

二化螟对双酰胺类杀虫剂的抗药性监测和交互抗性研究

赵丹丹¹ 周丽琪¹ 张帅² 姚蓉³ 邱运霞⁴ 高聪芬^{1,*}

(¹南京农业大学 植物保护学院 农药科学系, 农业部病虫监测与治理重点开放实验室, 南京 210095; ²全国农业技术推广服务中心, 北京 100026; ³南通市植保植检站, 江苏 南通 226006; ⁴南城县农业局, 江西 南城 344700; *通讯联系人, E-mail: gaocongfen@njau.edu.cn)

Resistance Monitoring and Cross-resistance to the Diamides in the Rice Stem Borer, *Chilo suppressalis* (Lepidoptera: Pyralidae)

ZHAO Dandan¹, ZHOU Liqi¹, ZHANG Shuai², YAO Rong³, QIU Yunxia⁴, GAO Congfen^{1,*}

(¹Department of Pesticide Science, College of Plant Protection, Nanjing Agricultural University, Key Laboratory of Monitoring and Management of Plant Disease and Insects, Ministry of Agriculture, Nanjing 210095, China; ²National Agro-Tech Extension and Service Center, Beijing 100026, China; ³Nantong Plant Protection and Quarantine Station, Nantong 226006, China; ⁴Nancheng Agricultural Bureau, Nancheng 344700, China. *Corresponding author, E-mail: gaocongfen@njau.edu.cn)

Abstract: 【Objective】 We aim to learn about the chlorantraniliprole and flubendiamide resistance development of *Chilo suppressalis* from the main rice-growing area in China, meanwhile, to define the difference between resistance levels to 97.3% chlorantraniliprole TC and 20% chlorantraniliprole SC and the cross-resistance between cyantraniliprole, tetrachlorantraniliprole, cyhalodiamide and chlorantraniliprole, flubendiamide in Yuyao and Xiangshan resistance populations. **【Method】** The resistance levels of nineteen *Chilo suppressalis* populations collected from seven provinces to chlorantraniliprole and flubendiamide, the resistance levels to 97.3% chlorantraniliprole TC and 20% chlorantraniliprole SC and the cross-resistance between cyantraniliprole, tetrachlorantraniliprole, cyhalodiamide and chlorantraniliprole, flubendiamide in Yuyao and Xiangshan resistance populations, were monitored by rice seeding dipping method in 2015. **【Result】** Yuyao and Cangnan populations from Zhejiang Province have developed high level of resistance to chlorantraniliprole (141.1-fold and 135.0-fold), and Xiangshan population also showed moderate level of resistance (87.9-fold). Moreover, the three field populations showed moderate level of resistance to flubendiamide (15.0-fold to 58.7-fold). In addition, Yuyao and Xiangshan populations showed various resistance ratios to 97.3% chlorantraniliprole TC and 20% chlorantraniliprole SC in with higher resistance ratio to 20% chlorantraniliprole SC. The result showed the two populations both have reached moderate or high level of resistance to flubendiamide and chlorantraniliprole (27.6-fold to 133.6-fold), meanwhile they also have exhibited moderate or high level of resistance to cyantraniliprole, SPY-9080 and cyantraniliprole (30.3-fold to 120.7-fold). **【Conclusion】** Significant variations among field populations to chlorantraniliprole and flubendiamide were observed, showing 117.6-fold and 146.8-fold differences, respectively, as well as the higher resistance ratio to 20% chlorantraniliprole SC in Yuyao and Xiangshan resistance populations and strong cross-resistance among cyantraniliprole, tetrachlorantraniliprole, cyhalodiamide and chlorantraniliprole, flubendiamide.

Key words: *Chilo suppressalis*; diamides; insecticide resistance; cross-resistance

摘 要: 【目的】 为了及时了解我国主要稻区二化螟对氯虫苯甲酰胺和氟苯虫酰胺的抗药性发展情况, 同时明确对氯虫苯甲酰胺原药和制剂的抗性水平是否存在差异及二化螟对新研发的双酰胺类杀虫剂溴氰虫酰胺、四氯虫酰胺及氯氟氰虫酰胺与氯虫苯甲酰胺、氟苯虫酰胺间是否存在交互抗性。 **【方法】** 采用稻苗浸渍法测定了 2015 年我国 7 省 19 地二化螟田间种群对氯虫苯甲酰胺和氟苯虫酰胺的抗药性, 同时测定了浙江余姚和象山两个抗性种群对 97.3% 氯虫苯甲酰胺原药、20% 氯虫苯甲酰胺悬浮剂制剂的抗药性及其对溴氰虫酰胺、四氯虫酰胺及氯氟氰虫酰胺与氯虫苯甲酰胺和氟苯虫酰胺间的交互抗性。 **【结果】** 浙江余姚和苍南种群对氯虫苯甲酰胺已达 141.1 倍和 135.0 倍的高水平抗性, 象山种群为 87.9 倍的中等水平抗性; 这三个种群对氟苯虫酰胺均表现为中等水平抗性 (15.0~58.7 倍)。二化螟对 97.3% 氯虫苯甲酰胺原药和 20% 氯虫苯甲酰胺悬浮剂制剂存在抗性差异, 浙江余姚和象山种群对制剂的抗性更高。交互抗性研究结果显示, 对氟苯虫酰胺和氯虫苯甲酰胺均产生了中到高水平抗性

(27.6~133.6 倍)的象山、余姚种群,对溴氰虫酰胺、四氯虫酰胺和氯氟氰虫酰胺同样也产生了中到高水平抗性(30.3~127.0 倍)。【结论】各二化螟地理种群之间对氯虫苯甲酰胺和氟苯虫酰胺抗性差异较大,分别表现出 117.6 倍和 146.8 倍的差异,浙江余姚和象山二化螟种群对 20%氯虫苯甲酰胺悬浮剂制剂抗性更高且三种新双酰胺类杀虫剂与氯虫苯甲酰胺和氟苯虫酰胺之间存在交互抗性。

