

番茄潜叶蛾对四唑虫酰胺的抗性 选育及交互抗性研究*

朱雅婷^{1**} 张雅蒙¹ 郭晓君¹ 李 娅¹
张润祥¹ 吴青君² 封云涛^{1***}

(1. 山西农业大学植物保护学院, 农业有害生物综合治理山西省重点实验室, 太原 030031;

2. 中国农业科学院蔬菜花卉研究所, 蔬菜生物育种全国重点实验室, 北京 100081)

摘 要 【目的】明确番茄潜叶蛾 *Tuta absoluta* (Meyrick) 对四唑虫酰胺的抗药性发展趋势及对 7 种杀虫剂的交互抗性, 为四唑虫酰胺的田间应用提供理论依据。【方法】采用浸叶法, 在室内用四唑虫酰胺对番茄潜叶蛾进行抗性选育汰选, 评估了抗性发展趋势并研究了交互抗性。【结果】在室内经过 14 代 11 次汰选后, 获得了抗性倍数为 18.67 倍的番茄潜叶蛾四唑虫酰胺抗性品系。番茄潜叶蛾对四唑虫酰胺抗性现实遗传力 h^2 为 0.188 5, 在致死率为 50%-90% 选择压力下, 预计番茄潜叶蛾对四唑虫酰胺抗性增长 10 倍需要 3.59-8.00 代。番茄潜叶蛾抗四唑虫酰胺品系对茚虫威存在明显的交互抗性, 抗性倍数为 8.89; 对甲维盐、苏云金芽孢杆菌 (Bt) 存在负交互抗性, 抗性倍数分别为 0.80 和 0.25; 对氯虫苯甲酰胺、多杀菌素、毒死蜱和高效氯氟氰菊酯不存在交互抗性, 抗性倍数分别为 3.58、2.39、1.80 和 1.73。【结论】用四唑虫酰胺防治番茄潜叶蛾存在抗性风险, 番茄潜叶蛾四唑虫酰胺抗性品系会与其他药剂产生交互抗性, 以上结果可为田间科学使用四唑虫酰胺和合理轮换用药提供理论依据。

关键词 番茄潜叶蛾; 四唑虫酰胺; 抗性选育; 交互抗性

Resistance selection of *Tuta absoluta* (Meyrick) to tetraniliprole and cross-realistic analysis

ZHU Ya-Ting^{1**} ZHANG Ya-Meng¹ GUO Xiao-Jun¹ LI Ya¹
ZHANG Run-Xiang¹ WU Qing-Jun² FENG Yun-Tao^{1***}

(1. College of Plant Protection, Shanxi Agricultural University, Shanxi Key Laboratory of Integrated Pest Management in Agriculture, Taiyuan 030031, China; 2. State Key Laboratory of Vegetable Biobreeding, Institute of Vegetables and Flowers, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract 【Aim】This study aims to investigate the trend in resistance development in *Tuta absoluta* (Meyrick) to tetraniliprole, and its cross-resistance to seven other insecticides. This research will provide a theoretical basis for the field application of tetraniliprole. 【Methods】Resistance of *T. absoluta* to tetraniliprole was tested in the laboratory using the leaf dipping method. Subsequently, the resistance development trend and degree of cross-resistance were analyzed. 【Results】After 11 generations of indoor selection over 14 generations, a strain with a resistance ratio of 18.67 times was obtained. The realized resistance heritability of *Tuta absoluta* to tetraniliprole was 0.188 5. Tetraniliprole resistance is expected to increase 10-fold in 3.59-8.00 generations under selective pressures of 50%-90%. The resistant strain had obvious cross-resistance to indoxacarb, and the resistance ratio was 8.89. Negative cross-resistance to emamectin benzoate and *Bacillus thuringiensis* was 0.8 and 0.25-fold, respectively. There was no cross-resistance to chlorantraniliprole, spinosad, chlorpyrifos, or lambda-cyhalothrin, with resistance ratios of 3.58, 2.39, 1.8, and 1.73-fold, respectively. 【Conclusion】There is a risk of *T.*

*资助项目 Supported projects: 国家重点研发计划项目 (2023YFD1401200)

**第一作者 First author, E-mail: 2507568676@qq.com

***通讯作者 Corresponding author, E-mail: fyt52@126.com

收稿日期 Received: 2023-08-31; 接受日期 Accepted: 2023-11-20

absoluta developing resistance to teraniliprole. Furthermore, the resistant strain of *T. absoluta* can produce cross-resistance with several other insecticides. These results establish a theoretical basis for the scientific application of teraniliprole in the field and promote the judicious rotation of pesticide use.

Key words *Tuta absoluta*; tetraniliprole; resistance selection; cross-resistance

番茄潜叶蛾 *Tuta absoluta* (Meyrick) 属鳞翅目 Lepidoptera 麦蛾科 Gelechiidae, 又名南美番茄潜叶蛾、番茄潜麦蛾、番茄麦蛾(马菲等, 2011; 张桂芬等, 2018), 源自于南美洲的秘鲁, 是南美洲国家番茄上的主要害虫 (Desneux *et al.*, 2010), 主要以幼虫潜食茄科植物叶片, 使受害叶片皱缩甚至枯萎脱落, 影响作物光合作用, 发生严重时会造成番茄产量减损 80%-100% (Desneux *et al.*, 2010) 和巨大的经济损失, 此外, 番茄潜叶蛾还能危害包括豆科、锦葵科、苋科等在内的 11 科 50 种植物 (张桂芬等, 2022)。2004 年欧洲和地中海植物保护组织 (European and Mediterranean Plant Protection Organization, EPPO) 将番茄潜叶蛾列为 A1 类检疫有害生物 (张桂芬等, 2013); 2006 年年底, 该虫首次入侵西班牙东部, 之后迅速向东南地区扩散 (Desneux *et al.*, 2010; Biondi *et al.*, 2018), 3 年就遍布了整个地中海区域; 2017 年 8 月, 首次在我国新疆伊犁发现番茄潜叶蛾, 冼晓青等 (2019) 对其进行了综合风险评估, 确定了番茄潜叶蛾属于风险性极高的农业入侵害虫; 截止 2022 年, 不到 5 年时间, 该害虫已经在我国四川、广西、湖南、江西等 13 个省 (直辖市、自治区) 被发现 (陆永跃, 2021; 张桂芬等, 2022), 不仅对我国局部地区番茄产业造成了严重危害, 也对我国其他作物 (如黄瓜、辣椒等) 的安全生产存在着潜在的巨大威胁。

