

张忠杰研究员主持“粮食干燥与绿色仓储”专栏文章之五

DOI: 10.16210/j.cnki.1007-7561.2023.05.006

李燕羽, 胡铁源, 姜雪, 等. S-烯虫酯防治拟谷盗持效性及解毒酶功能影响研究[J]. 粮油食品科技, 2023, 31(5): 42-52.

LI Y Y, HU T Y, JIANG X, et al. Simulation study on long-lasting effectiveness of S-methoprene on tribolium species and activity of detoxification enzyme[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2023, 31(5): 42-52.

S-烯虫酯防治拟谷盗持效性及 解毒酶功能影响研究

李燕羽^{1,2}, 胡铁源^{1,3}, 姜雪^{1,3}, 谢冰冰^{1,3},
王森山³, 宋丽雯³, 张洪清^{1,2}, 穆海亮⁴, 王明亮⁴

1. 国家粮食和物资储备局科学研究院 粮食储运研究所, 北京 100037;
2. 粮食储运国家工程研究中心, 北京 100037;
3. 甘肃农业大学 植物保护学院, 甘肃 兰州 730070;
4. 中保粮生物科技(海南)有限公司, 海南 海口 570100)

摘要:在当前害虫抗药性强和社会安全健康意识增强的背景下,迫切需要开发生态友好的防治手段。因此,采用小麦入仓全仓拌和 S-烯虫酯进行防治。通过分别扦取处理 90 天和 365 天后的小麦样品,在实验室内模拟了赤拟谷盗和杂拟谷盗的防治效果,并测定了 S-烯虫酯对拟谷盗幼虫三种解毒酶的影响。研究表明,施药时间和虫态是影响 S-烯虫酯杀虫效果的关键因素。在施用 S-烯虫酯 90 天后的小麦样品中,武汉、成都和齐河 3 个品系的赤拟谷盗卵孵化率为 0%,广东和北京 2 个品系的杂拟谷盗卵孵化率分别为 $1.67\% \pm 2.04\%$ 和 0%。此外,施用 S-烯虫酯 90 天后对赤拟谷盗和杂拟谷盗的杀蛹活性较好,羽化成虫无繁殖能力;施用 365 天后的杀蛹活性大大降低,羽化成虫有繁殖能力,而 F1 代蛹无法羽化。两处理组对两种成虫直接致死作用也有一定效果,但施用 365 天后的致死率大大降低,赤拟谷盗 F1 代仅有幼虫,而杂拟谷盗 F1 代有部分幼虫可化蛹但不能进一步转化为成虫。说明赤拟谷盗比杂拟谷盗更为敏感。S-烯虫酯胁迫之后,两种拟谷盗科幼虫体内的 3 种解毒酶活性受到了影响,且随着时间延长而增强。

关键词: S-烯虫酯; 拟谷盗; 持效性; 种群; 解毒酶

中图分类号: TS205; S379.5 文献标识码: A 文章编号: 1007-7561(2023)05-0042-11

网络首发时间: 2023-09-08 14:53:19

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/11.3863.TS.20230907.1927.006>

Simulation Study on Long-Lasting Effectiveness of S-Methoprene on Tribolium Species and Activity of Detoxification Enzyme

LI Yan-yu^{1,2}, HU Tie-yuan^{1,3}, JIANG Xue^{1,3}, XIE Bing-bing^{1,3}, WANG Sen-shan³,
SONG Li-wen³, ZHANG Hong-qing^{1,2}, MU Hai-liang⁴, WANG Ming-liang⁴

收稿日期: 2023-05-16

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项 (ZX2204)

Supported by: Fundamental Research Funds of the Central Research Institutes (No. ZX2204)

作者简介: 李燕羽, 女, 1980 年出生, 博士, 副研究员, 研究方向为生物科学。E-mail: lyy@ags.ac.cn

- (1. Institute of Grain Storage and Logistics, Academy of National Food and Strategic Reserves Administration, Beijing 100037, China;
2. National Engineering Research Center for Grain Storage and Logistics, Beijing 100037, China;
3. College of Plant Protection, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China;
4. Zhongbaoliang Biotechnology (Hainan) Co., Ltd, Haikou, Hainan 570100, China)

Abstract: In view of the prevailing insecticide resistance and increasing safety and health concerns, there is an urgent need to develop effective and environmentally friendly methods to control stored-product pests. S-methoprene, a microbial volatile compound with insecticidal properties, has been identified as a potential candidate for this purpose. However, its efficacy against storage pests is not well understood. In this study, wheat was treated with S-methoprene at a rate of 5 mg/kg and stored in ambient conditions within a grain bin. Samples were collected after 90 and 365 days, and bioassays were conducted on 20 mixed-sex developmental stages of *Tribolium castaneum* and *T. confusum*. S-methoprene showed significant ovicidal, pupicidal, and adulticidal activity against *T. castaneum* and *T. confusum*. The efficacy of S-methoprene was found to be influenced by the developmental stage of the pests and the timing of its application. In the 90-day treatment group, the hatching rate of three *T. castaneum* strains was zero, while that of *T. confusum* strains from Guangdong and Beijing was $(1.67 \pm 2.04)\%$ and 0%, respectively. S-methoprene treatment in the 90-day group resulted in effective pupicidal activity against both *T. castaneum* and *T. confusum*, with the F1 generation of adults being unable to reproduce. However, in the 365-day treatment group, the pupicidal activity significantly decreased, and the F1 generation of adults were able to reproduce but their F1 generation pupae can not hatch. The adulticidal activity of both pests had some effects in both treatments, but the mortality rate significantly decreased in the 365-day treatment group. The F1 generation of *T. castaneum* only consisted of larvae, while some larvae of *T. confusum* were able to pupate but could not further develop into adults. *T. castaneum* was found to be more susceptible to S-methoprene than *T. confusum*. After S-methoprene induction, the activity of three detoxification enzymes in *Tribolium* species was affected in varying degrees and had different variation patterns. The activity was positively correlated with induction time.

Key words: S-methoprene; *Tribolium* species; insecticidal activity; population growth; detoxification enzyme

赤拟谷盗 (*Tribolium castaneum* Herbs, TC) 和杂拟谷盗 (*Tribolium confusum* Jacquelin du Val, TCO) 隶属于鞘翅目拟步甲科, 二者的外部形态和生活习性非常相似, 是重要的世界性储粮害虫, 在我国各地的面粉厂、饲料厂和粮食仓库等地均有发生, 其取食和代谢物都会给农业生产及粮食储藏造成巨大的经济损失^[1]。自 20 世纪 60 年代起, 熏蒸剂和化学防护剂是储粮害虫防治主要手段, 但长期单一和不合理使用导致储粮害虫产生了严重的抗性^[2-6]。而且由于储粮害虫防治中对药剂的毒性及其残留限量有严格限定, 一般化学药剂难以满足这些要求。因此, 选择对人类和环境影响小的药剂、遵守使用储粮药剂的安全规范、定期检测储粮中的药剂残留情况, 并优化储粮的环境条件, 减少药剂的使用频率, 是当前应对挑

