨, 从总体变化趋势看, 处理组和对照组日捕食量均随猎物密度增加而增加, 戊唑醇、腈菌唑和吡唑醚菌酯处理会降低加州新小绥螨对二斑叶螨不同螨态的捕食量。

结合图 2, 处理内比较, 同一处理组加州新

表 1 4 种防治白粉病药剂对加州新小绥螨的急性毒力和安全系数
Table 1 Acute toxicity and security coefficient of 4 powdery mildew fungicides against *Neoseiulus californicus*

处理 Treatments	毒力回归 方程 Toxic equation	相关系数 Correlation coefficient	R^2 卡方检验 Chi-square test	χ^2 <i>P</i>	10%致死浓度 LC ₁₀ (mg/L) 95% confidence interval	半数致死浓度 LC ₅₀ (mg/L) 95% confidence interval	田间最大推荐使用 浓度 (mg/L)	安全系数 Security coefficient	安全性 等级 Safety grade
乙嘧酚 Ethirimol	-	-	-	-	-	-	304.792	-	低风险 Low risk
戊唑醇 Tebuconazole	-	-	-	-	-	-	129.000	>3 333.333	低风险 Low risk
腈菌唑 Myclobutanil	$y=1.659x - 7.589$	0.986	3.463	0.629*	6 346.135 (4 765.456-8 006.835)	37 598.103 (32 263.947-44 104.379)	66.667	563.943	低风险 Low risk
吡唑醚菌酯 Pyraclostrobin	$y=2.069x - 7.271$	0.988	5.568	0.351	786.302 (619.21-957.81)	3 274.290 (2 869.29-3 736.21)	166.667	19.646	低风险 Low risk

表 2 4 种防治白粉病药剂处理后加州新小绥螨对二斑叶螨各形态的日捕食量
Table 2 Daily consumption of *Neoseiulus californicus* treated with 4 powdery mildew fungicides on predation of *Tetranychus urticae*

处理 Treatments	螨态 Stages	猎物密度 (头/叶) Density of <i>T. urticae</i> (ind./leaf)					
		10	15	20	25	30	
对照 CK		9.50±0.29 Aa	12.00±0.41 Ab	13.75±0.75 Ac	15.25±0.63 Acd	16.75±0.63 Ad	
乙嘧酚 Ethirimol		9.50±0.29 Aa	11.25±0.63 ABa	13.25±0.75 ABb	14.75±0.63 ABbc	16.00±0.58 ABc	
戊唑醇 Tebuconazole	卵 Egg	8.75±0.48 ABa	10.50±0.29 ABab	11.75±0.48 ABbc	13.50±0.65 ABcd	14.25±0.85 BCd	
腈菌唑 Myclobutanil		8.25±0.25 Ba	10.50±0.65 ABb	11.25±0.48 Bbc	12.50±1.04 Bbc	13.00±0.71 Cc	
吡唑醚菌酯 Pyraclostrobin		7.75±0.25 Ba	9.75±0.48 Bb	11.75±0.48 ABc	13.25±0.75 ABcd	13.50±0.65 Cd	
		5	10	15	20	25	
对照 CK		4.00±0.29 Aa	7.25±0.41 Ab	10.00±0.75 Ac	11.75±0.63 Ad	12.50±0.63 Ad	
乙嘧酚 Ethirimol		4.00±0.00Aa	6.75±0.63 Ab	9.25±0.63 Ac	11.25±0.48 Ad	12.50±0.65 Ad	
戊唑醇 Tebuconazole	幼螨 Larva	4.00±0.00 Aa	6.00±0.41 Aa	9.00±0.71 Ab	10.25±0.63 Ab	12.75±1.25 Ac	
腈菌唑 Myclobutanil		4.50±0.29 Aa	6.00±0.41 Ab	8.75±0.25 Ac	10.00±0.41 Ad	10.75±0.48 Ad	
吡唑醚菌酯 Pyraclostrobin		2.75±0.25 Ba	4.50±0.29 Bb	6.25±0.48 Bc	7.25±0.48 Bcd	8.00±0.41 Bd	

续表 2 (Table 2 continued)

处理 Treatments	螨态 Stages	猎物密度 (头/叶) Density of <i>T. urticae</i> (ind./leaf)					
		5	10	15	20	25	
对照 CK	前若螨 Protonymph	4.50±0.29 Aa	7.25±0.25 Ab	9.25±0.25 Ac	11.75±0.48 Ad	12.75±0.48 Ad	
乙噻酚 Ethirimol		4.00±0.00 Aa	6.25±0.48 Ab	8.00±1.08 Ab	11.50±0.65 Ac	12.00±0.41 Ac	
戊唑醇 Tebuconazole		4.00±0.00 Aa	6.25±0.25 Ab	7.25±0.63 ABbc	8.50±0.65 Bcd	9.50±0.29 Bd	
腈菌唑 Myclobutanil		4.00±0.41 Aa	6.00±0.41 Ab	7.25±0.48 ABbc	8.50±0.65 Bcd	9.25±0.25 Bd	
吡唑醚菌酯 Pyraclostrobine		3.00±0.41 Ba	4.75±0.48 Bb	5.25±0.48 Bb	6.50±0.29 Cc	7.25±0.25 Cc	
		4	8	12	16	20	
对照 CK	后若螨 Deutonymph	3.50±0.29 Aa	4.50±0.29 Ab	6.50±0.29 Ac	7.25±0.48 Ac	9.25±0.25 Ad	
乙噻酚 Ethirimol		2.75±0.25 ABa	4.00±0.41 Aa	5.75±0.48 Ab	7.25±0.48 Ac	8.50±0.65 Ac	
戊唑醇 Tebuconazole		3.25±0.25 Aa	4.50±0.29 Ab	5.50±0.50 Ab	7.00±0.41 Ac	8.25±0.48 Ad	
腈菌唑 Myclobutanil		3.00±0.41 ABa	4.25±0.48 Aab	5.50±0.65 Abc	6.50±0.65 Acd	8.00±0.41 Ad	
吡唑醚菌酯 Pyraclostrobine		2.25±0.25 Ba	3.50±0.29 Ab	5.00±0.41 Ac	5.75±0.63 Acd	6.50±0.29 Bd	
		2	4	6	8	10	
对照 CK	成螨 Adult	2.00±0.00Aa	2.75±0.25 Aab	3.50±0.29 Abc	4.25±0.48 ABcd	5.25±0.48 Ad	
乙噻酚 Ethirimol		2.00±0.00 Aa	3.00±0.25 Aa	3.50±0.29 Ab	4.50±0.29 Ac	4.75±0.25 Ac	
戊唑醇 Tebuconazole		1.75±0.25 Aa	2.75±0.48 Aab	3.75±0.48 Abc	4.00±0.41 ABbc	5.00±0.41 Ac	
腈菌唑 Myclobutanil		1.50±0.29 Aa	2.00±0.00 Aa	2.75±0.25 ABb	3.25±0.25 BCb	3.50±0.29 Bb	
吡唑醚菌酯 Pyraclostrobine		1.50±0.29 Aa	2.00±0.41 Aab	2.25±0.25 Bab	2.75±0.25 Cbc	3.25±0.25 Bc	

表中数据为平均值±标准误, 表中同一螨态每列数据后不同大写字母和同一处理每行数据后不同小写字母代表数据间差异显著 (Duncan 氏新复极差法检验, $P<0.05$)。下表同。
Data in the table are mean±SE. The data followed by different uppercase letters in the same mite stage in each column and different lowercase letters in the each row represent significant difference by Duncan's new multiple ranges test ($P<0.05$). The same below.