关键词: 二化螟; 双酰胺药剂; 抗性; 交互抗性

中图分类号: S435.112⁺.1; S482.3

文献标识码: A

文章编号: 1001-7216(2017)03-0307-08

二化螟(*Chilo suppressalis* Walker) 属鳞翅目, 螟蛾科, 是水稻主要害虫之一, 在我国主要分布于湖南、湖北、四川、江西、浙江、江苏、安徽等地区^[1]。我国对于二化螟的防治主要采取化学防治措施^[2]。自 20 世纪 50 年代开始, 二化螟田间种群相继对杀虫单(双)、三唑磷、氟虫腈及毒死蜱等杀虫剂产生了中到高水平抗性^[3-8]。2008 年, 双酰胺类杀虫剂氯虫苯甲酰胺开始在水稻上推广使用, 由于其独特的杀虫机制和对鳞翅目害虫优异的控制效果, 从而开启了氯虫苯甲酰胺和氟苯虫酰胺及其混剂使用的鼎盛时代, 且亦被广泛应用于抗性严重的小菜蛾和甜菜夜蛾的防治^[9]。2010—2012 年间进行的我国 7 省 55 个二化螟田间种群对双酰胺类杀虫剂敏感性测定中, 大多数种群对氯虫苯甲酰胺和氟苯虫酰胺仍处于敏感水平阶段, 只有少数种群对这两种双酰胺类杀虫剂表现出低到中等水平抗性, 如湖南东安、湖北钟祥及江西上高二化螟田间种群对氟苯虫酰胺为低水平抗性(6.8~9.2 倍), 浙江金华种群对氟苯虫酰胺则产生了 11.8 倍的中等水平抗性^[10]; 浙江象山和苍南种群对氯虫苯甲酰胺为低水平抗性, 湖北武穴种群对氯虫苯甲酰胺为中等水平抗性^[11-12]。2014—2015 年调查了部分地区双酰胺类杀虫剂对二化螟的田间防治效果, 发现浙江余姚和象山地区的防治效果明显下降, 象山地区的防效甚至低于 50%, 这说明该地区的二化螟可能已经对双酰胺类杀虫剂产生了较高水平的抗性。

在第一代双酰胺类杀虫剂大量使用的同时, 新的双酰胺类杀虫剂也陆续得以开发并上市。2012 年美国杜邦公司开发的第二代鱼尼丁受体抑制剂类杀虫剂——溴氰虫酰胺在我国获得正式登记, 2013 年后国内开发的双酰胺类杀虫剂也已获得临时登记或正在登记, 包括沈阳化工研究院的四氯虫酰胺、浙江化工研究院的氯氟氰虫酰胺。与氯虫苯甲酰胺相比, 溴氰虫酰胺具有更广的杀虫谱, 主要用于蔬菜上多种害虫的防治; 四氯虫酰胺既可以防治二化螟、稻纵卷叶螟等水稻上害虫, 同时也可以防治小菜蛾、菜青虫等蔬菜害虫; 而氯氟氰虫酰胺则主要用于防治水稻螟虫^[13-17]。目前, 新的双酰胺类杀虫剂并没有在我国水稻上大面积推广, 但是已有研究

发现在小菜蛾、斜纹夜蛾和番茄斑潜蝇等害虫的防治中, 溴氰虫酰胺与氯虫苯甲酰胺和氟苯虫酰胺存在着一定的交互抗性^[18-21], 因此有必要进行新的双酰胺类杀虫剂与已经在水稻上大面积使用的氯虫苯甲酰胺和氟苯虫酰胺的交互抗性研究, 以延长该类药剂的使用寿命。

本研究通过监测长江中下游水稻种植区的不同二化螟地理种群对氯虫苯甲酰胺和氟苯虫酰胺的抗性, 旨在明确这两种药剂的抗性水平, 并以对氯虫苯甲酰胺和氟苯虫酰胺抗性较高的田间种群为材料, 比较其对氯虫苯甲酰胺原药和制剂间的抗性差异, 同时进一步测定该抗性种群对溴氰虫酰胺、四氯虫酰胺及氯氟氰虫酰胺的敏感性, 以明确这三种新药剂与氯虫苯甲酰胺和氟苯虫酰胺之间是否存在交互抗性。

1 材料与方法

1.1 供试虫源

二化螟田间种群于 2015 年采自湖南、浙江、湖北、安徽、江西、江苏及四川等 7 个省份 19 个地区。相对敏感品系(SS)由先正达(中国)投资有限公司提供, 2011 年起在室内不接触任何药剂饲养至今。试虫饲养参照韩兰芝等^[22]推荐的人工饲料配方进行。饲养条件保持相对稳定: 温度(28±1)°C, 相对湿度 70%~80%, 光周期 16 h 光照/8 h 黑暗。以体质量为 0.45~0.65 mg 的二龄中期幼虫供试。各种群具体采集和测试信息见表 1。

1.2 供试药剂

97.3%氯虫苯甲酰胺原药购自先正达(中国)投资有限公司; 97.3%氟苯虫酰胺原药购自拜耳(中国)有限公司; 20%氯虫苯甲酰胺悬浮剂、10%溴氰虫酰胺可分散油悬浮剂购自上海杜邦农化有限公司; 10%四氯虫酰胺悬浮剂购自沈阳科创化学制品有限公司; 20%氯氟氰虫酰胺悬浮剂购自浙江科化进出口有限公司。

1.3 试验方法

参照水稻二化螟抗性检测技术规程^[23], 采用稻苗浸渍法测定二化螟田间种群对氯虫苯酰胺

表 1 2015 年二化螟田间种群采集信息

Table 1. Collecting information of *Chilo suppressalis* from different prefectures in 2015.

