

三种杀虫剂亚致死浓度处理对螟黄赤眼蜂寄生功能及其酶活性和相关物质含量的影响*

郭琼琼** 刘明蕾 陈梦娇 张 烨 王 娟 朱文雅*** 马瑞燕***

(山西农业大学植物保护学院, 太原 030031)

摘 要 【目的】探究亚致死浓度阿维菌素、吡虫啉和高效氯氰菊酯对螟黄赤眼蜂 *Trichogramma chilonis* 寄生功能及体内解毒酶、保护酶的活性及线粒体呼吸链复合物 I (Mitochondrial respiratory chain complex I, MRCC I)、三磷酸腺苷 (Adenosine triphosphate, ATP)、活性氧 (Reactive oxygen species, ROS)、丙二醛 (Malondialdehyde, MDA) 等物质含量的影响, 以阐明 3 种杀虫剂对螟黄赤眼蜂亚致死效应的作用机制。【方法】采用药膜法, 以亚致死浓度 LC_{50} 处理螟黄赤眼蜂, 比较不同杀虫剂对螟黄赤眼蜂搜寻效应及处置时间、寄生效能和最大寄生量等寄生能力的影响, 并分析相关酶活性以及 MRCC I 与线粒体呼吸过程中 ATP 含量的变化。【结果】阿维菌素、吡虫啉和高效氯氰菊酯处理螟黄赤眼蜂后, 搜寻效应均降低; 寄生效能分别降低了 54.81%、20.79% 和 11.55%。3 种杀虫剂处理后, 螟黄赤眼蜂体内的谷胱甘肽 S-转移酶 (Glutathione S-transferase, GSTs)、细胞色素 CYP450 (Cytochrome P450, CYP450)、羧酸酯酶 (Carboxylesterase, CarE) 和过氧化物酶 (Peroxidase, POD) 活性均显著升高 (阿维菌素: $P = 0.043$ 、 $P = 0.005$ 、 $P = 0.022$ 和 $P = 0.004$ 、吡虫啉: $P < 0.001$ 、 $P = 0.013$ 、 $P = 0.017$ 和 $P < 0.001$ 、高效氯氰菊酯: $P < 0.001$ 、 $P = 0.013$ 、 $P = 0.002$ 和 $P = 0.002$)。其中阿维菌素处理后 ROS ($P = 0.050$)、MDA ($P < 0.001$) 和 MRCC I ($P = 0.006$) 含量显著增加, 超氧化物歧化酶 (Superoxide dismutase, SOD) 活性显著降低 ($P = 0.050$); 吡虫啉处理后 MDA ($P = 0.010$) 和 MRCC I ($P = 0.005$) 含量显著增加; 高效氯氰菊酯处理后过氧化氢酶 (Catalase, CAT) ($P = 0.034$) 活性、MRCC I ($P = 0.025$)、ATP ($P = 0.008$)、ROS ($P = 0.020$) 和 MDA ($P = 0.004$) 含量显著增加。【结论】3 种杀虫剂亚致死浓度均可显著抑制螟黄赤眼蜂的搜寻效应和寄生能力, 诱导螟黄赤眼蜂体内解毒酶活性上调, 影响螟黄赤眼蜂体内保护酶活性及 MRCC I、ATP、ROS 和 MDA 等物质含量。

关键词 螟黄赤眼蜂; 杀虫剂; 亚致死效应; 寄生功能; 搜寻能力; 酶活性

Effects of sublethal concentration of three insecticides on the parasitic behavior, enzyme activity and related chemical content, of *Trichogramma chilonis*

GUO Qiong-Qiong** LIU Ming-Lei CHEN Meng-Jiao ZHANG Ye
WANG Juan ZHU Wen-Ya*** MA Rui-Yan***

(College of Plant Protection, Shanxi Agricultural University, Taiyuan 030031, China)

Abstract [Aim] To investigate the effects of sublethal concentrations of the insecticides abamectin, imidacloprid and beta-cypermethrin on the parasitic behavior of *T. chilonis*, on the activity detoxification and protective enzymes in this species, and on levels of mitochondrial respiratory chain complex I (MRCC I), adenosine triphosphate (ATP), reactive oxygen species (ROS) and malondialdehyde (MDA). [Methods] The effects of sublethal concentrations of the different

*资助项目 Supported projects: 国家现代农业(梨)产业技术体系资助项目(CARS-28); 山西省重点研发计划项目(202302140601011); 国家重点研发计划(2023YFD1401400); 山西省自然科学研究面上项目(202303021211089)

**第一作者 First author, E-mail: 13525857028@163.com

***共同通讯作者 Co-corresponding authors, E-mail: zhuwenya1981@126.com; mary@sxau.edu.cn

收稿日期 Received: 2024-07-29; 接受日期 Accepted: 2025-08-15

insecticides on the prey searching, processing time, parasitic efficiency, and maximum parasitic capacity, of *T. chilonis* were measured and compared, and changes in enzyme activity, MRCC I and ATP content were analyzed using the dry film residue method. **[Results]** Abamectin, imidacloprid and beta-cypermethrin significantly reduced the effectiveness of prey searching, and reduced overall parasitic efficiency by 54.81%, 20.79% and 11.55%, respectively. Glutathione *S*-transferase (GSTs), cytochrome P450 (CYP450), carboxylesterase (CarE) and peroxidase (POD) activity all significantly increased after treatment with the three insecticides (abamectin: $P = 0.043$, $P = 0.005$, $P = 0.022$ and $P = 0.004$, imidacloprid: $P < 0.001$, $P = 0.013$, $P = 0.017$ and $P < 0.001$, beta-cypermethrin: $P < 0.001$, $P = 0.013$, $P = 0.002$ and $P = 0.002$). ROS ($P = 0.050$), MDA ($P < 0.001$) and MRCCI ($P = 0.006$) content significantly increased after treatment with abamectin. Superoxide dismutase (SOD) activity significantly decreased ($P = 0.050$), whereas MDA ($P = 0.010$) and MRCCI ($P = 0.005$) content significantly increased after treatment with imidacloprid. Catalase (CAT) ($P = 0.034$), ROS ($P = 0.025$), MDA ($P = 0.008$), MRCCI ($P = 0.020$) and ATP ($P = 0.004$) content significantly increased after beta-cypermethrin treatment. **[Conclusion]** Sublethal concentrations of abamectin, imidacloprid and beta-cypermethrin, significantly reduced the prey searching efficiency and parasitic ability of *T. chilonis* (parasitic ability: 20 grain: $P = 0.004$; 30 grain: $P < 0.001$; 50 grain: $P < 0.001$; 60 grain: $P < 0.001$; 100 grain: $P = 0.001$; 120 grain: $P = 0.003$; 150 grain: $P = 0.001$). Treatment with these pesticides also increased detoxification enzyme activity, and affected both protective enzyme activity and ROS, MDA, MRCC I and ATP content, in this species.

Key words *Trichogramma chilonis*; insecticides; sublethal effect; parasitic function; search capability; enzyme activity

赤眼蜂 *Trichogramma* spp. 是当前农业害虫生物防治中应用广泛的天敌昆虫 (沈艳等, 2024), 也是农药登记环境评价的重要靶标生物 (徐华强等, 2014)。利用赤眼蜂进行害虫防治主要采取田间淹没式释放方式, 其优势是能在寄主为害作物之前杀死寄主 (Gardner *et al.*, 2011; Wang *et al.*, 2012)。螟黄赤眼蜂 *Trichogramma chilonis* 是我国目前用于生物防治的一种优势寄生蜂 (金磊等, 2021), 研究表明, 螟黄赤眼蜂在水稻、玉米、棉花和果蔬等作物田中对多种鳞翅目害虫有很好的防治效果 (Ballal *et al.*, 2009; 杜文梅等, 2016; Zang *et al.*, 2021; 代晓彦, 2023)。田间释放赤眼蜂防治害虫很大程度上降低了农药的使用, 而且具有成本低、使用方便、防治效果好, 并对人畜无毒、不污染环境等优势, 在减轻农林害虫危害和农业可持续发展中起着不可替代的作用。

阿维菌素 (Abamectin) 属大环内酯双糖类生物杀虫剂, 作用靶标为 γ -氨基丁酸 (GABA) 受体和谷氨酸门控氯离子通道 (GluCl)。其作用机制主要是干扰害虫的神经系统, 尤其是通过激活谷氨酸门控氯离子通道导致害虫麻痹或死亡 (Wang *et al.*, 2022)。作用机制独特, 对害虫具有明显的胃毒和触杀作用, 是一类广谱、高效、低毒以及易降解的杀虫剂 (朱文雅等, 2021; 何

佳春等, 2024)。作用靶标对鳞翅目 Lepidoptera、双翅目 Homoptera、鞘翅目 Coleoptera、半翅目 Hemiptera 等多种害虫均有较好的防效, 尤其对害螨高效 (童建华和庄占兴, 1999)。阿维菌素对农田生态系统中的寄生蜂天敌如赤眼蜂的羽化和寄生率有显著影响, 存在较高安全风险性 (王德森等, 2011; 徐华强等, 2014; 张俊杰等, 2014; 袁伟宁等, 2019)。吡虫啉 (Imidacloprid) 属新烟碱类杀虫剂, 作用靶标是烟碱型乙酰胆碱受体 (Nicotinicacetylcholine receptor, nAChR), 其作用机制是与昆虫神经系统中的烟碱型乙酰胆碱受体结合 (Casida and Durkin, 2013; Mackei *et al.*, 2024), 并且新烟碱类不易被乙酰胆碱分解, 从而导致乙酰胆碱积累, 引起神经刺激及麻痹 (Matsuda *et al.*, 2001; Shimomura, 2005)。这一过程会阻断昆虫中枢神经系统的正常信号传导 (Matsuda *et al.*, 2001; Shimomura, 2005), 最终靶向导致昆虫死亡。具有活性高、广谱性的特点 (张琪等, 2020)。研究表明, 新烟碱类杀虫剂对玉米螟赤眼蜂 *Trichogramma ostrinae*、松毛赤眼蜂 *Trichogramma dendrolimi* 和拟澳赤眼蜂 *Trichogramma confusum* 具有较强的急性致死效应, 对赤眼蜂的生存、寄生和成虫羽化均有不利影响 (刘潇, 2019)。高效氯氰菊酯 (Beta-cypermethrin), 属拟除虫菊酯类杀虫剂, 作用靶

