

网络出版日期:2014-11-27

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/doi/10.7606/j.issn.1004-1389.2014.11.025.html>

3-二辛硫基-1,1,1-三氟-2-丙烷(OTFP)对小菜蛾 生长发育及农药敏感性的影响

任 可¹,李新慧¹,罗 川¹,马孝颖¹,田素芬¹,
田厚军²,陈艺欣²,魏 辉²,顾晓军¹

(1. 福建农林大学 植物保护学院,福州 350002;2. 福建省农科院 植物保护研究所,福州 350013)

摘 要 保幼激素是昆虫体内最重要的激素,保幼激素酯酶又是最重要的保幼激素代谢酶。为了探寻通过抑制保幼激素酯酶控制小菜蛾的可行性,测定保幼激素酯酶抑制剂 3-二辛硫基-1,1,1-三氟-2-丙烷(OTFP)对小菜蛾(*Plutella xylostella*)3龄、4龄幼虫的毒力,研究 OTFP 对小菜蛾 3龄幼虫蜕皮、4龄幼虫化蛹的影响,分析 OTFP 处理后小菜蛾 3龄、4龄幼虫农药敏感性的变化。结果表明:OTFP 对小菜蛾 3龄幼虫、4龄幼虫的毒力都很低,但能显著延迟 3龄幼虫蜕皮和 4龄幼虫化蛹,而且影响随其质量浓度升高而加剧;OTFP 处理后的 3龄试虫对 LC₅₀时的丁醚脲、茚虫威、Bt、印楝素的敏感性显著下降,协同毒力指数都显著低于-20,达到拮抗水平,说明 OTFP 在所设质量浓度下,能够降低小菜蛾 3龄幼虫对这几种农药的敏感性;但是对 4龄幼虫,OTFP 与以上 4种农药的共毒系数都显著高于 130,除个别处理外,OTFP 与各农药在所研究质量浓度下协同毒力指数都大于 0,并在几个处理中超过 20,显示 OTFP 能够提高 4龄幼虫对农药的敏感性。说明保幼激素酯酶抑制剂在小菜蛾控制中具有一定应用前景,但是若与农药配合使用,需要慎重选择使用时机、农药质量浓度等。

关键词 小菜蛾;3-二辛硫基-1,1,1-三氟-2-丙烷(OTFP);毒力;协同毒力指数(*c. f.*);共毒系数(CTI)

中图分类号 S433.4

文献标志码 A

文章编号 1004-1389(2014)11-0150-07

Effect of 3-Octyl-1,1,1-trifluoro-2-propanone (OTFP) on Growth and Development and Insecticide Sensitivity of Diamondback Moth, *Plutella xylostella*

REN Ke¹, LI Xinhui¹, LUO Chuan¹, MA Xiaoying¹, TIAN Sufen¹,
TIAN Houjun², CHEN Yixin², WEI Hui² and GU Xiaojun¹

(1. College of Plant Protection, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China;

2. Institute of Plant Protection, Fujian Academy of Agricultural Sciences, Fuzhou 350013, China)

Abstract Juvenile hormone (JH) is the most important hormone in the insects and juvenile hormone esterase (JHE) plays the greatest role in its metabolism. To find out the possibility of controlling the diamondback moth (DBM), *Plutella xylostella*, by means of JHE inhibition, the toxicities of 3-Octyl-1,1,1-trifluoro-2-propanone (OTFP), a specific JHE inhibitor, on both 3rd and 4th instar larvae of DBM were tested, the effect of OTFP on the molting of 3rd instar and pupation of the 4th instar larvae was investigated and the insecticide sensitivity changes of both 3rd and 4th instar larvae were measured.

收稿日期:2013-12-30 修回日期:2014-01-19

基金项目:国家公益性行业(农业)科研专项(201103021);国家自然科学基金(31240090);福建省杰出青年基金(2010J06008);福建省自然科学基金(2011J01085)。