采集地点 Collection site	种群 Population	采集日期 Sampling date(Month-Day)	采集虫态 Developmental stage	测定代次 Generation
湖南东安 Dong'an, Hunan Province	DA	04-02	蛹 Pupa	F ₁
湖南攸县 Youxian, Hunan Province	YX	04-30	卵块 Egg	F ₀
湖南芷江 Zhijiang, Hunan Province	ZJ	05-22	卵块 Egg	F ₀
浙江苍南 Cangnan, Zhejiang Province	CN	04-11	老熟幼虫 Mature larvae	F ₁
浙江瑞安 Ruian, Zhejiang Province	RA	04-25	卵块 Egg	F ₀
浙江象山 Xiangshan, Zhejiang Province	XS	06-30	蛹 Pupa	F ₁
浙江余姚 Yuyao, Zhejiang Province	YY	05-21	卵块 Egg	F ₀
湖北孝感 Xiaogan, Hubei Province	XG	05-14	卵块 Egg	F ₀
湖北荆州 Jingzhou, Hubei Province	JZ	04-04	老熟幼虫 Mature larvae	F ₁
湖北监利 Jianli, Hubei Province	JL	08-26	卵块 Egg	F ₀
安徽潜山 Qianshan, Anhui Province	QS	05-08	卵块 Egg	F ₀
安徽庐江 Lujiang, Anhui Province	LJ	08-15	幼虫 Larvae	F ₁
安徽徽州 Huizhou, Anhui Province	HZ	05-17	卵块 Egg	F ₀
江西上高 Shanggao, Jiangxi Province	SG	04-05	老熟幼虫 Mature larvae	F ₁
江西南城 Nancheng, Jiangxi Province	NC	04-11	卵块 Egg	F ₀
江苏仪征 Yizheng, Jiangsu Province	YZ	05-27	卵块 Egg	F ₀
江苏邳江 Hanjiang, Jiangsu Province	HJ	05-28	卵块 Egg	F ₀
四川乐山 Leshan, Sichuan Province	LS	07-24	蛹 Pupa	F ₁
四川绵阳 Mianyang, Sichuan Province	MY	08-30	幼虫 Larvae	F ₁

和氟苯虫酰胺的抗药性，同时测定了浙江余姚和象山两个抗性种群对 97.3%氯虫苯甲酰胺原药、20%氯虫苯甲酰胺悬浮剂制剂的抗药性及该抗性种群对溴氯虫酰胺、四氯虫酰胺及氯氟氰虫酰胺与氯虫苯甲酰胺和氟苯虫酰胺间的交互抗性。

1.4 统计分析

采用 Polo Plus 软件进行几率值分析，计算 LC_{50} 值及其 95%置信限、斜率及其标准误、卡方值及自由度。以 LC_{50} 值的 95%置信限不重叠作为判断种群间抗性水平存在显著差异的标准。

抗性倍数(RR)测试田间种群的 LC_{50} 值/敏感品系的 LC_{50} 值。抗性水平分级标准按照水稻二化螟抗药性监测技术规程 NY/T 2058 — 2014^[23]：RR=5.1~10.0 为低水平抗性；RR=10.1~100.0 为中等水平抗性；RR>100.0 为高水平抗性。

2 结果与分析

2.1 二化螟田间种群对氯虫苯甲酰胺和氟苯虫酰胺的抗药性

2015 年进行了湖南、浙江、湖北、安徽、江西、江苏及四川 7 省 19 个二化螟田间种群对氯虫苯甲酰胺和氟苯虫酰胺的抗药性监测(表 2 和表 3)。发现各地理种群间对氯虫苯甲酰胺和氟苯虫酰胺的抗

药性差异较大，分别表现出 117.6 倍和 146.8 倍的差异。其中浙江省 3 个二化螟种群对氯虫苯甲酰胺的抗药性水平最高，余姚和苍南种群对氯虫苯甲酰胺已产生 141.1 倍和 135.0 倍的高水平抗性，象山种群亦达中等水平抗性(87.9 倍)；安徽庐江、湖北监利及江西南城 3 个种群对氯虫苯甲酰胺为中等水平抗性(14.7~22.0 倍)，其余 13 个种群均处于敏感至低水平抗性(1.2~7.5 倍)。氟苯虫酰胺的抗性有相似趋势，浙江余姚、象山及苍南种群对其抗药性最高，为中等水平抗性(15.0~58.7 倍)，湖北监利和江西南城 2 个种群为低水平抗性(8.0 倍和 7.1 倍)，其余 13 个种群仍处于敏感水平(0.4~2.9 倍)。

2.2 二化螟田间种群对氯虫苯甲酰胺原药和制剂的抗药性比较

为明确原药和制剂的抗性水平是否存在差异，同时检测了浙江余姚和象山种群对 97.3%氯虫苯甲酰胺原药和 20%氯虫苯甲酰胺悬浮剂制剂的抗药性水平。结果显示：敏感品系对 97.3%氯虫苯甲酰胺原药和 20%氯虫苯甲酰胺悬浮剂的 LC_{50} 分别为 0.693 mg/L 和 0.418 mg/L，余姚和象山种群对制剂的抗药性分别为 383.3 倍和 433.4 倍，而对原药的抗药性则分别为 133.6 倍和 133.0 倍(表 4)，均表现为高水平抗性，但抗性倍数存在显著差异，制剂的抗性倍数分别是原药抗性倍数的 2.9 倍和 3.3 倍。

表 2 2015 年二化螟田间种群对氯虫苯甲酰胺的抗药性

Table 2. Resistance of field populations of *C. suppressalis* to chlorantraniliprole in 2015.