标是电压门控钠通道(VGSCs), 钠离子通道靶标敏感度降低可导致机体对拟除虫菊酯类杀虫剂产生击倒抗性(Knockdownresistance, kdr)(陈浩哲等, 2023)。作为一种高效、广谱、速效的杀虫剂, 具有强毒性, 可破坏昆虫神经系统, 对昆虫有很高的胃毒和触杀作用(王春光等, 2010; 刘琼琼, 2019), 因而被广泛用于大田鳞翅目、鞘翅目及蚜虫等多种农业害虫的防治(Palmquist *et al.*, 2012; Pansa *et al.*, 2015)。王德森等(2010)研究表明高效氯氰菊酯触杀性强, 对卷蛾分索赤眼蜂 *Trichogrammatoidea bactrae* 成蜂存活有极不利影响。

在田间控害中, 杀虫剂、杀菌剂等化学合成药剂的广泛使用, 不仅会使害虫产生抗药性(韩文素等, 2011; 伍一军, 2020a), 同时会对有益节肢动物及寄生蜂等天敌昆虫造成一定伤害, 降低有益节肢动物及寄生蜂作为天敌昆虫的自然控害作用。在农业生态系统中, 杀虫剂施用后会随着时间的推移递减到亚致死浓度(Boina *et al.*, 2009), 虽然不直接导致昆虫死亡, 但间接影响昆虫行为、生长发育及繁殖能力(Yao *et al.*, 2015)。杀虫剂或其他有害物质可打破昆虫体内正常代谢平衡, 诱发大量活性氧或自由基积累, 活性氧(Reactive oxygen species, ROS)可氧化脂肪、破坏蛋白质和DNA, ROS脂质过氧化产生丙二醛(Malondialdehyde, MDA), 而MDA在机体内的过量积累会破坏肠道细胞结构, 使机体受损。线粒体呼吸链复合物I(Mitochondrial respiratory chain complex I, MRCC I)是产生ROS的主要位点, 能够驱动三磷酸腺苷(Adenosine triphosphate, ATP)的合成(Koopman *et al.*, 2012), ATP能为生命活动提供能量(Fontecilla-Camps, 2021)。昆虫为应对外界环境刺激, 进化出一系列解毒机制, 形成了解毒酶包括羧酸酯酶(Carboxylesterase, CarE)、谷胱甘肽S-转移酶(Glutathione S-transferase, GSTs)、细胞色素P450(Cytochrome P450, CYP450)等和保护酶包括超氧化物歧化酶(Superoxide dismutase, SOD)、过氧化氢酶(Catalase, CAT)、过氧化物酶(Peroxidase,

POD)这2种重要酶系。当昆虫受到杀虫剂、温度等不利因素胁迫时, 2种酶系会发生变化, 以清除或分解昆虫体内有毒有害物质, 从而减轻对昆虫机体造成的损伤, (Desneux *et al.*, 2007)。

本研究旨在研究3种杀虫剂对螟黄赤眼蜂寄生功能、酶活性及线粒体呼吸链复合物I(MRCC I)、三磷酸腺苷(ATP)、活性氧(ROS)、丙二醛(MDA)含量的影响, 研究结果可为理解杀虫剂对螟黄赤眼蜂的毒性作用机理提供依据, 为杀虫剂和天敌在田间的协同应用提供参考, 以便于达到更好的生物防治效果。

1 材料与方法

1.1 供试昆虫

寄主米蛾 *Corcyra cephalonica*: 在(26±1)℃、相对湿度75%±5%、自然光照的室内条件下, 以麦麸、豆面、玉米面、白面饲养繁育多代。以总饲料: 水=100:15的比例进行饲料配制。米蛾产卵后收集卵。将新鲜米蛾卵在25 W紫外灯下灭活45 min后均匀散布在涂有白乳胶的干净卡片上(2.5 cm×4 cm)制成卵卡。

螟黄赤眼蜂: 采自山西省运城市盐湖区泓芝驿镇梨园梨小食心虫 *Grapholitha molesta* 的寄生卵, 羽化后经鉴定纯化, 在温度(26±1)℃、相对湿度75%±5%、光周期为15L:9D的实验室饲养条件下, 以米蛾卵作为寄主繁育多代备用。饲养期间不接触任何杀虫剂。试验所用螟黄赤眼蜂为羽化12 h内的成蜂。

1.2 供试杀虫剂及化学试剂

96%阿维菌素原药, 购自河北威远生化农药有限公司; 97.3%吡虫啉购自江苏常隆农化有限公司; 4.5%的高效氯氰菊酯原药, 购自天津汇源化学制品有限公司。

昆虫活性氧(ROS)、昆虫超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)、过氧化氢酶(CAT)、谷胱甘肽S-转移酶(GSTs)、细胞色素P450(CYP450)、羧酸酯酶(CarE)、丙二醛(MDA)、线粒体呼吸链复合物I(MRCC I)、

三磷酸腺苷 (ATP) 等 Elisa kit 试剂盒均购自 Andy Gene 公司。

1.3 亚致死浓度杀虫剂对螟黄赤眼蜂搜寻效应及功能反应的影响

根据前期实验毒力结果 (朱文雅等, 2021), 用丙酮将 3 种杀虫剂分别配置至 LC_{50} , 以丙酮处理作为对照。吸取 0.1 mL 药液加入高为 6 cm, 直径为 1.5 cm (内表面积为 30.02 cm^2) 指形管内, 匀速转动指形管, 使杀虫剂均匀分布在管内壁, 形成药膜。待丙酮挥发完全后, 将螟黄赤眼蜂雌雄成蜂引入指形管, 用黑布封口, 放至温度 (26 ± 1) $^{\circ}\text{C}$ 、相对湿度 $75\%\pm 5\%$ 的人工气候培养箱 (RGLC-P160B, 合肥达斯卡特生物科技有限公司) 内 8 h 后, 将存活的雌蜂引入到放有提前准备好的、不同密度的新鲜米蛾卵卡的指形管中供其寄生, 卵卡密度设置为 20、30、50、60、100、120、150、200 粒/张, 用黑布将试管封口后, 放入温度 (26 ± 1) $^{\circ}\text{C}$ 、相对湿度 $75\%\pm 5\%$ 的人工气候培养箱内待其寄生。每个处理 1 头雌蜂, 重复 20 次, 5 d 后统计其黑色卵数。

1.4 亚致死浓度杀虫剂对螟黄赤眼蜂酶活性和物质含量的影响

将 3 种杀虫剂浓度配置至 LC_{50} , 并在指形管内形成均匀的药膜, 待杀虫剂处理 8 h 后将存活的雌蜂分别引入离心管内 [(200 $\pm$ 50) 头], 加入 0.5 mL PBS (pH 7.2-7.4) 缓冲液。在冰上研磨混匀, 4 $^{\circ}\text{C}$ 下 2 000 r/min 离心 15 min 后, 取上清液放入新的无菌离心管作为酶源, 进行解毒酶、保护酶的酶活性及线粒体呼吸链复合物 I (MRCC I)、三磷酸腺苷 (ATP)、活性氧 (ROS)、丙二醛 (MDA) 等物质含量测定。

分别用 ELISA 试剂盒按照说明书上的步骤测定解毒酶、保护酶活性及 MRCC I、ATP、ROS 和 MDA 含量。每个处理重复 3 次。具体操作步骤如下: 在酶标包被板上加入 50 μL 样品稀释液做为空白孔, 加入 40 μL 样品稀释液到待测样品孔内, 再加入 10 μL 待测样品作为待测样品孔, 轻轻晃动混匀; 将酶标包被板用封板膜密封,

放入 37 $^{\circ}\text{C}$ 水浴锅温育 30 min; 同时将对应的 30 倍浓缩洗涤液用蒸馏水 30 倍稀释后备用, 待温育结束后, 去除封板膜, 将包被板内液体去除并甩干, 再将配置好的洗涤液取 300 μL 各自滴入包被板进行洗涤, 静置 30 s, 倒出洗涤液然后拍干, 重复 5 次; 待洗涤结束后, 除空白孔外其余孔分别加入 3 种酶标试剂 50 μL , 然后重复温育、洗液, 洗液 5 次; 在每个孔内加入对应的 50 μL 显色剂 A、再加入 50 μL 显色剂 B, 轻轻摇晃混匀, 37 $^{\circ}\text{C}$ 避光显色 15 min; 显色完毕后分别在每孔加入终止液 50 μL , 终止反应 (蓝色转黄色); 最后在 450 nm 波长下测量各样品孔吸光度 (Synergy HTX, 美国伯滕仪器有限公司)。

1.5 数据分析

所有数据均采用 Excel 2025 进行统计分析, 计算螟黄赤眼蜂搜寻效应与寄主密度拟合方程及圆盘方程, 功能反应用 Holling II 型圆盘方程进行拟合: $N_a = aTN/(1 + aT_hN)$ 。搜寻效应和寄主密度拟合方程: $S = a/(1 + aT_hN)$ (Holling, 1959; 唐超等, 2006; 张亮等, 2022)。式中: N 为米蛾卵密度, N_a 为寄生量 (即黑色卵数), 当 $N \rightarrow \infty$ 时, $N_a = 1/T_h$, 此时 N_a 为最大寄生量; a 为瞬时攻击率; T 为总寄生时间 (由于经过杀虫剂处理后, 螟黄赤眼蜂生命体征大幅下降, 仅有少数赤眼蜂存活时间大于 24 h, 所以控制所有赤眼蜂寄生时间为 1 d=24 h); T_h 为寄生蜂寄生 1 粒米蛾卵所需的时间。

利用 Origin 2021 制作功能反应类型曲线图; 利用 IBM SPSS Statistics 22.0 软件中的 Duncan 氏新复极差法检验对寄生量、酶活性进行多重比较, 统计数据用平均值 $\pm$ 标准差 (mean $\pm$ SD) 表示, $P < 0.05$ 表示差异显著。

2 结果与分析

2.1 杀虫剂处理后对螟黄赤眼蜂对米蛾卵搜寻效应的影响

经 3 种杀虫剂处理后螟黄赤眼蜂对米蛾卵

搜寻效应随着米蛾卵密度增加而降低,其中阿维菌素处理组对每个密度下米蛾卵的搜寻效应,始终低于对照、吡虫啉和高效氯氰菊酯处理组。搜寻效应大小依次是吡虫啉 > 高效氯氰菊酯 > 阿维菌素 (图 1)。

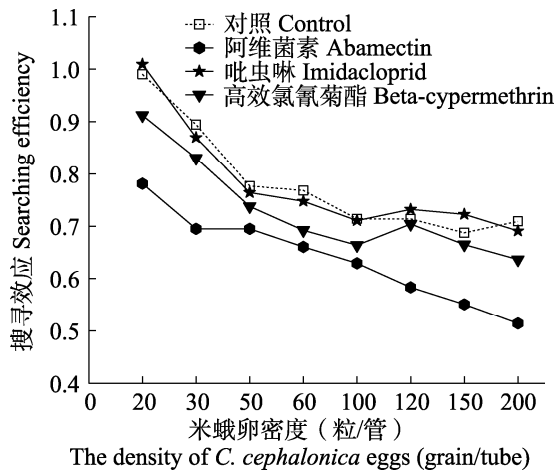


图 1 杀虫剂处理后螟黄赤眼蜂对米蛾卵的搜寻效应
Fig. 1 Searching efficiency of *Trichogramma chilonis* on *Corcyra cephalonica* eggs after insecticide treatment

对照: 丙酮。下图和下表同。

Control: Acetone. The same below.

