

螺虫乙酯对大型溞的急性和慢性毒性效应

陈颖¹, 陶芳怡¹, 刘训悦¹, 王蒙岑², 饶琼¹, 顾丹璐¹, 吴慧明^{*1}

(1. 浙江农林大学 农业与食品科学学院, 杭州 311300; 2. 浙江大学 农药与环境毒理研究所, 杭州 310058)

摘要: 为评价新型季酮酸衍生物类杀虫剂螺虫乙酯 (spirotetramat) 对水生生物的生态危害, 以大型溞 *Daphnia magna* 为研究对象, 将其暴露于不同质量浓度的螺虫乙酯中, 通过急性毒性试验、慢性毒性试验和子代染毒及恢复试验, 研究螺虫乙酯对大型溞的急性和 21 d 慢性毒性效应。急性毒性试验结果表明, 螺虫乙酯对大型溞的 48 h-EC₅₀ 值为 46.55 mg/L。慢性毒性试验结果表明, 经不同浓度螺虫乙酯暴露 21 d 后, 4.7 mg/L 浓度组在初次产溞数、母溞产溞总数和母溞产胎数上较对照都有显著减少, 并显著延后了初次产溞的时间。经螺虫乙酯暴露后的 F₀ 代大型溞所产后代 (F₁ 代) 对螺虫乙酯的耐药性降低, 同时对 F₁ 代染毒组的初次产溞时间、初次产溞数和产胎数均有显著影响, 但仅对 F₁ 代恢复组的体长有显著影响。综上所述, 螺虫乙酯对大型溞具有一定的生殖毒性, 并在一定程度上对大型溞的生长和繁殖能力具有抑制效应。

关键词: 螺虫乙酯; 大型溞; 急性毒性; 慢性毒性; 生殖毒性

中图分类号: S481.9; TQ450.2

文献标志码: A

文章编号: 1008-7303(2018)01-0118-06

Acute and chronic toxicities of spirotetramat to *Daphnia magna*

CHEN Ying¹, TAO Fangyi¹, LIU Xunyue¹, WANG Mengcen², RAO Qiong¹,
GU Danlu¹, WU Huiming^{*1}

(1. College of Agriculture and Food Science, Zhejiang Agriculture & Forestry University, Hangzhou 311300, China;
2. Institute of Pesticide and Environmental Toxicology, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: In order to evaluate the aquatic toxicity of the new tetramic acid derivative spirotetramat, the acute-chronic toxicity, offspring contamination and recovery test of *Daphnia magna* under different concentrations of spirotetramat were conducted. The acute toxicity results indicated that spirotetramat had low toxicity against *D. magna*, the 48 h-EC₅₀ value was 46.55 mg/L. The results of chronic test showed that, 21 days after exposure to spirotetramat, the first reproduction number, the number of total offspring per female and the number of brood per female of *D. magna* were significantly reduced. The first reproduction time was also evidently delayed at the concentration of 4.7 mg/L spirotetramat. The offspring of F₀ generation *D. magna* (named F₁ generation *D. magna*) was more sensitive to spirotetramat than the control. And the first reproduction time, the first reproduction number and the number of brood were significantly influenced, and only the body length of F₁ recovery group was significantly affected. In conclusion, spirotetramat had severe reproductive toxicity to *D. magna*, and had inhibiting

收稿日期: 2017-10-10; 录用日期: 2017-12-27.

基金项目: 浙江省自然科学基金 (LY15B070008); 浙江农林大学科研发展基金 (2015FR013); 浙江省三农六方项目 (2045210267).

作者简介: 陈颖, 女, 硕士研究生, E-mail: 2479507459@qq.com; *吴慧明, 通信作者 (Author for correspondence), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为农药残留和生态风险研究, E-mail: wuhm@zafu.edu.cn

effects on its growth and reproduction.