省份 Province	种群 Strain/Population	斜率(标准误) Slope (SE)	卡方值(自由度) χ^2 (df)	LC_{50} (95%置信限) LC_{50} (95% confidence interval)/(mg·L ⁻¹)	抗性倍数 Resistance ratio
湖南 Hunan	SS(敏感 Susceptible)	2.473(0.290)	2.260(4)	0.693(0.549—0.858)	1.0
	DA	2.061(0.247)	1.862(3)	3.456(2.581—4.546)	5.0
	YX	1.295(0.167)	0.785(3)	4.622(3.216—6.647)	6.7
浙江 Zhejiang	ZJ	1.336(0.161)	2.569(4)	3.455(2.317—5.047)	5.0
	RA	1.298(0.168)	1.566(3)	3.306(2.269—4.729)	4.8
	XS	0.836(0.118)	0.999(4)	60.903(37.531—110.653)	87.9
湖北 Hubei	YY	1.485(0.220)	2.232(4)	97.772(69.794—139.611)	141.1
	CN	1.382(0.261)	0.213(3)	93.583(61.714—138.667)	135.0
	XG	1.058(0.177)	0.035(3)	2.787(1.432—4.661)	4.0
安徽 Anhui	JZ	1.251(0.216)	1.211(3)	4.610(2.483—7.438)	6.7
	JL	0.871(0.126)	0.496(4)	10.969(6.403—18.745)	15.8
	QS	1.156(0.159)	0.074(3)	5.230(3.533—7.867)	7.5
江西 Jiangxi	LJ	0.907(0.151)	0.142(3)	9.917(6.139—18.483)	14.3
	HZ	0.963(0.186)	0.368(3)	2.100(1.026—3.940)	3.0
	SG	1.543(0.184)	1.239(3)	4.651(3.391—6.408)	6.7
江苏 Jiangsu	NC	1.237(0.141)	2.327(4)	15.220(10.700—22.330)	22.0
	YZ	0.791(0.150)	0.910(3)	1.169(0.590—2.109)	1.7
	HJ	0.941(0.162)	0.430(3)	1.169(0.619—1.997)	1.7
四川 Sichuan	LS	2.061(0.247)	1.862(3)	3.456(2.581—4.546)	5.0
	MY	0.985(0.153)	0.612(3)	0.806(0.473—1.255)	1.2

表 3 2015 年二化螟田间种群对氟苯虫酰胺的抗药性

Table 3. Resistance of field populations of *C. suppressalis* to flubendiamide in 2015.

省份 Province	种群 Strain/Population	斜率(标准误) Slope (SE)	卡方值(自由度) χ^2 (df)	LC_{50} (95%置信限) LC_{50} (95% confidence interval)/(mg·L ⁻¹)	抗性倍数 Resistance ratio
湖南 Hunan	SS(敏感 Susceptible)	2.172(0.283)	1.949(4)	0.217(0.173—0.266)	1.0
	DA	1.037(0.161)	0.728(3)	0.245(0.140—0.387)	1.1
	YX	0.990(0.151)	0.178(3)	0.397(0.249—0.623)	1.8
浙江 Zhejiang	ZJ	0.879(0.146)	0.802(3)	0.158(0.095—0.266)	0.7
	RA	1.232(0.165)	1.978(3)	0.234(0.153—0.338)	1.1
	XS	0.758(0.129)	1.859(4)	7.832(4.218—16.726)	36.1
湖北 Hubei	YY	1.611(0.262)	1.195(3)	3.253(2.221—4.421)	15.0
	CN	1.509(0.302)	0.154(3)	12.737(8.368—19.391)	58.7
	XG	1.177(0.199)	0.706(3)	0.359(0.189—0.587)	1.7
安徽 Anhui	JZ	1.126(0.216)	2.201(3)	0.561(0.279—0.960)	2.6
	JL	0.880(0.133)	0.652(4)	1.742(1.014—3.109)	8.0
	QS	1.082(0.159)	0.473(3)	0.231(0.142—0.348)	1.1
江西 Jiangxi	LJ	0.943(0.149)	0.735(3)	0.621(0.391—1.036)	2.9
	HZ	0.985(0.199)	0.659(3)	0.267(0.136—0.530)	1.2
	SG	1.052(0.154)	0.599(3)	0.398(0.256—0.610)	1.8
江苏 Jiangsu	NC	0.889(0.119)	0.367(4)	1.535(0.979—2.566)	7.1
	YZ	0.839(0.152)	0.531(3)	0.081(0.040—0.140)	0.4
	HJ	0.953(0.167)	1.454(3)	0.113(0.058—0.193)	0.5
四川 Sichuan	LS	1.037(0.161)	0.728(3)	0.245(0.140—0.387)	1.1

表 4 二化螟田间种群对 97.3%氯虫苯甲酰胺原药和 20%氯虫苯甲酰胺悬浮剂的抗药性

Table 4. Resistance levels of field populations of *C. suppressalis* to chlorantraniliprole (97.3% TC) and chlorantraniliprole (20% SC).

种群 Strain/Population	药剂 Insecticide	斜率(标准误) Slope (SE)	卡方值(自由度) χ^2 (df)	LC ₅₀ (95%置信限) LC ₅₀ (95% confidence interval)/(mg·L ⁻¹)	抗性倍数 Resistance ratio
敏感品系 SS	97.3%氯虫苯甲酰胺原药 Chlorantraniliprole (97.3%, TC)	2.473(0.290)	2.260(4)	0.693(0.549—0.858)	1.0
	20%氯虫苯甲酰胺悬浮剂 Chlorantraniliprole(20%, SC)	2.048(0.232)	3.640(4)	0.418(0.329—0.520)	1.0
余姚 YY	97.3%氯虫苯甲酰胺原药 Chlorantraniliprole (97.3%, TC)	1.402(0.233)	0.027(3)	92.607(67.859—129.729)	133.6
	20%氯虫苯甲酰胺悬浮剂 Chlorantraniliprole(20%, SC)	1.410(0.242)	0.449(3)	160.240(116.625—251.415)	383.3
象山 XS	97.3%氯虫苯甲酰胺原药 Chlorantraniliprole(97.3%, TC)	0.987(0.196)	0.289(3)	92.146(48.415—177.806)	133.0
	20%氯虫苯甲酰胺悬浮剂 Chlorantraniliprole(20%, SC)	1.020(0.194)	0.375(3)	181.149(92.727—324.879)	433.4