战的主要措施。其中包括使用昆虫生长调节剂。

昆虫生长调节剂主要包括保幼激素类似物、蜕皮激素类似物和几丁质合成抑制剂。其中, 烯虫酯 (Methoprene) 是一种保幼激素类似物 (JHAs), 已被商业化用于害虫控制^[7]。保幼激素类似物在囊胚形成期对胚胎形成^[8-9]或对幼虫具有杀伤力, 可产生畸形蛹^[7,10-12]。对于保幼激素类似物的许多研究机理集中在害虫的变态和发育过程的亚致死作用^[13]。例如, 影响滞育状态^[9]、信息素产生^[14]、交配^[15]、耐热性^[16]和行为^[17]。保幼激素类似物通常会影 响生殖系统。在储藏物^[18-19]和非储藏物害虫^[20]防治过程中, 当将保幼激素或其类似物应用于雌性成虫时, 可通过影响卵黄发生、卵泡生长或卵巢蛋白质合成来影响生殖, 或引起卵巢异常^[8]。当将保幼激素或其类似物应用于雄性成虫

时, 会影响性交流或交配^[11]。

烯虫酯是目前最广泛使用的保幼激素类似物之一^[21], 目前对于其如何影响拟步甲科储粮害虫雄性和雌性生殖系统以及生殖能力的研究较少。本研究以武汉、成都、齐河 3 个品系的赤拟谷盗和广东、北京 2 个品系的杂拟谷盗为供试昆虫, 测定 S-烯虫酯对拟步甲科储粮害虫不同虫态及子一代种群的持效性, 以及对幼虫三种解毒酶的影响, 从而为 S-烯虫酯实仓应用提供理论参考依据。

1 材料和方法

1.1 供试试虫

实验用赤拟谷盗采自武汉 (TC-WH)、成都 (TC-CD) 和齐河 (TC-QH), 杂拟谷盗采自广东 (TCO-GD) 和北京 (TCO-BJ), 在国家粮食和物资储备局科学研究院实验室进行标准化培养数代。用于饲养两种试虫的饲料配方比例为全麦粉: 燕麦片: 小麦: 酵母=70: 60: 15: 7, 饲料于-4℃冰箱中存放, 使用时提前取出备用。所有试虫在温度(27±1)℃、湿度70%±1%、光周期16L: 8D的条件下培养。

1.2 成虫和蛹获取

称取 200 g 饲料于直径为 80 mm、高 100 mm 的培养瓶, 接入 500 头成虫, 放置在(28±1)℃, RH 70%±1% 的恒温恒湿培养箱中饲养 1 d, 然后筛出成虫, 将带有虫卵的饲料放回, 继续置于培养箱中继续培养。筛选试虫的蛹态和采用新羽化 7 d 的成虫作为药效评价试虫。

1.3 虫卵的获取

称取全麦粉 100 g (过 80 目筛) 于直径为 80 mm、高 100 mm 培养瓶中, 接入供试试虫成虫 500 头, 于(27±1)℃, RH70%±1%的恒温恒湿培养箱中培养, 1 d 后筛出成虫, 用 80 目筛, 将虫卵筛出备用。

1.4 实仓药剂处理

所选无锡国家粮食储备库和常州城北国家粮食储备库四个平房仓, 仓房的隔热保温措施和年限一致性比较好。应用粮种为国产小麦, 水分均为 12%左右。入粮过程中, 在粮食卸载并输送至

粮仓皮带输送机上, 寻找合适的施药点, 使用在线自动超低容量喷施设备将稀释好的 S-烯虫酯喷施在粮食表面, 应用剂量为 5 mg/kg, 分别选取了防护期 90 d 和 365 d 的样品进行评价。

1.5 扦样图

为评价在线自动超低容量喷施设备的喷施效果, 施药一个月后, 按照图 1 选点, 分四层(-1 m、-2 m、-3 m 和-4 m) 取样^[19], 每个点抽取粮食 300~500 g, 用于检测药剂均匀度、防治效果等指标。

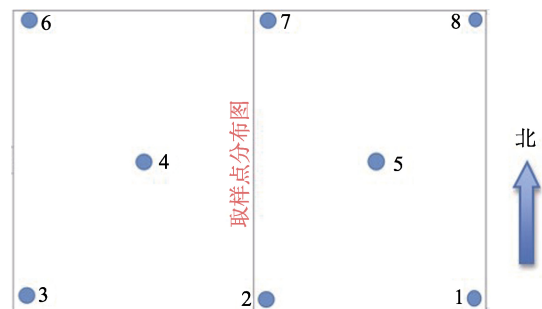


图 1 仓内取样点分布示意图

Fig.1 Schematic diagram of the sampling points distribution in the silo

1.6 室内药效评价方法

称取 50 g 从两个粮库扦取的样品于直径为 70 mm、高 150 mm 的培养瓶中, 接入 20 头供试试虫态, 在温度(27±1)℃, RH 70%±1%的恒温恒湿培养箱培养, 每组试验重复 3 次。接入成虫 14 d 后, 检查成虫存活情况, 将原饲料放回培养瓶中, 取出成虫; 30 d 后观察并记录种群子一代的数量; 以相同条件接入虫卵, 25 d 后观察并记录卵的孵化率以及试虫存活情况; 以相同条件接入蛹, 90 d 后观察并记录成虫存活情况以及种群子代的数量。

1.7 幼虫体内解毒酶的测定

取二龄幼虫饥饿处理 12 h, 饲喂用 5 mg/kg S-烯虫酯处理的全麦粉 0 天、3 天和 5 天, 分别称取 0.1 g 处理前后的幼虫, 迅速用液氮速冻以备后续实验用。使用谷胱甘肽-S-转移酶 (GST) 测定试剂盒、羧酸酯酶 (CarEs) 测定试剂盒和昆虫细胞色素 P450 (CYP450) 酶联免疫检测试剂盒分别测定拟谷盗科幼虫体内的 GST、CarE 和 CYP450 酶的活性。

1.8 数据分析

死亡率 (%) = 试虫死亡数目 / 试虫总数 × 100%。

校正死亡率 (%) = (处理死亡率 - 对照死亡率) / (1 - 对照死亡率) × 100%。

孵化率 (%) = 孵化幼虫数 / 卵数 × 100%。

所有数据均采用 Excel 2016 和 SPSS 25 对数据进行分析, 差异显著性用单因素方差 (One-way ANOVA) 进行分析, 多重比较采用 Duncan's 新复极差法分析。

2 结果与分析

2.1 药剂喷施效果

从喷施一个月后取样检测 (图 2) 可知, 药剂喷施比较均匀, 但药剂喷施过程中有流失, 因此大多数取样点药剂浓度都在 1~5 mg/kg。

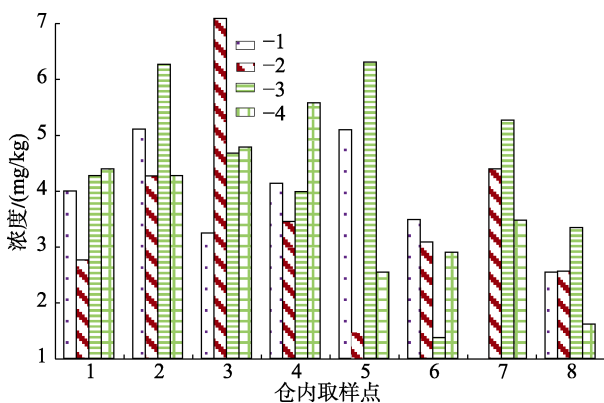


图 2 仓内不同点 S-烯虫酯含量分布图
Fig.2 S-Methoprene concentration at different points in the silo