Keywords: spirotetramat; *Daphnia magna*; acute toxicity; chronic toxicity; reproductive toxicity

随着应用的日益广泛, 农药已成为环境污染的主要来源之一, 水生环境和其他环境层中残留的农药均会对生物带来风险^[1-3]。螺虫乙酯 (spirotetramat) 是具有双向内吸传导性的杀虫剂, 通过抑制靶标酶乙酰辅酶 A 羧化酶 (ACCase) 的活性而干扰脂肪的生物合成, 最终导致昆虫死亡^[4]。其对刺吸式口器害虫的防治效果明显, 与其他杀虫剂无交互抗性^[5], 对蚜虫、全爪螨等害虫均有较好的防治效果, 且持效期较长^[6-7], 并能显著降低雌性成虫繁殖能力, 从而达到控制害虫种群数量的效果^[8-9]。此外, 螺虫乙酯经叶片处理还能防治隐蔽害虫 (如根蚜), 从而保护植物的新发组织^[4]。据调查, 螺虫乙酯将以更多制剂形式、更大数量投放市场^[10], 因此, 研究螺虫乙酯对环境的影响势在必行。

已有研究表明, 螺虫乙酯可影响非靶标生物的行为及其生理生化功能。如: 其可诱导斑马鱼 *Danio rerio* 的细胞凋亡^[11]; 破坏斑马鱼体内的氧化还原平衡^[12]; 可引发斑马鱼雌鱼和中华蟾蜍 *Bufo gargarizans* 蝌蚪产生氧化应激反应, 造成机体氧化损伤^[13]; 可降低鲶鱼 *Silurus asotus* 胚胎的孵化率, 并干扰幼鱼游动的协调能力^[14]。因此, 螺虫乙酯可能损伤非靶标生物的生命、繁殖及代谢过程, 对人类以及其他生物有潜在的不利影响^[11-14]。

大型溞 *Daphnia magna* 因其对环境变化的高敏感性、以及繁殖周期短和容易培养等特点被广泛应用于水生生态毒性研究中^[15]。有报道指出, 螺虫乙酯对网纹溞 *Ceriodaphnia dubia* 的 48 h-LC₅₀ 值为 23.8 mg/L^[16]。但目前尚未见螺虫乙酯对大型溞急性及慢性毒性的研究报道。鉴于此, 笔者依据经济合作与发展组织 (OECD) 化学品测试准则, 通过测定不同浓度螺虫乙酯对大型溞急性活动的抑制及慢性繁殖的影响, 研究了螺虫乙酯对大型溞的急、慢性毒性及其对大型溞种群的影响。

1 材料与方法

1.1 药剂与主要仪器

98.7% 螺虫乙酯 (spirotetramat) 原药 (由拜耳

作物科学公司提供); 丙酮 (分析纯) 购于杭州双林化工试剂厂。

单道可调量程移液器 (德国艾本德股份公司); SMZ-140 体视显微镜 (中国麦克奥迪实业集团有限公司); 尼康 Eclipse 80i 显微镜 (日本尼康公司); Xutemp 生物人工气候箱 (杭州雪中炭恒温技术有限公司)。

1.2 试验生物

大型溞 *Daphnia magna* (浙江大学农药与环境毒理研究所引种的 62 D. M 纯品系生物株), 于人工气候箱中培养, 控制温度为 20 °C ± 1 °C, 光周期 16 L : 8 D, 饲养密度为每 50 mL 培养液^[17]饲养 1 只母溞。每 2 d 更换 1 次培养液 (M4), 每天喂食小球藻 *Chlorella*。小球藻参照 OECD 化学品测试准则“201”中绿藻的要求培养^[18]。投饵密度为 $2.0 \times 10^5 \sim 3.0 \times 10^5$ cells/mL, 每天监测小球藻的密度, 待其稀释到投饵密度后再喂食。挑选出生 6~24 h 幼溞进行毒性试验。

1.3 试验方法

1.3.1 急性毒性试验 参照文献方法^[19]进行。根据预试验结果, 设置螺虫乙酯的质量浓度分别为 12.5、25.0、37.5、50.0 和 62.5 mg/L (母液用助溶剂丙酮配制), 同时设空白对照组和溶剂对照 (0.01% 丙酮) 组。每只烧杯 (100 mL) 中加入 50 mL 供试药液和 5 只幼溞作为一个处理, 每浓度组和对照组各设 4 个平行处理, 共 28 个处理。试验期间温度及光照与培养条件一致, 不喂食受试溞。分别在试验开始后 24 h 和 48 h 观察记录各试验组中溞的活动受抑制情况, 48 h 记录试验数据后终止试验。