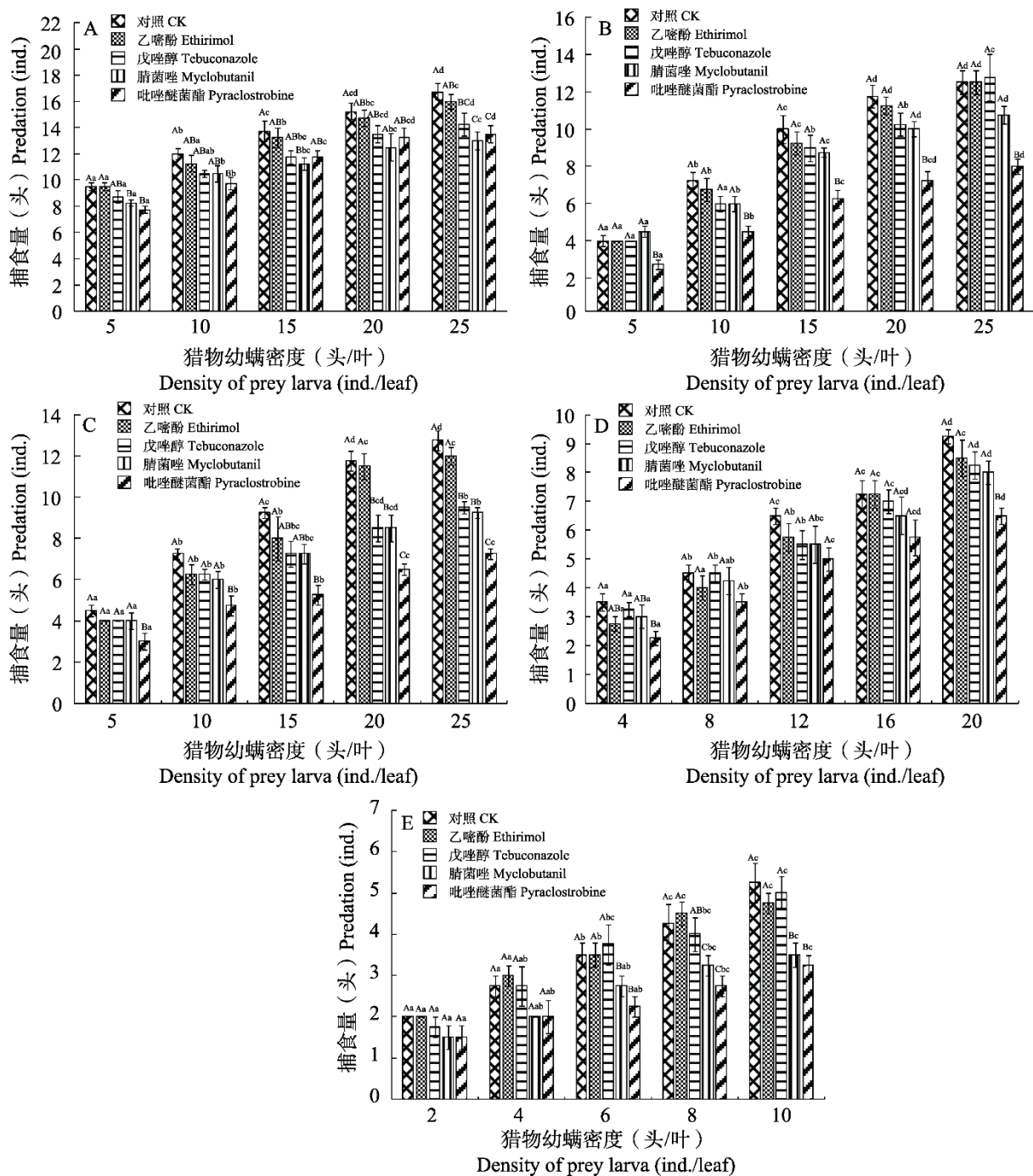


图 2 4 种防治白粉病药剂对加州新小绥螨捕食二斑叶螨的直接影响

Fig. 2 Direct effects of 4 powdery mildew fungicides on predation of *Tetranychus urticae* by *Neoseiulus californicus*

A. 捕食二斑叶螨卵的直接影响; B. 捕食二斑叶螨幼螨的直接影响; C. 捕食二斑叶螨前若螨的直接影响; D. 捕食二斑叶螨后若螨的直接影响; E. 捕食二斑叶螨成螨的直接影响。图中不同大写字母代表同一密度处理数据间差异显著, 不同小写字母代表同一药剂处理数据间差异显著 (Duncan 氏新复极差法检验, $P < 0.05$)。

A. Direct effects on predation of *T. urticae* egg; B. Direct effects on predation of *T. urticae* larva; C. Direct effects on predation of *T. urticae* protonymph; D. Direct effects on predation of *T. urticae* deutonymph; E. Direct effects on predation of *T. urticae* adult. Histograms with different uppercase letters represent significant difference between the data treated with the same density, while with different lowercase letters represent significant difference between the data treated with the same agent by Duncan's new multiple ranges test ($P < 0.05$).

小绥螨对二斑叶螨各螨态的捕食量随猎物密度增加而增加。处理间比较, 4 种防治白粉病杀菌剂对不同猎物螨态的捕食量影响不同。乙嘧酚处理加州新小绥螨后对二斑叶螨各螨态的直接捕食量影响不显著 ($P>0.05$)。戊唑醇处理在猎物卵和前若螨较大密度下 (>20 头/叶), 对直接捕食量有显著降低影响 ($P<0.05$)。腈菌唑处理对捕食猎物卵的直接捕食量在多个猎物密度下显著降低 ($P<0.05$), 对捕食猎物幼螨和后若螨的直接捕食量无显著差异 ($P>0.05$)。吡唑醚菌酯随猎物密度上升对捕食猎物各螨态量有显著降低 ($P<0.05$)。

综合以上结果, 乙嘧酚对加州新小绥螨捕食二斑叶螨各螨态的直接捕食量影响不显著, 戊唑醇能在较大猎物密度下降低捕食猎物卵和前若螨, 腈菌唑能降低其捕食猎物卵、前若螨和成螨, 吡唑醚菌酯能降低捕食猎物各螨态。

2.3 4 种防治白粉病药剂对加州新小绥螨捕食功能反应的影响

与对照组相比, 各处理组的功能反应参数发生不同程度的变化 (表 3, 表 4), 乙嘧酚处理后加州新小绥螨对猎物各螨态, 戊唑醇处理后对猎物幼螨、后若螨和成螨, 及腈菌唑处理后对猎物幼螨和后若螨的直接捕食量均无显著变化 ($P>0.05$), 则功能反应参数与对照组无统计学差异。

2.3.1 4 种防治白粉病药剂处理加州新小绥螨后功能反应类型的确定 利用 Logistic 模型对 4 种防治白粉病药剂处理加州新小绥螨后捕食二斑叶螨各螨态的试验数据进行拟合。对照组的加州新小绥螨对二斑叶螨各螨态的捕食功能反应为 Holling II 型 ($P_1<0$), 4 种防治白粉病药剂处理加州新小绥螨后, 捕食功能反应类型未发生变化, 仍为 Holling II 型 ($P_1<0$), 功能反应方程拟合的相关系数 $R^2>0.9309$ ($P<0.01$)。

2.3.2 4 种防治白粉病药剂对加州新小绥螨瞬时攻击率的影响 各处理组的瞬时攻击率或升或降 (图 3: A), 戊唑醇处理捕食猎物卵和前若螨的瞬时攻击率为 1.508 1 和 1.131 1, 腈菌唑处理捕食猎物卵和前若螨的瞬时攻击率为 1.214 2 和

1.137 8, 高于对照组的 1.485 8 和 1.093 2。吡唑醚菌酯处理捕食所有猎物螨态的瞬时攻击率低于对照组。捕食猎物卵、幼螨、前若螨、后若螨和成螨瞬时攻击率最低的是吡唑醚菌酯, 分别是 1.161 3、0.663 4、0.845 6、0.684 3 和 1.161 3, 较对照组分别降低 21.84%、28.00%、22.65%、47.59% 和 16.74%。

