

DOI: 10.7524/AJE.1673 - 5897.20131204001

张瑞明 李祥英 陈崇波 等. 虫螨腈对斑马鱼的急性毒性及生物富集性[J]. 生态毒理学报, 2014, 9(3): 430-436

Zhang R M, Li X Y, Chen C B, et al. Acute toxicity and bioaccumulation of chlorfenapyr in *Brachydanio rerio* [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2014, 9 (3): 430-436(in Chinese)

虫螨腈对斑马鱼的急性毒性及生物富集性

张瑞明¹, 李祥英¹, 陈崇波¹, 张宝兰¹, 张晶¹, 张宏涛^{1,*}, 孙国萍^{1,2}

1. 佛山市环境健康与安全评价研究中心 佛山 528000

2. 广东省微生物研究所 广州 510070

收稿日期: 2013-12-04 录用日期: 2014-01-06

摘要: 以斑马鱼 (*Brachydanio rerio*) 为试验生物, 采用半静态法测定虫螨腈对斑马鱼的急性毒性和生物富集系数。试验结果表明, 虫螨腈对斑马鱼 96 h- LC_{50} 为 $0.015 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 其 95% 的置信限为 $0.011 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \sim 0.12 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 属于高毒。在两个处理浓度 $2.0 \times 10^{-4} \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $2.0 \times 10^{-3} \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 下, 连续暴露 8 d, 斑马鱼对虫螨腈的生物富集系数 (BCF_{8d}) 分别为 1 211.6 和 1 549.7, 属于高富集性农药。

关键词: 虫螨腈; 斑马鱼; 急性毒性; 生物富集

文章编号: 1673-5897(2014)3-430-07 中图分类号: X171.5 文献标识码: A

Acute Toxicity and Bioaccumulation of Chlorfenapyr in *Brachydanio rerio*

Zhang Ruiming¹, Li Xiangying¹, Chen Chongbo¹, Zhang Baolan¹, Zhang Jing¹, Zhang Hongtao^{1,*}, Sun Guoping^{1,2}

1. Foshan Center for Environmental Health and Safety Assessment, Foshan 528000, China

2. Guangdong Institute of Microbiology, Guangdong 510070, China

Received 4 December 2013 accepted 6 January 2014

Abstract: Acute toxicity and bioaccumulation of Chlorfenapyr to *Brachydanio rerio* were measured by semi-static method. The results showed that the 96 h- LC_{50} of Chlorfenapyr to *B. rerio* was $0.015 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ with 95% confidence interval (CI) of 0.011 to $0.12 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. Chlorfenapyr showed high toxicity to *B. rerio*. The 8 days bioaccumulation factors (BCF_{8d}) of Chlorfenapyr were 1 211.6 and 1 549.7 at the concentrations of 2.0×10^{-4} and $2.0 \times 10^{-3} \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, respectively, which indicated bioaccumulation of Chlorfenapyr in *B. rerio* was high.

Keywords: chlorfenapyr; *Brachydanio rerio*; acute toxicity; bioaccumulation

随着用量的不断增加, 农药对生态环境的破坏也日渐严重。农药污染问题已成为全世界广泛关注的重大环境问题。为预防农药对生态环境产生不利影响, 有必要对农药的环境安全性和生态风险加以

评价。农药环境安全性评价对促进农药合理使用、保障生态环境安全具有重要作用^[1]。

生物个体或处于同一营养级的许多生物种群, 从周围环境中吸收并积累某种元素或难分解的化合

基金项目: 佛山市院市合作项目(No.0006905170614033) , 高新区发展引导专项资金(No.20604)

作者简介: 张瑞明(1986-) , 男, 硕士研究生, 研究方向为环境毒理与环境行为; E-mail: mingdizb@163.com;

* 通讯作者(Corresponding author): E-mail: zhanght218@163.com

物,导致生物体内该物质的平衡浓度超过环境中浓度的现象,叫生物富集,又叫生物浓缩。这是某些处于食物链高位营养级的动物受农药污染与危害的原因之一。施用于农田中的农药通过各种途径进入水环境中,经食物链逐级浓缩而对水生生态系统造成危害,甚至最终危害到人类健康。农药对水生生物的急性毒性和生物富集性与农药的合理施用密切相关,是农药环境安全评价的重要参数^[2]。