因此，田间二化螟种群对双酰胺类杀虫剂的抗药性可能比室内监测结果偏高，这是否与制剂中的助剂或使用技术有关则有待进一步验证。

2.3 双酰胺类杀虫剂的交互抗性

为了明确溴氰虫酰胺、四氯虫酰胺和氯氟氰虫酰胺三种新的双酰胺类杀虫剂与氯虫苯甲酰胺、氟苯虫酰胺之间是否存在交互抗性，我们测定了对氯虫苯甲酰胺和氟虫苯甲酰胺已产生高或中等水平抗性的浙江余姚和象山二化螟田间种群对另外三种新的双酰胺类杀虫剂的抗药性。由表 5 可见，对氯虫苯甲酰胺和氟虫苯甲酰胺表现为 133.6 倍的高水平抗性和 52.0 倍的中等水平抗性的象山种群，对溴氰虫酰胺表现为中等水平抗性(30.3 倍)，同时对四氯虫酰胺和氯氟氰虫酰胺达到 114.6 倍和 120.7 倍的高水平抗性；此外，对氯虫苯甲酰胺表现为高抗(133.6 倍)和对氟苯虫酰胺为中抗(27.6 倍)的余姚种群，对溴氰虫酰胺、四氯虫酰胺及氯氟氰虫酰胺均表现为中等抗性水平(41.1~83.6 倍)。表明溴氰虫酰胺、四氯虫酰胺及氯氟氰虫酰胺与氯虫苯甲酰胺和氟苯虫酰胺之间存在交互抗性。

3 讨论

本研究发现少数二化螟田间种群已对双酰类杀虫剂产生高水平抗药性，抗药性监测和治理亟需更全面开展。2010—2012 年间本实验室测定了我国 7 省 55 地区二化螟田间种群对氯虫苯甲酰胺和氟苯

虫酰胺的敏感性，其中 3.6%的田间种群对这两种杀虫剂产生了中等水平的抗性^[10-12]。到 2015 年则有 18.9%种群已处于中等水平抗性，并在浙江省已监测到高抗种群，其中余姚和苍南种群对氯虫苯甲酰胺的抗性分别达到了 141.1 倍和 135.0 倍。相同的情况也发生在其他鳞翅目害虫上，其中最为明显的是小菜蛾，2008—2009 年，我国 16 个地区小菜蛾种群对氯虫苯甲酰胺的抗性中仅安徽合肥种群产生了低水平抗性，其余种群均处于敏感阶段^[24]；2010 年江西信丰小菜蛾对氯虫苯甲酰胺产生了 12 倍的中等水平抗性^[25]，而在 2011 年广州增城小菜蛾田间种群对氯虫苯甲酰胺的抗性已达 606 倍；2013 年该地小菜蛾对氯虫苯甲酰胺的抗性继续上升为 2040 倍，且对氟苯虫酰胺也产生了 800 倍的抗性^[25-27]。此外，甜菜夜蛾和斜纹夜蛾对双酰胺类杀虫剂也产生了不同程度的抗药性^[28-29]。由此可知，双酰胺类杀虫剂具有在短时间内产生高水平抗性的风险，因此在对双酰胺类杀虫剂产生较高抗性的地区应该限制该类药剂的使用，同时在抗性水平较低的地区，该类药剂也存在着一定的抗性风险，应该持续监测双酰胺类杀虫剂的抗性，同时在田间防治二化螟时，应遵循科学合理的用药原则，以延缓该类药剂的抗性发展。

目前已有的双酰胺类杀虫剂交互抗性的研究主要集中在氯虫苯甲酰胺、氟苯虫酰胺及溴氰虫酰胺三种药剂间。在小菜蛾对氯虫苯甲酰胺和氟苯虫酰胺的交互抗性研究中发现，这两种杀虫剂存在着

表 5 二化螟田间种群对五种双酰胺类杀虫剂的抗性

Table 5. Resistance levels of field populations of *C. suppressalis* to five kinds of diamides.

种群	药剂	试虫	斜率(标准误)	卡方值(自由度)	LC ₅₀ (95%置信限)	抗性倍数
Strain/Population	Insecticide	N	Slope (SE)	χ^2 (df)	LC ₅₀ (95% confidence interval)/(mg·L ⁻¹)	Resistance ratio
敏感品系 SS	氯虫苯甲酰胺	280	2.473(0.290)	2.260(4)	0.693(0.549—0.858)	1.0
	Chlorantraniliprole					
	氟苯虫酰胺	280	2.172(0.283)	1.949(4)	0.217(0.173—0.266)	1.0
	Flubendiamide					
	溴氰虫酰胺	240	1.525(0.268)	0.267(3)	0.620(0.428—0.887)	1.0
	Cyantraniliprole					
	四氯虫酰胺	240	2.074(0.299)	1.162(3)	1.468(1.141—1.911)	1.0
	Tetrachlorantranil-iprole					
	氯氟氰虫酰胺	240	1.342(0.256)	0.012(3)	0.570(0.374—0.850)	1.0
	Cyhalodiamide					
余姚 YY	氯虫苯甲酰胺	240	1.402(0.233)	0.027(3)	92.607(67.859—129.729)	133.6
	Chlorantraniliprole					
	氟苯虫酰胺	240	1.419(0.235)	0.005(3)	5.983(4.197—8.101)	27.6
	Flubendiamide					
	溴氰虫酰胺	240	1.698(0.281)	1.213(3)	25.472(18.211—35.254)	41.1
	Cyantraniliprole					
	四氯虫酰胺	240	1.801(0.257)	0.928(3)	122.536(95.535—164.131)	83.6
	Tetrachlorantranil-iprole					
	氯氟氰虫酰胺	240	0.905(0.118)	0.844(4)	24.711(15.675—39.198)	43.4
	Cyhalodiamide					
象山 XS	氯虫苯甲酰胺	240	0.987(0.196)	0.289(3)	92.146(48.415—177.806)	133.0
	Chlorantraniliprole					
	氟苯虫酰胺	240	0.921(0.193)	0.370(3)	11.281(5.772—24.126)	52.0
	Flubendiamide					
	溴氰虫酰胺	240	1.668(0.285)	2.615(3)	18.623(13.515—27.253)	30.3
	Cyantraniliprole					
	四氯虫酰胺	240	0.740(0.150)	0.261(3)	168.203(86.831—343.634)	114.6
	Tetrachlorantranil-iprole					
	氯氟氰虫酰胺	240	1.503(0.267)	0.213(3)	68.826(49.192—102.678)	120.7
	Cyhalodiamide					