2.3.3 4 种防治白粉病药剂对加州新小绥螨处理猎物时间的影响 处理猎物时间随猎物发育阶段变化 (卵、幼螨、前若螨、后若螨和成螨) 呈增加趋势 (图 3: B)。戊唑醇处理后对猎物卵 (0.049 3 d) 和前若螨 (0.073 4 d) 的处理猎物时间, 腈菌唑处理后对猎物卵 (0.054 2 d)、前若螨 (0.075 8 d) 和成螨 (0.205 4 d) 的处理猎物时间, 吡唑醚菌酯处理后对猎物各螨态 (0.043 3、0.064 1、0.097 2、0.084 7 和 0.266 7 d) 的处理猎物时间, 大于对照组。处理猎物卵、幼螨、前若螨、后若螨和成螨时间最长的分别是腈菌唑 (0.054 2 d)、吡唑醚菌酯 (0.064 1 d)、吡唑醚菌酯 (0.097 2 d)、吡唑醚菌酯 (0.084 7 d) 和吡唑醚菌酯 (0.026 7 d), 较对照组增加 41.71%、103.54%、122.69%、1.19% 和 68.81%。

2.3.4 4 种防治白粉病药剂对加州新小绥螨理论最大捕食量的影响 理论最大捕食量随猎物发育阶段变化而降低, 戊唑醇、腈菌唑和吡唑醚菌酯处理后多个猎物螨态的理论最大捕食量低于对照组 (图 3: C)。戊唑醇处理加州新小绥螨后对猎物卵和前若螨的理论最大捕食量分别下降至 20.277 0 和 13.620 7 头, 腈菌唑处理后对猎物卵、前若螨和成螨的理论最大捕食量分别下降至 18.433 8、13.192 8 和 3.237 7 头, 吡唑醚菌酯处理后对各螨态的理论最大捕食量分别下降至 23.092 0、15.603 2、10.286 4、11.800 0 和 3.750 0 头。降低猎物卵、幼螨、前若螨、后若螨和成螨理论最大捕食量最大的分别是腈菌唑 (18.433 8 头)、吡唑醚菌酯 (15.603 2 头)、吡唑醚菌酯 (10.286 4 头)、戊唑醇 (10.701 9 头) 和吡唑醚菌酯 (3.750 0 头), 较对照组降低 29.43%、50.87%、55.09%、10.48%

表 3 4 种防治白粉病药剂处理后的加州新小绥螨捕食功能反应模型判断
Table 3 Evaluation of functional response model of *Neoseiulus californicus* treated with 4 powdery mildew fungicides

螨态 Stages	处理 Treatments	$P_1 \pm SE$	Z 值 Z-value	P 值 P-value	功能反应类型	Functional response type
卵 Egg	对照 CK	- 0.091 3 $\pm$ 0.018 4	- 4.966 4	<0.000 1		II
	乙嘧酚 Ethirimol	- 0.086 9 $\pm$ 0.017 8	- 4.891 6	<0.000 1		II
	戊唑醇 Tebuconazole	- 0.077 1 $\pm$ 0.016 7	- 4.623 1	<0.000 1		II
	腈菌唑 Myclobutanil	- 0.079 6 $\pm$ 0.016 5	- 4.833 8	<0.000 1		II
	吡唑醚菌酯 Pyraclostrobin	- 0.062 7 $\pm$ 0.016 1	- 3.903 8	<0.000 1		II
幼螨 Larva	对照 CK	- 0.067 2 $\pm$ 0.020 4	- 3.296 3	0.001 0		II
	乙嘧酚 Ethirimol	- 0.056 2 $\pm$ 0.019 8	- 2.847 5	0.004 4		II
	戊唑醇 Tebuconazole	- 0.044 5 $\pm$ 0.019 2	- 2.314 9	0.020 6		II
	腈菌唑 Myclobutanil	- 0.073 4 $\pm$ 0.019 8	- 3.703 3	0.000 2		II
	吡唑醚菌酯 Pyraclostrobin	- 0.042 7 $\pm$ 0.019 1	- 2.238 2	0.025 2		II
前若螨 Protonymph	对照 CK	- 0.071 4 $\pm$ 0.020 5	- 3.476 2	0.000 5		II
	乙嘧酚 Ethirimol	- 0.046 9 $\pm$ 0.019 3	- 2.434 5	0.014 9		II
	戊唑醇 Tebuconazole	- 0.073 9 $\pm$ 0.019 5	- 3.789 2	0.000 1		II
	腈菌唑 Myclobutanil	- 0.073 3 $\pm$ 0.019 5	- 3.763 0	0.000 1		II
	吡唑醚菌酯 Pyraclostrobin	- 0.056 3 $\pm$ 0.019 4	- 2.897 2	0.003 8		II
后若螨 Deutonymph	对照 CK	- 0.070 7 $\pm$ 0.026 9	- 2.628 1	0.008 6		II
	乙嘧酚 Ethirimol	- 0.504 9 $\pm$ 0.578 3	- 0.873 0	0.382 7		II
	戊唑醇 Tebuconazole	- 0.071 1 $\pm$ 0.026 7	- 2.663 5	0.007 7		II
	腈菌唑 Myclobutanil	- 0.064 6 $\pm$ 0.026 5	- 2.436 4	0.014 8		II
	吡唑醚菌酯 Pyraclostrobin	- 0.230 4 $\pm$ 0.570 7	- 0.403 8	0.686 4		II
成螨 Adult	对照 CK	- 0.180 5 $\pm$ 0.080 5	- 2.242 6	0.024 9		II
	乙嘧酚 Ethirimol	- 0.234 3 $\pm$ 0.083 8	- 2.795 9	0.005 2		II
	戊唑醇 Tebuconazole	- 0.173 2 $\pm$ 0.079 3	- 2.184 1	0.029 0		II
	腈菌唑 Myclobutanil	- 0.150 8 $\pm$ 0.075 7	- 1.992 2	0.046 3		II
	吡唑醚菌酯 Pyraclostrobin	- 0.162 0 $\pm$ 0.076 5	- 2.116 0	0.034 2		II

表 4 4 种防治白粉病药剂处理后的加州新小绥螨捕食功能反应模型
Table 4 Functional response model and parameters of *Neoseiulus californicus* treated with 4 powdery mildew fungicides