虫螨腈(chlorfenapyr),学名为4-溴-2-(4-氯苯基)-1-乙氧甲基-5-三氟甲基吡咯-3-腈,又名除尽、溴虫腈,是一种新型取代芳基吡咯类杀虫、杀螨剂^[3]。具有胃毒及触杀作用,主要通过作用于昆虫体内多功能氧化酶(MFO)来抑制线粒体ADP向ATP转化,由于其作用机理新颖,杀虫谱广、对常规农药无交互抗性,近年来广泛应用于防止水稻、棉花、蔬菜、柑桔、葡萄、大豆等作物的多种害虫和害螨^[4]。目前国内关于虫螨腈的研究主要集中在其检测技术和残留动态方面^[3,5-22],其对环境水生生物安全性的相关报道较少,仅有研究表明溴虫腈对水生生物和鸟类有一定程度的影响^[11]。本研究测定了虫螨腈对斑马鱼(*Brachydanio rerio*)的急性毒性和生物富集系数,以期评价虫螨腈对水生生态系统的影响提供依据。

1 材料与方法(Materials and methods)

1.1 材料

1.1.1 供试药剂

95%虫螨腈原药由衡水北方农药化工有限公司提供。

99.0%虫螨腈标准样品购买于广州分析测试中心科力技术开发公司。

1.1.2 试验生物

品系:斑马鱼(*Brachydanio rerio*)。

规格:从试验鱼中随机抽取10尾,试验鱼的全长为21.94 mm~29.59 mm,体重为0.143 g~0.395 g。

来源:广州杨氏水族馆。

驯养:取足够数量的试验鱼于试验相同条件下驯养至少7 d,自然死亡率应小于5%,试验前1 d停止喂食,急性毒性测定试验期间不喂食。

1.1.3 试验用水

使用过滤曝气自来水,水的总硬度为103.41 mg·L⁻¹(以CaCO₃计),pH为7.63。

1.1.4 试验条件

温度:23℃±2℃

溶解氧:不低于空气饱和值的60%

微弱光照:14 h·d⁻¹

1.1.5 仪器设备和试剂

仪器:气相色谱仪,带电子捕获检测器(Agilent 7890,美国Agilent公司,美国),分析天平(ABS 220-4型,德国KERN,德国),温湿度计(DSR-THEXT型,佐格微系统(杭州)有限公司,杭州,中国),pH计(PH3110型,德国WTW,德国),氮吹仪(MTN-2800D,天津奥特赛恩斯仪器有限公司,天津,中国),溶解氧测定仪(Oxi3205,德国WTW,德国),旋涡混合仪(QT-1,上海琪特分析仪器有限公司,上海,中国),冷冻离心机(GL-21M型,湖南湘仪实验室仪器开发有限公司,湖南,中国),超纯水仪(Millipore Aqueliox5型,密理博(上海)贸易有限公司,台湾,中国)。

设备:2.5 mL无菌注射器(湖南平安医械科技有限公司),0.22 μm针孔式有机滤膜,鱼缸、烧杯、量筒、容量瓶、吸管等。

试剂:乙腈(≥99.9%,上海安谱科学仪器有限公司),丙酮(100%,广州试剂厂),二氯甲烷(100%,广州试剂厂),吐温-80(相对密度1.06-1.10,天津大茂化学试剂厂),OP-10(≥99.0%,天津大茂化学试剂厂),重铬酸钾(≥99.8%,国药集团化学试剂有限公司),氯化钠(≥99.8%,国药集团化学试剂有限公司),无水硫酸钠(≥99.0%,国药集团化学试剂有限公司),使用前650℃烘烤4 h以上)。