2.2 S-烯虫酯对不同品系赤拟谷盗不同虫态的防治效果

2.2.1 卵孵化率抑制效果

图 3 显示了应用 S-烯虫酯不同防护时间段对赤拟谷盗卵的防治效果。结果表明, 在施用 S-烯虫酯 90 d 后的小麦样品中接入的 3 个品系赤拟谷盗卵的孵化率均为 0, 与对照组相比, 抑制作用显著 ($P < 0.05$) (见表 1)。在施用 S-烯虫酯 365 d 后的小麦样品中接入的武汉、成都和齐河品系的赤拟谷盗卵的孵化率分别为 $88.33\% \pm 10.21\%$ 、 $50.00\% \pm 7.07\%$ 和 $31.67\% \pm 9.35\%$, 与 90 d 的相比, 如表 2 所示, 抑制效果有显著差异 ($P < 0.05$)。研究结果表明, S-烯虫酯的药效随时间延长而降

低对赤拟谷盗卵的作用效果, 但实验过程中也发现, 所有处理组中孵化出来的幼虫会在 1~2 龄期死亡, 无法完成发育。

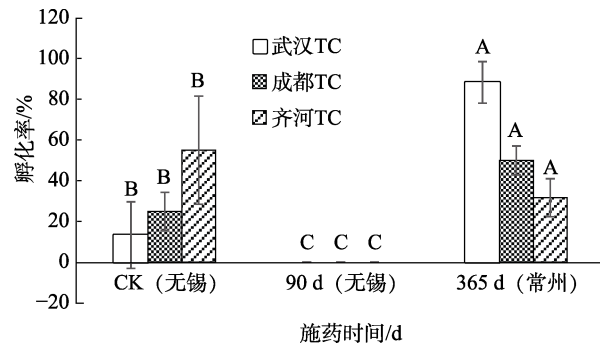


图 3 应用 S-烯虫酯小麦不同时间下赤拟谷盗卵的孵化率

Fig.3 Hatching rate of *Tribolium castaneum* eggs in wheat at different application times of S-Methoprene

注: 相同指标不同处理组之间标有不同字母表示在 0.01 水平差异显著, 下同。

Note: Different letters between different treatment groups of the same indicator shows significantly different at $P=0.01$, same as below.

表 1 品系和施药时间对赤拟谷盗卵孵化率的方差分析

Table 1 Analysis of variance (ANOVA) of strain and application time on egg hatching rate of *Tribolium castaneum*

源	III 类平方和	自由度	均方	F	显著性
品系	357.41	2	178.704	0.619	0.55
时间	19 162.963	2	9 581.481	33.167	0.00
误差	5 200	18	288.889		
总计	50 600	27			

2.2.2 蛹羽化率及种群变化情况

应用 S-烯虫酯不同防护时间防治赤拟谷盗蛹的效果如图 4 所示。结果表明, 在施用 S-烯虫酯 90 天后的小麦样品中, 接入的武汉、成都和齐河品系赤拟谷盗蛹羽化的子代成虫数分别为 (11.33 ± 4.16) 头、(3.67 ± 2.08) 头和 (5.00 ± 0.00) 头, 约为对照组的 1/2、1/6 和 1/2, 差异显著 ($P < 0.05$); 在施用 S-烯虫酯 365 天后的小麦样品中, 接入的 3 个品系赤拟谷盗蛹羽化的子代成虫数分别为 (13.00 ± 1.73) 头、(7.33 ± 3.06) 头和 (4.67 ± 1.53) 头, 约为对照组的 1/2、1/3 和 1/2, 差异显著 ($P < 0.05$)。这说明 S-烯虫酯对赤拟谷盗的蛹具有一定的抑制效果。

在施用 S-烯虫酯 90 d 后的小麦样品中, 接入的武汉、成都和齐河品系赤拟谷盗蛹羽化出来的成虫产生的 F1 代幼虫数均为 0, 表明 S-烯虫酯在

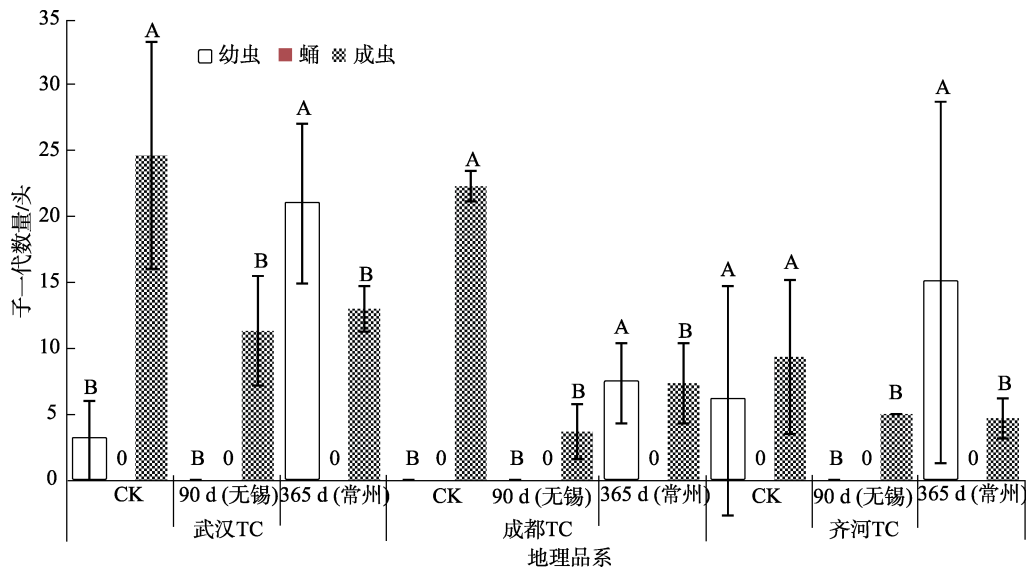


图 4 应用 S-烯虫酯小麦不同时间下赤拟谷盗蛹羽化子代数

Fig.4 Number of offspring generation of *Tribolium castaneum* in wheat at different application times of S-Methoprene

一定的防效期和防效浓度内，样品中即使赤拟谷盗蛹有部分羽化为成虫，也无法产生 F1 代，从而能有效抑制种群增长。在施用 S-烯虫酯 365 d 后的小麦样品中，接入的 3 个品系赤拟谷盗蛹羽化出来的成虫产生的 F1 幼虫数分别为 (21.00±6.08) 头、(7.33±3.06) 头和 (15.00±13.75) 头，品系间差异显著 ($P < 0.05$)。同时，实验结果还发现，无论是防护时间为 90 d 还是 365 d 的小麦样品中，3 个品系赤拟谷盗 F1 代幼虫化蛹数均为 0，说明 S-烯虫酯对幼虫态防治效果最好，在药效已经大大降低的情况下（防护时间 365 d 后），仍然能很好地控制种群的增长。