螨态 Stages	处理 Treatments	瞬时攻击率 a Attacking rate	处理猎物时间 T_h Handling time	最大捕食量 (头) $N_{\max}$ The maximum predatory amount (ind.)	捕食能力 a/T_h Predation capacity	功能反应方程 Functional response equation	相关系数 R^2 Correlation coefficient
卵 Egg	对照 CK	1.485 8	0.038 3	26.121 6	38.810 4	$N_a=1.485\ 8N/(1+0.056\ 9N)$	0.998 5
	乙嘧酚 Ethirimol	1.553 2	0.042 6	23.451 4	36.424 3	$N_a=1.553\ 2N/(1+0.066\ 2N)$	0.985 3
	戊唑醇 Tebuconazole	1.508 1	0.049 3	20.277 0	30.579 7	$N_a=1.508\ 1N/(1+0.074\ 4N)$	0.987 1
	腈菌唑 Myclobutanil	1.518 2	0.054 2	18.433 8	27.985 4	$N_a=1.518\ 2N/(1+0.082\ 4N)$	0.995 8
幼螨 Larva	吡唑醚菌酯 Pyraclostrobin	1.161 3	0.043 3	23.092 0	26.816 4	$N_a=1.161\ 3N/(1+0.050\ 3N)$	0.993 1
	对照 CK	0.921 4	0.031 5	31.759 3	29.264 2	$N_a=0.921\ 4N/(0+0.029\ 0N)$	0.997 6
	乙嘧酚 Ethirimol	0.935 1	0.037 4	26.765 8	25.029 8	$N_a=0.935\ 1N/(0+0.034\ 9N)$	0.998 9
	戊唑醇 Tebuconazole	0.945 2	0.044 1	22.662 9	21.420 9	$N_a=0.945\ 2N/(0+0.041\ 7N)$	0.979 7
前若螨 Protonymph	腈菌唑 Myclobutanil	1.214 2	0.064 0	15.619 8	18.966 2	$N_a=1.214\ 2N/(1+0.077\ 7N)$	0.956 6
	吡唑醚菌酯 Pyraclostrobin	0.663 4	0.064 1	15.603 2	10.351 6	$N_a=0.663\ 4N/(0+0.042\ 5N)$	0.997 9
	对照 CK	1.093 2	0.043 7	22.906 2	25.042 0	$N_a=1.093\ 2N/(1+0.047\ 7N)$	0.996 9
	乙嘧酚 Ethirimol	0.956 7	0.045 6	21.935 5	20.985 1	$N_a=0.956\ 7N/(0+0.043\ 6N)$	0.981 4
后若螨 Deutonymph	戊唑醇 Tebuconazole	1.131 1	0.073 4	13.620 7	15.405 8	$N_a=1.131\ 1N/(1+0.083\ 0N)$	0.996 5
	腈菌唑 Myclobutanil	1.137 8	0.075 8	13.192 8	15.010 8	$N_a=1.137\ 8N/(1+0.086\ 2N)$	0.997 2
	吡唑醚菌酯 Pyraclostrobin	0.845 6	0.097 2	10.286 4	8.698 4	$N_a=0.845\ 6N/(0+0.082\ 2N)$	0.988 2
	对照 CK	1.305 5	0.083 7	11.954 3	13.610 2	$N_a=1.305\ 5N/(1+0.109\ 2N)$	0.930 9
成螨 Adult	乙嘧酚 Ethirimol	0.820 4	0.069 5	14.395 8	11.810 2	$N_a=0.820\ 4N/(0+0.057\ 0N)$	0.971 8
	戊唑醇 Tebuconazole	1.122 4	0.093 4	10.701 9	12.011 5	$N_a=1.184\ 5N/(1+0.122\ 7N)$	0.958 9
	腈菌唑 Myclobutanil	1.002 1	0.091 9	10.878 1	10.900 6	$N_a=1.002\ 1N/(1+0.092\ 1N)$	0.997 2
	吡唑醚菌酯 Pyraclostrobin	0.684 3	0.084 7	11.800 0	8.074 7	$N_a=0.684\ 3N/(0+0.058\ 0N)$	0.992 4
	对照 CK	1.394 8	0.158 0	6.330 5	8.829 9	$N_a=1.394\ 8N/(1+0.220\ 3N)$	0.946 6
	乙嘧酚 Ethirimol	1.394 5	0.146 6	6.820 4	9.510 9	$N_a=1.394\ 5N/(1+0.204\ 5N)$	0.986 8
	戊唑醇 Tebuconazole	1.105 6	0.123 8	8.076 2	8.929 0	$N_a=1.105\ 6N/(1+0.136\ 9N)$	0.992 5
	腈菌唑 Myclobutanil	1.041 2	0.205 4	4.867 5	5.068 1	$N_a=1.041\ 2N/(1+0.213\ 9N)$	0.972 5
	吡唑醚菌酯 Pyraclostrobin	1.161 3	0.266 7	3.750 0	4.510 8	$N_a=1.161\ 3N/(1+0.309\ 7N)$	0.944 7

和 48.86%。

2.3.5 4 种防治白粉病药剂对加州新小绥螨捕食能力的影响 捕食能力随猎物发育阶段变化而减弱, 戊唑醇处理降低加州新小绥螨对猎物卵和前若螨的捕食能力至 30.579 7 和 15.405 8, 腈菌唑处理降低对猎物卵、前若螨和成螨的捕食能力至 27.985 4、15.010 8 和 5.068 1, 吡唑醚菌酯处理降低对猎物各螨态的捕食能力。降低猎物卵、幼螨、前若螨、后若螨和成螨捕食能力最多的是吡唑醚菌酯, 分别为 26.816 4、10.351 6、8.698 4、8.074 7 和 4.510 8, 分别较对照组降低 30.90%、64.63%、65.26%、40.67%和 48.91% (图 3: D)。

综合以上结果, 戊唑醇、腈菌唑和吡唑醚菌酯能对加州新小绥螨的捕食功能产生消极影响, 增加处理猎物时间, 降低最大捕食量和捕食能力, 吡唑醚菌酯对多个猎物螨态功能反应参数影响较大。