1.2 方法

1.2.1 鱼类急性毒性试验

参照OECD化学品测试导则^[23]和我国《化学品测试方法》^[24]进行。

1.2.1.1 鱼类敏感性检查:采用重铬酸钾作为参比物进行鱼类敏感性检查。重铬酸钾经105℃烘后,准确称取5.000 g到小烧杯中,用适量的试验用水溶解后转移至500 mL的容量瓶中,用试验用水稀释到标线,混匀,配制成10 g·L⁻¹的参比物贮备液。试验体系的总体积为3 L,根据所设浓度,计算出参比物贮备液和试验用水的比例,加入至试验容器中分别配制成150 mg·L⁻¹、192 mg·L⁻¹、246 mg·L⁻¹、315 mg·L⁻¹和403 mg·L⁻¹5个浓度梯度,每个浓度设置1个平行,同时设1个空白对照组。各试验容器中放入10尾鱼,试验暴露周期为24 h。试验结束时,观察记录受试鱼死亡数。试验温度为(23±2)℃,光暗周期为12 h:12 h,试验期间不喂食。

1.2.1.2 预试验: 先对 95% 虫螨腈原药进行较大范围浓度系列(0.002、0.005、0.01、0.02 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)的预试验, 每组用鱼 5 尾, 不设平行; 试验采用静态方式进行, 试验期间不换水, 观察并记录试验用鱼 96 h(或 48 h)的中毒症状和死亡情况。试验温度为(23 ± 2) °C, 光暗周期为 12 h: 12 h, 试验期间不喂食。由此求出死亡率 100% 的最低浓度和死亡率为 0% 的最高浓度的范围, 并在该范围内设置正式试验的浓度。

1.2.1.3 正式试验: 根据预试验结果, 设置正式试验的浓度梯度, 即 0.0055 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、0.0074 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、0.010 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、0.014 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 0.018 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 5 个浓度梯度。各试验容器中放入 10 尾鱼, 试验暴露周期为 96 h, 试验采用半静态方式进行, 每隔 24 h 更换 1 次试验溶液, 并观察记录受试鱼死亡数。试验温度为(23 ± 2) °C, 光暗周期为 12 h: 12 h, 试验期间不喂食。计算虫螨腈对斑马鱼的 24 h、48 h、72 h 和 96 h- LC_{50} 。

1.2.1.4 检测指标: 试验期间, 于试验开始后 24 h、48 h、72 h 和 96 h 观察记录各容器内鱼的活动状态和死鱼数, 用玻璃棒轻触鱼的尾部, 无可见运动即为死亡, 并及时取出死鱼。测定各组试验开始后 0 h、96 h 以及 24 h、48 h、72 h 更换试验溶液前后的 pH、温度和溶解氧含量。

1.2.1.5 数据处理: 采用 DPS13.5 统计软件对数据进行处理, 计算 96 h 的 LC_{50} 值以及 95% 的置信限。

1.2.2 生物富集试验

采用半静态法, 根据 95% 虫螨腈原药对斑马鱼 96 h 致死中浓度测定结果, 以 96 h LC_{50} 的 1/100、1/10 浓度设置 2 个供试药液浓度处理, 即 2.0×10^{-4} $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 2.0×10^{-3} $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 每个浓度设置 2 个平行。同时设置 1 个不加农药的空白对照组和 1 个溶剂对照组, 每组设置 2 个平行。

生物富集作用于(23 ± 2) °C 条件下进行, 鱼缸内加入 10 L 试验药液, 投放斑马鱼 25 尾, 满足每天每升水承载鱼重(湿重) 0.1 g ~ 1.0 g; 试验过程中于 0 h、24 h、48 h、96 h、144 h 和 192 h 测定水中和鱼体内富集受试物浓度, 取样均在更换受试物试验溶液前进行, 每次取样时试验溶液均需搅拌均匀, 试验鱼随机选取 4 尾; 同时在换液前后分别测定试验溶液 pH、温度和溶解氧含量, 记录试验鱼状态。试验期间每 24 h 投放饵料 1 次, 每次约 0.2 g。试验结束时, 试液中农药含量不低于初始浓度的 80%。试验期间水中溶解氧不得低于 5 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