番茄潜叶蛾繁殖力和隐蔽性强, 且世代重叠, 化学防治是控制其危害的重要方式之一 (Desneux *et al.*, 2011), 然而药剂的持续大量施用, 会导致番茄潜叶蛾对药剂产生极高抗性风险 (Siqueira *et al.*, 2000; Silva *et al.*, 2011; Campos *et al.*, 2015; Roditakis *et al.*, 2015)。在 21 世纪初, 国外多个不同地区已有番茄潜叶蛾对有机磷类杀虫剂、拟除虫菊酯、阿维菌素、

杀螟丹、氰氟虫腙、氯菊酯和印楝素等药剂产生抗性 (Siqueira *et al.*, 2000, 2001; Salazar and Araya, 2001) 的报道; 近十年内, 又发现其对昆虫生长调节剂、茚虫威、苏云金芽孢杆菌 (*Bacillus thuringiensis*, 简称 Bt)、联苯菊酯、双酰胺类等杀虫剂产生高等水平抗性 (抗性倍数 >100) (Silva *et al.*, 2011; Roditakis *et al.*, 2015, 2018)。庾琴等 (2022) 报道南美番茄潜叶蛾对溴氰菊酯产生较高抗性; 李晓维等 (2022) 研究发现云南和新疆番茄潜叶蛾种群对氯虫苯甲酰胺都达到高抗, 抗性倍数分别为 212.7 和 169.3 倍, 对多杀菌素和茚虫威抗性倍数均达到中等水平抗性 (20 倍左右), 抗药性的产生加大了番茄潜叶蛾的防治难度。

四唑虫酰胺 (Tetraniliprole) 又名氰氟虫酰胺, 是拜耳公司新研发的邻甲酰胺基苯甲酰胺类杀虫剂 (谭海军, 2021), 是一种低毒、高效的新型双酰胺类杀虫剂。该药剂以胃毒为主, 通过与害虫体内的鱼尼丁受体高度亲和性结合后, 引起细胞内钙离子过度释放, 导致虫体肌肉细胞收缩麻痹, 从而杀死害虫 (李洋, 2021)。2020 年我国正式批准登记四唑虫酰胺 90% 原药和 200 g/L 悬浮剂 (李洋, 2021, 盛祝波等, 2021), 可有效防治草地贪夜蛾 *Spodoptera frugiperda* (池艳艳等, 2023)、稻纵卷叶螟 *Cnaphalocrocis medinalis* (Guenee) (胡健等, 2022; 王晓飞等, 2023)、柑桔潜叶蛾 *Phyllocnistis citrella* (池艳艳等, 2021; 甘宁等, 2021)、桃蚜 *Myzus persicae* (英君伍等, 2021)、蓟马 *Thripidae* (陈小平等, 2021)、斜纹夜蛾 *Spodoptera litura* (徐丽娜等, 2020)、水稻二化螟 *Chilo suppressalis* (Walker) (李卫等, 2019) 等害虫, 尤其对鳞翅目害虫高效。目前国内对四唑虫酰胺的报道多集中在药效试验上, 关于番茄潜叶蛾对四唑虫酰胺产生抗性的相关研究尚未见报道, 为了解番

茄潜叶蛾对四唑虫酰胺的抗性发展动态, 延长四唑虫酰胺的使用寿命, 本研究在室内开展了番茄潜叶蛾对四唑虫酰胺抗性选育及抗性风险评估研究, 并测定了四唑虫酰胺抗性品系对 7 种杀虫剂的交互抗性, 为四唑虫酰胺田间科学合理用药提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

1.1.1 供试害虫 敏感品系 (S): 于 2021 年 6 月采自山西省太原市小店区番茄大棚, 在不接触任何药剂的情况下在室内用番茄苗连续饲养至今, 作为本实验的敏感品系。抗性品系 (R): 于 2021 年 12 月 1 日开始, 从敏感品系中分离出一部分群体, 在室内用四唑虫酰胺多代汰选选育而成。 F_n 代表筛选第 n 代的试虫。两品系均在相对湿度 (26±1) °C、相对湿度 60%-70%、光周期 16:8D 的恒温养虫室内饲养。

1.1.2 供试药剂 200 g/L 四唑虫酰胺悬浮剂购于拜耳作物科学(中国)有限公司北京分公司, 95.3%氯虫苯甲酰胺 (Chlorantraniliprole) 原药购于上海杜邦农药有限公司, 96.1%高效氯氟氰菊酯 (Lambda-cyhalothrin) 原药购于江苏皇马农化有限公司, 96%毒死蜱 (Chlorpyrifos) 原药购于济南绿霸农药有限公司, 95%氨基阿维菌素苯甲酸盐 (Emamectin benzoate, 简称甲维盐) 原药、92%多杀菌素 (Spinosad) 原药、90%茚虫威 (Indoxacarb) 原药和 50 000 IU/mg 苏云金芽孢杆菌 Bt 原药均购于湖北玖丰隆化工有限公司。

1.2 试验方法

1.2.1 室内毒力测定 参照李晓维等 (2022) 全叶浸叶法并略有改进。用丙酮溶解原药并配置成母液, 之后用蒸馏水将药剂依次配置成 5-7 个浓度梯度。取新鲜、长势较好且无虫卵的番茄叶片分别在对照组和不同浓度的药液中浸泡 15 s, 取出后放在垫有湿润滤纸的培养皿 (直径 9 cm) 上, 用湿脱脂棉包裹住叶片茎段切口保湿, 把叶片晾干直到表面无明水。以清水为对照, 共设置