2.2 杀虫剂处理后对螟黄赤眼蜂对米蛾卵寄生量的影响

在实验设定范围内,将功能反应圆盘方程拟合计算得到的理论值与实际值进行统计,以此判断杀虫剂对天敌实际寄生效能的干扰程度,从而调整防控策略。3种杀虫剂处理后,螟黄赤眼蜂对米蛾卵的寄生量随着米蛾卵密度增加而增加。当米蛾卵密度为 200 粒时,螟黄赤眼蜂对米蛾卵的寄生量较对照组没有显著差异(阿维菌素: $P = 0.172$; 吡虫啉: $P = 0.552$ 和高效氯氰菊酯: $P = 0.890$); 当米蛾卵密度为 150 粒时,3种杀虫剂处理后的寄生量较对照组显著降低(阿维菌素: $P = 0.009$; 吡虫啉: $P = 0.030$ 和高效氯氰菊酯: $P = 0.070$); 当米蛾卵密度为 20、30、50、60、100 和 120 粒时,阿维菌素处理组的螟黄赤眼蜂对米蛾卵的寄生量较对照组显著降低(20 粒: $P = 0.001$; 30 粒: $P = 0.001$; 50 粒: $P < 0.001$; 60 粒: $P < 0.001$; 100 粒: $P = 0.005$ 和 120 粒: $P =$

0.002),吡虫啉处理较对照组无显著差异(20 粒: $P = 0.720$; 30 粒: $P = 0.280$; 50 粒: $P = 0.280$; 60 粒: $P = 0.552$; 100 粒: $P = 0.483$; 120 粒: $P = 0.126$),米蛾卵密度在 30 ($P = 0.046$)、50 ($P = 0.005$) 和 120 ($P = 0.009$) 粒时,高效氯氰菊酯处理的寄生量较对照组显著降低,米蛾卵密度在 20 ($P = 0.127$)、60 ($P = 0.703$) 和 120 ($P = 0.482$) 粒时,高效氯氰菊酯处理较对照组无显著差异(表 1)。

2.3 杀虫剂处理后对螟黄赤眼蜂对米蛾卵寄生功能的影响

根据表 1 功能反应圆盘方程拟合计算得到的理论值与实测值,进行寄生功能分析。3种杀虫剂处理后,螟黄赤眼蜂对米蛾卵的寄生数随着米蛾卵密度增加而增加,但与对照组相比,3种杀虫剂处理后,螟黄赤眼蜂对米蛾卵的寄生数除 200 粒外均显著降低(20 粒: $P = 0.004$; 30 粒: $P < 0.001$; 50 粒: $P < 0.001$; 60 粒: $P < 0.001$; 100 粒: $P = 0.001$; 120 粒: $P = 0.003$; 150 粒: $P = 0.001$)(图 2: B-D)。其中阿维菌素处理组的米蛾卵密度在到达一定量后,寄生量增加速度也逐渐变慢,趋于平稳,且阿维菌素处理组的寄生数降低趋势最为明显(图 2: B)。

2.4 杀虫剂处理后对螟黄赤眼蜂功能反应模型参数的影响

结合螟黄赤眼蜂对米蛾卵的寄生功能反应曲线(图 2: A-D),对 3 种不同杀虫剂处理下的寄生功能反应参数进行统计分析。结果表明,亚致死浓度杀虫剂处理后螟黄赤眼蜂功能反应模型的结构没有改变,仍符合 Holling II 模型,只是模型参数发生了变化(表 2)。与对照相比,阿维菌素和高效氯氰菊酯处理后瞬间攻击率 α 分别降低了 19.72% 和 9.05%,猎物处理时间分别延长了 1.77 和 1.14 倍,最大寄生量分别降低了 43.71% 和 12.91%; 吡虫啉处理后瞬间攻击率 α 提高 8.54%,猎物处理时间延长了 1.23 倍,最大寄生量降低 18.51%。寄生效能大小依次是吡虫啉 > 高效氯氰菊酯 > 阿维菌素,分别降低了 11.55%、20.79% 和 54.81%(表 2)。

表 1 杀虫剂处理后螟黄赤眼蜂对米蛾卵的寄生量
Table 1 The amount of parasitism of *Trichogramma chilonis* on *Coreyra cephalonica* eggs after insecticide treatment

杀虫剂 Insecticides		寄生量（头/管）Parasitism quantity (ind./tube)							
		20	30	50	60	100	120	150	200
对照 Control	实际寄生量 Actual parasitism quantity	18.40±1.34 a	27.60±2.30 ab	42.00±2.45 a	43.20±2.17 a	51.60±12.86 a	51.60±6.35 a	56.20±7.73 a	52.40±7.96 a
	理论寄生量 Theoretical parasitism quantity	19.45	26.17	36.18	40.01	50.73	54.37	58.58	63.49
	实际寄生量 Actual parasitism quantity	14.00±1.58 b	21.00±1.87 c	21.60±6.54 b	25.20±5.85 b	28.80±3.56 b	34.80±5.54 b	39.60±7.64 c	45.80±5.81 a
	理论寄生量 Theoretical parasitism quantity	14.23	18.57	24.58	26.75	32.46	34.29	36.34	38.65
吡虫啉 Imidacloprid	实际寄生量 Actual parasitism quantity	18.00±2.00 a	29.00±1.41 a	40.00±6.78 a	42.00±4.64 a	46.80±6.87 a	44.00±7.65 ab	45.20±5.26 b	49.60±6.19 a
	理论寄生量 Theoretical parasitism quantity	19.62	25.77	34.40	37.55	45.95	48.67	51.73	55.21
	实际寄生量 Actual parasitism quantity	16.60±1.95 a	24.60±1.67 b	35.80±2.59 a	42.40±3.97 a	47.00±5.43 a	40.60±3.21 ab	46.80±6.42 b	51.80±5.36 a
	理论寄生量 Theoretical parasitism quantity	17.51	23.48	32.30	35.64	44.95	48.09	51.70	55.89

同列实际寄生量数据后标有不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$, Duncan 氏新复极差法检验)。
Data with different lowercase letters in the same line indicate significant differences between treatments ($P < 0.05$, Duncan's multiple range test).

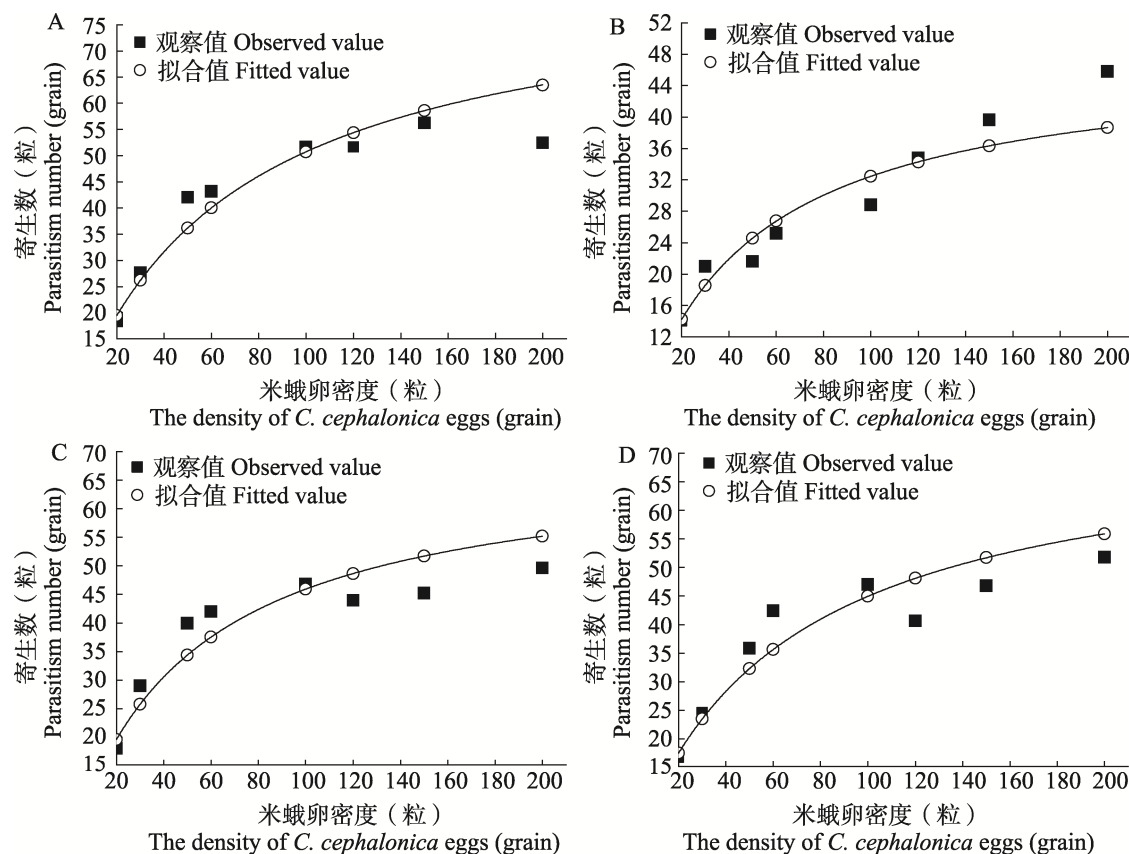


图 2 杀虫剂处理后螟黄赤眼蜂对米蛾卵寄生功能的反应曲线
Fig. 2 Response curve of *Trichogramma chilonis* to parasitism functional of *Corcyra cephalonica* eggs after insecticide treatment

A. 对照; B. 阿维菌素; C. 吡虫啉; D. 高效氯氰菊酯。
A. Control; B. Abamectin; C. Imidacloprid; D. Beta-cypermethri.

表 2 杀虫剂对螟黄赤眼蜂寄生功能反应参数的影响
Table 2 Effect of insecticides on parasitic functional response parameters of *Trichogramma chilonis*