按下式计算生物富集系数(BCF) [25]:

$$\text{BCF} = C_{\text{fs}}/C_{\text{ws}}$$

式中, C_{ws} 为水溶液中农药的浓度($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$), C_{fs} 为鱼体内的农药浓度($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)。

采用 Microsoft Office Excel 2007 对试验数据进行统计处理。

1.2.3 色谱条件

仪器: Agilent7890A 气相色谱仪; 色谱柱: HP-5 (30 m × 0.32 mm × 0.25 μm); 柱温: 230 °C; 进样口温度: 250 °C; 检测器: ECD; 检测器温度: 300 °C; 气流模式: 恒压 14.5 psi; 载气: 氮气, 纯度大于等于 99.999%; 分流方式: 分流; 分流比: 15:1; 进样量: 5 μL 。

1.2.4 样品前处理方法

1.2.4.1 水样前处理: 取 200 mL 水样于 500 mL 分液漏斗中, 加入约 5 g 的氯化钠, 再加入 80 mL 二氯甲烷, 充分震荡, 静置; 溶液分层后, 将二氯甲烷相转移至三角瓶中, 加入 10 g 的无水硫酸钠, 静置 1 h; 取 40 mL 二氯甲烷旋蒸至干, 用 1.0 mL 丙酮定容, 过 0.22 μm 滤膜, 待测。

1.2.4.2 鱼样前处理: 取斑马鱼 4 尾, 称重并记录, 放入研钵中, 加入 5 g 的无水硫酸钠, 将鱼研碎后转移至 50 mL 离心管中, 用 15 mL 乙腈分 3 次清洗研钵, 转移至离心管中, 超声 10 min, 在 7 000 $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ 下离心 5 min, 收集离心上清液, 重复超声、离心操作 2 次, 将 3 次收集到的上清液混合倒入 50 mL 容量瓶中, 用乙腈定容。在容量瓶中取 2.0 mL 上清液氮吹, 吹干后用 1.0 mL 丙酮定容, 过 0.22 μm 滤膜, 待测。

1.2.5 添加回收率测定

1.2.5.1 水样加标试验: 量取 200 mL 水样后, 精确添加虫螨腈标准溶液(添加水平分别为 2.0×10^{-3} 、 2.0×10^{-4} 和 2.0×10^{-5} $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$), 振摇均匀, 于室温下放置 10 min, 其他步骤按照 1.2.4.1 方法进行提取, 按照 1.2.3 色谱条件进行检测。每个添加水平重复 3 次。

1.2.5.2 鱼样加标试验: 称取鱼样后, 精确添加虫螨腈标准溶液(添加水平分别为 5 和 0.05 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), 振摇均匀, 于室温下放置 10 min, 其他步骤按照 1.2.4.1 方法进行提取, 按照 1.2.3 色谱条件进行检测。每个添加水平重复 5 次。

2 结果(Results)

2.1 重铬酸钾对斑马鱼的急性毒性

重铬酸钾对斑马鱼急性毒性结果见表 1 重铬酸钾

对斑马鱼的 24 h- LC_{50} 值为 $316\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 满足参比物重铬酸钾 24 h- LC_{50} 值在 $200\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}\sim 400\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间的试验有效性要求^[16]。参比物重铬酸钾试验结果证明斑马鱼的敏感性 同时验证了检测过程的有效性。

2.2 95% 虫螨腈原药对斑马鱼的急性毒性

试验结果见表 2。试验结果表明 95% 虫螨腈原药对斑马鱼 96h- LC_{50} 为 $0.015\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 其 95% 的置信限为 $0.011\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}\sim 0.12\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。《化学农药环境安全评价试验准则》^[26] 规定的化学农药对鱼类急性

毒性的评价标准: $LC_{50} > 10\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 低毒; $1.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1} < LC_{50} \leq 10\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 中毒; $LC_{50} \leq 1.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 高毒。根据该评价标准 在本试验条件下 95% 虫螨腈原药对斑马鱼的急性毒性为高毒。