第一作者:任 可,男,硕士研究生,从事农药毒理学研究。E-mail: rkhist@163.com

通信作者:顾晓军,男,博士,教授,硕士生导师,从事农药毒理学研究。E-mail: guxiaojun1@163.com

魏 辉,男,博士,研究员,硕士生导师,从事化学生态学和农业昆虫学研究。E-mail: weihui318@hotmail.com

The direct toxicity of OTFP on either 3rd or 4th instar larvae of DBM was comparatively low, but it prolonged the molting of 3rd instar larvae and pupation of the 4th instar larvae in a dose-dependent way. The cooperative virulence indice (*c. f.*) between OTFP pretreatment and diafenthiuron, indoxacarb, Bt and azadirachtin 3rd instar DBM larvae were all lower than -20 suggesting that OTFP pretreatment antagonized the toxicities of the four insecticides to the 3rd instar larvae at the set concentration. However, in 4th instar larvae, the co-toxicity indices (CTI) between OTFP pretreatment and the four above insecticides were all greater than 130 and the *c. f.* was positive in almost all treatments and even greater than 20 in several treatments, which indicated that OTFP pretreatment synergized the toxicities of the insecticides to the 4th instar larvae. Inferred from these, JHE inhibition helps for DBM control, but if combined with insecticide application, the administration time and the insecticide concentration should be taken into deep consideration.

Key words *Plutella xylostella*; 3-Octyl-1,1,1-trifluoro-2-propanone (OTFP); Toxicity; Cooperative virulence index (*c. f.*); Co-toxicity index (CTI)

小菜蛾 [*Plutella xylostella* (Linn.)] 属鳞翅目 (Lepidoptera), 菜蛾科 (Plutellidae) 昆虫, 是全世界十字花科蔬菜的最重要害虫。全球每年因小菜蛾为害所致损失加之其防治费用之和可达 40~50 亿美元^[1]。长期以来, 小菜蛾防治一直依赖农药特别是化学农药的使用, 但是该虫对农药抗性发展迅速。先前证实小菜蛾几乎已经对所有使用过的防治药剂包括传统的化学农药 (如有机氯类、有机磷类、拟除虫菊酯类、氨基甲酸酯类)、较为新颖的生长调节剂类及生物农药 (如 Bt 等) 都产生严重抗性^[2-3], 为此加快了新型药剂的开发步伐。但最近的调查发现新型药剂氯虫苯甲酰胺在华南地区仅使用 2 a (2009—2011 年), 便出现抗性水平高达 606.00 倍的田间种群^[4]。对于转基因作物, 小菜蛾也同样具有很强的抗性风险, 因为实验室条件下选育的小菜蛾 Bt 抗性种群也能在高表达 Bt 毒素 Cry1C 转基因花椰菜上完成生活史^[5]。可见, 无论是开发新型防治药剂还是培育转基因作物, 都难以克服小菜蛾抗性的产生, 其防治急需探索新的思路。

昆虫的生长发育受各类激素的调节, 其中以保幼激素的功能最为重要^[6]。因为该激素几乎参与昆虫体内的所有生理过程, 如幼期形态及性状的保持; 蜕皮性质的决定; 蚜虫、蝗虫等多型性昆虫翅型分化及蚂蚁、蜜蜂、白蚁等社会性昆虫等级分化的调控; 成虫生殖腺的发育的调控等^[7-12]。此外, 保幼激素也影响昆虫取食、防御与攻击、迁飞、求偶与交配、产卵等行为^[13]。保幼激素的功能如此重要, 因而一直是新型药剂开发的重要靶标。

昆虫体内参与保幼激素代谢的酶包括保幼激素酯酶 (Juvenile hormone esterase, JHE)、保幼激素环氧水解酶 (Juvenile hormone epoxide hydrolase, JHEH) 和保幼激素二醇激酶 (Juvenile hormone diol kinase, JHDK) 3 类^[14-15]。其中保幼激素酯酶既能有效降解游离态的保幼激素, 也能有效降解结合态的保幼激素^[6], 并为全变态昆虫高龄幼虫化蛹前体内保幼激素低水平的维持发挥关键作用^[16], 因而是昆虫体内最重要的保幼激素代谢酶。

无疑, 保幼激素酯酶活性受抑制后必然会导致害虫体内保幼激素水平失衡, 进而引发害虫生长发育紊乱, 最终有助于害虫控制。但是保幼激素酯酶活性抑制后是否影响害虫农药敏感性? 保幼激素酯酶抑制剂能否与农药混用以提高农药使用效果? 有关这方面的研究尚未见报道。鉴于此, 本试验以小菜蛾作为对象, 研究保幼激素酯酶抑制对小菜蛾农药敏感性的影响, 以期阐明保幼激素酯酶抑制剂与农药联合作用控制小菜蛾的可行性。