1.3.2 慢性毒性试验 参照文献方法^[20]进行。根据急性毒性试验的结果设计 3 个暴露浓度, 分别约为 48 h-EC₅₀ 值的 1/100、1/50 和 1/10, 另设空白对照组。由于所设置的浓度低于螺虫乙酯在水中的溶解度^[5], 稀释农药时无需助溶剂, 因此试验设计中不设溶剂对照, 每次配制药液均用培养液直接稀释母液。在 100 mL 烧杯中加入 50 mL 供试药液, 每只烧杯放入 1 只幼溞 (F₀ 代), 每个处理组用 20 头幼溞, 即 20 个烧杯。采用半静态试验, 每隔 48 h 更换 1 次试验溶液。每日投喂新鲜小球藻 ($2.0 \times 10^5 \sim 3.0 \times 10^5$ cells/mL)。从每个处理

组母蚤所生的幼蚤(F_1 代)中各挑选 20 只进行子代 21 d 暴露试验,其他条件与 F_0 代处理相同,作为 F_1 代染毒试验;同时在每个试验处理组 F_0 代母蚤所生幼蚤(F_1 代)中各挑选 20 只,分别置于 50 mL 空白培养液中,进行子代 21 d 恢复试验,其他条件与以上的 F_1 代染毒试验相同,作为 F_1 代恢复试验。

试验期间每 24 h 观察 1 次,将新生的幼蚤及时取出,并记录每只母蚤的初次产蚤时间、初次产蚤数、蜕壳次数、产胎数和死亡率,计算整个试验期间产蚤次数和总产蚤数。分别于 F_0 代及 F_1 代试验第 21 天时,在显微镜下测量大型蚤体长。采用 Lotka 方程计算内禀增长率(r_m)^[21]。

1.4 数据处理

运用 IBM SPSS Statistics 19 数据处理软件中的 Probit 模块,求得螺虫乙酯对大型蚤的 48h- EC_{50} 值,采用 Duncan 检验法比较对照组与农药处理组间的差异显著性,结果采用平均值 $\pm$ 标准差表示。

2 结果与分析

2.1 螺虫乙酯对大型蚤急性活动的抑制作用

本研究结果表明:螺虫乙酯对大型蚤的 48h-

EC_{50} 值为 46.55 mg/L,95% 置信区间为 41.79~51.77 mg/L;剂量-效应方程为 $y=1.42x-15.95$ (相关系数 r 为 0.918 0),依据《化学农药环境安全评价试验准则第 13 部分:蚤类急性活动抑制试验》^[22],螺虫乙酯对大型蚤属低毒化合物。

2.2 螺虫乙酯对大型蚤 21 d 染毒试验结果

表 1 中列出了 F_0 代、 F_1 代染毒试验和 F_1 代恢复试验中大型蚤初次产蚤时间与初次产蚤数。结果显示:螺虫乙酯可影响 F_0 代大型蚤的初次产蚤时间,其中 4.7 mg/L 浓度组显著 ($P<0.05$) 延长了初次产蚤时间,同时, F_0 代母蚤初次产蚤数也受到明显抑制。 F_1 代染毒后其初次产蚤时间均有不同程度的延迟,其中 4.7 mg/L 浓度组显著迟于对照组; F_1 代持续染毒后,初次产蚤数量均明显下降,且呈现剂量-效应关系。 F_1 代在无毒培养液中恢复培养后(恢复组),初次产蚤时间和初次产蚤数与对照组相比均无明显差异。与 F_0 代相比, F_1 代 0.47、0.94 mg/L 染毒处理组初次产蚤时间明显推迟,初次产蚤数明显降低;经 0.47、0.94 mg/L 螺虫乙酯处理的 F_0 代所产的 F_1 代,在恢复试验时初次产蚤时间明显推迟。