试验期间 试验溶液中 pH 变化范围为 7.60~8.14; 温度变化范围为 $21.1\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 22.5\text{ }^{\circ}\text{C}$; 溶解氧含量的变化范围为 74~93%。试验结束时 空白对照组和溶剂对照组鱼死亡率均为 0% 低于 10%。

表 1 重铬酸钾对斑马鱼的急性毒性
Table 1 Acute toxicity of potassium dichromate against B. rerio

时 间/h	毒性回归方程	相关系数	$LC_{50}/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	95% 置信限 $/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$
Time/h	Toxicity regression equation	Correlation coefficient	Concentration of 50% death $/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	95% credible limit $/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$
24	$y = -19.2023 + 9.6816x$	0.9687	316	270 ~ 372

表 2 虫螨腈对斑马鱼的急性毒性
Table 1 Acute toxicity of chlorfenapyr against B. rerio

时 间/h	毒性回归方程	相关系数	$LC_{50}/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	95% 置信限 $/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$
Time/h	Toxicity regression equation	Correlation coefficient	Concentration of 50% death $/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	95% credible limit
96	$y = 10.8957 + 3.2347x$	0.9439	0.015	0.011 ~ 0.20

2.3 标准曲线

准确称取 31.12 mg 虫螨腈标准品于 25 mL 容量瓶中 用乙腈将其溶解 配成浓度为 $1.18 \times 10^3\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的贮备液。用丙酮将贮备液逐级配成有效浓度为 $0.2\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $0.05\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $0.02\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $0.005\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $0.002\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $0.001\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 一系列标准溶液 在气相色谱检测条件下测定 以质量浓度(x, $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)为横坐标、峰面积(y)为纵坐标建立标准曲线 结果见图 1。由所测得的标准曲线可知 其线性方程是 $y = 102623x + 78.167$ 相关系数 $R^2 = 0.9999$ 。虫螨腈浓度在 $0.001\sim 0.2\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 范围内与峰面积具有良好的线性相关性。

2.4 方法的回收率和精密度

在空白的水样和鱼样中 添加已知含量的虫螨腈标准品 按照上述前处理方法和色谱操作条件测定其含量 计算其回收率及变异系数 结果见表 4 和表 5。

由表 3 和表 4 可知 通过对虫螨腈残留样品分析的准确度及精确度检验 本方法测定的鱼样中虫螨腈的回收率为 92.0%~108.2% 变异系数为 4.4%~6.5% 水中虫螨腈的回收率为 75.1%~100.2% 变

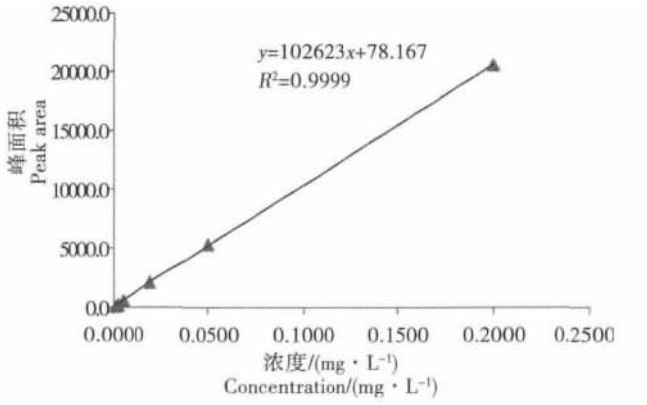


图 1 标准曲线
Fig. 1 Standard curve

异系数为 3.1%~6.6%。因此 利用本方法进行虫螨腈残留样品的分离和含量测定 灵敏度高 重现性好 能为样品检测提供可靠的数据。本方法对水样和鱼样中虫螨腈的检出限分别为 $5.0 \times 10^{-6}\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $1.0 \times 10^{-3}\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

虫螨腈在水和鱼体中残留量的典型色谱图见图 2 和图 3。

表 3 虫螨腈水中添加回收率及相对标准偏差 (n = 3)
Table 3 Fortified recovery and RSD of chlorfenapyr in water(n = 3)