2.2.3 成虫致死率

由图 5 可以看出，在施用 S-烯虫酯 90 d 后的小麦样品中，接入的武汉、成都和齐河 3 个品系赤拟谷盗成虫的校正死亡率分别为 18.33%±12.42%、96.49%±4.30%和 98.33%±2.04%，约为对照组的 6 倍、58 倍和 59 倍，表现出显著的抑制作用 ($P < 0.05$) (见表 2)。在施用 S-烯虫酯 365 d 后的小麦样品中，接入的 3 个品系赤拟谷盗成虫的校正死亡率分别为 2.04%±5.83%、15.17%±6.02%和 0%，与施用 S-烯虫酯 90 d 后的处理组相比表现出显著差异 ($P < 0.05$) (见表 2)。实验结果表明，随着时间的延长，S-烯虫酯的药效对赤拟谷盗成虫的作用效果降低，而且对成都和齐河品系赤拟谷盗成虫的抑制效果最好。

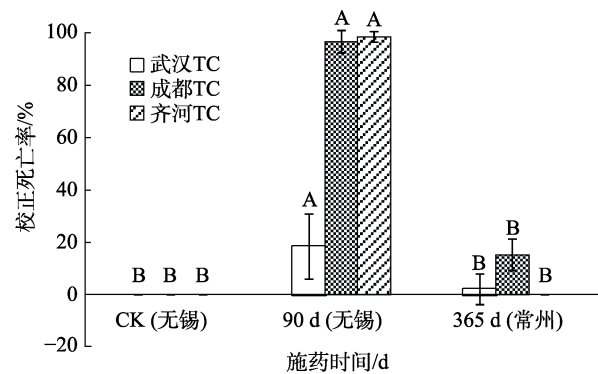


图 5 应用 S-烯虫酯小麦不同时间下赤拟谷盗成虫的校正死亡率

Fig.5 Corrected mortality of adult *Tribolium castaneum* in wheat at different application times of S-Methoprene

表 2 品系和施药时间对赤拟谷盗成虫校正死亡率的方差分析

Table 2 Analysis of variance (ANOVA) of strain and application time on corrected mortality of adult *Tribolium castaneum*

源	III 类平方和	自由度	均方	F	显著性
品系	5 139.14	2	2 569.572	42.506	0
时间	27 562.23	2	13 781.115	227.969	0
误差	1 088.13	18	60.452		
总计	59 789.19	27			

2.2.4 成虫子一代种群变化

由图 6 可以看出，施用 S-烯虫酯 90 d 后的小麦样品，在接入武汉、成都和齐河 3 个品系赤拟谷盗成虫时，其子一代幼虫数均为 0。而施药 365 d 后的小麦样品，在对应的 3 个品系赤拟谷盗的子一代幼虫数方面表现出明显的抑制作用，分别为 (6.00±5.29) 头、(4.00±2.65) 头和 (6.33±3.21) 头 ($P < 0.05$)。

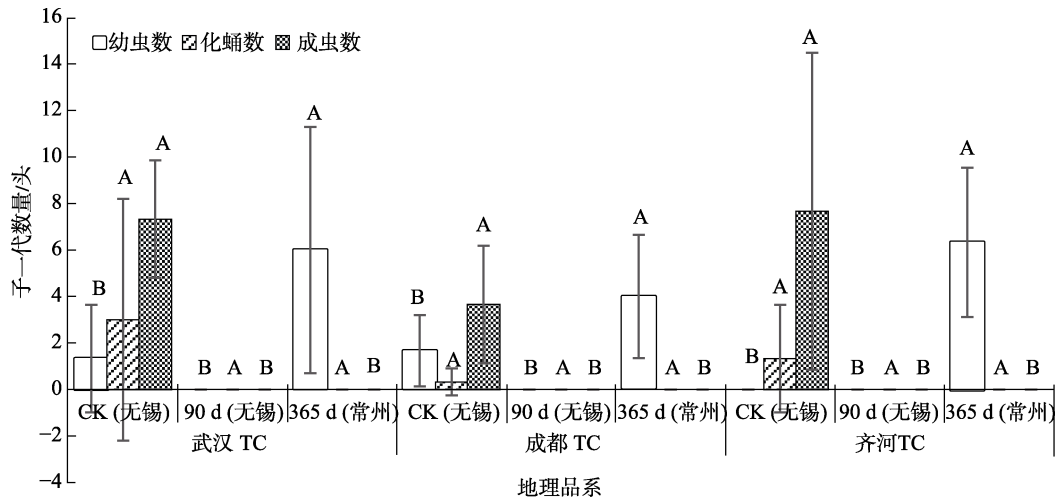


图 6 S-烯虫酯不同施药时间下不同品系赤拟谷盗的子一代种群数量

Fig. 6 Offspring population size of different *Tribolium castaneum* strains at different S-Methoprene application times

所有处理组中，3 个品系赤拟谷盗子一代幼虫化蛹数均为 0，与对照组相比无显著差异 ($P > 0.05$)。此外，所有处理组中武汉、成都和齐河品系的子一代成虫数量均为 0，而对照组中相应的品系成虫数量分别为 (7.33 ± 2.52) 头、 (3.67 ± 2.52) 头和 (7.67 ± 6.81) 头，两者之间存在显著差异 ($P < 0.05$)，显示出明显的抑制效果。

2.3 S-烯虫酯对不同品系杂拟谷盗不同虫态的持效性

2.3.1 卵孵化率抑制效果

由图 7 可知，在施用 S-烯虫酯 90 d 后的小麦样品中，接入的广东和北京品系杂拟谷盗卵的孵化率均为 0。而在施用 S-烯虫酯 365 d 后的小麦样品中，对应的两个品系卵的孵化率分别为 $71.67\% \pm 8.16\%$ 和 $86.67\% \pm 5.40\%$ 。与 90 d 的结果相比，抑制效果有显著差异 ($P < 0.05$) (见表 3)，表明 S-烯虫酯的药效随时间延长而降低对杂拟谷盗卵的作用效果。然而，实验过程中观察到所有处理组中孵化出来的幼虫都在 1~2 龄期死亡，无法完成发育。在本实验中，对照仓组的两个品系杂拟谷盗卵孵化率也很低，可能是因为对照仓组应用了溴氰菊酯类防护剂的缘故。

2.3.2 蛹羽化率及种群变化情况

由图 8 可知，施用 S-烯虫酯 90 d 后的小麦样品中，接入广东和北京 2 个品系杂拟谷盗蛹羽化为成虫的数量分别为 (12.67 ± 2.08) 头和 (14.67 ± 4.16) 头。而在施药 365 d 后的处理组中，对应品