1 材料与方法

1.1 试剂与药品

$\omega=20\%$ 丁醚脲 (Diafenthiuron) 乳油, 国家公益性行业 (农业) 科研专项统一配制, 浙江省农科院植物保护研究所提供; $\omega=5\%$ 茚虫威 (Indoxacarb) 乳油, 国家公益性行业 (农业) 科研专项统一配制, 浙江省农科院植物保护研究所提供; Bt (*Bacillus thuringiensis*) 16 000 IU/L 可湿性粉剂, 福建浦城绿安生物农药有限公司; $\omega=0.3\%$

印楝素(Azadirachtin)乳油,成都绿金生物科技有限责任公司;3-二辛硫基-1,1,1-三氟-2-丙酮(OTFP),上海朵成化工科技有限公司按照 Hammock 等^[17]报道的方法合成。

各农药以蒸馏水(含 $\varphi=1\%$ 丙酮、 $\varphi=1\%$ Triton)稀释,OTFP 以蒸馏水(含 $\varphi=1\%$ 乙酸乙酯、 $\varphi=1\%$ Triton)稀释至 5 300、2 650、1 325、662.5 mg/L 4 个质量浓度。

1.2 试虫饲养

采用萝卜苗饲养试虫^[18]。从福州大学大学城校区周边菜地(119.28°E、26.08°N)采集小菜蛾蛹置于养虫笼中,成虫羽化后以 $\varphi=10\%$ 蜂蜜水补充营养,并移入盆栽萝卜苗供其产卵。幼虫孵化后以萝卜苗为食,每 24 h 更换萝卜苗。饲养条件为:光周期 L:D=14:10,温度 25℃,相对湿度 70%~80%。室内不接触农药饲养 1 代以后用于试验。

1.3 毒力测定

采用浸叶法。选取未接触过农药药的新鲜甘蓝叶片,自来水冲洗干净并自然晾干。避开主叶脉用打孔器制作直径 3 cm 的叶碟,在药液中浸渍 10 s 后取出,滤纸吸去多余药液并晾干。后转入底部垫有湿润滤纸、直径 3.5 cm 的培养皿中,并接入体长一致、饥饿 2 h 试虫(3 龄幼虫体长 5 mm,4 龄幼虫体长 7 mm),每皿 10 头。对照以蒸馏水(含 $\varphi=1\%$ 乙酸乙酯或丙酮、 $\varphi=1\%$ Triton)处理,每个质量浓度处理及对照均重复 3 次,并且每 24 h 更换叶碟。试虫处理后置于人工气候箱中,温湿度条件同饲养条件。

每 12 h 观察试虫存活情况,记录死虫数,并及时移出死虫;计算死亡率、校正死亡率。试虫死亡的判断标准为以 0 号毛笔轻触试虫,无反应者视为死亡。

1.4 OTFP 对试虫生长发育的影响

试虫选择及处理方法同“1.3”。OTFP 设置 4 个质量浓度,另设置清水对照、稀释液对照(含 $\varphi=1\%$ 乙酸乙酯、 $\varphi=1\%$ Triton 的蒸馏水)。每个质量浓度 OTFP 处理及对照均处理 30 头试虫,单头饲养。OTFP 处理 24 h,之后每 24 h 更换干净无毒叶碟。每 8 h 逐头观察记录试虫蜕皮、化蛹、死亡情况。

1.5 OTFP 对试虫农药敏感性的影响

试虫选择及处理方法同“1.3”,设 OTFP 处理组、OTFP 预处理+农药联合作用组、农药处理

组共 3 组处理,另设蒸馏水空白对照。其中联合作用组为 OTFP 浸叶法处理叶碟后,饲喂试虫 24 h,再饲喂农药处理过的叶碟,另 2 个处理组中 OTFP 或农药处理时间及质量浓度分别与联合作用组相同。农药处理 48 h 后观察记录结果,计算协同毒力指数、共毒系数,评价联合作用。

1.6 试验结果统计

1.6.1 计算公式 死亡率=试虫死亡率/试虫总数 $\times 100\%$

校正死亡率=(处理死亡率-对照死亡率)/(1-对照死亡率) $\times 100\%$

理论死亡率=农药校正死亡率+OTFP 预处理校正死亡率-(农药校正死亡率 $\times$ OTFP 预处理校正死亡率)