基 质 Matrix	添加水平/(mg•L ⁻¹) Spiked level/(mg•L ⁻¹)	回收率/% Recovery/%			均回收率/% Average recovery/%	相对标准偏差/% RSD/%
		1	2	3		
水 Water	2.0 × 10 ⁻³	97.0	92.4	88.8	92.7	4.4
	2.0 × 10 ⁻⁴	81.6	85.6	75.1	80.7	6.6
	2.0 × 10 ⁻⁵	100.2	94.3	96.9	97.1	3.1

表 4 虫螨腈水中添加回收率及相对标准偏差 (n = 3)
Table 4 Fortified recovery and RSD of chlorfenapyr in water(n = 3)

基 质 Matrix	添加水平/ (mg•L ⁻¹) Spiked level/ (mg•L ⁻¹)	回收率/% Recovery/%					均回收率/% Average recovery/%	相对标准偏差/% RSD/%
		1	2	3	4	5		
鱼 Fish	5	102.9	92.4	93.1	97.9	98.2	96.9	4.4
	0.05	92.0	95.3	94.5	108.2	96.7	97.3	6.5

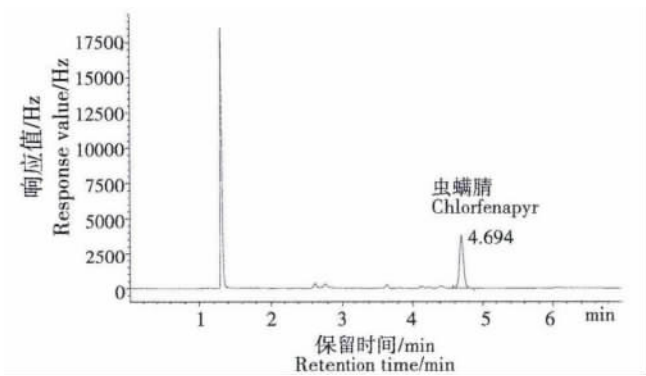


图 2 虫螨腈在水中残留量的典型色谱图
Fig. 2 GC chromatography of chlorfenapyr in water

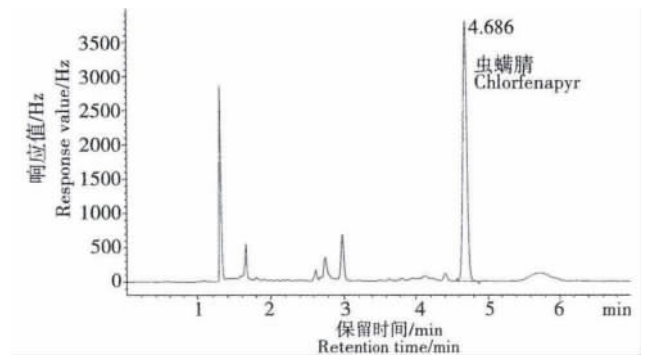


图 3 虫螨腈在鱼中残留量的典型色谱图
Fig. 3 GC chromatography of chlorfenapyr in fish

2.5 斑马鱼对 95% 虫螨腈原药的生物富集性
试验结果见表 5 至表 6。结果表明 ,试验结束

时 ,两个试验组水中虫螨腈的含量分别为初始含量的 94.5% 和 90.5% ,均高于 80% ,符合“评价准则”要求。在两个处理浓度下 ,斑马鱼对虫螨腈的生物富集系数(BCF_{8d}) 分别为 1 211.6 和 1 549.7。根据《化学农药环境安全评价试验准则》的评价标准 ,在本试验条件下 ,95% 虫螨腈原药对斑马鱼的生物富集性为高富集性。试验过程中未有斑马鱼死亡 ,空白对照组和溶剂对照组水中和斑马鱼中未检出虫螨腈。
试验期间 ,试验溶液中 pH 变化范围为 7.321 ~ 8.125; 温度变化范围为 22.7 ℃ ~ 24.0 ℃; 溶解氧含量的变化范围为 5.2 mg•L⁻¹ ~ 7.9 mg•L⁻¹。