表 1 螺虫乙酯对大型蚤初次产蚤时间及初次产蚤数的影响

处理 Treatment(mg/L)	初次产蚤时间 First brood time/d			初次产蚤数 First brood number		
	F_0 代染毒 F_0 generation (contamination)	F_1 代染毒 F_1 generation (contamination)	F_1 代恢复 F_1 generation (recovery)	F_0 代染毒 F_0 generation (contamination)	F_1 代染毒 F_1 generation (contamination)	F_1 代恢复 F_1 generation (recovery)
CK	6.58 $\pm$ 0.45 a	7.06 $\pm$ 0.13 a*	7.06 $\pm$ 0.13 a*	19.41 $\pm$ 3.66 b	13.45 $\pm$ 0.97 c*	13.45 $\pm$ 0.97 a*
0.47	6.23 $\pm$ 0.17 a	8.65 $\pm$ 0.46 ab*	7.05 $\pm$ 0.10 a*	17.76 $\pm$ 3.11 b	9.40 $\pm$ 1.51 b*	14.00 $\pm$ 1.50 a*
0.94	6.18 $\pm$ 0.12 a	8.79 $\pm$ 0.17 ab*	7.11 $\pm$ 0.13 a*	15.44 $\pm$ 2.96 ab	9.96 $\pm$ 1.32 b*	14.66 $\pm$ 2.82 a
4.70	7.27 $\pm$ 0.44 b	9.63 $\pm$ 2.56 b	6.95 $\pm$ 0.10 a	10.84 $\pm$ 5.26 a	6.23 $\pm$ 1.74 a	13.11 $\pm$ 1.51 a

注: F_0 代和 F_1 代染毒组进行螺虫乙酯暴露处理, F_1 代恢复组不进行农药处理。不同小写字母表示同列数据差异显著 (ANOVA, LSD, $P<0.05$); *表示同行数据差异显著 (ANOVA, LSD, $P<0.05$)。

Note: F_0 generation (contamination) and F_1 generation (contamination) groups were treated with spirotetramat. F_1 generation (recovery) groups were not treated with pesticide. Means ($\pm$ SE) within a column followed by different letters are significantly different by LSD (ANOVA, $P<0.05$); Means ($\pm$ SE) within a row followed by ‘*’ are significantly different by LSD (ANOVA, $P<0.05$).

由表 2 中数据可以看出:经 4.7 mg/L 螺虫乙酯处理的 F_0 代大型蚤,每头母蚤 21 d 平均总产蚤数显著降低,仅为对照组的 80%。在 F_1 代染毒试验中,0.47、0.94 和 4.7 mg/L 染毒组 21 d 单雌产蚤总数均显著低于对照组,且存在明显的剂量-效应关系;4.7 mg/L 处理组产胎数显著降低。 F_1 代恢复组的单雌产蚤数及产胎数与对照组相比则无

显著差异,表明螺虫乙酯处理 F_0 代大型蚤不会影响 F_1 代恢复组的增殖。 F_1 代染毒及恢复组与 F_0 代染毒组进行对比, F_1 代染毒的单雌产蚤数均显著低于 F_0 代染毒组, F_1 代恢复组中仅 4.7 mg/L 处理组的产蚤数无显著变化; F_1 代染毒组中 0.47、0.94 mg/L 处理的单雌产胎数显著低于同浓度处理的 F_0 代染毒组, F_1 代恢复组中仅母代为 0.94 mg/L

表 2 螺虫乙酯对大型溞单雌产溞数和产胎数的影响

Table 2 Effect of spirotetramat on number of offspring per adult and number of broods of *D. magna*

处理 Treatment/(mg/L)	单雌产溞数 Number of offspring per adult			产胎数 Number of broods		
	F ₀ 代染毒 F ₀ generation (contamination)	F ₁ 代染毒 F ₁ generation (contamination)	F ₁ 代恢复 F ₁ generation (recovery)	F ₀ 代染毒 F ₀ generation (contamination)	F ₁ 代染毒 F ₁ generation (contamination)	F ₁ 代恢复 F ₁ generation (recovery)
CK	248.36 ± 23.45 b	177.10 ± 14.47 c*	177.10 ± 14.47 a*	8.16 ± 0.66 a	7.84 ± 0.70 b	7.84 ± 0.70 a
0.47	250.49 ± 8.02 b	116.55 ± 19.36 b*	179.80 ± 19.30 a*	8.19 ± 0.13 a	6.66 ± 0.56 ab*	7.80 ± 0.33 a
0.94	257.33 ± 7.51 b	134.93 ± 11.62 b*	171.28 ± 16.78 a*	8.45 ± 0.53 a	6.88 ± 0.30 ab*	7.76 ± 0.35 a*
4.7	197.65 ± 27.04 a	48.15 ± 37.12 a*	157.71 ± 14.57 a	7.63 ± 0.72 a	5.40 ± 3.22 a	7.82 ± 0.35 a