杀虫剂 Insecticides	功能反应方程 Equation of functional response	R^2	瞬间攻击率 α Instantaneous attack rate	处理时间 T_h (d) Handling time (d)	寄生效能 Parasitic efficiency	寄生上限 (粒) Maximum parasitizing capacity, $N_{a\max}$ (grain)
对照 Control	$1.261\ 8N/(1+0.014\ 9N)$	0.939	1.261 8	0.011 8	107.05	84.84
阿维菌素 Abamectin	$1.013\ 0N/(1+0.021\ 2N)$	0.925	1.013 0	0.020 9	48.38	47.76
吡虫啉 Imidacloprid	$1.369\ 6N/(1+0.019\ 8N)$	0.908	1.369 6	0.014 5	94.69	69.14
高效氯氰菊酯 Beta-cypermethrin	$1.147\ 5N/(1+0.015\ 5N)$	0.907	1.147 5	0.013 5	84.79	73.89

2.5 亚致死浓度杀虫剂对螟黄赤眼蜂酶活性及 ROS、MDA、MRCC | 和 ATP 等物质含量的影响

2.5.1 对螟黄赤眼蜂解毒酶活性的影响 3 种

不同类型的杀虫剂处理后, 螟黄赤眼蜂体内的解毒酶活性均上调。其中谷胱甘肽 *S*-转移酶 (GSTs) 活性从大到小依次为吡虫啉>高效氯氰菊酯>阿维菌素>对照, 活性依次为 0.266、0.193、

0.186 和 0.103 [mmol/(min·mg)], 其中吡虫啉处理组上调最为显著 ($P < 0.001$), 较对照组增加 2.58 倍, 其次是高效氯氰菊酯 ($P < 0.001$) 和阿维菌素 ($P = 0.043$), 较对照组显著增加 1.87 和 1.81 倍 (图 3)。细胞色素 CYP450 活性从大到小依次为阿维菌素>高效氯氰菊酯>吡虫啉>对照, 活性依次为 0.195、0.175、0.142 和 0.093 [mmol/(min·mg)], 其中阿维菌素处理组上调最为显著 ($P = 0.005$), 较对照组增加 2.09 倍, 其

次是高效氯氰菊酯 ($P = 0.013$) 和吡虫啉 ($P = 0.013$), 较对照组显著增加 1.88 和 1.53 倍 (图 3)。羧酸酯酶 (CarE) 活性从大到小依次为高效氯氰菊酯>吡虫啉>阿维菌素>对照, 活性依次为 0.201、0.167、0.164 和 0.109 [mmol/(min·mg)], 其中高效氯氰菊酯处理组上调最为显著 ($P = 0.002$), 较对照组分别增加 1.84 倍, 其次是吡虫啉 ($P = 0.017$) 和阿维菌素 ($P = 0.022$), 较对照组分别增加 1.84、1.53 和 1.5 倍 (图 3)。

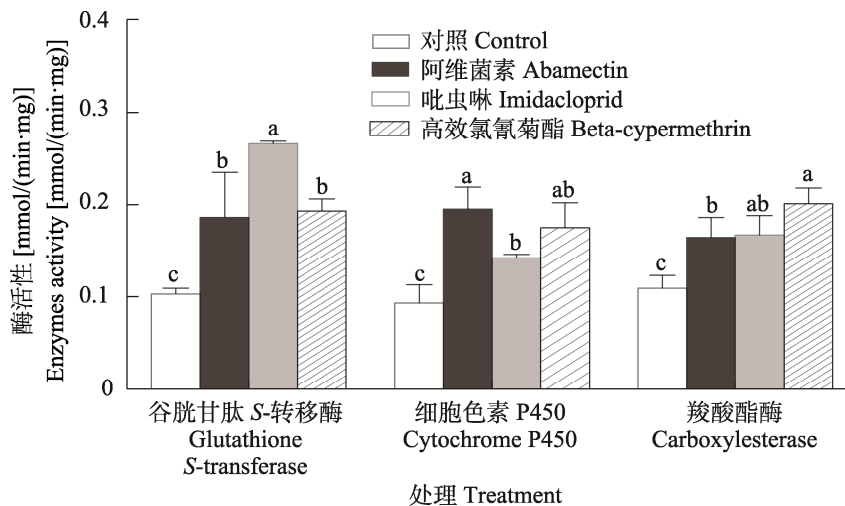


图 3 杀虫剂处理后螟黄赤眼蜂体内解毒酶活性变化

Fig. 3 Changes of detoxification enzyme activity in *Trichogramma chilonis* after insecticide treatment

图中数据为平均值±标准差。柱上不同字母表显著差异 ($P < 0.05$, Duncan 氏新复极差法检验)。下图同。

Data in the figure are presented as mean±SD, and different letters above bars indicate significant difference ($P < 0.05$, Duncan's multiple range test). The same below.

2.5.2 对螟黄赤眼蜂保护酶活性的影响 3 种杀虫剂处理后, 螟黄赤眼蜂体内的过氧化物酶 (POD) 的活性均有所增加, 其中吡虫啉处理组最为显著 ($P < 0.001$), POD 活性从大到小依次为吡虫啉>高效氯氰菊酯>阿维菌素>对照, 活性依次为 0.227、0.152、0.115 和 0.064 [mmol/(min·mg)], 较对照组分别增加 3.54、2.38 和 1.80 倍 (图 4)。吡虫啉 ($P = 0.082$) 和高效氯氰菊酯 ($P = 0.110$) 处理组对螟黄赤眼蜂体内的超氧化物歧化酶 (SOD) 活性均无显著影响, 而阿维菌素处理组的 SOD 活性显著受到抑制 ($P = 0.05$), 其活性为 0.617 [mmol/(min·mg)], 较对照组降低 0.84 倍 (图 4)。高效氯氰菊酯处理组的螟黄赤眼蜂体内的过氧化氢酶 (CAT) 活性显

著升高 ($P = 0.034$), 活性为 0.221 [mmol/(min·mg)], 较对照组增加 1.25 倍。阿维菌素 ($P = 0.059$) 和吡虫啉 ($P = 0.979$) 处理组的 CAT 活性较对照组没有显著差异 (图 4)。

2.5.3 对螟黄赤眼蜂 MRCC I、ATP、ROS 和 MDA 含量的影响 3 种杀虫剂处理后, 螟黄赤眼蜂体内的线粒体呼吸链复合物 I (MRCC I) 的含量均有所增加, MRCC I 的含量从大到小依次为吡虫啉>高效氯氰菊酯>阿维菌素>对照, 含量依次为 0.110、0.101、0.097 和 0.069 nmol/mg, 较对照组分别增加 1.59、1.46 和 1.41 倍, 其中吡虫啉对 MRCC I 的诱导作用最为显著 ($P = 0.005$) (图 5)。高效氯氰菊酯处理后, 螟黄赤眼蜂体内的三磷酸腺苷 (ATP) 的含量显著增加

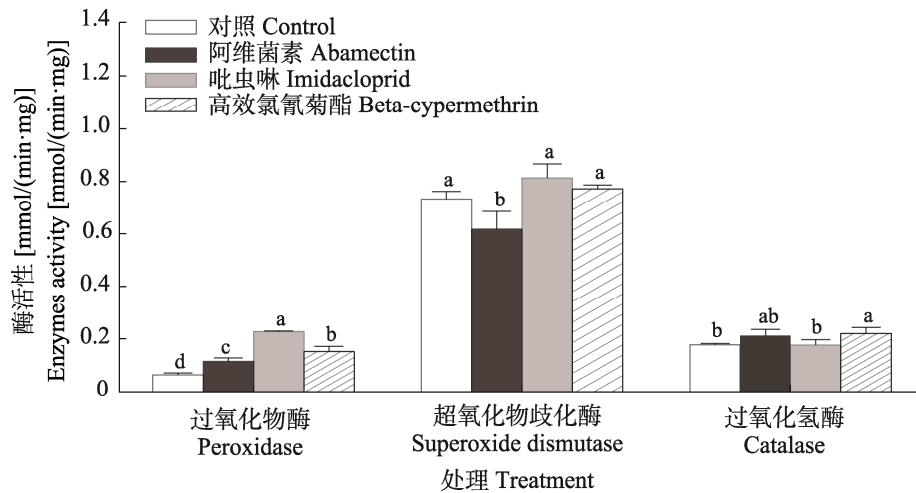


图 4 杀虫剂处理后螟黄赤眼蜂体内保护酶活性变化

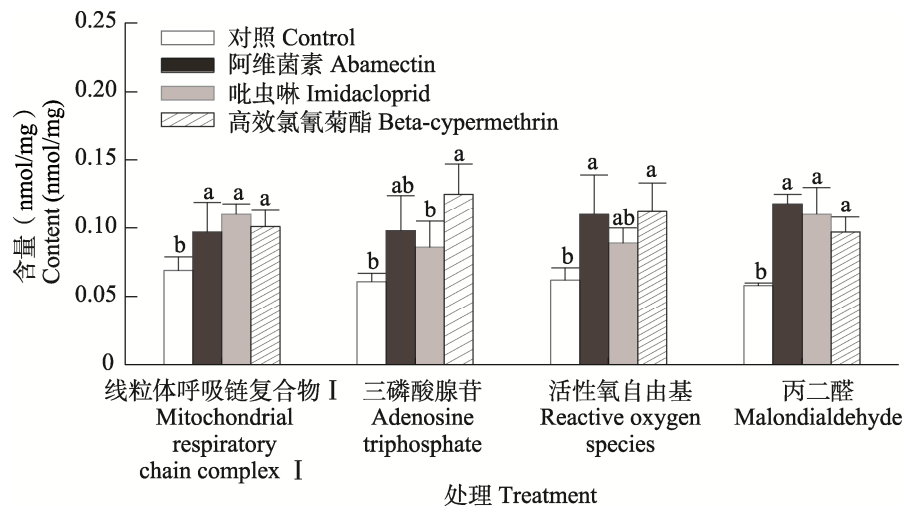
Fig. 4 Changes of protective enzyme activity in *Trichogramma chilonis* after insecticide treatment

图 5 杀虫剂处理后螟黄赤眼蜂体内线粒体呼吸链复合物 I (MRCC I)、三磷酸腺苷 (ATP)、活性氧自由基 (ROS) 和丙二醛 (MDA) 含量变化

Fig. 5 Changes of mitochondrial respiratory chain complex I (MRCC I), adenosine triphosphate (ATP), reactive oxygen species (ROS) and malondialdehyde (MDA) contents in *Trichogramma chilonis* after insecticide treatment