协同毒力指数(*c. f.*)=(实际死亡率-理论死亡率)/理论死亡率 $\times 100$

共毒系数(CTI)=未经 OTFP 预处理试虫 LC_{50} /经 OTFP 预处理试虫 $LC_{50} \times 100$

1.6.2 联合作用评价 *c. f.* ≥ 20 为协同作用,*c. f.* ≤ -20 为拮抗作用, $-20 < c. f. < 20$ 为相加作用^[19]。

CTI ≥ 130 为协同作用,CTI ≤ 70 为拮抗作用, $70 < CTI < 130$ 为相加作用^[20]。

1.6.3 回归方程的计算 以 Excel 2010 及 DPS 软件作为统计工具,几率值法计算农药毒力回归方程及其 LC_{50} ^[21]。

1.6.4 显著性检验 新复极差法检验差异的显著性,显著性水平设定为 0.05,DPS 软件完成^[21]。

2 结果与分析

2.1 OTFP 对小菜蛾的毒力

在质量浓度为 5 300、2 650 mg/L 时,OTFP 溶液处理过的叶碟 20 h 后会出现失绿变黄、边缘灼伤现象;但在 2 个较低的质量浓度 1 325、662.5 mg/L 时,影响不明显。由于试验过程中每 24 h 更换叶碟,因此,对于毒力测定的影响不大。结果表明,在所设定的质量浓度下,OTFP 各质量浓度处理组试虫死亡率与对照组相近($P > 0.05$,数据未列出),说明 OTFP 对小菜蛾 3 龄幼虫、4 龄试虫的毒力都较小。

2.2 OTFP 对小菜蛾生长发育的影响

2.2.1 OTFP 对小菜蛾 3 龄幼虫生长至 4 龄的影响 有关 OTFP 对小菜蛾 3 龄幼虫生长至 4 龄的影响见表 1。表中数据显示,所有 OTFP 处

表 1 不同处理中小菜蛾的生长发育
Table 1 Growth and development of *Plutella xylostella* in different treatments

处 理 Treatment	OTFP 质量浓度/ (mg/L) OTFP mass concentration	3 龄幼虫 3 rd instar larvae		4 龄幼虫 4 th instar larvae	
		观察虫数 Number of insects	蜕皮时间/h Molting period	观察虫数 Number of insects	化蛹时间/h Pupation period
清水对照 Blank control	0	31	32.77±0.83 c	19	79.47±1.79 b
稀释液对照 Solvent control	0	26	33.23±1.87 c	23	83.33±4.58 ab
处 理 1 Treatment 1	662.5	28	38.00±1.56 b	24	86.60±2.73 ab
处 理 2 Treatment 2	1 325	28	39.38±1.38 b	27	87.00±2.07 ab
处 理 3 Treatment 3	2 650	30	45.85±1.22 a	24	92.40±3.44 ab
处 理 4 Treatment 4	5 300	26	40.00±1.72 b	20	94.00±7.31 a

注:3 龄试虫蜕皮时间为试验开始至试虫蜕皮所需时间;4 龄试虫化蛹时间也为试验开始至试虫化蛹所需时间;数据为“平均数±标准差”,同列不同小写字母表示差异显著($P<0.05$),下同。
Note:The molting period was the duration from the beginning of the experiment to the molting of the 3rd instar larvae. Similarly, the pupation period was that to pupation of the 4th instar larvae;the data are “mean±standard deviation” and in the same column followed with different letters indicated significantly different ($P<0.05$),the same below.

理组中,试虫蜕皮都显著晚于清水对照和稀释液处理($P<0.05$)。并且在质量浓度 2 650 mg/L 以前,蜕皮时间随着 OTFP 质量浓度的升高而逐渐延长,如清水对照中试虫蜕皮时间为 32.77 h,662.5 mg/L 处理组中便已经显著延长至 38.00 h;2 650 mg/L 组中则达到最大值 45.85 h。不仅显著长于清水对照,也长于其他处理($P<0.05$)。不过其后在 5 300 mg/L 处理组中,试虫蜕皮时间又缩短至 40.00 h,但仍显著长于清水对照及稀释液处理($P<0.05$)。表 1 数据还表明,与清水对照相比,稀释液对试虫蜕皮或化蛹没有明显影响($P>0.05$)。

2.2.2 OTFP 对小菜蛾 4 龄幼虫发育至蛹的影响 表 1 还列出 OTFP 处理对小菜蛾 4 龄幼虫化蛹的影响,由表中数据可见随着 OTFP 质量浓度的升高,试虫化蛹时间逐渐延长,差异也逐渐显著。如在 OTFP 质量浓度为 5 300 mg/L 的处理组中,试虫化蛹时间为 94.00 h,显著长于清水对照中的 79.47 h($P<0.05$)。