注: F₀ 代和 F₁ 代染毒组进行螺虫乙酯暴露处理, F₁ 代恢复组不进行农药处理。不同小写字母表示同列数据差异显著 (ANOVA, LSD, $P < 0.05$); *表示同行数据差异显著 (ANOVA, LSD, $P < 0.05$)。

Note: F₀ generation (contamination) and F₁ generation (contamination) groups were treated with spirotetramat. F₁ generation (recovery) groups were not treated with pesticide. Means (± SE) within a column followed by different letters are significantly different by LSD (ANOVA, $P < 0.05$); Means (± SE) within a row followed by ‘*’ are significantly different by LSD (ANOVA, $P < 0.05$).

处理组的产胎数显著低于 F₀ 代染毒组。

F₀ 代中各处理组大型溞的体长及蜕壳次数与对照组相比均没有明显差异 (表 3)。F₀ 代中不同

浓度处理组的溞所产的 F₁ 代, 无论进行染毒或恢复处理, 21 d 后大型溞的平均体长均明显比对照组短; 各处理组溞的蜕壳数无明显差异。

表 3 螺虫乙酯对大型溞 21 d 体长和蜕壳次数的影响

Table 3 Effect of spirotetramat on body length and number of cumulative molts of *D. magna*

处理 Treatment/(mg/L)	21 d 体长 Body length/mm			蜕壳次数 Number of cumulative molts		
	F ₀ 代染毒 F ₀ generation (contamination)	F ₁ 代染毒 F ₁ generation (contamination)	F ₁ 代恢复 F ₁ generation (recovery)	F ₀ 代染毒 F ₀ generation (contamination)	F ₁ 代染毒 F ₁ generation (contamination)	F ₁ 代恢复 F ₁ generation (recovery)
CK	3.04 ± 0.01 a	3.85 ± 0.10 c*	3.85 ± 0.10 c*	12.93 ± 1.40 a	12.95 ± 0.23 a	12.95 ± 0.23 a
0.47	3.10 ± 0.06 a	3.46 ± 0.01 ab*	3.71 ± 0.07 ab*	12.70 ± 0.24 a	12.56 ± 0.43 a	12.60 ± 0.71 a
0.94	3.00 ± 0.15 a	3.44 ± 0.04 a*	3.75 ± 0.01 bc*	12.70 ± 0.24 a	12.16 ± 0.84 a	12.51 ± 0.37 a
4.7	3.04 ± 0.09 a	3.56 ± 0.08 ab*	3.63 ± 0.08 a*	12.88 ± 1.07 a	12.52 ± 0.34 a	12.57 ± 0.35 a

注: F₀ 代和 F₁ 代染毒组进行螺虫乙酯暴露处理, F₁ 代恢复组不进行农药处理。不同小写字母表示同列数据差异显著 (ANOVA, LSD, $P < 0.05$); *表示同行数据差异显著 (ANOVA, LSD, $P < 0.05$)。

Note: F₀ generation (contamination) and F₁ generation (contamination) groups were treated with spirotetramat. F₁ generation (recovery) groups were not treated with pesticide. Means (± SE) within a column followed by different letters are significantly different by LSD (ANOVA, $P < 0.05$); Means (± SE) within a row followed by ‘*’ are significantly different by LSD (ANOVA, $P < 0.05$).