($P = 0.008$), 较对照组增加 2.04 倍, 阿维菌素 ($P = 0.074$) 和吡虫啉 ($P = 0.105$) 处理组对 ATP 的含量较对照无显著影响 (图 5)。

阿维菌素 ($P = 0.050$) 和高效氯氰菊酯 ($P = 0.020$) 处理后, 螟黄赤眼蜂体内的活性氧自由基 (ROS) 含量均显著增加, 较对照组分别增加 1.81 和 1.78 倍, 而吡虫啉处理组对 ROS 的含量无显著影响 ($P = 0.052$), 含量从大到小依次为高效氯氰菊酯>阿维菌素>吡虫啉>对照 (图 5)。螟黄赤眼蜂体内的丙二醛 (MDA) 的含量均有

所增加, MDA 的含量从大到小依次为阿维菌素>吡虫啉>高效氯氰菊酯>对照, 含量依次为 0.118、0.110、0.097 和 0.058 nmol/mg, 较对照组分别增加 2.03、1.90 和 1.67 倍, 其中阿维菌素对 MDA 的诱导作用最为显著 ($P < 0.001$) (图 5)。

3 结论与讨论

天敌的功能反应是研究天敌对害虫寄生能力的一种经典方法, 可用来评价天敌对害虫的控制效能, 天敌对害虫的瞬时攻击率 a 和处理时间

T_h 是衡量天敌作用的重要参数 (Fathipour *et al.*, 2006), 寄生蜂的寄生效能 a/T_h 能够反映寄生蜂对寄主卵的寄生能力强弱, 寄生效能 a/T_h 值越大, 表明控害能力越强 (陈俊谕等, 2013; 钱肖娜等, 2021)。本研究结果表明 3 种杀虫剂处理后, 螟黄赤眼蜂对米蛾卵的寄生量较对照都有所降低, 其中阿维菌素处理组的寄生量降低最为显著。进一步的功能反应拟合结果也表明, 螟黄赤眼蜂对米蛾卵的寄生功能反应符合 Holling II 模型, 阿维菌素和高效氯氰菊酯处理螟黄赤眼蜂后, 对米蛾卵处理时间延长, 瞬间攻击率和寄生效能均降低, 控害能力下降, 其中阿维菌素最为显著。推测原因可能是阿维菌素对螟黄赤眼蜂的毒力更高, 导致螟黄赤眼蜂接触杀虫剂后寄生能力减弱。有类似研究发现, 拟除虫菊酯和阿维菌素能显著降低短管赤眼蜂 *Trichogramma pretiosum* 的寄生率 (Cônsoли *et al.*, 1998; Vianna *et al.*, 2009); 沈佳忠等 (2024) 研究表明氯虫苯甲酰胺能够显著降低螟黄赤眼蜂对米蛾卵寄生效能和防控能力。此外, 赵于菲 (2018) 还证明了亚致死浓度的啉虫脒、吡虫啉和高效氯氰菊酯能显著降低管氏肿腿蜂 *Sclerodermus guani* 雌蜂的寄生率, 延长处理时间。搜寻效应反映了赤眼蜂通过飞行、爬行等方式对寄主卵的搜寻能力, 杀虫剂的施用会引起昆虫的顿感反应影响天敌神经系统进而影响对猎物的搜寻能力 (古德就等, 1991; Singh and Jalali, 1997; Haseeb and Amano, 2002)。本研究发现 3 种杀虫剂处理后螟黄赤眼蜂对米蛾卵的搜寻效应随米蛾卵密度增加而降低, 其中阿维菌素处理组的搜寻效应显著低于对照。王华玲等 (2011) 研究发现, 不同亚致死剂量多杀菌素处理的阿里山潜蝇茧蜂 *Fopius arisanus* 对橘小实蝇 *Bactrocera dorsalis* 卵的搜寻效应随着寄主密度的增大而逐渐降低; 杨桦等 (2013) 研究发现吡虫啉亚致死浓度 (LC_{10}) 处理后川硬皮肿腿蜂 *Sclerodermus sichuanensis* 搜寻能力降低。推测可能与阿维菌素的作用机制有关, 阿维菌素可以作用于氯离子通道, 引起氯离子通道通透性改变, 从而导致神经传递障碍 (Barragry, 1987), 导致神经元膜超极化、麻痹。

阿维菌素对螟黄赤眼蜂行动能力有显著影响, 导致其对猎物的搜索能力减弱, 但具体原因还需通过进一步试验探究。本研究还发现吡虫啉处理后, 虽然螟黄赤眼蜂对米蛾卵的处理时间延长, 寄生量降低, 但寄生效能无显著变化。Ray 等 (2023) 研究结果表明当螟黄赤眼蜂暴露在吡虫啉 LC_{30} 浓度时, 功能反应虽为 Holling II 型, 但赤眼蜂对寄主卵的搜索效率更高, 处理时间更短, 与本实验试验结果存在差异。推测可能低浓度吡虫啉能够刺激螟黄赤眼蜂搜寻米蛾卵, 高浓度吡虫啉则抑制螟黄赤眼蜂对米蛾卵搜寻能力。根据本研究结果, 杀虫剂与天敌在田间协同应用时, 应调整赤眼蜂释放时机, 避免与农药冲突, 提高防治效率。

昆虫受到杀虫剂、高温、干旱、 CO_2 浓度升高等内外源因素胁迫时逐渐生成多种生理机制去应对不利外界环境, 赤眼蜂对杀虫剂的敏感性与杀虫剂的理化性质、化学结构及发生作用时的靶标部位密切相关, 其中解毒酶系和保护酶系是主要的适应方式之一 (王泽华等, 2024)。细胞色素 P450 多功能氧化酶系、谷胱甘肽 S-转移酶及羧酸酯酶是昆虫体内 3 种重要的解毒酶系, 其活力增强能够导致昆虫的代谢抗性 (Tiwari *et al.*, 2011; 陈澄宇等, 2016; 伍一军, 2020b)。本研究发现, 经亚致死浓度阿维菌素、吡虫啉和高效氯氰菊酯处理后, 螟黄赤眼蜂体内的 GSTs、CYP450 和 CarE 3 种解毒酶活性被显著诱导上升, 由此可以推测螟黄赤眼蜂体内解毒酶参与了对 3 种杀虫剂的代谢解毒。类似结果在其他文献中也有报道, 祝军 (2024) 研究发现, 当美国白蛾 *Hyphantria cunea* 受到不同剂量阿维菌素胁迫时, 细胞色素 P450 酶、谷胱甘肽 S-转移酶和羧酸酯酶的活性均有一定程度的升高; 王丹丹等 (2024) 研究发现, 红光熊蜂 *Bombusignitus smith* 受 $0.1 \text{ ng}/\mu\text{L}$ 吡虫啉胁迫后 GST、CarE 和 CYP450 基因均显著高表达, 表明 GST、CarE 和 CYP450 参与了对吡虫啉的代谢解毒; 使用亚致死剂量吡虫啉处理西方蜜蜂 *Apis mellifera*, 谷胱甘肽 S-转移酶活性显著升高 (Li *et al.*, 2017)。解毒酶活性诱导是复杂的过程, 不同解毒酶相互协调完

成代谢解毒过程。

超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)和过氧化氢酶(CAT)是昆虫体内3种重要的抗氧化损伤的保护酶,它们共同发挥清除昆虫体内过剩的活性氧(ROS)的功能,其中SOD催化超氧离子自由基(Superoxide anion radical) $O_2^{\bullet-}$ 歧化生成 H_2O_2 和 O_2 , 是生物细胞内重要的清除自由基的酶(Sheng *et al.*, 2014; 蒋武, 2015), POD又以 H_2O_2 为电子受体催化 H_2O_2 与酚类、苯类及胺类化合物进行氧化还原反应(O'Brien, 2000; Dias *et al.*, 2016), 而 H_2O_2 属于氧化剂有毒物质, CAT又将多余的 H_2O_2 分解为 H_2O 和 O_2 (Corona *et al.*, 2006; 林婷楠等, 2024), 3种保护酶相互协调, 共同维持昆虫体内自由基代谢的动态平衡。研究表明, 在高温、杀虫剂等逆境胁迫下该动态平衡受到破坏时, 会毒害虫体, 最终可能导致昆虫死亡(Gruborlajsic *et al.*, 1996)。也有大量研究表明, 杀虫剂可激发昆虫体内保护酶系的防御应答。本研究发现阿维菌素对螟黄赤眼蜂体内SOD有抑制作用, 使昆虫无法及时清除虫体产生的超氧阴离子自由基($O_2^{\bullet-}$)活性氧; 对POD的活性起诱导作用, 能高效清除赤眼蜂体内的过氧化氢(H_2O_2), 对CAT活性没有显著性影响。孟令昱(2017)的研究结果同样证明阿维菌素抑制朱红毛斑蛾 *Phauda flammans* 幼虫体内SOD的活性, 而对CAT活性无显著性影响。推测阿维菌素作用于螟黄赤眼蜂时可破坏其体内保护酶, 从而达到毒杀效果。吡虫啉对螟黄赤眼蜂体内的POD活性起到诱导作用, 能高效清除赤眼蜂体内的过氧化氢(H_2O_2), 对SOD和CAT的活性没有显著影响, 与侯梦赏等(2020)研究的吡虫啉胁迫后, 意大利蜜蜂 *Apis mellifera ligustica* 哺育蜂的CAT与SOD活力均有显著下调的结果不同, 2种昆虫对吡虫啉有不同的解毒和抗性机制可能是导致研究结果存在差异的原因。高效氯氟氰菊酯对螟黄赤眼蜂体内的POD和CAT活性均起到诱导作用, 对SOD无显著影响, 与王秋月(2020)的研究结果高效氯氟氰菊酯亚致死浓度(LC₃₀)对木瓜秀粉蚧 *Paracoccus marginatus* 2龄若虫体内CAT

活性起到促进作用相似, 推测螟黄赤眼蜂可通过提高其体内保护酶活性, 抵御高效氯氟氰菊酯对自身的伤害。不同作用靶标的杀虫剂对螟黄赤眼蜂的神经毒性存在显著差异, 进而影响其生理功能和行为表现, 最终导致寄生效率的变化, 并决定其在田间的实际防控效果。