2.3 OTFP 对小菜蛾农药敏感性的影响

2.3.1 OTFP 对小菜蛾 3 龄幼虫农药敏感性的影响 根据预试验结果(数据未列出),农药选择接近 LC_{50} 质量浓度,OTFP 选择 1 325 mg/L 质量浓度,考察 OTFP 预处理 24 h 对试虫农药敏感性的影响,结果见表 2。由表中数据可见,OTFP 预处理后,再经农药处理,试虫死亡率显著降低。如在茚虫威农药处理中,未经 OTFP 预处理试虫死亡率达到 75.00%,而经 OTFP 预处理后的试

虫死亡率仅为 40.00%,差异显著($P<0.05$)。其他农药处理也与此相近。联合作用评价结果也证实这一点,所研究的几种农药与 OTFP 的协同毒力指数均小于 -20,在印楝素中更是达到 -60.46。说明在所选定质量浓度下,OTFP 预处理对几种农药的毒力都有显著降低作用。

2.3.2 OTFP 对小菜蛾 4 龄幼虫农药敏感性的影响 OTFP 预处理后,所测定的几种农药对小菜蛾 4 龄幼虫 LC_{50} 都有所降低(表 3),说明 OTFP 对农药毒力具有提高作用。如经 OTFP 预处理过的试虫,Bt 对其 LC_{50} 为 0.09×10^6 IU/L,而对未经 OTFP 预处理的试虫,其 LC_{50} 则是 0.23×10^6 IU/L,二者相差超过 2 倍。有关 OTFP 对农药毒力的提高作用可以由共毒系数更明显地看出,因为 OTFP 与所有农药的共毒系数都超过 130,达到增效水平。不过,OTFP 对农药毒力的提高作用在不同农药间存在差异,如 OTFP 与 Bt 的共毒系数为 255.56,但与茚虫威仅为 159.04。

2.3.3 OTFP 对小菜蛾 4 龄幼虫农药敏感性影响的质量浓度效应 OTFP 对农药毒力的影响,不仅不同农药间存在差异(表 3),在同一农药内部不同质量浓度间也有所不同(图 1~图 4)。随着农药质量浓度的变化,OTFP 对农药毒力的影响不仅出现增效作用类型,而且也出现相加作用甚至还出现拮抗作用类型。如 OTFP 与 6.88 mg/L 茚虫威的协同毒力指数为 -28.45,达到拮抗水平(图 2)。OTFP 对个别农药浓度毒

力的拮抗作用在印楝素中也有出现(图 4)。但 3 也多为正值。
种类型中仍以相加作用最多,并且协同毒力指数

表 2 OTFP 预处理与农药对小菜蛾 3 龄幼虫的联合作用

Table 2 Interaction between OTFP pretreatment and insecticides on the 3rd instar larvae of *Plutella xylostella*

处 理 Treatment	农药质量浓度 Insecticide mass concentration	OTFP 质量浓度/ (mg/L) OTFP mass concentration	死亡率/% Mortality	校正死亡率/% Corrected mortality	理论死亡率/% Theoretical mortality	协同毒力指数 Cooperative virulence index	联合作 用评价 Interaction assessment
CK	0	0	3.30±5.2 d				
OTFP	0	1 325	8.30±7.5 d	5.02			
丁醚脲 Diafenthiuron	135.81 mg/L	0	66.70±5.1 a	63.45		—44.70	拮抗 Antagonism
		1 325	40.00±12.1 b	36.72	65.20		
茚虫威 Indoxacarb	8.43 mg/L	0	75.00±5.4 a	71.71		—49.80	拮抗 Antagonism
		1 325	40.00±9.0 b	36.73	73.10		
Bt	0.50×10 ⁶ IU/L	0	26.67±8.8 bc	21.43		—43.71	拮抗 Antagonism
		1 325	20.00±11.6 c	14.28	25.37		
印楝素 Azadirachtin	30.00 mg/L	0	33.33±14.5 b	31.03		—60.46	拮抗 Antagonism
		1 325	16.67±3.3 cd	13.80	34.49		

表 3 OTFP 预处理与农药对小菜蛾 4 龄幼虫的联合作用

Table 3 Interaction between OTFP pretreatment and insecticides on the 4th instar larvae of *Plutella xylostella*