5-6 个处理, 每个培养皿各接 2-3 龄幼虫 15-20 头, 盖上皿盖, 置于光照培养箱中 (相对温度 (26±1) °C、相对湿度 60%-70%、光周期 16L:8D), 每处理 4 次重复, 48 h 后观察结果。用毛笔尖轻轻触碰虫体 (对于表皮内的幼虫, 先轻轻撕开叶表皮后再轻触虫体), 将虫体体表皱缩、变形及丧失行动能力的视为死亡, 记录死亡结果。

1.2.2 抗性品系选育 通过室内毒力测定, 得出敏感品系 LC_{50} , 根据该结果确定第 1 代筛选浓度, 随后采用喷雾法进行抗性筛选。将 200 g/L 四唑虫酰胺悬浮剂配置成杀死品系 20%-80% 的剂量, 用小型喷雾器对虫笼里的番茄苗和番茄潜叶蛾 2-3 龄幼虫进行喷雾, 使番茄苗叶片上布满药剂, 需更换的新鲜番茄苗也喷以相同浓度的药液, 然后置于恒温养虫室内隔离饲养, 之后每隔 20-30 d 用小型喷雾器将相同浓度药液均匀喷洒于已有幼虫的番茄苗上, 存活个体作为下一代虫源, 每隔 1-2 代进行一次室内毒力测定, 以掌握抗性发展情况并且及时调整下一代筛选浓度。若因选择压力较大导致品系数量较少时, 则间隔一代用药, 使品系保持较大数量。

1.2.3 抗性风险评估 采用 Tabashnik 阈值分析法 (Tabashnik, 1992), 估算番茄潜叶蛾对四唑虫酰胺的抗性现实遗传力。抗性现实遗传力 $h^2 = R/S$, 其中, R 为选择反应, S 为选择差异。 $R = [\log \text{终 } LC_{50} - \log \text{始 } LC_{50}] / n$, n 为选择代数, $S = i\delta p$, 其中 i 表示选择强度, δp 表示表现型标准差。 $i \approx 1.583 - 0.019 33p + 0.000 04p^2 + 3.651 94/p$ ($10 < p < 80$); $p = (1 - \text{平均校正死亡率}) \times 100$, p 表示筛选成活率; $\delta p = [1/2 (\text{初斜率} + \text{终斜率})]^{-1}$ 。

根据抗性现实遗传力 h^2 可预测抗性上升 x 倍需要的代数 G_x , $G_x = \log x / (h^2 S)$ 。在不同选择压力下 (50%-90%), 推算番茄潜叶蛾抗性上升 10 倍所需代数。

1.2.4 交互抗性测定 采用浸叶法分别测定氯虫苯甲酰胺、高效氯氟氰菊酯、毒死蜱、多杀菌素、茚虫威、甲维盐和 Bt 杀虫剂对四唑虫酰胺抗性品系和敏感品系的毒力。

1.2.5 数据统计分析 采用 Probit-MSChart (版本 2022.5.10) 软件对室内毒力测定数据进行处理, 分别计算出番茄潜叶蛾敏感和抗性品系的毒

力回归方程、致死中浓度 LC_{50} 及 95% 置信区间、卡方值和自由度。抗性倍数 (Resistance ratio, RR) = 抗性品系 LC_{50} /敏感品系 LC_{50} 。 $RR < 1$ 表示负交互抗性, $1 \leq RR < 5$ 表示无交互抗性或无抗性, $RR \geq 5$ 表示有交互抗性或有抗性(沈晋良等, 1991)。

2 结果与分析

2.1 番茄潜叶蛾对四唑虫酰胺的抗性选育

由表 1 可知, 用四唑虫酰胺对番茄潜叶蛾连

续饲养 14 代, 汰选 11 代后, 获得抗性倍数为 18.67 倍的番茄潜叶蛾抗性品系, 其 LC_{50} 值由汰选前的 0.220 mg/L 上升为 4.108 mg/L。

结合图 1 可知, 在抗性选育过程中, 汰选初期种群的敏感度很高, 抗性发展缓慢, F_0 - F_4 代, LC_{50} 值仅由 0.220 mg/L 上升到 0.326 mg/L, 抗性倍数缓慢上升为 1.48; F_7 代时, LC_{50} 值上升为 1.585 mg/L, 抗性倍数达到 7.20, 初步形成抗性品系; F_8 - F_{14} 代, LC_{50} 值呈现增长趋势, 由 1.585 mg/L 上升到 4.108 mg/L, 抗性倍数升至 18.67, 番茄潜叶蛾抗性品系已达到中等水平抗性。

表 1 番茄潜叶蛾对四唑虫酰胺的抗性选育
Table 1 The resistance selection of *Tuta absoluta* against tetraniliprole

世代 Generations	毒力回归方程 $y=a+bx$	斜率±标准误 Slope±SE	LC_{50} (95%置信限) (mg/L) LC_{50} (95% CL) (mg/L)	卡方 (自由度) χ^2 (df)	抗性倍数 Resistance ratio
F_0	$y=5.99+1.51x$	1.51 ± 0.16	0.220 (0.161-0.301)	5.048 (4)	1.00
F_3	$y=5.59+1.17x$	1.17 ± 0.18	0.314 (0.174-0.567)	5.860 (4)	1.43
F_4	$y=5.47+0.97x$	0.97 ± 0.17	0.326 (0.189-0.577)	4.045 (4)	1.48
F_5	$y=5.10+0.87x$	0.87 ± 0.15	0.777 (0.494-1.371)	2.230 (4)	3.53
F_6	$y=5.05+1.49x$	1.49 ± 0.22	0.921 (0.619-1.440)	3.985 (4)	4.19
F_7	$y=4.72+1.41x$	1.41 ± 0.25	1.585 (1.249-2.149)	1.058 (4)	7.20
F_8	$y=4.66+1.28x$	1.28 ± 0.18	1.851 (1.404-2.555)	1.983 (4)	8.41
F_{12}	$y=4.49+1.03x$	1.03 ± 0.15	3.123 (2.042-5.912)	2.940 (4)	14.20
F_{13}	$y=4.38+1.04x$	1.04 ± 0.16	3.959 (2.716-6.087)	2.440 (4)	18.00
F_{14}	$y=4.47+0.87x$	0.87 ± 0.15	4.108 (3.001-5.579)	1.281 (4)	18.67