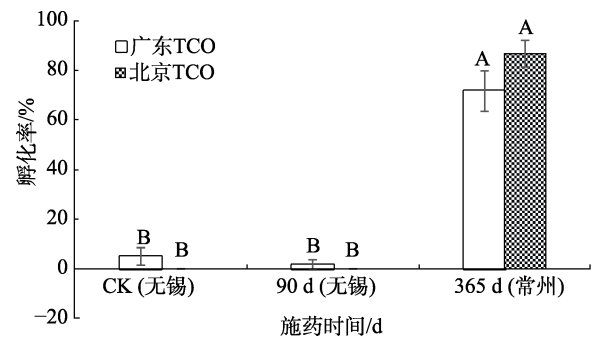


图 7 应用 S-烯虫酯小麦不同时间下杂拟谷盗卵的孵化率

Fig. 7 Hatching rate of *Tribolium confusum* eggs in wheat at different application times of S-Methoprene

表 3 品系和施药时间对杂拟谷盗卵孵化率的方差分析

源	III 类平方和	自由度	均方	F	显著性
品系	34.722	1	34.722	0.926	0.355
时间	24 033.333	2	12 016.667	320.444	0
误差	450	12	37.5		
总计	38 475	18			

系的成虫数量分别为 (14.67 ± 1.53) 头和 (14.00 ± 4.36) 头。两处理组间差异不显著，但是与对照组相比，差异显著 ($P < 0.05$)，且处理组的成虫数量约为对照组的 1/4。

施用 S-烯虫酯 90 d 后的小麦样品接入广东和北京品系杂拟谷盗蛹羽化出来的成虫未能产生幼虫，幼虫数为 0。而在施药 365 d 后的处理组里，对应的幼虫数量分别为 (24.67 ± 7.51) 头和 (28.67 ± 8.08) 头。观察还发现，在三个实验组中，施药 365 d 后的处理组幼虫数量最多，三者之间

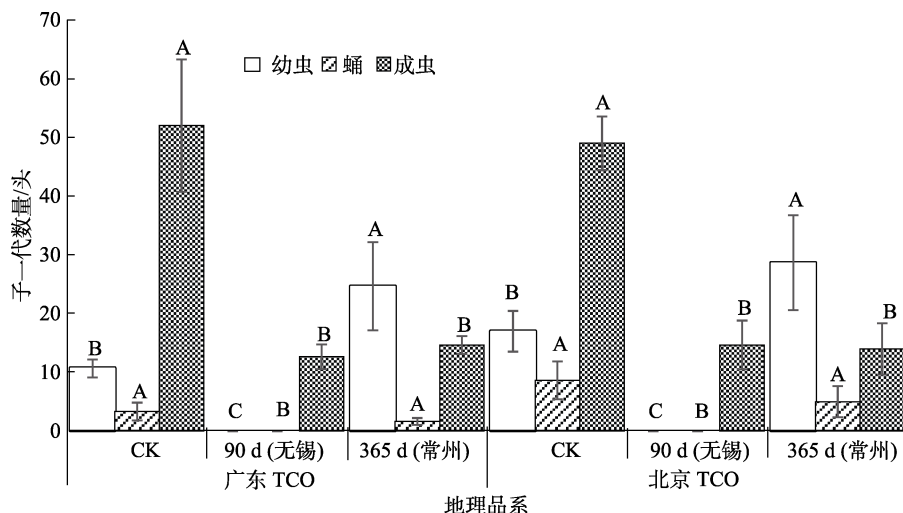


图8 应用 S-烯虫酯小麦不同时间下杂拟谷盗蛹羽化子代数

Fig.8 Number of offspring generation of *Tribolium confusum* in wheat at different application times of S-Methoprene

差异显著 ($P < 0.05$)。

经过施用 S-烯虫酯 90 天后的小麦样品中, 两个品系杂拟谷盗并未出现新的蛹, 与施药 365 天后的处理组和对照组相比, 差异显著 ($P < 0.05$)。在实验过程中, 发现施药 365 天后的处理组虽然有极少部分幼虫转化为蛹, 但这些蛹并不能进一步正常羽化为成虫。

2.3.3 成虫致死率

如图 9 所示, 在施用 S-烯虫酯 90 d 后的小麦样品中, 广东和北京品系的杂拟谷盗成虫校正死亡率分别为 $21.67\% \pm 7.36\%$ 和 $5.26\% \pm 6.45\%$ 。与对照组相比, 差异显著 ($P < 0.05$) (见表 4)。在施用 S-烯虫酯 365 d 后的小麦样品中, 对应品系的校正死亡率分别为 $1.67\% \pm 2.04\%$ 和 0% , 与对照组相比, 如表 5 所示, 差异不显著 ($P > 0.05$)。

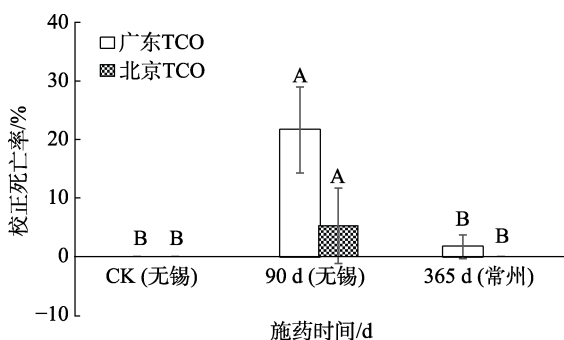


图9 应用 S-烯虫酯小麦不同时间下杂拟谷盗成虫的校正死亡率

Fig.9 Corrected mortality of adult *Tribolium confusum* in wheat at different application times of S-Methoprene

表 4 品系和施药时间对杂拟谷盗成虫校正死亡率的方差分析

Table 4 Analysis of variance (ANOVA) of strain and application time on corrected mortality of adult *Tribolium confusum*

源	III 类平方和	自由度	均方	F	显著性
品系	108.585	1	108.585	3.131	0.102
时间	598.908	2	299.454	8.634	0.005
误差	416.216	12	34.685		
总计	1 949.324	18			

2.3.4 成虫子一代种群变化

图 10 所示, 施用 S-烯虫酯 90 d 后的小麦样品中, 接入广东和北京 2 个品系的杂拟谷盗成虫 F1 代幼虫数为 0, 与对照相比差异不显著。而在施药 365 d 后的处理组里, 对应 F1 代幼虫数分别为 (9.67 ± 9.07) 头和 (7.00 ± 3.61) 头, 与对照相比差异显著 ($P < 0.05$)。

在小麦样品施用 S-烯虫酯 90 d 后, 接入广东和北京 2 个品系的杂拟谷盗成虫产生的 F1 代幼虫化蛹数均为 0, 而在施药 365 d 后的处理组里, 对应 F1 代幼虫化蛹数分别为 (1.00 ± 0.00) 头和 (6.67 ± 1.53) 头, 差异显著 ($P < 0.05$)。

在小麦样品施用 S-烯虫酯 90 d 后, 接入广东和北京 2 个品系的杂拟谷盗成虫均未能繁殖出 F1 代成虫。而在施药 365 d 后的处理组里, F1 代成虫数在处理组和对照组之间存在显著差异。其中, 广东品系的处理组产生的 F1 代成虫数为 (1.00 ± 1.73) 头, 明显低于对照组; 而北京品系的处理组则未产生任何 F1 代成虫, 与对照组有显著差异