农 药 Insecticide	OTFP 质量浓度/ (mg/L) Mass concentration of OTFP	毒力方程 Toxicity regression equation	相关系数 Correlation coefficient	LC ₅₀	95%置信限 95% confident interval	共毒系数 Co-toxicity index	联合作用评价 Interaction assessment
丁醚脲 Diafenthiuron	0	$y = 2.26 + 1.45x$	0.960	78.49 mg/L	54.12~113.82	180.44	增效 Synergism
	2 650	$y = 2.63 + 1.45x$	0.943	43.50 mg/L	26.30~71.98		
茚虫威 Indoxacarb	0	$y = 4.22 + 0.56x$	0.850	25.16 mg/L	10.50~60.28	159.04	增效 Synergism
	2 650	$y = 3.43 + 1.31x$	0.963	15.82 mg/L	9.96~25.14		
Bt	0	$y = 5.78 + 1.22x$	0.975	0.23×10 ⁶ IU/L	0.13~0.40	255.56	增效 Synergism
	2 650	$y = 6.1 + 1.05x$	0.926	0.09×10 ⁶ IU/L	0.03~0.27		
印楝素 Azadirachtin	0	$y = 3.88 + 1.28x$	0.898	7.48 mg/L	3.46~16.17	251.01	增效 Synergism
	2 650	$y = 4.77 + 0.48x$	0.871	2.98 mg/L	0.20~44.48		

注: y 为几率值, x 为质量浓度常用对数。

Note: y represents probit value and x represents common logarithm of mass concentration.

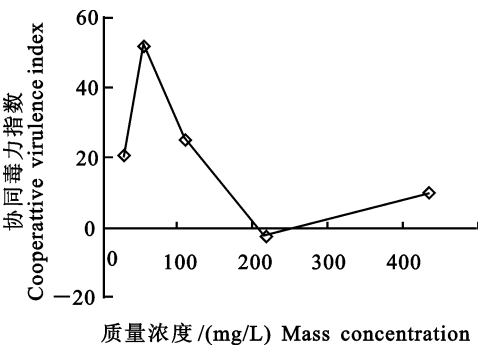


图 1 OTFP 与不同质量浓度丁醚脲对
小菜蛾 4 龄幼虫的协同毒力指数

Fig. 1 The cooperative virulence index (c. f.) between
OTFP and diafenthiuron at different mass concentrations
on 4th instar larvae of *Plutilla xylostella*

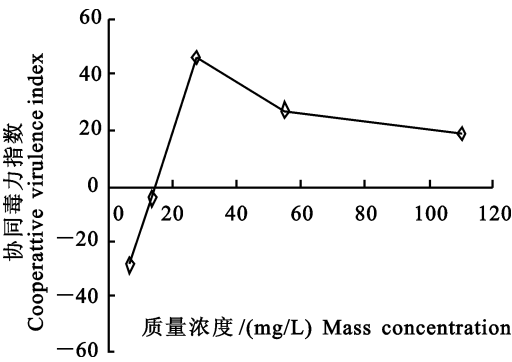


图 2 OTFP 与不同质量浓度茚虫威对
小菜蛾 4 龄幼虫的协同毒力指数

Fig. 2 The cooperative virulence index (c. f.) between
OTFP and indoxacarb at different mass concentrations
on 4th instar larvae of *Plutilla xylostella*

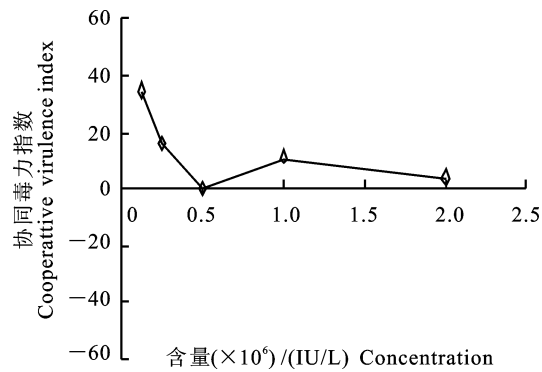


图3 OTFP与不同含量Bt对小菜蛾4龄幼虫的协同毒力指数

Fig. 3 The cooperative virulence index (c. f.) between OTFP and Bt at different content on 4th instar larvae of *Plutilla xylostella*