表 4 中列出了大型溞在不同浓度螺虫乙酯暴露下, 21 d 后 F₀ 代染毒、F₁ 代染毒及 F₁ 代恢复

试验的死亡率, 以及采用 Lotka 方法计算得到不同处理组的内禀增长率 (r_m)。结果显示: F₀ 代染

表 4 螺虫乙酯对大型溞死亡率和内禀增长率的影响

Table 4 Effect of spirotetramat on mortality and innate rate of increase of *D. magna*

处理 Treatment/ (mg/L)	死亡率 Mortality/%			内禀增长率 Innate rate of increase, r_m		
	F ₀ 代染毒 F ₀ generation (contamination)	F ₁ 代染毒 F ₁ generation (contamination)	F ₁ 代恢复 F ₁ generation (recovery)	F ₀ 代染毒 F ₀ generation (contamination)	F ₁ 代染毒 F ₁ generation (contamination)	F ₁ 代恢复 F ₁ generation (recovery)
CK	0	0	0	0.56	0.52	0.52
0.47	0.37	16.84	0	0.57	0.44	0.58
0.94	22.17	1.11	0.38	0.56	0.49	0.60
4.7	22.97	36.51	7.93	0.45	0.39	0.57

注: F₀ 代和 F₁ 代染毒组进行螺虫乙酯暴露处理, F₁ 代恢复组不进行农药处理。

Note: F₀ generation (contamination) and F₁ generation (contamination) groups were treated with spirotetramat. F₁ generation (recovery) groups were not treated with pesticide.

毒、F₁ 代染毒以及 F₁ 代恢复试验中死亡率最高的均为 4.7 mg/L 处理组，说明母代经螺虫乙酯暴露后子代继续暴露会增加子代的死亡率，恢复组死亡率虽低于其母代染毒组及 F₁ 代染毒组，但仍高于无药物处理的对照组。 r_m 可表述大型溞种群瞬时增长的能力，是种群繁衍能力的指标之一。用螺虫乙酯持续暴露可降低 F₀ 代大型溞的 r_m 值，F₁ 代恢复组大型溞由于脱离了有毒环境的胁迫而使得 r_m 恢复正常。因此，一定浓度的螺虫乙酯持续暴露会影响大型溞种群的繁衍能力。

3 结论与讨论

F₀ 代大型溞在螺虫乙酯中的 21 d 慢性毒性暴露试验结果表明，螺虫乙酯可影响大型溞的生长发育及繁衍，螺虫乙酯处理可延迟 F₀ 代大型溞初次产溞时间，并减少母溞初次产溞数量和平均产溞总数。大型溞的体长是评价慢性毒性的重要指标之一^[23]。本研究结果表明，在所有指标中，螺虫乙酯对大型溞 21 d 体长的影响最为明显，将经螺虫乙酯暴露后产生的大型溞后代 (F₁ 代溞) 放入无螺虫乙酯的环境 (F₁ 代恢复组)，其平均体长仍显著低于对照组。将 F₁ 代大型溞持续暴露于不同浓度的螺虫乙酯中 21 d，各处理组大型溞平均产溞数显著下降，且产胎次数明显减少，同时其初次产溞时间被推迟，初次产溞数量显著下降。而螺虫乙酯对大型溞的蜕壳次数影响并不明显，因此在以后的实验中可去除这一指标。研究表明，F₀ 代大型溞受螺虫乙酯暴露影响后，其产生的后代 (F₁ 代) 行为更易受农药的影响，这可能与 F₀ 代溞体内的脂类生物合成及代谢失衡、激素水平发生变化，导致后代发育受影响有关^[24-25]。

目前，螺虫乙酯在中国主要登记用于番茄、柑橘、黄瓜、辣椒、梨、苹果等旱地作物上防治烟粉虱、红蜘蛛、蚧壳虫等害虫^[26]。在正常条件下，螺虫乙酯在土壤中有一定的移动性^[27]，其在水中也有一定持留性，当 pH 值为 7 时，半衰期分别为 8.5 d (25 °C) 和 13 d (20 °C)^[28]，而大型溞的生育周期约为 7 d，因此，水中残留的一定浓度的螺虫乙酯可能会影响 1~2 代大型溞的生存和繁育，对其种群安全具有潜在的威胁，存在一定的水生生态风险。

参考文献 (Reference):

[1] POLIDORO B A, COMEROS-RAYNAL M T, CAHILL T, et al. Land-based sources of marine pollution: pesticides, PAHs and phthalates in coastal stream water, and heavy metals in coastal stream sediments in American Samoa[J]. Mar Pollut Bull, 2017, 116(1-2): 501-507, doi: 10.1016/j.marpolbul.2016.12.058.