($P < 0.05$)。

2.4 拟步甲科储粮害虫虫种和品系间敏感性比较

本研究比较了拟步甲科储粮害虫不同虫种和

品系间的敏感性, 结果如表 5~6 所示。评价数据是药效 90 d 后的处理组。对于成虫和蛹来说, 赤拟谷盗比杂拟谷盗更敏感。在孵化率和子一代种

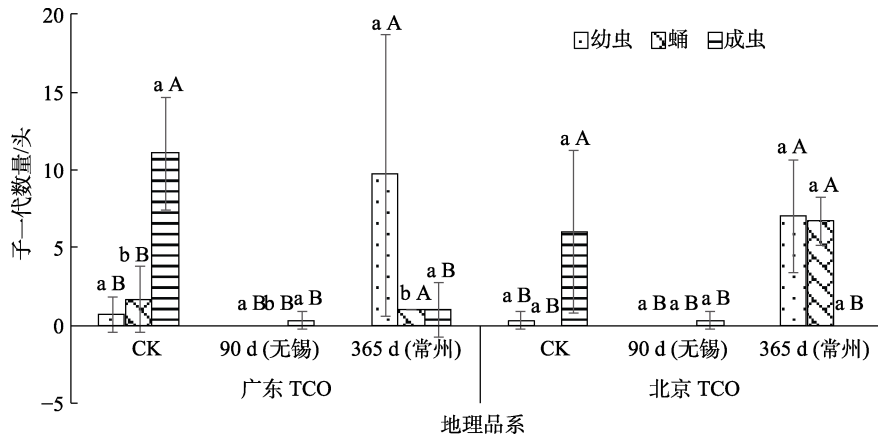


图 10 S-烯虫酯不同施药时间下不同品系杂拟谷盗的子一代种群数量

Fig. 10 Offspring population size of different *Tribolium confusum* strains at different S-Methoprene application times

表 5 虫种对赤拟谷盗和杂拟谷盗不同虫态防治效果的方差分析表

Table 5 Analysis of variance (ANOVA) for insect species effect on different stages control of *Tribolium castaneum* and *T. confusum*

比较参数	源	III 类平方和	自由度	均方	F	显著性
成虫校正死亡率	虫种	8 598.408	1	8 598.408	6.444	0.025
	误差	17 345.832	13	1 334.295		
	总计	60 529.205	15			
蛹羽化子代数	虫种	176.4	1	176.4	11.861	0.004
	误差	193.333	13	14.872		
	总计	1 714	15			
子一代种群数量	虫种	0.4	4	0.1	0.75	0.58
	误差	1.333	10	0.133		
	总计	2	15			
卵孵化率	虫种	2.5	1	2.5	1.56	0.234
	误差	20.833	13	1.603		
	总计	25	15			

表 6 品系对两种拟谷盗不同虫态防治效果的方差分析表

Table 6 Analysis of variance (ANOVA) for insect strains effect on different stages control of *Tribolium castaneum* and *T. confusum*

虫种	比较参数	源	III 类平方和	自由度	均方	F	显著性
赤拟谷盗	成虫校正死亡率	品系	12 511.862	2	6 255.931	53.072	0
		误差	707.254	6	117.876		
		总计	58 654.881	9			
赤拟谷盗	蛹羽化子代数	品系	100.667	2	50.333	6.969	0.027
		误差	43.333	6	7.222		
		总计	544	9			
杂拟谷盗	成虫校正死亡率	品系	403.604	1	403.604	4.216	0.109
		误差	382.883	4	95.721		
		总计	1 874.324	6			
杂拟谷盗	蛹羽化子代数	品系	6	1	6	0.554	0.498
		误差	43.333	4	10.833		
		总计	1 170	6			

群数量方面，两者之间没有显著差异。此外，对于成虫致死率和蛹羽化后产生的后代种群数，赤拟谷盗的三个品系之间差异显著，而杂拟谷盗的两个品系之间差异不显著 ($P > 0.05$)。其中，成都和齐河品系的赤拟谷盗成虫和蛹对 S-烯虫酯最敏感。

2.5 S-烯虫酯对拟谷盗科幼虫体内 3 种解毒酶的影响

不同时间段的拟谷盗科幼虫体内的 3 种解毒酶受到 S-烯虫酯的影响结果如图 11~13 所示。饲喂 S-烯虫酯后，处理组和对照组相比，赤拟谷盗（成都）和杂拟谷盗（广东）幼虫体内的 CYP450 酶的活性均没有显著性变化，而杂拟谷盗（北京）的受到了抑制作用。S-烯虫酯对于赤拟谷盗（成都）和杂拟谷盗（广东）幼虫体内的 GST 酶具有

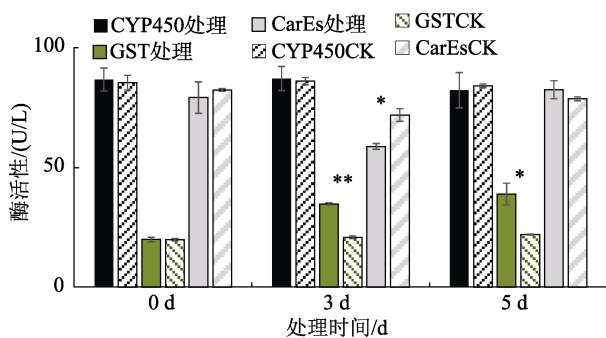


图 11 S-烯虫酯对赤拟谷盗（成都）幼虫解毒酶的影响

Fig.11 S-Methoprene effect on detoxification enzyme activity in *Tribolium castaneum* larvae (Chengdu)

备注：**表示两者差异极显著，*表示两者差异显著。

Note: ** shows significantly different at $P < 0.01$ and * shows significantly different at $P < 0.05$.

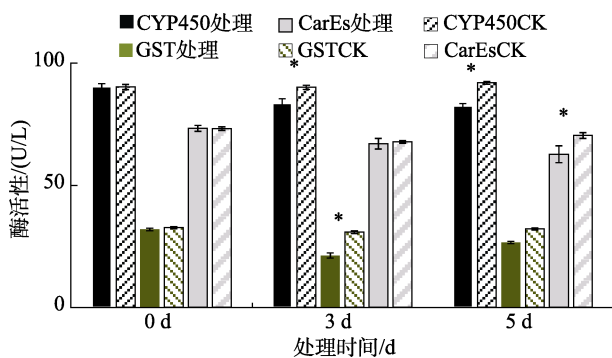


图 12 S-烯虫酯对杂拟谷盗（北京）幼虫解毒酶的影响

Fig.12 S-Methoprene effect on detoxification enzyme activity in *Tribolium confusum* larvae (Beijing)

备注：**表示两者差异极显著，*表示两者差异显著。

Note: ** shows significantly different at $P < 0.01$, * shows significantly different at $P < 0.05$.