2.4 4 种防治白粉病药剂对加州新小绥螨寻找效益的影响

4 种防治白粉病药剂对加州新小绥螨寻找效益的影响见图 4, 不同处理后加州新小绥螨对猎物的寻找效应均随猎物密度增加而降低, 不同猎物螨态下各处理组变化不一。

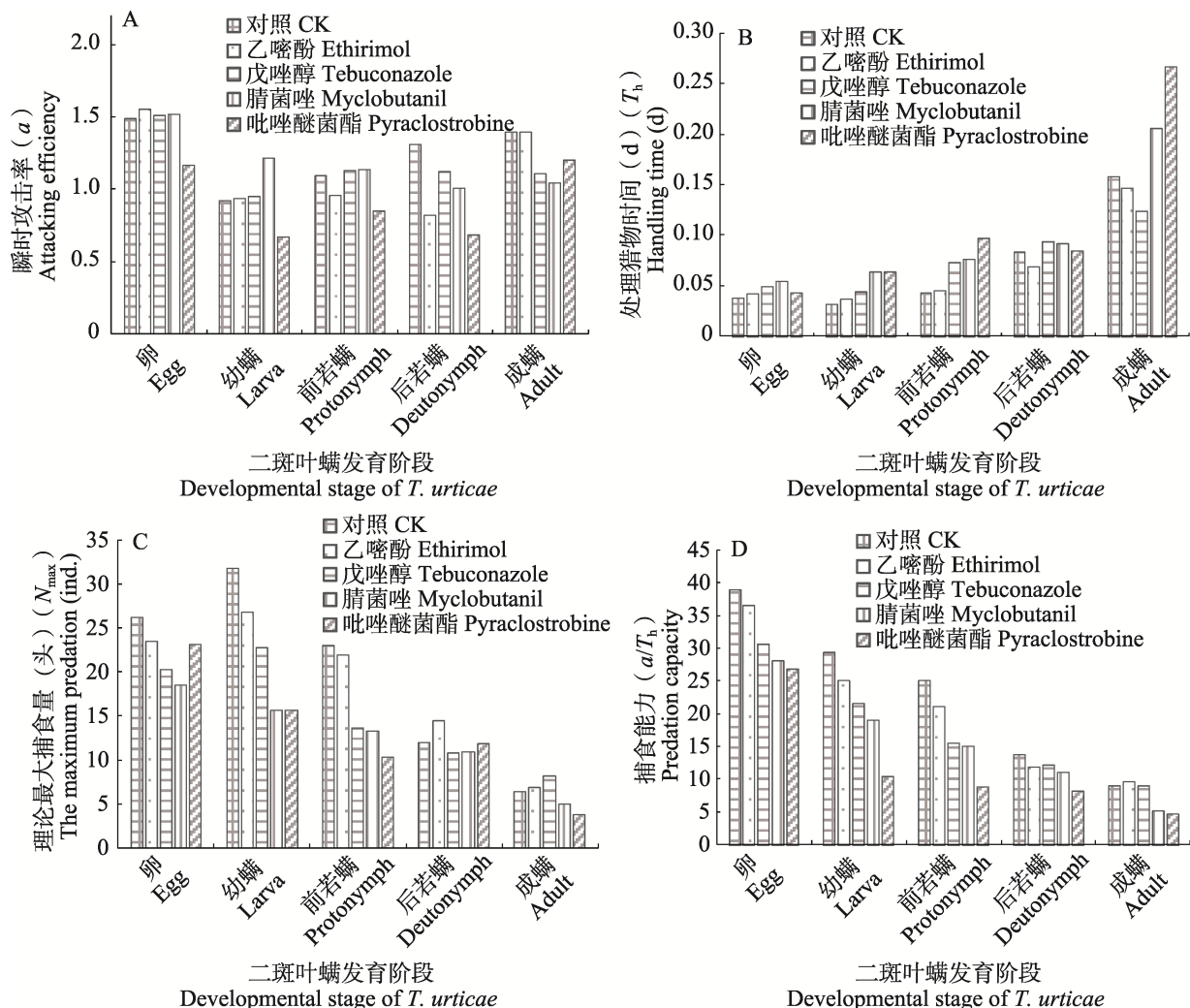


图 3 4 种防治白粉病药剂处理后对加州新小绥螨捕食二斑叶螨各螨态的捕食能力影响

Fig. 3 Effect of predation capacity amount of *Neoseiulus californicus* preys on *Tetranychus urticae* treated with 4 powdery mildew fungicides

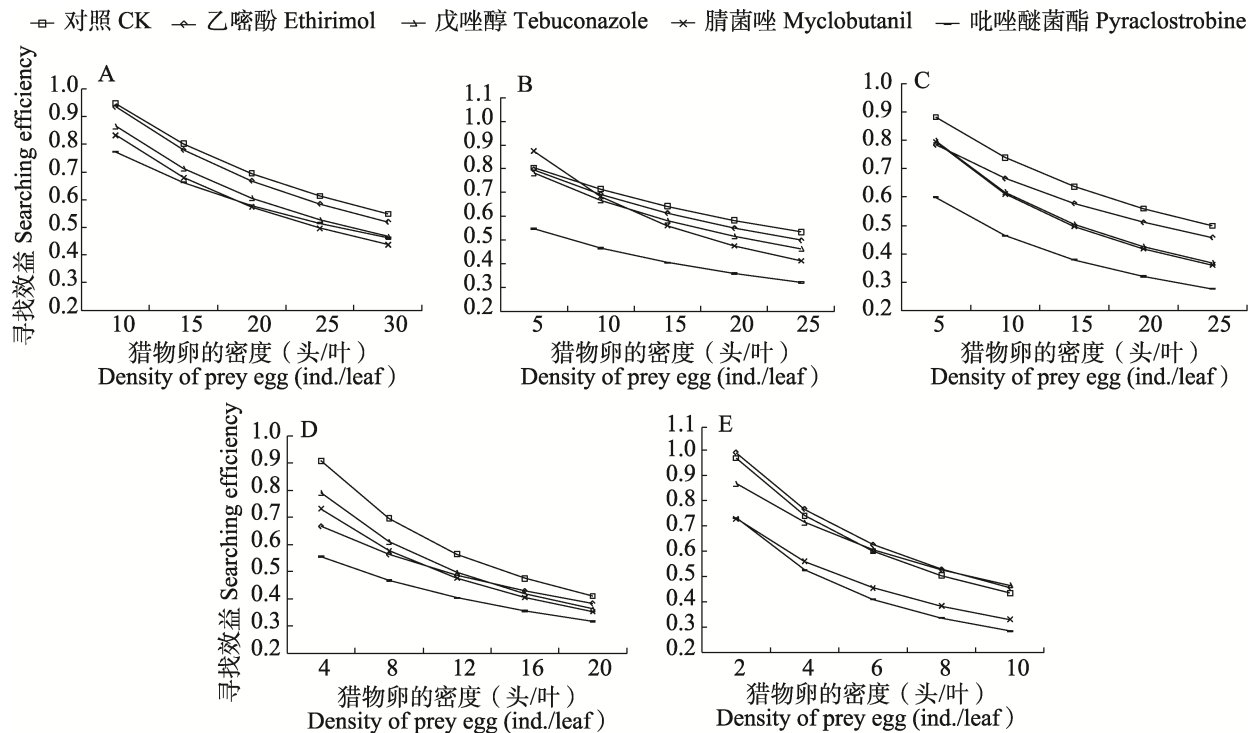


图 4 4 种防治白粉病药剂处理后加州新小绥螨对二斑叶螨寻找效应与密度的关系

Fig. 4 The direct effect of 4 powdery mildew fungicides on the relationship between the density of *Tetranychus urticae* and the searching rate of *Neoseiulus californicus*

A. 处理后加州新小绥螨对二斑叶螨卵寻找效应与密度的关系; B. 处理后加州新小绥螨对二斑叶螨幼螨寻找效应与密度的关系; C. 处理后加州新小绥螨对二斑叶螨前若螨寻找效应与密度的关系; D. 处理后加州新小绥螨对二斑叶螨后若螨寻找效应与密度的关系; E. 处理后加州新小绥螨对二斑叶螨成螨寻找效应与密度的关系。

A. The relationship between the density of *T. urticae* egg and the searching rate of *N. californicus*; B. The relationship between the density of *T. urticae* larva and the searching rate of *N. californicus*; C. The relationship between the density of *T. urticae* protonymph and the searching rate of *N. californicus*; D. The relationship between the density of *T. urticae* deutonymph and the searching rate of *N. californicus*; E. The relationship between the density of *T. urticae* adult and the searching rate of *N. californicus*.

结合表 2 和图 2, 乙嘧酚处理后对猎物各螨态的捕食量与对照无显著差异 ($P>0.05$), 寻找效益参数无统计学差异显著。戊唑醇、腈菌唑和吡唑醚菌酯降低对猎物卵和前若螨的寻找效应, 寻找效应大小依次是对照和乙嘧酚>戊唑醇>腈菌唑>吡唑醚菌酯。腈菌唑和吡唑醚菌酯降低对猎物幼螨的寻找效应, 其中腈菌唑在 5 头/叶的密度下寻找效应最高, 尔后下降速度最快, 寻找效应整体大小依次是对照和乙嘧酚、戊唑醇>腈菌唑>吡唑醚菌酯。吡唑醚菌酯降低对猎物后若螨的寻找效应, 腈菌唑和吡唑醚菌酯降低对猎物成螨的寻找效应, 其中吡唑醚菌酯的降低程度最大。

综合来看, 加州新小绥螨接触戊唑醇、腈菌唑

和吡唑醚菌酯后寻找效应发生不同程度降低, 吡唑醚菌酯的降低程度最大, 其次是腈菌唑和戊唑醇, 乙嘧酚对寻找效益的影响不显著。

3 讨论

设施农业应用天敌防治具有明显优势, 全球应用天敌昆虫(益螨)产生的效益 80%来自设施农业系统 (van Lenteren *et al.*, 2020), 二斑叶螨和白粉病是设施棚室多种作物的主要病虫(螨)害, 治理螨害和病害是两种不同的防治思路与手段, 应用捕食螨防治叶螨和杀菌剂防治白粉病是设施作物绿色防治病虫(螨)害需协同解决的问题。本研究测定了乙嘧酚、戊唑醇、腈菌唑和吡唑醚菌酯 4 种防治白粉病药剂对加州新小绥螨

的安全系数和捕食功能影响, 有助于掌握加州新小绥螨在杀菌剂环境下的捕食作用, 更好地利用加州新小绥螨的生物防治功能。研究发现 4 种杀菌剂对加州新小绥螨的安全系数属于低风险, 急性毒性大小依次为吡唑醚菌酯>腈菌唑>戊唑醇和乙嘧酚, 戊唑醇、腈菌唑和吡唑醚菌酯能不同程度降低加州新小绥螨的捕食功能。