较强的交互抗性^[18-19]。在斜纹夜蛾中,溴氰虫酰胺和氯虫苯甲酰胺间亦存在潜在的交互抗性,因为斜纹夜蛾对这两种杀虫剂的抗性存在明显的相关性^[20]。此外番茄斑潜蝇对溴氰虫酰胺和氯虫苯甲酰胺也存在明显的交互抗性^[21]。但是Li等^[30]研究发现,在烟粉虱中溴氰虫酰胺和氯虫苯甲酰胺之间并无交互抗性,并且也有报道显示在番茄斑潜蝇中,氟苯虫酰胺和氯虫苯甲酰胺、溴氰虫酰胺间不存在交互抗性^[21]。本研究中浙江余姚和象山二化螟种群对五种双酰胺类杀虫剂(氯虫苯甲酰胺、氟苯虫酰胺啊、溴氰虫酰胺、四氯虫酰胺和氯氟氰虫酰胺)均表现出中到高水平的抗性,即在对氯虫苯甲酰胺和氟苯虫酰胺较高抗性水平的田间种群,对其他三种

新的双酰胺类杀虫剂也表现出中到高水平的抗药性,这说明在二化螟中双酰胺类杀虫剂存在着明显的交互抗性。由于本实验室采集二化螟田间种群时,四氯虫酰胺在我国刚获得临时登记,并未大面积推广使用,溴氰虫酰胺和氯氟氰虫酰胺尚未在我国水稻上获得登记,此次发现在二化螟中存在交互抗性,为双酰胺类杀虫剂在田间的使用提出了预警。首先应密切关注三种新型的双酰胺类杀虫剂的抗性发展情况,同时对双酰胺类杀虫剂的使用应制定行之有效的杀虫剂轮用措施,以期在保护其良好杀虫效能的同时,也能延缓抗性发展,使其在二化螟的抗性治理中能够更好、更长久地发挥作用。

科学使用双酰胺等杀虫剂,有效控制二化螟的

为害。基于近 6 年的抗药性监测情况, 我们提出如下抗性治理方案。首先, 应该继续开展二化螟对双酰胺类杀虫剂的抗药性监测, 更好地掌握其抗性发展动态, 这既可以为田间用药起指导作用, 也可以为后续该类药剂的研究奠定基础。其次, 要因地制宜的制定防治措施, 长期监测的结果显示, 二化螟对双酰胺类杀虫剂的抗药性存在一定的地理差异, 浙江南部地区的二化螟抗性发展较快, 因此在该地区应该严格限制使用已经产生高水平抗性且田间防治效果下降的药剂。而在江苏、四川及北方稻区的二化螟对双酰胺类杀虫剂还处于较敏感的阶段, 该类药剂仍可作为主要候选药剂用于二化螟的防治, 但仍需严格遵循科学的用药原则, 以延缓其抗性发展速率, 延长其使用寿命。此外, 合理混配药剂, 有助于延长药剂的使用寿命。在田间二化螟的防治中, 阿维菌素常以混配的形式登记, 并且在田间调查中也发现如氟苯虫酰胺和阿维菌素的混配药剂一稻腾在田间的防治效果要优于氯虫苯甲酰胺或氟苯虫酰胺单剂, 在象山地区稻腾的残虫防效和保苗效果均为 50% 左右, 而上述两种药剂的单剂则只有 20%~40%。因此应该开发更多的对二化螟高效的复配药剂, 以通过药剂的混配来延长药剂的使用寿命。本实验室连续多年进行的二化螟对常规化学药剂的抗药性监测表明, 阿维菌素、甲维盐及甲氧虫酰胺的杀虫效果较好且抗性较低, 因此可以在已对双酰胺类杀虫剂产生较高抗性的地区, 交替轮换使用阿维菌素、甲维盐和甲氧虫酰胺等药剂。

综上所述, 本研究发现了对双酰胺类杀虫剂产生高水平抗性的田间种群, 且该地区田间防治效果也明显下降; 二化螟对氯虫苯甲酰胺制剂的抗药性明显高于原药, 表明田间二化螟的抗药性水平可能比室内监测的结果更高; 二化螟对双酰胺类杀虫剂间存在明显的交互抗性。同时, 鉴于双酰胺类杀虫剂的抗性发展较快, 需要在已产生高水平抗性的地区制定合理的抗药性治理策略, 而在其他地区应该继续加强田间二化螟对双酰胺类杀虫剂的抗药性监测, 以此来延缓该类药剂的抗性发展, 延长其使用寿命, 使其在二化螟的防治中发挥更好的效果。

谢辞: 安徽徽州、庐江、潜山植物保护站, 湖南省东安、攸县、芷江植物保护站, 湖北荆州、监利、孝感植物保护站, 江苏邗江、仪征植物保护站, 江西南城、上高植物保护站, 四川乐山、绵阳植物保护站及浙江省苍南、瑞安、象山、余姚植物保护站, 在虫源采集中给予了大力协助, 同时对于拜耳

作物科学(中国)有限公司、日本农药株式会社、杜邦贸易(上海)有限公司及先正达(中国)投资有限公司对本实验的大力支持, 在此一并致以衷心感谢!