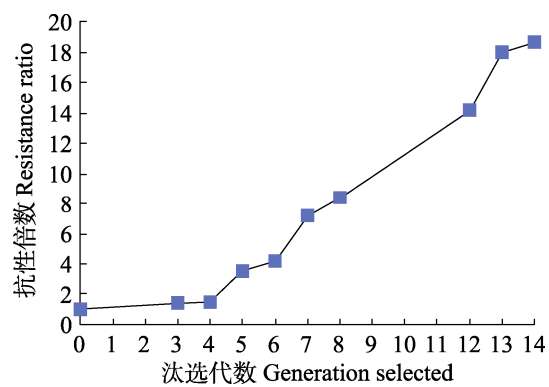


图 1 番茄潜叶蛾对四唑虫酰胺的抗性发展
Fig. 1 The dynamics of tetraniliprole resistance in *Tuta absoluta*

2.2 番茄潜叶蛾对四唑虫酰胺的抗性现实遗传力

用四唑虫酰胺对番茄潜叶蛾汰选 11 代后,

其抗性现实遗传力 h^2 为 0.188 5 (表 2)。 F_0 - F_4 、 F_4 - F_7 和 F_7 - F_{14} 各阶段的 h^2 分别为 0.086 5、0.277 1 和 0.120 1, 结合表 1 可以看出, 在筛选前期 (F_0 - F_4), 抗性发展缓慢, 仅上升了 1.48 倍; F_4 - F_7 连续筛选 4 代后, 抗性发展迅速, 增长 4.86 倍; F_7 - F_{14} 非连续汰选 5 代后, 抗性升高后趋于平缓, 抗性增长 2.59 倍, $h^2 (F_4-F_7) > h^2 (F_7-F_{14}) > h^2 (F_0-F_4)$, 二者表现一致。

根据得出的 F_0 - F_{14} 现实遗传力 (h^2) 0.188 5, 即 δp 为 0.840, 在实验室条件下, 当死亡率分别为 50%、60%、70%、80% 和 90% 时, 预计番茄潜叶蛾对四唑虫酰胺的抗性增长 10 倍, 分别需要约 8.00、6.54、5.44、4.53 和 3.59 代 (图 2)。该结果表明, 番茄潜叶蛾对四唑虫酰胺具有较高的抗性风险, 在现实遗传力稳定的情况下, 其抗

表 2 番茄潜叶蛾抗性品系抗性遗传力的估算

Table 2 Estimation of realized heritability of resistance to R strain of *Tuta absoluta*

汰选代数 Selected generations	选择反应 R Response to selection			选择差异 S Selection differential						现实遗传力 h^2 Realized heritability
	始 LC_{50} (mg/L) Initial LC_{50} (mg/L)	终 LC_{50} (mg/L) Final LC_{50} (mg/L)	选择响应 R Response to selection	存活率 P Survival rate	选择强度 i Intensity of selection	初斜率 b Initial slope	终斜率 b Final slope	标准差 δp Phenotypic standard deviation	选择差异 S Selection differential	
4(F_0 - F_4)	0.220	0.326	0.042 7	60.99	0.612 8	1.510	0.972	0.805 8	0.493 8	0.086 5
4(F_4 - F_7)	0.326	1.585	0.171 7	53.16	0.737 1	0.972	1.407	0.840 7	0.619 7	0.277 1
5(F_7 - F_{14})	1.585	4.108	0.082 7	50.25	0.785 4	1.407	0.871	0.877 2	0.689 0	0.120 1
11(F_0 - F_{14})	0.220	4.108	0.115 6	53.59	0.730 2	1.510	0.871	0.840 0	0.613 3	0.188 5

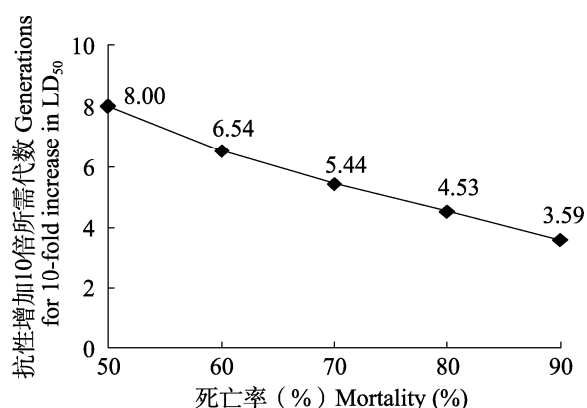


图 2 不同选择压力下番茄潜叶蛾对四唑虫酰胺抗性发展 10 倍所需代数

Fig. 2 Generations for *Tuta absoluta* to develop 10-fold resistance to tetraniliprole under different selection pressures

性发展速率会随着药剂杀死率的提高而加快。

2.3 番茄潜叶蛾抗四唑虫酰胺品系对其他杀虫剂的交互抗性

如表 3 所示, 对 7 种杀虫剂交互抗性测定结果表明, 氯虫苯甲酰胺、高效氯氟氰菊酯、毒死蜱和多杀菌素对两品系抗性倍数分别为 3.58、1.73、1.80 和 2.39, 与四唑虫酰胺不存在交互抗性, 但多杀菌素两品系 LC_{50} 值的 95% 置信限没有交叉, 因此有产生交互抗性的可能; 对茚虫威存在明显的交互抗性, 抗性倍数为 8.89; 对甲维盐和 Bt 则存在负交互抗性, 抗性倍数分别为 0.80 和 0.25。