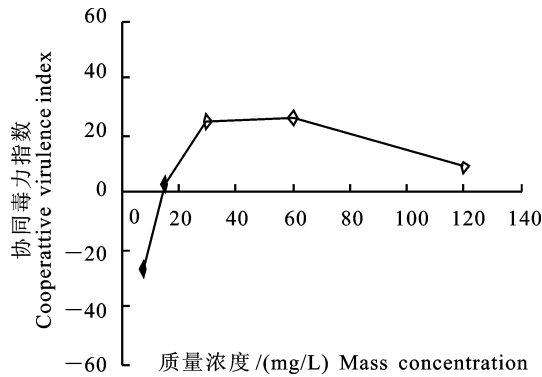


图4 OTFP与不同质量浓度印楝素对小菜蛾4龄幼虫的协同毒力指数

Fig. 4 The cooperative virulence index (c. f.) between OTFP and azadirachtin at different mass concentrations on 4th instar larvae of *Plutilla xylostella*

3 讨论

与预期一致,OTFP对小菜蛾直接毒力很低,即便在5300 mg/L的质量浓度下,也未导致试虫死亡率明显增加(数据未显示),但是由于其对保幼激素酯酶的抑制作用,试虫体内的保幼激素未能有效降解,从而生长发育受阻,表现为3龄试虫蜕皮、4龄试虫化蛹时间均推迟(表1)。并且总体而言,随着OTFP质量浓度的升高,延迟作用加剧,唯一的例外是3龄试虫5300 mg/L质量浓度的处理,其蜕皮时间较之2650 mg/L处理还显著缩短($P<0.05$),其原因尚不明确。

由于OTFP具有阻碍试虫生长发育的作用,而低龄幼虫较之高龄幼虫通常农药敏感性更高,故理论上讲OTFP应该能够提高农药的毒力。

这在有关OTFP对小菜蛾4龄幼虫农药的敏感性影响的研究中也得到了证实(表3,图1至图4)。因为OTFP与4种农药的共毒系数都显著超过了130,达到增效水平。进一步地,除了低质量浓度茚虫威(图2)、低质量浓度印楝素(图4)外,在各农药的其余质量浓度组合中,协同毒力指数也都为正值,意味着实际死亡率大于理论死亡率,并且在几个处理中还超过20,这些都显示OTFP对农药的增效作用。可是,与4龄幼虫相反,OTFP与几种农药对3龄幼虫的协同毒力指数均显著小于-20(表2),即相互间存在显著的拮抗作用。笔者曾经认为这可能是由于只研究了1个质量浓度农药或者OTFP处理后试虫取食量下降,进而导致农药摄入减少,相应地降低农药毒力,但是在其后的研究中发现OTFP处理后,小菜蛾3龄幼虫对这几种农药的敏感性都显著降低,并且试虫取食量也未减少^[22]。可见,OTFP对小菜蛾3龄幼虫农药敏感性降低作用的真正原因还有待于进一步研究。

本研究中选用茚虫威、丁醚脲、Bt、印楝素4种农药,虽然这4种农药作用机制各异,但是都具有使用后见效较慢的缺点。根据本研究结果,对于小菜蛾4龄幼虫,OTFP能够提高其对这几种农药的敏感性,表明OTFP及保幼激素酯酶抑制剂有助于实现小菜蛾控制中的农药减量使用。可是OTFP对小菜蛾3龄幼虫农药敏感性的降低作用又说明要将OTFP或保幼激素酯酶抑制剂应用于小菜蛾控制,特别是与农药的配合使用,在防治时机的选择、农药使用浓度的确定等方面还需要开展更多研究。

Reference (参考文献):

[1] Furlong M J, Wright D J, Dosdall L M. Diamondback moth ecology and management: problems, progress and prospects [J]. Annual Review of Entomology, 2013, 58: 517-541.

[2] Ferre J, van Rie J. Biochemistry and genetics of insect resistance to *Bacillus thuringiensis* [J]. Annual Review of Entomology, 2002, 47: 501-533.

[3] Zhao J Z, Li Y X, Collins H L, et al. Monitoring and characterization of diamondback moth (Lepidoptera: Plutellidae) resistance to spinosad [J]. Journal of Economic Entomology, 2002, 95(2): 430-436.