功能反应是评估捕食性天敌控害潜能的重要方法和途径, 通过设置不同密度的猎物, 观察捕食者在一定时间内的捕食量, 拟合 Holling 圆盘方程分析捕食者捕食猎物的定量规律, 评价捕食者对猎物的捕食效率和捕食者对猎物种群的控制能力。乙嘧酚处理后加州新小绥螨对二斑叶螨各螨态的直接捕食量与空白对照差异不显著, 因而捕食功能参数变化在统计学上差异不显著, 戊唑醇、腈菌唑和吡唑醚菌酯对加州新小绥螨产生不同程度的捕食功能消极影响, 但没有导致捕食功能反应类型的改变, 主要表现为处理猎物时间延长, 捕食能力和寻找效应降低。瞬时攻击率 a 发生不同程度变化, 与捕食能力 a/T_h 有明显的下降趋势不同, 有学者指出瞬时攻击率 a 和处理猎物时间 T_h 两个参数的量变并不同步, 两个数据之间的比值捕食能力 a/T_h 能更直观反映天敌捕食能力的强弱 (王蔓等, 2019; 张誉心等, 2021)。通过捕食能力 a/T_h 比较发现, 戊唑醇处理后加州新小绥螨对二斑叶螨卵和前若螨的捕食能力分别降低至 30.579 7 和 15.405 8, 降幅分别为 21.21% 和 38.48%, 腈菌唑处理后对二斑叶螨卵、前若螨和成螨的捕食能力分别降低至 27.985 4、15.010 8 和 5.068 1, 降幅分别为 27.89%、40.06% 和 42.60%, 吡唑醚菌酯处理后对二斑叶螨各螨态的降低程度最大, 分别达到 30.90%、64.63%、65.63%、40.67% 和 48.91%, 结合寻找效应的变化判断, 对加州新小绥螨捕食功能的降低程度为吡唑醚菌酯>腈菌唑>戊唑醇>乙嘧酚。综上, 从急性毒性看, 乙嘧酚、戊唑醇、腈菌唑和吡唑醚菌酯对加州新小绥螨的致死作用均可以接受, 但戊唑醇、腈菌唑和吡唑醚菌酯影响其捕食功能, 使得加州新小绥螨控制二斑叶螨的意义减弱, 在释放加州新小绥螨时, 为

保护其捕食能力, 4 种药剂的使用优先度是乙嘧酚>戊唑醇>腈菌唑>吡唑醚菌酯。

生产应用中慎用少用杀虫剂杀螨剂是使用天敌的共识, 而面对同步发生的病害使用杀菌剂, 继而直接接触到捕食螨的情况并不罕见。杀菌剂作为天敌益虫 (螨) 的非靶标药剂, 非靶标效应因有效成分和接触物种而不同 (Schmidt-Jeffris *et al.*, 2021)。王瑜等 (2022) 发现吡唑醚菌酯和叶枯唑对玉米螟赤眼蜂 *Trichogramma ostrinae* Pang *et Chen* 寄生能力持续影响时间长, 降低寄生能力明显, 戊唑醇能致死玉米螟赤眼蜂及降低子代羽化率和死亡率。李钊等 (2018) 研究表明乙嘧酚磺酸酯、氟霜唑和百菌清对松毛虫赤眼蜂 *Trichogramma dendrolimi* Matsumura 具有中等风险, 甲基硫菌灵、苯醚甲环唑、啉氧菌酯、氟啶胺和粉唑醇具有低风险。Cheng 等 (2022) 研究了 9 种杀虫剂、杀菌剂对异色瓢虫 *Harmonia axyridis* (Pallas) 的毒性和风险评估, 指出戊唑醇和腈菌唑对异色瓢虫的风险较低。Sukhoruchenko 等 (2021) 发现 375 g/L 氟吡菌酰胺+125 g/L 啉霉胺复配药剂对智利小植绥螨 *Phytoseiulus persimilis* Athias-Henriot、斯氏钝绥螨 *Amblyseius swirskii* (Athias-Henriot) 和黄瓜新小绥螨 *N. cucumeris* (Oudemans) 有显著致死力。Ersin 等 (2020) 研究发现在最大使用推荐量下, 吡唑萘菌胺、霜霉威盐酸盐+氟吡菌胺和辛唑啉菌胺+烯酰吗啉对斯氏钝绥螨卵有显著致死力, 辛唑啉菌胺+烯酰吗啉和霜霉威盐酸盐+氟吡菌胺对幼螨有显著致死力, 4 种药剂对成螨都有不同的致死力, 双炔腈菌胺还会造成繁殖力下降。Fiedler 和 Sosnowska (2014) 发现, 甲基托布津、霜霉威盐酸盐、百菌清对斯氏钝绥螨、安氏钝绥螨 *A. andersoni* 和智利小植绥螨有显著致死力。本研究中, 吡唑醚菌酯、腈菌唑、戊唑醇和乙嘧酚对加州新小绥螨的安全系数虽然属于低风险, 但戊唑醇能降低加州新小绥螨对猎物卵和前若螨的捕食能力, 腈菌唑降低对猎物卵、前若螨和成螨的捕食能力, 吡唑醚菌酯降低对猎物各螨态的捕食能力, 生产应用中应根据其非靶标效应选择性使用。目前杀菌剂对非靶标生物的作用机

制研究较少,有推测杀菌剂可能影响非靶标生物的某些酶活性(安颢敏等, 2017), 但还有待相关验证。

单独使用化学或生物防治难以充分解决某些多病虫害作物生态系统或破坏性极强和难以控制的病虫害(Torres and de F Bueno, 2018)。设施农业环境具有种植环境相对封闭、生态因子可调控和摆脱恶劣气候影响的特点,在营造优越作物生长环境的同时也为二斑叶螨、白粉病等病虫害提供更适宜发生条件,协同使用种植管理、物理器械、化学农药和天敌生物是设施棚室有害生物综合治理(Integrated pest management, IPM)的重要举措,选择性使用杀菌剂是保护天敌和协同两者高效防治设施病虫害的关键措施。

本研究采用使用最大推荐使用浓度测定对加州新小绥螨的捕食功能影响,原因是实际生产中多直接采用推荐浓度,最大推荐使用浓度能最大程度体现药剂对加州新小绥螨的捕食功能影响。下一步工作将对显著影响加州新小绥螨捕食作用的药剂开展合适使用浓度和错时协调使用试验,最大程度兼顾加州新小绥螨的捕食能力和防治白粉病的效果,优化设施环境内病害与螨害的绿色协同防治。此外,加州新小绥螨在杀菌剂环境下生长发育和繁殖变化、生理生态行为反应、毒性累积效应(慢性毒性)等也值得进一步研究。