3 结论与讨论

四唑虫酰胺作为一种新型双酰胺类杀虫剂, 可有效防治鳞翅目、双翅目和鞘翅目等害虫, 但目前已有害虫对四唑虫酰胺产生抗性的报道, 2018-2019 采自河南安阳的甜菜夜蛾 *Spodoptera exigua* (Hübner) 田间种群对四唑虫酰胺产生了 128.1 倍高水平抗性 (赵云霞, 2020); 在室内选育方面, 刘宴弟 (2021) 用四唑虫酰胺对桃小食心虫 *Carposina sasakii* 筛选 10 代, 得到抗性倍数为 7.86 倍的抗性种群; 钱梦雅 (2021) 用四唑虫酰胺对亚洲玉米螟 *Ostrinia furnacalis* 筛选 11 代, 获得了 11.51 倍的中抗品系。本研究用四唑虫酰胺对番茄潜叶蛾饲养 14 代汰选 11 代后, 其产生了 18.67 倍的中等抗性, 选育前 4 代, 抗性发展缓慢, 第 4 代后, 抗性发展加快, 抗性发展整体呈现先缓后升的趋势。

抗性风险评估为研究害虫抗性机理、后期防控及杀虫剂的科学使用提供依据, 目前常用的抗性风险评估方法是根据抗性现实遗传力 h^2 来预测害虫在一定选择压力下对杀虫剂的抗性发展速率。黄国玉 (2022) 在室内用四氯虫酰胺对草地贪夜蛾筛选 10 代, h^2 为 0.13, 在致死率为 50%-90% 时, 抗性上升 10 倍需要 1.77-11.59 代; 陈琼等 (2015) 在室内用唑虫酰胺对小菜蛾 *Plutella xylostella* (Linnaeus) 进行了 26 代 24 次抗性选育, h^2 为 0.1672, 致死率为 50%-90% 时,

表 3 番茄潜叶蛾四唑虫酰胺抗性品系对 7 种杀虫剂的交互抗性
Table 3 Cross-resistance of tetraniliprole- resistance strain of *Tuta absoluta* to seven insecticides

杀虫剂 Insecticides	品系 Strains	斜率±标准误 Slope±SE	LC ₅₀ (95%置信限) (mg/L) LC ₅₀ (95% CL) (mg/L)	卡方 (自由度) χ^2 (df)	抗性倍数 Resistance ratio
氯虫苯甲酰胺 Chlorantraniliprole	S	0.87±0.12	1.051 (0.419-2.209)	6.314 (4)	3.58
高效氯氟氰菊酯 Lambda-cyhalothrin	R	1.39±0.22	3.762 (1.495-8.917)	7.191 (4)	
毒死蜱 Chlorpyrifos	S	1.03±0.20	275.041 (139.889-536.143)	3.083 (3)	1.73
多杀菌素 Spinosad	R	2.24±0.29	474.813 (357.4-630.509)	2.197 (3)	
茚虫威 Indoxacarb	S	0.71±0.20	117.264 (33.029-399.841)	2.215 (3)	1.80
甲氨基阿维菌素 Emamectin benzoate	R	1.68±0.21	210.776 (128.857-343.047)	4.343 (3)	
苯甲酸盐 Bacillus thuringiensis	S	1.55±0.22	0.388 (0.307-0.487)	0.938 (3)	2.39
苏云金芽孢杆菌 Bacillus thuringiensis	R	1.25±0.15	0.927 (0.756-1.125)	1.104 (4)	
	S	1.23±0.15	2.127 (1.436-3.048)	3.573 (4)	8.89
	R	1.02±0.16	18.912 (9.528-41.913)	5.356 (4)	
	S	1.55±0.16	0.208 (0.140-0.290)	3.675 (4)	0.80
	R	1.24±0.15	0.166 (0.110-0.242)	3.680 (4)	
	S	1.29±0.28	35.95 × 10 ⁷ (24.061 × 10 ⁷ - 54.568 × 10 ⁷)	0.858 (3)	0.25
	R	0.88±0.20	9.002 × 10 ⁷ (3.065 × 10 ⁷ - 23.931 × 10 ⁷)	4.013 (3)	

S: 敏感品系; R: 抗性品系。
S: Sensitive strain; R: Resistant strain.

抗性上升 10 倍需要 6.8-15.0 代。从本研究室内 11 代汰选结果来看, 抗性倍数上升 18.76 倍, 最终 h^2 为 0.188 5, 致死率为 50%-90%时, 预计抗性增长 10 倍, 需要 3.59-8.00 代, 表明番茄潜叶蛾对四唑虫酰胺产生抗性的风险较大。由于室内环境相比于田间稳定, 抗性筛选过程中所采用的喷雾法可能使试验幼虫受药不均匀等原因, 因此室内 h^2 估算值可能高于田间实际值, 虽然抗性结果并不能直接用于田间, 但一定程度上也反映了该杀虫剂的基本特点, 仍然可以为制定预防性抗性治理策略提供理论参考。

交互抗性是指害虫对一种杀虫剂产生抗性后, 对其他从未接触过的杀虫剂也产生抗性的现象, 新型杀虫剂的推广应用和抗性有效治理措施会受到交互抗性的影响, 因此, 明确害虫交互抗性谱对抗性治理具有重要意义。本研究发现, 番茄潜叶蛾对四唑虫酰胺产生抗性之后, 对茚虫威表现出明显的交互抗性, 而对氯虫苯甲酰胺 (3.58 倍)、高效氯氟氰菊酯 (1.73 倍)、毒死蜱 (1.80 倍) 和多杀菌素 (2.39 倍) 不存在交互抗性, 对甲维盐 (0.80 倍) 和