线粒体呼吸传递链复合体I位于线粒体内膜上, 是电子呼吸传递链中的一个组成部分, 可以将电子从NADH传递至CoQ, 同时偶联4个质子从线粒体基质泵出膜间隙, 形成跨膜质子梯度, 驱动ATP合成(Kotlyar and Vinogradov, 1990; 吕宝北等, 2018)。ATP能为生命活动提供能量, 其含量的增加意味着生物活性功能升高(Fontecilla-Camps, 2021)。MRCC I也是机体中ROS产生的主要位点(Koopman *et al.*, 2012), ROS对生物体有毒性, 可氧化脂肪、破坏蛋白质和DNA, ROS脂质过氧化产生MDA, 而MDA在机体内的过量积累会破坏肠道细胞结构, 影响线粒体的正常功能, 降低生物能量, 并引起细胞氧化损伤(Després *et al.*, 2007; Nesmelov *et al.*, 2018; 鲁何东等, 2023)。本研究发现阿维菌素、吡虫啉和高效氯氟氰菊酯处理均可显著增加螟黄赤眼蜂体内MRCC I的含量; 阿维菌素和吡虫啉处理后赤眼蜂体内ATP的含量无显著变化, 而高效氯氟氰菊酯处理后, 其体内的ATP含量显著增加; 3种杀虫剂胁迫后螟黄赤眼蜂体内ROS和MDA含量显著升高, 进而激发氧化损伤, 可能导致赤眼蜂机体细胞程序性凋亡(Matsumura *et al.*, 2017), 以致寄生能力下降, 降低对害虫的防控。低剂量吡虫啉处理黑腹果蝇 *Drosophila melanogaster* 后, 引起线粒体功能障碍, ROS水平迅速增加(Zhong *et al.*, 2016; Martelli *et al.*, 2020)。李静静(2022)的研究结果同样发现亚致死浓度啉虫酰胺可以导致中华通草蛉 *Chrysoperla sinica* 体内ROS和MDA大量积累。推测阿维菌素和拟除虫菊酯通过CYP450代谢产生活性氧(ROS↑), 引发脂质过氧化(MDA↑), 损伤线粒体功能。短期胁迫还可增强糖酵解(Warburg效应), 进一步增加ATP生成(ATP↑)(刘媛等, 2024)。但是3种杀虫剂处理后MRCC I、

ATP、ROS 和 MDA 升高的具体原因, 还需要对杀虫剂胁迫后螟黄赤眼蜂的细胞功能、神经信号通路和代谢抗性进一步研究。

本研究从螟黄赤眼蜂对米蛾卵的搜寻效应、处置时间、最大寄生量和寄生效能等参数研究阿维菌素、吡虫啉和高效氯氰菊酯 3 种杀虫剂亚致死浓度对螟黄赤眼蜂寄生功能的影响, 通过对比保护酶系、解毒酶系的活性变化和活性氧 (ROS)、丙二醛 (MDA)、MRCC I 及 ATP 等物质含量变化, 进一步从氧化损伤及线粒体呼吸能量合成等方面, 探讨阿维菌素、吡虫啉和高效氯氰菊酯 3 种杀虫剂对螟黄赤眼蜂亚致死效应的作用机制。螟黄赤眼蜂与杀虫剂的协同应用是有害生物综合治理 (Integrated Pest Management, IPM) 成功的关键, 研究结果可为杀虫剂与螟黄赤眼蜂科学协同防治害虫提供基础依据, 以及为理解杀虫剂亚致死效应提供新视角。

参考文献 (References)

- Ballal CR, Srinivasan R, Jalali SK, 2009. Evaluation of an endosulfan tolerant strain of *Trichogramma chilonis* on cotton. *BioControl*, 54(6): 723–732.
- Barragry TB, 1987. A review of the pharmacology and clinical uses of avermectin. *Canadian Veterinary Journal*, 28(8): 512–517.
- Boina DR, Onagbola EO, Salyani M, Lukasz L, Stelinski LL, 2009. Antifeedant and sublethal effects of imidacloprid on Asian citrus psyllid, *Diaphorina citri*. *Pest Management Science*, 65(8): 870–877.
- Casida JE, Durkin KA, 2013. Neuroactive insecticides: Targets, selectivity, resistance and secondary effects. *Annual Review of Entomology*, 58: 99–117.
- Chen CY, Shi XY, Gao XW, 2016. Mechanism of insect metabolic resistance to pyrethroid insecticides. *Chinese Journal of Pesticide Science*, 18(5): 545–555. [陈澄宇, 史雪岩, 高希武, 2016. 昆虫对拟除虫菊酯类杀虫剂的代谢抗性机制研究进展. *农药学报*, 18(5): 545–555.]
- Chen HZ, Weng YY, Zhou Q, Li W, Hu JC, Wang P, Yang CY, Wang SG, 2023. Research progress on the mechanism of pyrethroids' action on insect neural signaling pathways and their metabolic resistance. *Journal of Hangzhou Normal University (Natural Science Edition)*, 22(4): 420–431. [陈浩哲, 翁盈盈, 周倩, 李玟, 胡景超, 王平, 杨陈雨, 王世贵, 2023. 拟除虫菊酯对昆虫神经信号通路的作用机制及其代谢抗性研究进展. *杭州师范大学学报(自然科学版)*, 22(4): 420–431.]
- Chen JY, Chen TY, Fu YG, Zhang FP, Han DY, Niu LM, 2013. Functional response of *Encarsia guadeloupae* Viggiani on *Aleurodicus dispersus* Russell. *Chinese Journal of Biological Control*, 29(2): 175–180. [陈俊谕, 陈泰运, 符悦冠, 张方平, 韩冬银, 牛黎明, 2013. 哥德恩蚜小蜂对螺旋粉虱的功能反应研究. *中国生物防治学报*, 29(2): 175–180.]
- Cônsoi FL, Parra JRP, Hassan SA, 1998. Side-effects of insecticides used in tomato fields on the egg parasitoid *Trichogramma pretiosum* Riley (Hym. Trichogrammatidae), a natural enemy of *Tuta absoluta* (Meyrick) (Lep., Gelechiidae). *Journal of Applied Entomology*, 122(1/5): 43–47.
- Corona M, Robinson G, 2006. Genes of the antioxidant system of the honey bee: annotation and phylogeny. *Insect Molecular Biology*, 15(5): 687–701.
- Dai XY, Wang RJ, Liu Y, Chen H, Su L, Zhang F, Li HM, Zhao JF, Zheng L, Zhai YF, 2023. Comparison of parasitism ability of three indigenous *Trichogramma* species to *Tuta absoluta* (Meyrick) eggs. *Shandong Agricultural Sciences*, 55(11): 30–34. [代晓彦, 王瑞娟, 刘艳, 陈浩, 苏龙, 张峰, 李红梅, 赵金凤, 郑礼, 翟一凡, 2023. 三种本土赤眼蜂对番茄潜叶蛾卵的寄生能力比较. *山东农业科学*, 55(11): 30–34.]
- Desneux N, Decourtye A, Delpuech JM, 2007. The sublethal effects of pesticides on beneficial arthropods. *Annual Review of Entomology*, 52: 81–106.
- Després L, David JP, Gallet C, 2007. The evolutionary ecology of insect resistance to plant chemicals. *Trends in Ecology and Evolution*, 22(6): 298–307.
- Dias FA, Gandara ACP, Perdomo HD, Gonçalves RS, Oliveira CR, Oliveira RLL, Citelli M, Polycarpo CR, Santesmasses D, Mariotti M, GuigóR, Braz GR, Missirlis F, Oliveira PL, 2016. Identification of a selenium-dependent glutathione peroxidase in the blood-sucking insect *Rhodnius prolixus*. *Insect Biochemistry and Molecular Biology*, 69: 105–114.
- Du WM, Lin Y, Zang LS, Zhang C, Liu XJ, Ruan CC, 2016. Interspecific interference of *Trichogramma japonicum* with other two *Trichogramma* species on eggs of the rice striped stem borer, *Chilo suppressalis* (Walker). *Journal of Environmental Entomology*, 38(3): 488–493. [杜文梅, 林英, 臧连生, 张晨, 刘显娇, 阮长春, 2016. 稻螟赤眼蜂与二种赤眼蜂对水稻二化螟卵寄生竞争作用. *环境昆虫学报*, 38(3): 488–493.]
- Fathipour Y, Hosseini A, Talebi AA, Moharramipour S, 2006. Functional response and mutual interference of *Diaeretiella*