[2] ROSSA P D, JANNOYER M, MOTTES C, et al. Linking current river pollution to historical pesticide use: insights for territorial management?[J]. Sci Total Environ, 2017, 574: 1232-1242, doi: 10.1016/j.scitotenv.2016.07.065.

[3] LAI W Y. Pesticide use and health outcomes: evidence from agricultural water pollution in China[J]. J Environ Econom Manage, 2017, 86: 93-120.

[4] ERNST B, ALFRED E, REINER F, et al. Movento, an innovative ambimobile insecticide for sucking insect pest control in agriculture: biological profile and field performance[J]. Crop Protection, 2009, 28(10): 838-844.

[5] 张庆宽. 双向内吸性新杀虫剂螺虫乙酯的开发[J]. 农药, 2009, 48(6): 445-447.

ZHANG Q K. Discovery, synthesis and development of a new ambimobile insecticide spirotetramat[J]. Agrochemicals, 2009, 48(6): 445-447.

[6] 宫庆涛, 耿军, 武海斌, 等. 3种果树蚜虫有效防治药剂及剂量筛选[J]. 植物保护, 2016, 42(5): 225-229.

GONG Q T, GENG J, WU H B, et al. Screening of effective pesticides and doses against three kinds of fruit aphids[J]. Plant Protect, 2016, 42(5): 225-229.

[7] 焦蕊, 李立涛, 于丽辰, 等. 三种杀螨剂及其复配剂对苹果全爪螨的田间防效[J]. 北方园艺, 2017(4): 109-111.

JIAO R, LI L T, YU L C, et al. Effects of three kinds of miticides and their compounds against *Panonychus ulmi* Koch in field[J]. North Horticult, 2017(4): 109-111.

[8] MARCIC D, MUTAVDZIC S, MEDJO I, et al. Spirotetramat toxicity to immatures and sublethal effects on fecundity of female adults of *Tetranychus urticae* Koch[J]. Zoosymposia, 2011, 6: 99-103.

[9] MARCIC D, PETRONIJEVIC S, DROBNJAKOVIC T, et al. The effects of spirotetramat on life history traits and population growth of *Tetranychus urticae* (Acari: Tetranychidae)[J]. Exp Appl Acarol, 2012, 56(2): 113-122.

[10] 杨琳琳, 段洁. 杀虫、杀螨剂螺虫乙酯的专利技术现状分析[J]. 农药, 2016, 55(5): 320-323.

YANG L L, DUAN J. Analysis of patent technology of insecticide and acaricide: spirotetramat in China[J]. Agrochemicals, 2016, 55(5): 320-323.

[11] 李江, 赖柯华, 冯青, 等. 螺虫乙酯对斑马鱼的急性毒性及细胞凋亡的影响[J]. 热带农业科学, 2015, 35(5): 45-49.

LI J, LAI K H, FENG Q, et al. Effects of spirotetramat on acute toxicity and apoptosis of zebra fish[J]. Chin J Trop Agric, 2015,

35(5): 45-49.

[12] 毛晨蕾, 王珏, 江盛菊, 等. 螺虫乙酯对雌性斑马鱼的毒性及氧化应激效应[J]. 农药学学报, 2014, 16(3): 300-306.

MAO C L, WANG J, JIANG S J, et al. Toxicity of spirotetramat and oxidative stress response in female zebrafish (*Danio rerio*)[J]. Chin J Pest Sci, 2014, 16(3): 300-306.

[13] YIN X H, JIANG S J, YU J, et al. Effects of spirotetramat on the acute toxicity, oxidative stress, and lipid peroxidation in Chinese toad (*Bufo bufo gargarizans*) tadpoles[J]. Environ Toxicol Pharmacol, 2014, 37(3): 1229-1235.