Bt (0.25 倍) 则存在负交互抗性。类似结果在其他研究中也报道, 刘佳等 (2012) 报道甜菜夜蛾抗氯虫苯甲酰胺品系对茚虫威 (22.16 倍) 存在交互抗性, 钱梦雅 (2021) 筛选的亚洲玉米螟抗四唑虫酰胺品系对氯虫苯甲酰胺 (2.8 倍)、甲维盐 (0.96 倍) 无交互抗性, 谭晓伟 (2012) 报道抗氯虫苯甲酰胺小菜蛾种群对高效氯氟氰菊酯 (1.0 倍)、毒死蜱 (1.2 倍) 和多杀菌素 (1.3 倍) 没有表现出交互抗性。交互抗性产生的机制与多种抗性因子相关, 虽然同种类杀虫剂作用机理相同, 但害虫抗性机制涉及到生理生化抗性和行为抗性等因素, 所以很有可能出现害虫对同种类杀虫剂不存在交互抗性, 而对其他种类杀虫剂产生交互抗性的现象。因此, 建议在防治番茄潜叶蛾的过程中选择与四唑虫酰胺无交互抗性的杀虫剂进行交替轮换使用, 延缓番茄潜叶蛾对四唑虫酰胺抗性的发展。

番茄潜叶蛾具有世代重叠、繁殖快等特点, 有利于抗药性的形成, 今后生产上在防治番茄潜叶蛾特别是在抗性的早期阶段, 有必要加强番茄潜叶蛾对四唑虫酰胺的抗性监测和抗性机制研

究, 再结合农业防治和生物防治, 制定相应的预防性抗性治理对策, 从而为该药的合理应用、延长其使用寿命以及番茄潜叶蛾抗性综合治理提供科学依据。

参考文献 (References)

- Biondi A, Guedes RNC, Wan FH, Desneux N, 2018. Ecology, worldwide spread, and management of the invasive South American tomato pinworm, *Tuta absoluta*: Past, present, and future. *Annual Review of Entomology*, 63: 239–258.
- Campos MR, Silva TBM, Silva WM, Silva JE, Siqueira HAA, 2015. Spinosyn resistance in the tomato borer *Tuta absoluta* (Meyrick) (Lepidoptera: Gelechiidae). *Journal of Pest Science*, 88(2): 405–412.
- Chen Q, Chen JQ, Huang SJ, Chen HF, Qin WJ, Qin HG, 2015. Realized heritability and risk assessment of resistance of *Plutella xylostella* to toltenpyrad. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences*, 31(2): 267–271. [陈琼, 陈洁琼, 黄水金, 陈洪凡, 秦文婧, 秦厚国, 2015. 小菜蛾对唑虫酰胺的抗性现实遗传力及风险评价. 江苏农业学报, 31(2): 267–271.]
- Chen XP, Liu AP, Guan SF, Yu WW, Ren YG, Liu XP, 2021. Diamide insecticides and their application market and prospect of controlling sucking pests. *World Pesticide*, 43(11): 1–12. [陈小平, 柳爱平, 关少飞, 余蔚蔚, 任叶果, 刘兴平, 2021. 双酰胺类杀虫剂及其应用市场与防治刺吸式口器害虫前景. 世界农药, 43(11): 1–12.]
- Chi YY, Lin SY, Chen BX, Quan LF, 2021. Evaluation of effect of tetrazolamide on control of *Phyllocnistis citrella* in the field. *Fruit Trees in Southern China*, 50(2): 23–25. [池艳艳, 林少源, 陈炳旭, 全林发, 2021. 四唑虫酰胺对柑桔潜叶蛾的田间防效评价. 中国南方果树, 50(2): 23–25.]
- Chi YY, Lin SY, Chen BX, Xu S, 2023. Toxicity and field efficacy of tetraniliprole against *Spodoptera frugiperda*. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 39(7): 111–115. [池艳艳, 林少源, 陈炳旭, 徐淑, 2023. 四唑虫酰胺对草地贪夜蛾的毒力评价及田间防效. 中国农学通报, 39(7): 111–115.]
- Desneux N, Luna MG, Guillemaud T, Urbaneja A, 2011. The invasive south American tomato pinworm, *Tuta absoluta*, continues to spread in Afro-Eurasia and beyond: The new threat to tomato world production. *Journal of Pest Science*, 84(4): 403–408.
- Desneux N, Wajnberg E, Wyckhuys KAG, Burgio G, Arpaia S, Narváez-Vasquez CA, González-Cabrera J, Ruescas DC, Tabone E, Frandon J, Pizzol J, Poncet C, Cabello T, Urbaneja A, 2010. Biological invasion of European tomato crops by *Tuta absoluta*: Ecology, geographic expansion and prospects for biological control. *Journal of Pest Science*, 83(3): 197–215.