致谢: 感谢广东省农业科学院植物保护研究所宋子伟副研究员对加州新小绥螨鉴定和试验设计的指导,以及沈阳农业大学周金成副教授对数据分析的帮助。

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 & Applied Acarology*, 64(3): 361–373.
- An HM, Jia BT, Li ZW, Wang L, Che AS, Lu JJ, 2017. Acute toxicity and safety evaluation of 12 fungicide formulations to *Diadegma semiclausum* (Hymenoptera: Ichneumonidae). *Asian Journal of Ecotoxicology*, 12(4): 242–248. [安颢敏, 贾变桃, 李志伟, 王龙, 车安圣, 卢晶晶, 2017. 12 种杀菌剂制剂对半闭弯尾姬蜂的急性毒性及安全性评价. *生态毒理学报*, 12(4): 242–248.]
- Cheng SH, Yu CH, Xue Mm, Wang XJ, Chen LP, Nie DX, Zhang N, Zhang J, Hou YH, Lin RH, 2022. Toxicity and risk assessment of nine pesticides on nontarget natural predator *Harmonia axyridis* (Coleoptera: Coccinellidae). *Pest Management Science*, 78(12): 5124–5132.
- de Andrade Meyer G, Valdebenito-Sanhueza RM, 2009. Pesticide selectivity used in apple crops *Neoseiulus californicus* (McGregor) (Acari: Phytoseiidae). *Revista Brasileira de Fruticultura*, 31(2): 381–387.
- Ersin F, Döker İ, Turanlı F, 2020. Toxicity of sulfoxaflor and four modern fungicides on various stages of a non-target predatory mite, *Amblyseius swirskii* (Acari: Phytoseiidae). *Systematic and Applied Acarology*, 25(9): 1531–1540.
- Fiedler Z, Sosnowska D, 2014. Side effects of fungicides and insecticides on predatory mites, in laboratory conditions. *Journal of Plant Protection Research*, 54(4): 349–353.
- Fraulo AB, Liburd OE, 2007. Biological control of two spotted spider mite, *Tetranychus urticae*, with predatory mite, *Neoseiulus californicus*, in strawberries. *Experimental & Applied Acarology*, 43(2): 109–119.
- Hong XY, Xue XF, Wang JJ, Dou W, Zhang YX, Chen HJ, Zhang JY, Qiu GS, Hu JH, Wang SL, Yu LC, Shen HM, Sun RH, Guo JJ, Wu WN, Guo MF, Zhang JP, Chen BX, Song ZW, Gui LY, 2013. Integrated control techniques for spider mites on important crops. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 50(2): 321–328. [洪晓月, 薛晓峰, 王进军, 豆威, 张艳璇, 陈汉杰, 张金勇, 仇贵生, 胡军华, 王少丽, 于丽辰, 沈慧敏, 孙瑞红, 郭建军, 吴伟南, 郭明昉, 张建萍, 陈炳旭, 宋子伟, 桂连友, 2013. 作物重要叶螨综合防控技术研究示范推广. *应用昆虫学报*, 50(2): 321–328.]
- Huang J, Wang M, Men XY, Ji J, Liu YJ, Yin SY, 2019. Safety evaluation of eight commonly used pesticides on *Neoseiulus californicus* in apple orchard. *Shandong Agricultural Sciences*, 51(4): 124–127. [黄婕, 王蔓, 门兴元, 季洁, 刘永杰, 尹淑艳, 2019. 苹果园 8 种常用药剂对加州新小绥螨的安全性评价. *山东农业科学*, 51(4): 124–127.]
- Huang J, Wang M, Men XY, Ji J, Liu YJ, Yin SY, 2020. Predation of European red mite *Panonychus ulmi* by predatory mite *Neoseiulus californicus* at different stages. *Journal of Plant Protection*, 47(1): 46–52. [黄婕, 王蔓, 门兴元, 季洁, 刘永杰, 尹淑艳, 2020. 加州新小绥螨对苹果全爪螨各螨态的捕食作用. *植物保护学报*, 47(1): 46–52.]
- Jia JJ, Chen JY, Zhang FP, Niu LM, Fu YG, 2019a. Effects of

- temperature on predatory functional responses of *Neoseiulus californicus* to *Eutetranychus orientalis*. *Journal of Environmental Entomology*, 41(4): 857–865. [贾静静, 陈俊谕, 张方平, 牛黎明, 符悦冠, 2019a. 加州新小绥螨在不同温度下对六点始叶螨的捕食效能. 环境昆虫学报, 41(4): 857–865.]
- Jia JJ, Fu YG, Zhang FP, Liang M, Chen JY, 2019b. Effects of temperature on predatory functional responses of *Neoseiulus californicus* to *Eutetranychus orientalis*. *Chinese Journal of Biological Control*, 35(3): 382–389. [贾静静, 符悦冠, 张方平, 梁敏, 陈俊谕, 2019b. 温度对加州新小绥螨捕食东方真叶螨功能反应的影响. 中国生物防治学报, 35(3): 382–389.]
- Jia JY, Zhang W, Yan JY, Xu HY, Sun L, Li XH, 2021. Optimization of grapevine powdery mildew resistance identification methods and evaluation of variety resistance. *Plant Protection*, 47(1): 160–164. [贾静怡, 张玮, 燕继晔, 徐海英, 孙磊, 李兴红, 2021. 葡萄白粉病抗性鉴定方法优化及品种抗性评价. 植物保护, 47(1): 160–164.]
- Juliano SA, 2001. Nonlinear curve fitting: Predation and functional response curves// Scheiner SM, Gurevitch J (eds.). *Design and Analysis of Ecological experiments*. New York: Oxford University Press. 178–196.
- Kim SY, Ahn HG, Ha PJ, Lim UT, Lee JH, 2018. Toxicities of 26 pesticides against 10 biological control species. *Journal of Asia-Pacific Entomology*, 21(1): 1–8.
- Li H, Gong SQ, Song HJ, Chu X, Sun XW, Cai YP, 2021. Research progress of pumpkin powdery mildew. *China Cucurbits and Vegetables*, 34(2): 8–11. [黎豪, 龚诗琦, 宋慧娟, 楚箫, 孙小武, 蔡雁平, 2021. 南瓜白粉病研究进展. 中国瓜菜, 34(2): 8–11.]
- Li LF, Sun QY, Shi J, Ma ZH, 2017. Pathogen identification and forecasting model construction of cucurbit powdery mildew in greenhouse in Ningxia. *Journal of Plant Protection*, 44(5): 788–795. [李磊福, 孙秋玉, 史娟, 马占鸿, 2017. 宁夏温室瓜菜白粉病菌鉴定及病害流行预测模型构建. 植物保护学报, 44(5): 788–795.]
- Li YR, Li Q, Hu CX, Duan P, Chen GH, Zhang XM, 2019. Effect of imidacloprid concentrations on predatory functional responses of *Orius similis* to *Frankliniella occidentalis*. *Journal of Yunnan Agricultural University (Natural Sciences Edition)*, 34(4): 590–596. [李宜儒, 李琼, 胡昌雄, 段盼, 陈国华, 张晓明, 2019. 吡虫啉对南方小花蝽捕食西花蓟马功能反应的影响. 云南农业大学学报 (自然科学版), 34(4): 590–596.]
- Li YY, Wang MQ, Zhang YY, Ma M, Li P, Mao JJ, Chen HY, Zhang LS, 2021. Predatory capacity of *Chrysopa formosa* on the eggs and young larvae of *Spodoptera frugiperda*. *Plant Protection*, 47(5): 178–184, 197. [李玉艳, 王孟卿, 张莹莹, 马梦, 李萍, 毛建军, 陈红印, 张礼生, 2021. 丽草蛉幼虫对草地贪夜蛾卵及低龄幼虫的捕食能力评价. 植物保护, 47(5): 178–184, 197.]
- Li Z, Zhang J, Wu YG, Qiao K, Wang KY, Jiang LL, 2018. Toxicity and safety evaluation of 23 pesticides on *Trichogramma dendrolimi*. *Journal of Environmental Entomology*, 40(1): 224–230. [李钊, 张杰, 武玉国, 乔康, 王开运, 姜莉莉, 2018. 23 种农药对松毛虫赤眼蜂的急性毒性及安全性评价. 环境昆虫学报, 40(1): 224–230.]
- Li DX, Tian J, Shen ZR, 2007. Influence of chlorpyrifos and abamectin on the functional response of *Scolothrips takahashii* Prisenner to hawthorn spider mite *Tetranychus viennensis* Zacher. *Acta Entomologica Sinica*, 50(5): 467–473. [李定旭, 田娟, 沈佐锐, 2007. 毒死蜱和阿维菌素对塔六点蓟马功能反应的影响. 昆虫学报, 50(5): 467–473.]
- Liu TZ, Duan YP, Yang JP, 2009. *Oidium neolycopersici*, a tomato powdery mildew pathogen new to China. *Mycosystema*, 28(3): 463–465. [刘铁志, 段永平, 杨俊平, 2009. 新番茄粉孢——我国番茄白粉病菌一新记录. 菌物学报, 28(3): 463–465.]
- McMurtry JA, De Moraes GJ, Sourassou NF, 2013. Revision of the lifestyles of phytoseiid mites (Acari: Phytoseiidae) and implications for biological control strategies. *Systematic and Applied Acarology*, 18(4): 297–320.
- Pervez A, Omkar, 2005. Functional responses of coccinellid predators: An illustration of a logistic approach. *Journal of Insect Science*, 5(1): 1–6.
- Schmidt-Jeffris RA, Beers EH, Sater C, 2021. Meta - analysis and review of pesticide non - target effects on phytoseiids, key biological control agents. *Pest Management Science*, 77(11): 4848–4862.
- Shi LL, Li ZY, Lin DM, Lu YY, Chen KW, 2022. Predatory capability of *Mallada basalis* (Neuroptera: Chrysopidae) larvae on the eggs and early instar larvae of *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae). *Acta Entomologica Sinica*, 65(10): 1324–1333. [施琳琳, 李子园, 林丹敏, 陆永跃, 陈科伟, 2022. 黄玛草蛉幼虫对草地贪夜蛾卵和低龄幼虫的捕食能力. 昆虫学报, 65(10): 1324–1333.]
- Silva DE, do Nascimento JM, da Silva RTL, Juchem CF, Ruffatto K, da Silva GL, Johann L, Corrêa LLC, Ferla NJ, 2019. Impact of vineyard agrochemicals against *Panonychus ulmi* (Acari: Tetranychidae) and its natural enemy, *Neoseiulus californicus* (Acari: Phytoseiidae) in Brazil. *Crop Protection*, 123: 5–11.
- Song ZW, Zhang BX, Deng CF, Li DS, 2014. Sublethal effects of abamectin on the biological performance of *Neoseiulus fallacis* (Garman). *Chinese Journal of Biological Control*, 30(4): 475–480. [Song ZW, Zhang BX, Deng CF, Li DS, 2014. 阿维菌素对加州新小绥螨生物学性能的影响. 中国生物防治学报, 30(4): 475–480.]