[14] AGBOHESSI P T, TOKO I I, HOUNDJI A, et al. Acute toxicity of agricultural pesticides to embryo-larval and juvenile African catfish *Clarias gariepinus*[J]. Arch Environ Contaminat Toxicol, 2013, 64(4): 692-700.

[15] 庄德辉, 梁彦龄, 邓冠强. 氯化高汞对大型溞的慢性毒性[J]. 水生生物学集刊, 1984, 8(4): 449-456.

ZHUANG D H, LIANG Y L, DENG G Q. Toxicity of mercuric chloride to *Daphnia magna* Straus, with special emphasis on long-term tests[J]. Acta Hydrobiol Sin, 1984, 8(4): 449-456.

[16] CHEN X D, STARK J D. Individual-and population-level toxicity of the insecticide, spirotetramat and the agricultural adjuvant, destiny to the cladoceran, *Ceriodaphnia dubia*[J]. Ecotoxicology, 2010, 19(6): 1124-1129.

[17] 罗特B, 张甬元. 试验用大型溞(*Daphnia magna*)的培养方法[J]. 环境科学, 1987, 8(3): 28-30.

ROTTER B, ZHANG Y Y. Culture of laboratory *Daphnia magna*[J]. Environ Sci, 1987, 8(3): 28-30.

[18] Organisation for Economic Co-operation and Development. Method 201 guideline for testing of chemicals, *Alga* sp. Acute immobilisation Test[S]. Paris: OECD, 2004.

[19] Organisation for Economic Co-operation and Development. Method 202 guideline for testing of chemicals, *Daphnia* sp. Acute immobilisation test[S]. Paris: Environment Health and Safety Publications, 2004.

[20] Organisation for Economic Co-operation and Development. Method 211 guideline for testing of chemicals, *Daphnia* sp. *Daphnia magna* reproduction test[S]. Paris: Environment Health and Safety Publications, 2004.

[21] 林昌善. 动物种群数量变动的理论与试验研究 II. 杂拟谷盗 *Tribolium confusum* (H.)的内禀增长能力(r_m)的研究[J]. 动物学报, 1964, 16(3): 323-338.

LIN C S. The theoretical and laboratory studies of animal population dynamics II. A study of innate capacity for increase (r_m) of *Tribolium confusum* (H.) under certain experimental conditions[J]. Acta Zool Sin, 1964, 16(3): 323-338.

[22] 化学农药环境安全评价试验准则 第13部分: 溞类急性活动抑制试验: GB/T 31270.13—2014[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.

Test guidelines on environmental safety assessment for chemical pesticides—Part 13: *Daphnia* sp. acute immobilisation test: GB/T31270.13—2014[S]. Beijing: Standards Press of China, 2015.

[23] TOUMI H, BOUMAIZA M, MILLET M, et al. Effects of deltamethrin (pyrethroid insecticide) on growth, reproduction, embryonic development and sex differentiation in two strains of *Daphnia magna* (Crustacea, Cladocera)[J]. Sci Total Environ, 2013, 458-460: 47-53.

[24] 吴慧明. 螺虫乙酯对雄性大鼠毒性及其机制研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2013.

WU H M. Toxicity and toxic mechanism of spirotetramat in male rats[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013.

[25] FALEIRO F, NARCISO L. Lipid dynamics during early development of *Hippocampus guttulatus* seahorses: searching for clues on fatty acid requirements[J]. Aquaculture, 2010, 307(1-2): 56-64.

[26] 刘刚. 目前在我国登记的螺虫乙酯产品[J]. 农药市场信息, 2017(14): 38.

LIU G. Currently registered ethyl snail products in China[J]. Pestic Market News, 2017(14): 38.

[27] 杜芳. 螺虫乙酯在大豆和土壤中的消解动态及最终残留研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2016.

DU F. Study on degradation dynamic and residual behavior of spirotetramat in soybean and soil[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2016.

[28] 张建功. 螺虫乙酯的合成、衍生及生物活性研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2012.

ZHANG J G. Study on synthesis process of snirotetramat and bioactivtv structure relationship of its derivatives[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012.

(责任编辑: 金淑惠)