- Gan N, Liang ZL, Cao XY, Liang XR, 2021. Field efficacy of tetraniliprole SC to *Phyllocnistis citrella*. *Guangxi Plant Protection*, 34(2): 34–35. [甘宁, 梁载林, 曹相余, 梁秀荣, 2021. 四唑虫酰胺 SC 防治柑橘潜叶蛾田间保叶效果试验. 广西植保, 34(2): 34–35.]
- Hu J, Gu LL, Qiu XP, Cheng XS, 2022. Control effect of tetraniliprole on *Cnaphalocrocis medinalis*. *Modern Agrochemicals*, 21(5): 70–72. [胡健, 谷莉莉, 仇学平, 成晓松, 2022. 四唑虫酰胺对水稻纵卷叶螟的防治效果. 现代农药, 21(5): 70–72.]
- Huang GY, 2022. Resistance risk assessment and preliminary study on resistance mechanism of *Spodoptera frugiperda* to tetrachlorantraniliprole. Master dissertation. Wuhan: Huazhong Agricultural University. [黄国玉, 2022. 草地贪夜蛾对四氯虫酰胺的抗性风险评估及抗性机理初探. 硕士学位论文. 武汉: 华中农业大学.]
- Li W, Zhang Y, Jia HR, Li BT, 2019. Field efficacy of tetraniliprole 18% SC on rice *Chilo suppressalis*. *Agrochemicals*, 58(3): 221–222. [李卫, 张月, 贾浩然, 李保同, 2019. 18%四唑虫酰胺悬浮剂对水稻二化螟的田间防效. 农药, 58(3): 221–222.]
- Li XW, Ma L, Lü YB, 2022. Susceptibility of Xinjiang and Yunnan populations of *Tuta absoluta* (Lepidoptera: Gelechiidae) to six insecticides and its relationship with detoxification enzyme activities. *Acta Entomologica Sinica*, 65(8): 1010–1017. [李晓维, 马琳, 吕要斌, 2022. 新疆和云南番茄潜叶蛾种群对六种杀虫剂的敏感性及其与解毒酶活性的关系. 昆虫学报, 65(8): 1010–1017.]
- Li Y, 2021. Pesticide registration and new pesticides registered in China in 2020. *World Pesticide*, 43(3): 10–15. [李洋, 2021. 2020 年农药登记及新农药品种. 世界农药, 43(3): 10–15.]
- Liu J, Bo LY, Zhou XM, 2012. Study on the cross resistance of *Spodoptera exigua* chlorworm benzamide resistant strain to other insecticides and the synergism of synergists. 50th Anniversary Celebration Conference and 2012 Academic Annual Meeting of the Chinese Plant Protection Society. Beijing: China Agricultural science and Technology Press. 526. [刘佳, 柏连阳, 周小毛, 2012. 甜菜夜蛾氯虫苯甲酰胺抗性品系对其他杀虫剂的交互抗性及其增效剂增效作用研究. 中国植物保护学会成立 50 周年庆祝大会暨 2012 年学术年会. 北京: 中国农业科学技术出版社. 526.]
- Liu YD, 2021. Study on resistance risk assessment and resistance mechanism of *Carposina sasakii* to diamide insecticides. Master dissertation. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences. [刘宴弟, 2021. 桃小食心虫对二酰胺类杀虫剂的抗性风险评估及抗性机理研究. 硕士学位论文. 北京: 中国农业科学院.]
- Lu YY, 2021. Be alert to the continuous spread and invasion of *Tuta absoluta* (Meyrick) in China. *Journal of Environmental Entomology*, 43(2): 526–528. [陆永跃, 2021. 警惕番茄潜叶蛾 *Tuta absoluta* (Meyrick) 在我国持续扩散入侵. 环境昆虫学报, 43(2): 526–528.]
- Ma F, Zhang JH, Yu YX, Cao YX, Duan SN, 2011. *Tuta absoluta* (Meyrick). *Plant Quarantine*, 25(5): 55–58. [马菲, 张俊华, 于艳雪, 曹逸霞, 段胜男, 2011. 番茄麦蛾. 植物检疫, 25(5): 55–58.]
- Qian MY, 2021. Resistance mechanism of *Ostrinia furnacalis* to tetraniliprole. Master dissertation. Hefei: Anhui Agricultural University. [钱梦雅, 2021. 亚洲玉米螟对四唑虫酰胺的抗性机理研究. 硕士学位论文. 合肥: 安徽农业大学.]