[4] HU Zhendi(胡珍娣), CHEN Huanyu(陈焕瑜), LI Zhenyu(李振宇). Found a field population of diamondback moth, *Plutella xylostella* (L.), with high-level resistance to chlorantraniliprole in South China [J]. Guangdong Agricultural

- Sciences(广东农业科学),2012(1):79-81(in Chinese with English abstract).
- [5] Zhao J Z, Collins H L, Tang J D, *et al.* Development and characterization of diamondback moth resistance to transgenic broccoli expressing high levels of Cry1C [J]. *Applied Environmental Microbiology*, 2000, 9: 378-489.
- [6] LI Sheng(李 胜), JIANG Rongjing(蒋容静), CAO Meixun(曹梅讯). Metabolism of juvenile hormone [J]. *Acta Entomologica Sinica(昆虫学报)*, 2004, 47(3): 389-393(in Chinese with English abstract).
- [7] Truman J W, Riddiford L M. The morphostatic actions of juvenile hormone[J]. *Insect Biochemistry and Molecular Biology*, 2007, 37(8): 761-770.
- [8] Scott M P. The role of juvenile hormone in competition and cooperation by burying beetles[J]. *Journal of Insect Physiology*, 2006, 52(10): 1005-1011.
- [9] Hrdy I, Kuldová J, Wimmer Z. Juvenogens as potential agents in termite control: laboratory screening[J]. *Pest Management Science*, 2004, 60(10): 1035-1042.
- [10] Riddiford L M. Juvenile hormone; the status of its “status quo” action[J]. *Archives of Insect Biochemistry and Physiology*, 1996, 32(3-4): 271-286.
- [11] Riddiford L M. Cellular and molecular actions of juvenile hormone I. General considerations and premetamorphic actions[J]. *Advances in Insect Physiology*, 1994, 24: 213-274.
- [12] Wyatt G R, Davey K G. Cellular and molecular actions of juvenile hormone II. Roles of juvenile hormone in adult insects[J]. *Advances in Insect Physiology*, 1996, 26: 1-155.
- [13] Tillman J A, Seybold S J, Jurenka R A, *et al.* Insect pheromones—an overview of biosynthesis and endocrine regulation[J]. *Insect Biochemistry and Molecular Biology*, 1999, 29(6): 481-514.
- [14] Maxwell R A, Welch W H, Horodyski F M, *et al.* Juvenile hormone diol kinase II. Sequencing, cloning, and molecular modeling of juvenile hormone-selective diol kinase from *Manduca sexta* [J]. *Journal of Biological Chemistry*, 2002, 277(24): 21882-21890.
- [15] Hammock B D, Sparks T C. A rapid assay for insect juvenile hormone esterase activity[J]. *Analytical Biochemistry*, 1977, 82(2): 573-579.
- [16] Mackert A, Nascimento A M, Bitondi M M G, *et al.* Identification of a juvenile hormone esterase-like gene in the honey bee, *Apis mellifera* L. — Expression analysis and functional assays[J]. *Comparative Biochemistry and Physiology Part B: Biochemistry and Molecular Biology*, 2008, 150(1): 33-44.
- [17] Hammock B D, Abdel-Aal Y A I, Mullin C A, *et al.* Substituted thiotrifluoropropanones as potent selective inhibitors of juvenile hormone esterase[J]. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 1984, 22(2): 209-223.
- [18] WEI Hui(魏 辉). Control Effects of Secondary Plant Metabolites on the Diamondback Moth, *Plutella xylostella* [D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University (福建农林大学), 2002(in Chinese with English abstract).
- [19] Mansour N A, Eldefrawi M E, Topozada A, *et al.* Toxicological studies on the Egyptian cotton leafworm, *Prodenia litura*. VI. Potentiation and antagonism of organophosphorus and carbamate insecticides [J]. *Journal of Economic Entomology*, 1966, 59: 307-311.
- [20] SONG Huawen(宋化稳), MU Liyi(慕立义), WANG Jinxin(王金信). Studies on the Toxicity and Joint-toxicity to *Propylaea japonica* and *Chrysopa septempunctata* of Some Insecticides [J]. *Pesticide Science and Administration(农药科学与管理)*, 2001, 22(6): 17-18(in Chinese with English abstract).
- [21] TANG Qiyi(唐启义), FENG Mingguang(冯明光). Practical Statistics and Computer Data-processing Platform(实用统计分析及计算机处理平台) [M]. Beijing: China Agricultural Press, 1997(in Chinese).
- [22] REN Ke(任 可). Interaction between 3-Octyl-1,1,1-trifluoro-2-propanone (OTFP) and insecticides on diamondback moth, *Plutella xylostella* [D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University(福建农林大学), 2014(in Chinese with English abstract).