- rapae* (Hymenoptera: Aphidiidae) on *Brevicoryne brassicae* (Homoptera: Aphididae). *Entomologica Fennica*, 17(2): 90–97.
- Fontecilla-Camps JC, 2021. Primordial bioenergy sources: The two facets of adenosine triphosphate. *Journal of Inorganic Biochemistry*, 216: 111347.
- Gardner J, Hoffmann MP, Pitcher SA, Harper JK, 2011. Integrating insecticides and *Trichogramma ostrinae* to control European corn borer in sweet corn: Economic analysis. *Biological Control*, 56(1): 9–16.
- Gruborlajsic G, Block W, Jovanovic A, Worland R, 1996. Antioxidant enzymes in larvae of the Antarctic fly, *Belgica antarctica*. *Cryo-Letters*, 17(1): 39–42.
- Gu DJ, Yu ME, Hou RH, Li ZH, 1991. The effects of sublethal doses of insecticides on the foraging behaviour of parasitoid, *Diaeretiella rapae* (Hym. Braconidae). *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.]
- Han WS, Wang LH, Sun HH, Gao XW, 2011. Research progress on sublethal effects of insecticides on insect. *China Plant Protection*, 31(11): 15–20. [韩文素, 王丽红, 孙姗姗, 高希武, 2011. 杀虫剂对昆虫的亚致死效应的研究进展. 中国植保导刊, 31(11): 15–20.]
- Haseeb M, Amano H, 2002. Effects of contact, oral and persistent toxicity of selected pesticides on *Cotesia plutellae* (Hym., Braconidae), a potential parasitoid of *Plutella xylostella* (Lep., Plutellidae). *Journal of Applied Entomology*, 126(1): 8–13.
- He JC, Wang KY, Hussain M, Wei Q, Wan PJ, Lai FX, Wang WX, Fu Q, 2024. Effects of emamectin benzoate and avermectin on the fecundity of *Nilaparvata lugens* (Hemiptera: Delphacidae) and the pest control capacity of parasitic wasp, *Anagrus nilaparvatae* (Hymenoptera: Mymaridae). *Acta Entomologica Sinica*, 67(4): 538–548. [何佳春, 王康逸, Mubashar Hussain, 魏琪, 万品俊, 赖凤香, 王渭霞, 傅强, 2024. 甲维盐与阿维菌素对褐飞虱繁殖力及天敌稻虱缨小蜂控害能力的影响. 昆虫学报, 67(4): 538–548.]
- Holling CS, 1959. Some characteristics of simple types of predation and parasitism. *Canadian Entomologist*, 91(7): 385–398.
- Hou MS, Cheng XF, Qiu YM, Zhu YN, Zhao BA, Li ZG, Su SK, 2020. Effects of imidacloprid on immune detoxification-related gene expression and immune detoxification enzymes activity in nurse bees of *Apis mellifera ligustica*. *Journal of Environmental Entomology*, 42(6): 1415–1423. [侯梦赏, 程雪芬, 邱园妹, 朱雅楠, 赵必安, 李志国, 苏松坤, 2020. 吡虫啉胁迫对意大利蜜蜂哺育蜂免疫解毒相关基因表达及酶活性的影响. 环境昆虫学报, 42(6): 1415–1423.]
- Jiang W, 2015. Study on the superoxide dismutase and catalase-like activities of simulant. Master dissertation. Wuhan: Wuhan Institute of Technology. [蒋武, 2015. 超氧化物歧化酶及过氧化氢酶模拟物的研究. 硕士学位论文. 武汉: 武汉工程大学.]
- Jin L, Zhang WZ, Zhang CQ, Zhu GN, Liu YH, 2021. Evaluation of toxicity of nine commonly used pesticides to *Trichogramma chilonis*. *Chinese Journal of Pesticide Science*, 23(4): 716–723. [金磊, 张文哲, 张传清, 朱国念, 刘亚慧, 2021. 戊唑醇等 9 种农药对螟黄赤眼蜂的毒性评价. 农药学报, 23(4): 716–723.]
- Koopman WJ, Willems PH, Smeitink JA, 2012. Monogenic mitochondrial disorders. *The New England Journal of Medicine*, 366(12): 1132–1141.
- Kotlyar AB, Vinogradov AD, 1990. Slow active/inactive transition of the mitochondrial NADH-ubiquinone reductase. *Biochimica et Biophysica Acta*, 1019(2): 151–158.
- Li JJ, 2022. Sublethal effect of tolfenpyrad on *Chrysoperla sinica* abstract. Master dissertation. Taian: Shandong Agricultural University. [李静静, 2022. 唑虫酰胺对中华通草蛉的亚致死效应. 硕士学位论文. 泰安: 山东农业大学.]
- Li ZG, Li M, He JF, Zhao XM, Chaimanee V, Huang WF, Nie HY, Zhao YZ, Su SK, 2017. Differential physiological effects of neonicotinoid insecticides on honey bees: A comparison between *Apis mellifera* and *Apis cerana*. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 140: 1–8.
- Lin TN, Zhao M, Wu CY, Wang YQ, Wang J, Zhu JY, 2024. Effects of parasitization by *Scleroderma guani* and injection of its venom on the expression of catalase gene in *Tenebrio molitor*. *Journal of Environmental Entomology*, 46(1): 194–200. [林婷婷, 赵满, 吴朝妍, 王玉琴, 王俊, 朱家颖, 2024. 管氏肿腿蜂寄生和注射其毒液对黄粉虫过氧化氢酶基因表达的影响. 环境昆虫学报, 46(1): 194–200.]
- Liu QQ, 2019. Acute toxicity and enzyme activity of pyrethroid pesticides on *Apis mellifera ligustica* and *Apis cerana cerana*. Master dissertation. Hefei: Anhui Agricultural University. [刘琼琼, 2019. 拟除虫菊酯类农药对意大利蜜蜂和中华蜜蜂的急性毒性及酶活性的影响. 硕士学位论文. 合肥: 安徽农业大学.]
- Liu X, 2019. Study on the risk assessment of neonicotinoid insecticides on three species of *Trichogramma*. Master dissertation. Taian: Shandong Agricultural University. [刘潇, 2019. 新烟碱类杀虫剂对三种赤眼蜂毒性效应研究及风险评

- 估. 硕士学位论文. 泰安: 山东农业大学.]
- Liu Y, Qu MJ, Tan JQ, Li MM, Jia FY, Li SZ, Yin LW, Peng XK, Zhou J, 2024. Electroacupuncture inhibits inflammatory response through hexokinase 2-mediated Warburg effect in rats with acute lung injury. *Acupuncture Research*, 49(12): 1289–1295. [刘媛, 屈萌根, 谭金曲, 李萌萌, 贾飞阳, 李书枝, 尹林伟, 彭昕珂, 周君, 2024. 电针通过己糖激酶 2 介导的 Warburg 效应抑制急性肺损伤大鼠的炎性反应. 针刺研究, 49(12): 1289–1295.]
- Lü BB, Zhao PX, Zhang X, Ma XM, Xie F, 2018. Research progress on structure and function of mitochondrial respiratory chain complex I. *Progress in Modern Biomedicine*, 18(2): 356–359, 380. [吕宝北, 赵鹏翔, 张鑫, 马雪梅, 谢飞, 2018. 线粒体呼吸链复合物 I 结构和功能的研究进展. 现代生物医学进展, 18(2): 356–359, 380.]
- Lu HD, Liu XY, Li K, Zhong YN, Wang WJ, Zhang Y, Deng AQ, Zhang M, Zou JJ, Han ZH, Zou WW, 2023. Advances in the treatment of mitochondrial diseases associated with functional defects in electron transport chain. *Chinese Bulletin of Life Sciences*, 35(6): 759–768. [鲁何东, 刘鑫雨, 李可, 钟一宁, 王文敬, 张瑜, 邓安琪, 张敏, 邹佳佳, 韩智慧, 邹薇薇, 2023. 电子传递链功能缺陷相关线粒体疾病的治疗进展. 生命科学, 35(6): 759–768.]
- Mackei M, Huber F, Sebök C, Vörösházi J, Tráj P, Márton RA, Horváth E, Neogrády Z, Mátis G, 2024. Unraveling the acute sublethal effects of acetamiprid on honey bee neurological redox equilibrium. *Scientific Reports*, 14(1): 27514.
- Martelli F, Zuo ZY, Wang JL, Wong CO, Karagas NE, Roessner U, Rupasinghe T, Venkatachalam K, Perry T, Bellen HJ, Batterham P, 2020. Low doses of the neonicotinoid insecticide imidacloprid induce ROS triggering neurological and metabolic impairments in *Drosophila*. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 117(41): 25840–25850.
- Matsuda K, Buckingham SD, Kleier D, Rauh JJ, Grauso M, Sattelle DB, 2001. Neonicotinoids: Insecticides acting on insect nicotinic acetylcholine receptors. *Trends in Pharmacological Sciences*, 22(11): 573–580.
- Matsumura T, Matsumoto H, Hayakawa Y, 2017. Heat stress hardening of oriental armyworms is induced by a transient elevation of reactive oxygen species during sublethal stress. *Archives of Insect Biochemistry and Physiology*, Doi: 10.1002/arch.21421.
- Meng LY, 2017. Effects of five pesticides on toxicity, and enzyme system in *Phauda flammans* Walker (Lepidoptera: Zygaenidae). Master dissertation. Nanning: Guangxi University. [孟令昱, 2017. 5 种杀虫剂对朱红毛斑蛾的毒力及其体内酶系的影响. 硕士学位论文. 南宁: 广西大学.]
- Nesmelov A, Cornette R, Gusev O, Kikawada T, 2018. The antioxidant system in the anhydrobiotic midge as an essential, adaptive mechanism for desiccation survival. *Advances in Experimental Medicine and Biology*, 1081: 259–270.
- O'Brien PJ, 2000. Peroxidases. *Chemico-Biological Interactions*, 129(1/2): 113–139.
- Palmquist K, Salatas J, Fairbrother A, 2012. Pyrethroid insecticides: Use, environmental fate and ecotoxicology// Perveen F (ed.). *Insecticides-Advances in Integrated Pest Management*. InTech. Available from: <http://dx.doi.org/10.5772/29495>.
- Pansa MG, Blandino M, Ingegno BL, Ferrari E, Reyneri A, Tavella L, 2015. Toxicity and persistence of three pyrethroids for the control of cereal bugs on common wheat. *Journal of Pest Science*, 88(1): 201–208.
- Qian XN, Ma YX, Xu W, Sun XL, 2021. Parasitism of *Ectropis grisescens* by *Trichogramma dendrolimi*. *Chinese Journal of Biological Control*, 37(4): 709–715. [钱肖娜, 马延旭, 徐伟, 孙晓玲, 2021. 松毛虫赤眼蜂对灰茶尺蠖的寄生效果评价. 中国生物防治学报, 37(4): 709–715.]
- Ray A, Gadratagi BG, Budhlakoti N, Rana DK, Adak T, Govindharaj GPP, Patil NB, Mahendiran A, Rath PC, 2023. Functional response of an egg parasitoid, *Trichogramma chilonis* Ishii to sublethal imidacloprid exposure. *Pest Management Science*, 79(10): 3656–3665.
- Shen JZ, Zhang WZ, Zhang CQ, Liu YH, 2024. Investigation of the lethal and behavioral effects of chlorantraniliprole on the parasitoid wasp *Trichogramma chilonis*. *Chinese Journal of Biological Control*, 40(1): 1–11. [沈佳忠, 张文哲, 张传清, 刘亚慧, 2024. 氯虫苯甲酰胺对螟黄赤眼蜂致死效应及行为影响. 中国生物防治学报, 40(1): 1–11.]
- Shen Y, Wu J, Huang XP, Han YJ, Zhou FY, Zhang Y, 2024. Acute toxicity and risk assessment of 5 multiple combined herbicides to *Trichogramma dendrolimi* and *Coccinella septempunctata*. *Agrochemicals*, 63(1): 26–31. [沈艳, 武健, 黄学屏, 韩云静, 周凤艳, 张勇, 2024. 5 种多元复配除草剂对天敌昆虫赤眼蜂和七星瓢虫的急性毒性及初级风险评估. 农药, 63(1): 26–31.]
- Sheng YW, Abreu IA, Cabelli DE, Maroney MJ, Miller AF, Teixeira M, Valentine JS, 2014. Superoxide dismutases and superoxide reductases. *Chemical Reviews*, 114(7): 3854–3918.
- Shimomura M, 2005. Molecular mechanism of selective toxicity of neonicotinoids. *Journal of Pesticide Science*, 30(3): 230–231.
- Singh SP, Jalali SK, 1997. Impact of pesticides on natural enemies