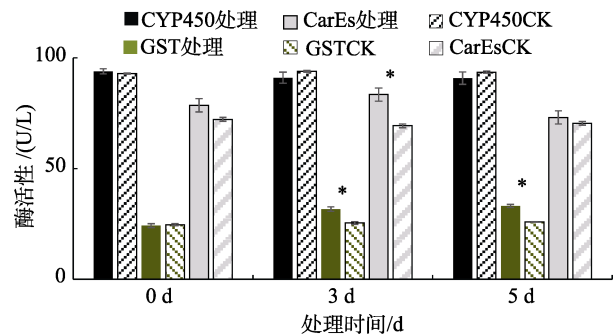


图 13 S-烯虫酯对杂拟谷盗（广东）幼虫解毒酶的影响

Fig.13 S-Methoprene effect on detoxification enzyme activity in *Tribolium confusum* larvae (Guangdong)

备注：**表示两者差异极显著，*表示两者差异显著。

Note: ** shows significantly different at $P < 0.01$, * shows significantly different at $P < 0.05$.

刺激作用，而对于杂拟谷盗（北京）则表现出抑制作用。用 S-烯虫酯处理后，对赤拟谷盗（成都）和杂拟谷盗（北京）幼虫体内 CarE 酶的活性表现出抑制作用，而对于杂拟谷盗（广东）则表现出刺激的作用。对于对照组，同一龄期不同时间三种解毒酶含量差异不明显，而处理组随着处理时间的延长表现出来的影响作用增加。

3 讨论

拟谷盗害虫是许多储藏产品的重要害虫，其幼虫和成虫会造成谷物数量（重量损失）和质量的损失（营养、工业和商用价值的损失）^[22]，其发育周期约为 20 天，每只雌性在最适宜条件下可以产下 300~400 个卵。本研究发现 S-烯虫酯对拟谷盗害虫的多个虫态都有很好的抑制作用^[23]。其主要作用是抑制幼虫的化蛹，虽然不能完全抑制蛹和成虫，但通过抑制子一代的数量和发育，可以在施药初期（90 d）控制害虫种群，特别是在拟谷盗种群发育的防治中适用。此外，两个近缘种对于 S-烯虫酯的敏感性存在差异性，其中赤拟谷盗表现得更为敏感。

通常评估 S-烯虫酯或其与其他药剂组合的实仓残效性，有仓房结构空间空仓处理和拌粮处理。在粮库或面粉加工车间的空间空仓处理区域由面粉堆放区、不同包装材料表面处理区域或混凝土表面处理区域组成^[24]。本研究实验室模拟该处理方式，在这些区域投放赤拟谷盗和杂拟谷盗的幼虫，以评估暴露在这些区域的幼虫是否能发育为

成虫。同时,本研究模拟应用S-烯虫酯后的时效性,这更符合实际情况,因为将活昆虫带进粮仓或面粉加工车间导致外源感染是害虫发生的一种形式。该方法提供了一种可行且快速的评价S-烯虫酯时效性的方法。Scheff等^[25]使用S-烯虫酯处理聚合物包装,发现赤拟谷盗卵在聚对苯二甲酸乙二酯包装上的孵化率显著低于未经处理的包装;在聚酯-聚乙烯包装上,S-烯虫酯对赤拟谷盗卵和羽化率有100%的抑制效果。Wijayarathne等^[26]用 0.001 mg/m^3 和 0.0165 mg/m^3 的S-烯虫酯处理小麦,发现S-烯虫酯可以通过抑制赤拟谷盗子一代种群的数量从而降低其种群密度。Arthur^[27]用 1.25 mg/m^3 和 2.5 mg/m^3 的烯虫酯处理小麦和玉米,对于赤拟谷盗的子代有较好的抑制效果。这些结果与本研究的结论一致。此外,通过对粮库的实仓数据调研(未发表),目前实仓(无锡360 d,常州635 d)持效性效果好^[28],至今没有发现有虫,用户满意。

蛹对S-烯虫脂的耐受性可能归因于以下两个原因:一方面,昆虫的活跃期比静止期更容易受到影响,因此蛹对S-烯虫脂的耐受性也可能受到这种差异的影响;另一方面,S-烯虫脂可导致出现的成虫畸形率和死亡率较高,这可显著增加S-烯虫脂的杀蛹活性。本研究结果表明,S-烯虫脂对拟谷盗具有很强的杀卵、杀幼虫和杀蛹活性,比之前报道的好^[29]。成虫是检验新化合物生物活性最常用的昆虫阶段。此外,本研究还发现,在小麦贮藏90 d后使用S-烯虫酯对成虫也有防治效果,这可能是由于特定的应用系统和不同的杀虫剂配方有关。

赤拟谷盗和杂拟谷盗是两种近缘的储粮害虫,它们的形态和习性相似。本研究所有处理中,S-烯虫脂对赤拟谷盗的药效优于对杂拟谷盗的药效。初期应用S-烯虫脂时,赤拟谷盗成虫死亡率很高,而杂拟谷盗的存活率比较高。由于杂拟谷盗体内存在*Wolbachia*^[30],而赤拟谷盗体内并未发现*Wolbachia*的感染报道,因此两种近缘种体内的菌群可能会对它们的耐药性产生影响。*Wolbachia*引起学者们关注的原因之一,是它对寄主生殖的调控作用,包括诱导胞质不亲和、孤雌

生殖、雌性化和雄性致死等^[31]。然而,目前还不清楚S-烯虫脂是否与*Wolbachia*有协同作用,需要进一步研究。

4 结论

本研究旨在评估S-烯虫酯对赤拟谷盗和杂拟谷盗不同虫态的持效期和敏感性差异。S-烯虫酯对赤拟谷盗和杂拟谷盗的卵、蛹和成虫及其子一代种群均有抑制作用。成都和齐河品系的赤拟谷盗成虫以及广东品系的杂拟谷盗成虫对S-烯虫酯的抑制效果最好。赤拟谷盗成虫和蛹比杂拟谷盗更加敏感,但不同品系的杂拟谷盗之间差异不显著。不同品系的赤拟谷盗成虫和蛹对S-烯虫酯的敏感性从大到小依次为成都品系、齐河品系和武汉品系。此外,随着时间的推移,S-烯虫酯的药效逐渐降低。实际的储粮实仓数据表明,两个储藏库的处理仓均未出现虫害。

参考文献:

- [1] 张生芳,刘永平,武增强.中国储藏物甲虫[M].中国农业科技出版社,1998.
ZHANG S F, LIU Y P, WU Z Q. Beetles of associated with stored products in China[M]. China Agricultural Press, 1998.
- [2] WANG D X, COLLINS P J, GAO X. Optimising indoor phosphine fumigation of paddy rice bag-stacks under sheeting for control of resistant insects[J]. Journal of Stored Products Research, 2006, 42(2): 207-217.
- [3] 曹阳,刘梅,郑彦昌.五种储粮害虫11个品系的磷化氢抗性测定[J].粮食储藏,2003(2): 9-11.
CAO Y, LIU M, ZHONG Y C. Measurement of the resistance to phosphine in eleven strains of five species of stored grain insects[J]. Grain Storage, 2003(2): 9-11.
- [4] RUMBOS C I, DUTTON A C, TSIROPOULOS N G, et al. Persistence and residual toxicity of two pirimiphos-methyl formulations on wheat against three stored-product pests[J]. Journal of Stored Products Research, 2018, 76: 14-21.
- [5] DAGLISH G J, HEAD M B, HUGHES P B. Field evaluation of spinosad as a grain protectant for stored wheat in Australia: Efficacy against *Rhyzoperth dominica* (F.) and fate of residues in whole wheat and milling fractions[J]. Australian Journal of Entomology, 2008, 47(1): 70-74.
- [6] RUMBOS C I, DUTTON A C, ATHANASSIOU C G. Comparison of two pirimiphos-methyl formulations against major stored-product insect species[J]. Journal of Stored Products Research, 2013, 55: 106-115.
- [7] OBERLANDER H, SILHACEK D L, SHAYYA E, et al. Current