参考文献:

- [1] 丁锦华, 苏建亚. 农业昆虫学. 北京: 中国农业出版社, 2001.
Ding J H, Su J Y. Agricultural Entomology. Beijing: China Agricultural Press, 2001. (in Chinese)
- [2] 胡君, 陈文明, 张真真, 郑雪松, 靳建超, 苏建亚, 高聪芬, 沈晋良. 长江流域稻区二化螟抗药性监测. 中国水稻科学, 2010, 24(5): 509-515.
Hu J, Chen W M, Zhang Z Z, Zheng X S, Jin J C, Su J Y, Gao C F, Shen J L. Insecticide resistance monitoring of *Chilo suppressalis* in the drainage area of the Yangtze River, China. *Chin J Rice Sci*, 2010, 24(5): 509-515. (in Chinese with English abstract)
- [3] Ozaki K. Resistance to parathion in the rice stem borer, *Chilo suppressalis* Walker. *Botyu Kagaku*, 1962, 27: 81-96.
- [4] 苏建坤, 褚柏. 扬州地区水稻二化螟抗药性监测. 南京农业大学学报, 1987, 4(增刊): 56-63.
Su J K, Chu B. Resistance monitoring of the rice stem borer, *Chilo suppressalis* Walker in Yangzhou region. *J Nanjing Agric Univ*, 1987, 4(Suppl): 56-63. (in Chinese)
- [5] 蒋学辉, 章强华, 胡仕孟, 谢士杰, 徐喜刚. 浙江省水稻二化螟抗药性现状与治理对策. 植保技术与推广, 2001, 21(3): 27-29.
Jiang X H, Zhang Q H, Hu S M, Xie J S, Xu X G. The status of pesticide of rice stalk borer in Zhe Jiang Province and their management tactics. *Plant Prot Technol Ext*, 2001, 21(3): 27-29. (in Chinese with English abstract)
- [6] 曲明静, 韩召军, 许新军, 邵晓玲, 田学志, 符明龙. 二化螟对三唑磷的抗性发生动态与风险评估. 南京农业大学学报, 2005, 28(3): 38-42.
Qu M J, Han Z J, Xu X J, Shao X L, Tian X Z, Fu M L. Dynamics and risk assessment of triazophos resistance in rice stem borer (*Chilo suppressalis* Walker). *J Nanjing Agric Univ*, 2005, 28(3): 38-42. (in Chinese with English abstract)
- [7] 熊件妹, 朱杏芬, 肖海军. 南昌地区二化螟抗药性监测与治理. 江西农业大学学报, 2006, 28(6): 877-880.
Xiong J M, Zhu X F, Xiao H J. Monitoring and administering of resistance of rice stem borer, *Chilo suppressalis* to 4 conventional insecticides in Nanchang region. *Acta Agric Univ Jiangxiensis*, 2006, 28(6): 877-880. (in Chinese with English abstract)
- [8] He Y P, Gao C F, Chen W M, et al. Comparison of dose responses and resistance ratios in four populations of the rice stem borer, *Chilo suppressalis* (Lepidoptera: Pyralidae), to 20 insecticides. *Pest Manag Sci*, 2008, 64: 308-315.
- [9] 徐尚成, 俞幼芬, 王晓军, 万琴. 新杀虫剂氯虫苯甲酰胺及其研究开发进展. 现代农药, 2008, 7(5): 8-11.
Xu S C, Yu Y F, Wang X J, Wan Q. Rynaxypyr, a new insecticide and its research & development in application. *Modern Agrochem*, 2008, 7(5): 8-11. (in Chinese with English abstract)
- [10] Wu M, Zhang S, Yao R, Wu S, Su J, Gao C F. Susceptibility of the Rice Stem Borer, *Chilo suppressalis*