- Roditakis E, Vasakis E, García-Vidal L, del Rosario Martínez-Aguirre M, Rison JL, Haxaire-Lutun MO, Nauen R, Tsagkarakou A, Bielza P, 2018. A four-year survey on insecticide resistance and likelihood of chemical control failure for tomato leaf miner *Tuta absoluta* in the European/Asian region. *Journal of Pest Science*, 91(1): 421–435.
- Roditakis E, Vasakis E, Grispou M, Stavrakaki M, Nauen R, Gravouil M, Bassi A, 2015. First report of *Tuta absoluta* resistance to diamide insecticides. *Journal of Pest Science*, 88(1): 9–16.
- Salazar ER, Araya JE, 2001. Tomato moth, *Tuta absoluta* (Meyrick) response to insecticides in Arica, Chile. *Agricultura Técnica*, 61(4): 429–435.
- Shen JL, Tan JG, Xiao B, Tan FJ, You ZP, 1991. Monitoring and prediction of resistance of *Helicoverpa armigera* to pyrethroid insecticides in China. *Entomological Knowledge*, 28(6): 337–341. [沈晋良, 谭建国, 肖斌, 谭福杰, 尤子平, 1991. 我国棉铃虫对拟除虫菊酯类农药的抗性监测及预报. 昆虫知识, 28(6): 337–341.]
- Sheng ZB, Wang J, Pei HY, Gao YX, Zhang J, Zhang LX, 2021. A new insecticide tetraniliprole. *Agrochemicals*, 60(1): 52–56, 60. [盛祝波, 汪杰, 裴鸿艳, 高一星, 张静, 张立新, 2021. 新型杀虫剂四唑虫酰胺. 农药, 60(1): 52–56, 60.]
- Silva GA, Picanço MC, Bacci L, Crespo ALB, Rosado JF, Guedes RNC, 2011. Control failure likelihood and spatial dependence of insecticide resistance in the tomato pinworm, *Tuta absoluta*. *Pest Management Science*, 67(8): 913–920.
- Siqueira HAA, Guedes RNC, Fragozo DB, Magalhaes LC, 2001. Abamectin resistance and synergism in Brazilian populations of *Tuta absoluta* (Meyrick) (Lepidoptera: Gelechiidae). *International Journal of Pest Management*, 47(4): 247–251.
- Siqueira HAA, Guedes RNC, Picanço MC, 2000. Insecticide resistance in populations of *Tuta absoluta* (Lepidoptera: Gelechiidae). *Agricultural and Forest Entomology*, 2(2): 147–153.
- Tabashnik BE, 1992. Realized heritability of resistance to *Bacillus thuringiensis* in diamondback moth (Lepidoptera: Plutellidae), tobacco budworm (Lepidoptera: Noctuidae), and colorado potato beetle (Coleoptera: Chrysomelidae). *Journal of Economic Entomology*, 85(5): 1551–1559.
- Tan HJ, 2021. Characteristics, synthesis and application of a diamide insecticide: Tetraniliprole. *World Pesticide*, 43(9): 32–42, 56. [谭海军, 2021. 双酰胺类杀虫剂四唑虫酰胺的特点、合成与应用. 世界农药, 43(9): 32–42, 56].
- Tan XW, 2012. Resistance risk and sublethal effect of chlorantraniliprole in diamondback moth, *Plutella xylostella* (Lepidoptera: Plutellidae). Master dissertation. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences. [谭晓伟, 2012. 小菜蛾对氯虫苯甲酰胺的抗性风险及亚致死效应研究. 硕士学位论文. 北京: 中国农业科学院.]
- Wang XF, Li CM, Shi K, Sun HY, Fu YS, Jia W, 2023. Study on the control effect of 200 g/L tetrazolamide suspension on *Cnaphalocrocis medinalis* Guenee and *Sesamia inferens* (Walker). *Modern Agricultural Sciences and Technology*, 5: 107–109, 112. [王晓飞, 李春梅, 施坤, 孙环宇, 付佑胜, 贾蔚, 2023. 200 g/L 四唑虫酰胺悬浮剂对水稻稻纵卷叶螟和大螟的防效研究. 现代农业科技, 5: 107–109, 112.]
- Xian XQ, Zhang GF, Liu WX, Wan FH, 2019. Risk assessment of the invasion of the tomato leafminer *Tuta absoluta* (Meyrick) into China. *Journal of Plant Protection*, 46(1): 49–55. [洗晓青, 张桂芬, 刘万学, 万方浩, 2019. 世界性害虫番茄潜叶蛾入侵我国的风险分析. 植物保护学报, 46(1): 49–55.]
- Xu LN, Wu CY, Hu F, Zhou ZY, Hu BJ, 2020. Effects of tetraniliprole on the control of *Spodoptera litura* in cotton fields. *Xinjiang Agricultural Science*, 57(6): 1090–1094. [徐丽娜, 吴晨源, 胡飞, 周子燕, 胡本进, 2020. 四唑虫酰胺对棉田斜纹夜蛾的防治效果. 新疆农业科学, 57(6): 1090–1094.]
- Ying JW, Song YQ, Li B, Yang HB, 2021. Study on synthesis and bioactivity of tetraniliprole. *Modern Agrochemicals*, 20(6): 21–25. [英君伍, 宋玉泉, 李斌, 杨辉斌, 2021. 四唑虫酰胺的合成与杀虫活性. 现代农药, 20(6): 21–25.]
- Yu Q, Guo XJ, Feng YT, Du EQ, Liu X, Zhang RX, Hao C, 2022. Toxicity of six insecticides on *Tuta absoluta* (Meyrick) and control efficacy in field trials. *Journal of Biosafety*, 31(4): 345–350. [庾琴, 郭晓君, 封云涛, 杜恩强, 刘新, 张润祥, 郝赤, 2022. 6 种杀虫剂对南美番茄潜叶蛾的毒力及田间防效. 生物安全学报, 31(4): 345–350.]
- Zhang GF, Liu WX, Guo JY, Zhang YB, Wan FH, 2013. Species-specific CO I primers for rapid identification of *Tuta absoluta* (Meyrick), a significant, potential alien species. *Journal of Biosafety*, 22(2): 80–85. [张桂芬, 刘万学, 郭建洋, 张毅波, 万方浩, 2013. 重大潜在入侵害虫番茄潜叶蛾的 SS-CO I 快速检测技术. 生物安全学报, 22(2): 80–85.]
- Zhang GF, Liu WX, Wan FH, Xian XQ, Zhang YB, Guo JY, 2018. Bioecology, damage and management of the tomato leafminer *Tuta absoluta* (Meyrick) (Lepidoptera: Gelechiidae), a world wide quarantine pest. *Journal of Biosafety*, 27(3): 155–163. [张桂芬, 刘万学, 万方浩, 洗晓青, 张毅波, 郭建洋, 2018. 世界毁灭性检疫害虫番茄潜叶蛾的生物生态学及危害与控制. 生物安全学报, 27(3): 155–163.]
- Zhang GF, Zhang YB, Xian XQ, Liu WX, Li P, Liu WC, Liu H, Feng XD, Lü ZC, Wang YS, Huang C, Guo JY, Wan FH, Ma DY, Zhang XM, Gui FR, Li YH, Luo R, Wang HQ, Wang J, 2022. Damage of an important and newly invaded agricultural pest, *Phthorimaea absoluta*, and its prevention and management measures. *Plant Protection*, 48(4): 51–58. [张桂芬, 张毅波, 洗晓青, 刘万学, 李萍, 刘万才, 刘慧, 冯晓东, 吕志创, 王玉生, 黄聪, 郭建洋, 万方浩, 马德英, 张晓明, 桂富荣, 李亚红, 罗荣, 王慧卿, 王俊, 2022. 新发重大农业入侵害虫番茄潜叶蛾的发生为害与防控对策. 植物保护, 48(4): 51–58.]
- Zhao YX, 2020. Resistance monitoring in *Spodoptera frugiperda* and *Spodoptera exigua* and risk assessment of *Spodoptera exigua* to tetraniliprole. Master dissertation. Nanjing: Nanjing Agricultural University. [赵云霞, 2020. 草地贪夜蛾和甜菜夜蛾的抗药性监测及甜菜夜蛾对四唑虫酰胺的抗性风险评估. 硕士学位论文. 南京: 南京农业大学.]