- of agricultural pests. *Ecological Agriculture and Sustainable Development*, 2(1): 162–175.
- Tang C, Peng ZQ, Wu KH, Liang YJ, Jin QA, Fu YG, Wan FH, 2006. The effect of sublethal doses of insecticides on the functional response of *Asecodes hispinarum*. *Chinese Bulletin of Entomology*, 43(5): 644–647. [唐超, 彭正强, 吴坤宏, 梁玉洁, 金启安, 符悦冠, 万方浩, 2006. 三种农药亚致死剂量对椰甲截脉姬小蜂功能反应的影响. *昆虫知识*, 43(5): 644–647.]
- Tiwari S, Pelz-Stelinski K, Stelinski LL, 2011. Effect of *Candidatus Liberibacter asiaticus* infection on susceptibility of Asian citrus psyllid, *Diaphorina citri*, to selected insecticides. *Pest Management Science*, 67(1): 94–99.
- Tong JH, Zhuang ZX, 1999. Current situation of production and application of avermectin. *Agrochemicals*, 38(9): 38–39. [童建华, 庄占兴, 1999. 阿维菌素生产与应用现状. *农药*, 38(9): 38–39.]
- Vianna UR, Pratisoli D, Zanuncio JC, Lima ER, Brunner J, Pereira FF, Serrão JE, 2009. Insecticide toxicity to *Trichogramma pretiosum* (Hymenoptera: Trichogrammatidae) females and effect on descendant generation. *Ecotoxicology*, 18(2): 180–186.
- Wang CG, Yan DY, Xu SH, Lou YH, 2010. Research progress on the inhibition of pyrethroid pesticides to enzyme activity. *Agrochemicals*, 49(6): 403–406, 415. [王春光, 颜冬云, 徐绍辉, 楼迎华, 2010. 拟除虫菊酯农药对酶活性抑制的研究进展. *农药*, 49(6): 403–406, 415.]
- Wang DD, Wang X, Zhang XW, Liu DM, 2024. The effect of imidacloprid stress on the antioxidant and detoxification enzyme systems of *Bombus ignitus* Smith. *Journal of Northeast Normal University (Natural Science Edition)*, 56(1): 125–132. [王丹丹, 王星, 张晓婉, 刘丹梅, 2024. 吡虫啉胁迫对红光熊蜂抗氧化酶系与解毒酶系的影响. *东北师大学报(自然科学版)*, 56(1): 125–132.]
- Wang DS, Lü LH, He YR, Qin SS, Pan F, 2010. Effect of conventional insecticides on *Trichogrammatoidea bactrae*. *Chinese Bulletin of Entomology*, 47(2): 379–383. [王德森, 吕利华, 何余容, 覃松生, 潘飞, 2010. 常用杀虫剂对小菜蛾天敌卷蛾分索赤眼蜂的影响. *昆虫知识*, 47(2): 379–383.]
- Wang DS, Pan F, He YR, Guo XL, Chen Q, 2011. Sublethal effects of eleven insecticides of different categories on reproduction of *Trichogrammatoidea bactrae* Nagaraja (Hymenoptera: Trichogrammatidae). *Chinese Journal of Applied Entomology*, 54(1): 56–63. [王德森, 潘飞, 何余容, 郭祥令, 陈俏, 2011. 11 种不同类型杀虫剂对卷蛾分索赤眼蜂繁殖的亚致死效应. *应用昆虫学报*, 54(1): 56–63.]
- Wang HL, Chen JH, Ji QE, Yang JQ, Wang B, 2011. Sublethal effects of spinosad on the parasitoid *Fopius arisanus* (Sonan). *Chinese Journal of Tropical Crops*, 32(3): 490–494. [王华玲, 陈家骅, 季清娥, 杨建全, 王波, 2011. 多杀菌素对阿里山潜蝇茧蜂的亚致死效应. *热带作物学报*, 32(3): 490–494.]
- Wang QY, 2020. Sublethal effects of two insecticides against *Paracoccus marginatus* (Hemiptera: Pseudococcidae). Master dissertation. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University. [王秋月, 2020. 两种杀虫剂对新入侵害虫木瓜秀粉蚧的亚致死效应. 硕士学位论文. 福州: 福建农林大学.]
- Wang R, Fang Y, Che W, Zhang QH, Wang JD, Luo C, 2022. Metabolic resistance in abamectin-resistant *Bemisia tabaci* Mediterranean from northern China. *Toxins*, 14(7): 424.
- Wang YH, Chen LP, Yu RX, Zhao XP, Wu CX, Cang T, Wang Q, 2012. Insecticide toxic effects on *Trichogramma ostrinae* (Hymenoptera: Trichogrammatidae). *Pest Management Science*, 68(12): 1564–1571.
- Wang ZH, Yang F, Gao TT, Zhang DF, Yu QY, Gao MY, Wang SN, 2024. Insecticidal activity of *Coriandrum sativum* essential oil against *Myzus persicae* (Hemiptera: Aphididae) and the effects on the aphid's protective and detoxification enzyme activities. *Acta Entomologica Sinica*, 67(3): 366–373. [王泽华, 杨帆, 高恬恬, 张道丰, 于秋月, 高梦瑶, 王山宁, 2024. 芫荽精油对桃蚜的杀虫活性及其保护酶和解毒酶活性的影响. *昆虫学报*, 67(3): 366–373.]
- Wu YJ, 2020a. Advances in insecticide toxicology in China in the last two decades II: Resistance of insects to insecticides. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 57(5): 995–1008. [伍一军, 2020a. 近二十年我国杀虫剂毒理学研究进展(II): 昆虫对杀虫剂的抗性研究. *应用昆虫学报*, 57(5): 995–1008.]
- Wu YJ, 2020b. Advances in insecticide toxicology in China in the last two decades I: Insecticide toxicity and environmental safety. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 57(4): 767–780. [伍一军, 2020b. 近二十年我国杀虫剂毒理学研究进展(I): 杀虫剂的毒性与环境安全性研究. *应用昆虫学报*, 57(4): 767–780.]
- Xu HQ, Xue M, Zhao HP, Liu YY, Zhu GD, 2014. Safety evaluation of abamectin and its mixtures on *Trichogramma* spp. *Chinese Journal of Biological Control*, 30(3): 311–315. [徐华强, 薛明, 赵海朋, 刘艳艳, 祝国栋, 2014. 阿维菌素等药剂及其混配制剂对赤眼蜂的安全性评价. *中国生物防治学报*, 30(3): 311–315.]
- Yang H, Yang W, Yang CP, Wang XL, Huang Q, Zhu TH, Han S, 2013. Sublethal effects of three insecticides on the reproduction and host searching behaviors of *Sclerodermus sichuanensis* Xiao (Hymenoptera: Bethyidae). *Acta Ecologica Sinica*, 33(5): 1000–1008. [杨海, 杨文, 杨成平, 王小林, 黄强, 朱天华, 韩松, 2013. 三种杀虫剂对四川小蜂的繁殖和寄主搜寻行为的影响. *生态学报*, 33(5): 1000–1008.]

- 1405–1412. [杨桦, 杨伟, 杨春平, 王熊莉, 黄琼, 朱天辉, 韩珊, 2013. 三种杀虫剂亚致死浓度对川硬皮肿腿蜂繁殖和搜寻行为的影响. 生态学报, 33(5): 1405–1412.]
- Yao FL, Zheng Y, Zhao JW, Desneux N, He YX, Weng QY, 2015. Lethal and sublethal effects of thiamethoxam on the whitefly predator *Serangium japonicum* (Coleoptera: Coccinellidae) through different exposure routes. *Chemosphere*, 128: 49–55.
- Yuan WN, Wei YH, Niu LM, Zhou ZX, Zhang XR, 2019. Toxicity of emamectin benzoate to 3 kinds of pests (Lepidoptera) and *Trichogramma dendrolimi*. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 35(26): 148–152. [袁伟宁, 魏玉红, 牛丽敏, 周昭旭, 张新瑞, 2019. 甲氨基阿维菌素苯甲酸盐对 3 种鳞翅目害虫与赤眼蜂的毒力. 中国农学通报, 35(26): 148–152.]
- Zang LS, Wang S, Zhang F, Desneux N, 2021. Biological control with *Trichogramma* in China: History, present status, and perspectives. *Annual Review of Entomology*, 66: 463–484.
- Zhang JJ, Du WM, Jin XF, Ruan CC, Zang LS, 2014. Susceptibility of the egg parasitoid *Trichogramma dendrolimi* (Hymenoptera: Trichogrammatidae) to three kinds of insecticides commonly used in fields. *Journal of Plant Protection*, 41(5): 555–561. [张俊杰, 杜文梅, 金雪菲, 阮长春, 臧连生, 2014. 松毛虫赤眼蜂对三种农田常用杀虫剂的敏感性. 植物保护学报, 41(5): 555–561.]
- Zhang L, Lü HX, Shi DD, Li XC, Ma KS, 2022. Effects of low doses of acetamiprid and afidopyropen on the parasitic function of *Lysiphlebia japonica* (Ashmead). *Chinese Journal of Pesticide Science*, 24(6): 1417–1424. [张亮, 吕海翔, 石丹丹, 李旭超, 马康生, 2022. 低剂量啉虫脒和双丙环虫酯对棉蚜茧蜂寄生功能的影响. 农药学报, 24(6): 1417–1424.]
- Zhang Q, Zhao C, Lu XX, Yu B, Huang YT, 2020. Advances in research on toxic effects of neonicotinoid insecticides on non-target organisms. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 15(1): 56–71. [张琪, 赵成, 卢晓霞, 于波, 黄钰婷, 2020. 新烟碱类杀虫剂对非靶标生物毒性效应的研究进展. 生态毒理学报, 15(1): 56–71.]
- Zhao YF, 2018. Sublethal effects of three kinds of insecticides on *Sclerodermus guani*. Master dissertation. Luoyang: Henan University of Science and Technology. [赵于菲, 2018. 三种杀虫剂对管氏肿腿蜂的亚致死效应. 硕士学位论文. 洛阳: 河南科技大学.]
- Zhong GH, Cui GF, Yi X, Sun RR, Zhang JJ, 2016. Insecticide cytotoxicology in China: Current status and challenges. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 132: 3–12.
- Zhu J, 2024. Effects of avermectin on detoxifying enzymes in five-year-old *Hyphantria cunea* larvae. *Journal of Jilin Forestry Science and Technology*, 53(3): 15–19. [祝军, 2024. 阿维菌素对美国白蛾 5 龄幼虫解毒酶的影响. 吉林林业科技, 53(3): 15–19.]
- Zhu WY, Zhang Y, Li T, 2021. Safety of five insecticides to different developmental stages of *Trichogramma chilonis* Ishii. *Agrochemicals*, 60(4): 272–276. [朱文雅, 张烨, 李唐, 2021. 5 种杀虫剂对不同发育阶段螟黄赤眼蜂的安全性评价. 农药, 60(4): 272–276.]