- 460–465. [宋子伟, 张宝鑫, 邓彩凤, 李敦松, 2014. 阿维菌素亚致死剂量对虚伪新小绥螨的影响. 中国生物防治学报, 30(4): 460–465.]
- Sukhoruchenko GI, Ivanova GP, Krasavina LP, Kozlova EG, Trapeznikova OV, 2021. Effects of Luna® tranquility fungicide on arthropod pests and predatory mites in protected grounds. *Entomological Review*, 101(3): 287–298.
- Tan DL, Liao WT, Zheng Y, Zheng JR, Zhang CY, Zhang BX, Li DS, 2021. Effects of the insecticide cyflumetofen on the growth and development of the spider mite, *Tetranychus urticae* Koch. *Journal of Biosafety*, 30(1): 50–55. [谭德龙, 廖伟涛, 郑苑, 郑锦荣, 张长远, 张宝鑫, 李敦松, 2021. 丁氟螨酯对二斑叶螨生长发育的影响. 生物安全学报, 30(1): 50–55.]
- Torres JB, de F Bueno A, 2018. Conservation biological control using selective insecticides – A valuable tool for IPM. *Biological Control*, 126: 53–64.
- Tusset AM, Piccirillo V, Balthazar JM, 2016. A note on SDRE control applied in predator-prey model: Biological control of spider mite *Panonychus ulmi*. *Journal of Biological Systems*, 24(2): 1–12.
- van Lenteren JC, Alomar O, Ravensberg WJ, Urbaneja A, 2020. Biological control agents for control of pests in greenhouses// Maria LG, Ramon A, Philippe CN (eds.). *Integrated Pest and Disease Management in Greenhouse Crops*. Cham: Springer International Publishing. 409–439.
- Wang M, Li B, Huang J, Men XY, Ji J, Liu YJ, Yin SY, 2019. Comparison of *Neoseiulus californicus* and *Neoseiulus barkeri* as biological controls for *Tetranychus urticae*. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 56(6): 1256–1263. [王蔓, 李波, 黄婕, 门兴元, 季洁, 刘永杰, 尹淑艳, 2019. 加州新小绥螨和巴氏新小绥螨对二斑叶螨的捕食能力比较. 应用昆虫学报, 56(6): 1256–1263.]
- Wang Y, Dai XY, Wang RJ, Liu Y, Chen H, Zheng L, Dong XL, Zhai YF, 2022. Effects of residues of pesticides commonly used in corn fields on *Trichogramma ostrinae* (Hymenoptera: Trichogrammatidae) at different time after application. *Acta Entomologica Sinica*, 65(7): 852–865. [王瑜, 代晓彦, 王瑞娟, 刘艳, 陈浩, 郑礼, 董小林, 翟一凡, 2022. 施药后不同时间玉米田中常用农药残留对玉米螟赤眼蜂的影响. 昆虫学报, 65(7): 852–865.]
- Wu JW, Li Q, 2019. Prey preference and diffusion behavior of *Neoseiulus californicus* (McGregor) (Acari: Phytoseiidae). *Chinese Journal of Biological Control*, 35(3): 374–381. [吴佳蔚, 李庆, 2019. 加州新小绥螨对猎物的选择行为及其扩散行为. 中国生物防治学报, 35(3): 374–381.]
- Wu WN, Fang XD, 2021. *Phytoseiidae Systematics and Management Pests*. Guangzhou: Guangdong Science and Technology Press. 56. [吴伟南, 方小端, 2021. 植绥螨系统学及其对有害生物的治理. 广州: 广东科技出版社. 56.]
- Xiao R, Yi TC, Guo JJ, Jin DC, 2019. Progress in research on *Neoseiulus californicus* (McGregor). *Chinese Journal of Applied Entomology*, 56(4): 672–677. [肖榕, 乙天慈, 郭建军, 金道超, 2019. 加州新小绥螨的研究进展. 应用昆虫学报, 56(4): 672–677.]
- Yang JY, Wei SJ, Su DF, Chen SY, Luo ZW, Shen XM, Lai YH, Jamil A, Tong JY, Cui XL, 2019. Research advances on powdery mildew pathogens and molecular defense mechanism of strawberries. *Journal of Yunnan University (Natural Sciences Edition)*, 41(4): 842–850. [杨俊誉, 魏世杰, 苏代发, 陈杉艳, 罗志伟, 沈雪梅, 赖泳红, Jamil Arslan, 童江云, 崔晓龙, 2019. 草莓白粉病病原菌及分子防御机制的研究进展. 云南大学学报 (自然科学版), 41(4): 842–850.]
- Yoshimura T, Mori K, Kishimoto H, Toyama M, Miyazaki H, Igarashi K, 2022. Side effects of pesticides on *Neoseiulus californicus* (Acari: Phytoseiidae) – A comprehensive evaluation combined with directly exposed and residual toxicity. *Japanese Journal of Applied Entomology and Zoology*, 66(2): 31.
- 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.]
- Zheng JR, Wu SH, Zhang ZY, Li YH, 2020. *New Techniques for New Varieties of Modern Facilities Horticulture*. Beijing: China Agriculture Press. 285. [郑锦荣, 吴仕豪, 张长远, 李艳红, 2020. 现代设施园艺新品种新技术. 北京: 中国农业出版社. 285.]