- status and future perspectives of the use of insect growth regulators for the control of stored product insects[J]. *Journal of Stored Products Research*, 1997, 33: 1-6.
- [8] NATION J L. *Insect Physiology and Biochemistry*[M]. CRC Press, New York, 2002: 123-160.
- [9] GRANGER N A, BOLLENBACHER W E, VINCE R, et al. In vitro biosynthesis of juvenile hormone by the larval corpora allata of *Manduca sexta*: quantification by radioimmunoassay [J]. *Molecular and Cellular Endocrinology*, 1979, 16: 1-17.
- [10] WILLIAMS C M. Third generation pesticides[J]. *Scientific American*, 1967, 217: 13-17.
- [11] MONDAL K A M S H, PARWEEN S. Insect growth regulators and their potential in the management of stored-product insect pests[J]. *Integrated Pest Management Review*, 2000, 5: 255-295.
- [12] WRIGHT J E. Environmental and toxicological aspects of insect growth regulators[J]. *Environmental Health Perspectives*, 1976, 14: 127-132.
- [13] PHILLIPS T W, THRONE J E. Biorational approaches to managing stored-product insects[J]. *Annual Review of Entomology*, 2010, 55: 375-397.
- [14] EREZYILMAZ D F, RIDDIFORD L M, TRUMAN J W. Juvenile hormone acts at embryonic molts and induces the nymphal cuticle in the direct-developing cricket[J]. *Development Genes and Evolution*, 2004, 214: 313-323.
- [15] KESHAN B, HIRUMA K, RIDDIFORD L M. Developmental expression and hormonal regulation of different isoforms of the transcription factor E75 in the tobacco hornworm *Manduca sexta* [J]. *Developmental Biology*, 2006, 295: 623-632.
- [16] KLOWDEN M J. Endocrine systems. In: *Physiological systems in insects*[M]. Academic Press, MA, 2007: 1-74.
- [17] SCHOOLEY D A, BAKER F C. Juvenile hormone biosynthesis. In: KERKUT G A, GILBERT L I (Eds.), *Comprehensive Insect Physiology Biochemistry and Pharmacology*[M]. New York, Pergamon Press, 1985: 363-389.
- [18] MINAKUCHI C, NAMIKI T, SHINODA T. Krüppel homolog 1, an early juvenile hormone-response gene downstream of methoprene-tolerant, mediates its anti-metamorphic action in the red flour beetle *Tribolium castaneum*[J]. *Developmental Biology*, 2009, 325: 341-350.
- [19] MINAKUCHI C, TANAKA M, MIURA K, et al. Developmental profile and hormonal regulation of the transcription factors broad and Krüppel homolog 1 in hemimetabolous thrips[J]. *Insect Biochemistry and Molecular Biology*, 2011, 4: 125-134.
- [20] SCHOOLEY D A, BAKER F C, TSAI L W, et al. Juvenile hormones 0, I and II exist only in Lepidoptera. In: HOFFMANN J, PORCHET M (Eds.), *Biosynthesis, Metabolism and Mode of Action of Invertebrate Hormones*[M]. Springer, Berlin, 1984: 371-383.
- [21] RICHARD D S, APPLEBAUM S W, SLITER T J, et al. Juvenile hormone bisepoxide biosynthesis in vitro by the ring gland of *Drosophila melanogaster*: a putative juvenile hormone in the higher Diptera[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 1989, 86: 1421-1425.
- [22] ABDULLAHI G, MUHAMAD R, SULE H. Biology, host range and management of red four beetle *Tribolium castaneum* (Herbst) (Coleoptera: Tenebrionidae): a review[J]. *Taraba Journal of Agricultural Research*, 2019, 7(1): 48-64.
- [23] PADIN S, DAL BELLO G, FABRIZIO M. Grain loss caused by *Tribolium castaneum*, *Sitophilus oryzae* and *Acanthoscelides obtectus* in stored durum wheat and beans treated with *Beauveria bassiana*[J]. *Journal of Stored Products Research*, 2002, 38(1): 69-74.
- [24] SUTTON A E, ARTHUR F H, ZHU K Y, et al. Residual efficacy of pyrethrin+methoprene aerosol against larvae of *Tribolium castaneum* and *Tribolium confusum* (Coleoptera: Tenebrionidae) [J]. *Journal of Stored Products Research*, 2011, 47: 399-406.
- [25] SCHEFF D S, SUBRAMANYAM B, ARTHUR F H. Effect of methoprene treated polymer packaging on fecundity, egg hatchability, and egg-to-adult emergence of *Tribolium castaneum* and *Trogoderma variabile*[J]. *Journal of Stored Products Research*, 2016, 69: 227-234.
- [26] WIJAYARATNE L K W, FIELDS P G, ARTHUR F H. Effect of methoprene on the progeny production of *Tribolium castaneum* (Coleoptera: Tenebrionidae)[J]. *Pest Management Science*, 2012, 68(2): 217-224.
- [27] ARTHUR F H. Efficacy of methoprene for multi-year protection of stored wheat, brown rice, rough rice and corn[J]. *Journal of Stored Products Research*, 2016, 68: 85-92.
- [28] 姜雪, 赵珍, 龚超, 等. 应用 S-烯虫酯小麦防治米象和玉米象持效性模拟研究[J]. *中国粮油学报*, 2022, 37(4): 153-158.
- JIANG X, ZHAO Z, GONG C, et al. Simulation Study on Residual Effects of S-Methoprene on *Sitophilus oryzae* and *Sitophilus zeamais*[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2022, 37(4): 153-158.
- [29] ARTHUR F H. Residual efficacy of pyrethrin+methoprene for control of *Tribolium castaneum* and *Tribolium confusum* in a commercial flour mill[J]. *Journal of Stored Products Research*, 2015.
- [30] FIALHO R F, STEVENS L. Molecular evidence for single *Wolbachia* infections among geographic strains of the flour beetle *Tribolium confusum*[J]. *Proceedings of the Royal Society of London Series B*, 1997, 264(1384): 1065-1068.
- [31] WERREN J H, BAIDO L, CLARK M E. *Wolbachia*: master manipulators of invertebrate biology[J]. *Nature Reviews Microbiology*, 2008, 6(10): 741-751. ㊞
- 备注: 本文的彩色图表可从本刊官网 (<http://llyspkj.ijournal.cn>)、中国知网、万方、维普、超星等数据库下载获取。