- (Lepidoptera: Crambidae), to Flubendiamide in China. *J Ecol Entomol*, 2014, 107(3): 1250-1255.
- [11] Gao C F, Yao R, Zhang Z Z, Zhang S, Su J Y. Susceptibility baseline and chlorantraniliprole resistance monitoring in *Chilo suppressalis* (Lepidoptera: Pyralidae). *J Ecol Entomol*, 2013, 106(5): 2190-2194.
- [12] Su J Y, Zhang Z Z, Wu M, Gao C F. Geographic susceptibility of *Chilo suppressalis* Walker (Lepidoptera: Crambidae), to chlorantraniliprole in China. *Pest Manag Sci*, 2014, 70 (6): 989-995.
- [13] Foster S P, Denholm L, Rison J L, Portillo H E, Margaritopoulos J, Slater R. Susceptibility of standard clones and European field populations of the green peach aphid, *Myzus persicae*, and the cotton aphid, *Aphis gossypii* (Hemiptera: Aphididae), to the novel anthranilic diamide insecticide cyantraniliprole. *Pest Manag Sci*, 2012, 68(4): 629-633.
- [14] 李斌, 杨辉斌, 王军锋, 宋玉泉. 四氯虫酰胺的合成及其杀虫活性. 现代农药, 2014, 13(3): 17-21.
Li B, Yang H B, Wang J F, Song Y Q. Synthesis and insecticidal activity of Si Lv Chong Xian'an. *Modern Agrochem*, 2014, 13(3): 17-21. (in Chinese with English abstract)
- [15] 邢家华, 朱冰春, 袁静, 郁季平, 董德臻, 周冬英, 胡冬松, 陈杰. 新型杀虫剂氯氟氰虫酰胺对不同鳞翅目害虫的毒力和田间防效与方法. 农药学学报, 2013, 15(2): 159-164.
Xing J H, Zhu B C, Yuan J, Yu J P, Dong D Z, Zhou D Y, Hu D S, Chen J. Bioactivity and field efficacy of novel insecticide ZJ4042 against different lepidopterous pests. *Chin J Pest Sci*, 2013, 15(2): 159-164. (in Chinese with English abstract)
- [16] 董卫莉, 徐俊英, 刘幸海, 赵卫光, 李正名. 昆虫鱼尼汀受体及以其为靶标的杀虫剂的研究进展. 农药学学报, 2008, 10(2): 178-185.
Dong W L, Xu J Y, Liu X H, Zhao W G, Li Z M. Progress on insect ryanodine receptor and insecticides targeting at ryanodine receptor. *Chin J Pest Sci*, 2008, 10(2): 178-185.
- [17] 杨桂秋, 黄琦, 陈霖, 辉斌, 于海波, 李斌. 新型杀虫剂溴氰虫酰胺研究概述. 世界农药, 2012, 34(12): 19-21.
Yang G Q, Huang Q, Chen L, Hui B, Yu H B, Li B. Research review on a novel insecticide cyantraniliprole. *World Pesi*, 2012, 34(12): 19-21. (in Chinese)
- [18] Liu X, Wang H Y, Ning Y B, Qiao K, Wang K Y. Resistance selection and characterization of chlorantraniliprole resistance in *Plutella xylostella* (Lepidoptera: Plutellidae). *J Eco Entomol*, 2015, 108(4): 1978-1985.
- [19] Wang X, Khakame S K, Ye C, Yang Y, Wu Y. Characterisation of field-evolved resistance to chlorantraniliprole in the diamondback moth, *Plutella xylostella*, from China. *Pest Manag Sci*, 2013, 69(5): 661-665.
- [20] Sang S, Shu B S, Yi X, Liu J, Hu M, Zhong G. Cross-resistance and baseline susceptibility of *Spodoptera litura* (Fabricius) (Lepidoptera: Noctuidae) to cyantraniliprole in the south of China. *Pest Manag Sci*, 2015, 72(5): 922-928.
- [21] Campos M R, Silva T B, Silva W M, Silva J E, Siqueira H A. Susceptibility of *Tuta absoluta* (Lepidoptera: Gelechiidae) Brazilian populations to ryanodine receptor modulators. *Pest Manag Sci*, 2015, 71(4): 537-544.
- [22] Han L Z, Li S B, Liu P L, Peng Y F, Hu M L. New artificial diet for continuous rearing of *Chilo suppressalis* Walker (Lepidoptera: Crambidae). *Arthrop Biol*, 2012, 105(2): 253-258.
- [23] 中华人民共和国农业部. NY/T 2058-2014. 中华人民共和国农业行业标准, 水稻二化螟抗药性监测技术规程. 北京: 中国农业出版社, 2014.
Ministry of agriculture of the People's Republic of China. NY/T 2058-2014. Agricultural industry standard of the People's Republic of China, Technological rules for monitoring insecticide resistance in striped stem borer, *Chilo suppressalis* Walker. Beijing: China Agriculture Press, 2014.
- [24] Wang X L, Li X Y, Shen A, Wu Y. Baseline susceptibility of the diamondback moth (Lepidoptera: Plutellidae) to chlorantraniliprole in China. *J Ecol Entomol*, 2010, 103(3): 843-848. (in Chinese)
- [25] 胡珍娣, 冯夏, 李振宇, 张德雍, 陈焕瑜. 不同小菜蛾田间种群对氯虫苯甲酰胺药剂的敏感性. 农药研究与应用, 2010, 14(3): 25-27.
Hu Z D, Feng X, Li Z Y, Zhang D Y, Chen H Y. Studies on the susceptibility of diamondback moth (DBM) *Plutella xylostella* L. to chlorantraniliprole in different vegetable fields. *Agrochem Res Appl*, 2010, 14 (3): 25-27. (in Chinese)
- [26] 胡珍娣, 陈焕瑜, 李振宇, 张德雍, 尹飞, 林庆胜, 包华理, 周小毛, 冯夏. 华南小菜蛾田间种群对氯虫苯甲酰胺已产生严重抗性. 广东农业科学, 2012(1): 79-81.
Hu Z D, Chen H Y, Li Z Y, Zhang D Y, Yin F, Lin Q S, Bao L H, Zhou X M, Feng X. Found a field population of diamondback moth, *Plutella xylostella* (L.), with high-level resistance to chlorantraniliprole in South China. *Guangdong Agric Sci*, 2012, (1): 79-81. (in Chinese)
- [27] Wang X L, Khakame S K, Ye C, Yang Y, Wu Y. Characterisation of field-evolved resistance to chlorantraniliprole in the diamondback moth, *Plutella xylostella*, from China. *Pest Manag Sci*, 2013, 69(5): 661-665.
- [28] Su J Y, Lai T C, Li J. Susceptibility of field populations of *Spodoptera litura* (Fabricius) (Lepidoptera: Noctuidae) in China to chlorantraniliprole and the activities of detoxification enzymes. *Crop Prot*, 2012, 42: 217-222.
- [29] Lai T C, Li J, Su J Y. Monitoring of beet armyworm *Spodoptera exigua* (Lepidoptera: Noctuidae) resistance to chlorantraniliprole in China. *Pest Biol Physiol*, 2011, 101(3): 198-205.
- [30] Li X C, Degain B A, Harpold V S, Marçon P G, Nichols RL, Fournier A J, Naranjo S E, Palumbo J C, Ellsworth P C. Baseline susceptibilities of B- and Q-biotype *Bemisia tabaci* to anthranilic diamides in Arizona. *Pest Manag Sci*, 2012, 68: 83-91.