3 讨论(Discussion)
进行农药对鱼类的毒性试验时, 应尽可能避免溶剂和助剂本身对鱼类的影响^[27]。试验采用丙酮对虫螨腈进行助溶 ,加入量为 0.1% (V/V) 。结果表明 ,鱼类急性毒性试验和生物富集性试验中溶剂对照组均未有出现斑马鱼死亡情况 ,因此可以认为本试验中丙酮对斑马鱼毒性试验的影响可以忽略。
本试验结果表明 ,虫螨腈对斑马鱼属于高毒、高富集性农药。因此 ,在农业生产中 ,要特别注意虫螨腈的使用范围、施用量和使用方法 ,应避免在水田中使用此类农药 ,以免对生态环境造成危害。另外 ,农药在环境中的降解和移动, 决定了农药在水、气、土壤中的残留和污染状况, 也是评价农药对各种环境生物

表 5 虫螨腈生物富集试验测定结果
Table 5 Results of bio-concentration tests of chlorfenapyr

时 间/h Time/h	虫螨腈在水中的含量/(mg·L ⁻¹) Content of Chlorfenapyr in water/ (mg·L ⁻¹)		虫螨腈在鱼中的含量/(mg·L ⁻¹) Content of chlorfenapyr in fish/ (mg·L ⁻¹)	
	试验组 1 Group 1	试验组 2 Group 2	试验组 1 Group 1	试验组 2 Group 2
0	2.00 × 10 ⁻⁴	1.89 × 10 ⁻³	-	-
24	1.49 × 10 ⁻⁴	1.64 × 10 ⁻³	0.0721	0.334
48	1.85 × 10 ⁻⁴	1.24 × 10 ⁻³	0.0677	1.28
96	1.77 × 10 ⁻⁴	1.01 × 10 ⁻³	0.110	2.40
144	1.60 × 10 ⁻⁴	1.83 × 10 ⁻³	0.227	2.62
192	1.89 × 10 ⁻⁴	1.71 × 10 ⁻³	0.229	2.65

注: 1) 试验组 1 和试验组 2 设定浓度分别为 2.0 × 10⁻⁴ mg·L⁻¹ 和 2.0 × 10⁻³ mg·L⁻¹; 2) 表中数据均为两次重复平均值。

表 6 虫螨腈生物富集系数(BCF_{8d})
Table 6 BCF_{8d} of chlorfenapyr

浓 度/(mg·L ⁻¹) Concentration /(mg·L ⁻¹)	生物富集系数 BCF _{8d}
2.0 × 10 ⁻⁴	1 211.6
2.0 × 10 ⁻³	1 549.7

影响的重要参数。因此,有必要开展虫螨腈其他环境行为特性如土壤降解、水解、光解等的研究,以期全面、系统、准确地评价虫螨腈对水生生物的生态风险。

致谢: 感谢实验室全体成员的参与和支持。感谢衡水北方农药化工有限公司提供测试样品。

通讯作者简介: 张宏涛(1978—), 工程师, 主要研究方向为生态毒理学。

参考文献:

[1] 胡双庆. 3 种农药对斑马鱼的急性毒性及生物安全性评价[J]. 安徽农业科学, 2011, 39(35): 21698-21700
Hu S Q. Acute toxicity and satety evaluation of three pesticides to Brachydonio rerio [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2011, 39(35): 21698-21700 (in Chinese)
[2] 邹积鑫, 何雄奎, 陶传江, 等. 乙羧氟草醚对斑马鱼的急性毒性和生物富集性研究[J]. 农药学报, 2006, 8(4) : 375 - 378
Zou J X, He X K, Tao C J, et al. Acute toxicity and bio-concentration of fluoroglycofen-ethyl to Brachydonio rerio [J]. Chinese Journal of Pesticide Science. 2006, 8(4): 375 - 378 (in Chinese)
[3] 石隆平, 薄瑞, 王胜翔, 等. 虫螨腈原药高效液相色谱分析方法研究[J]. 农药科学与管理, 2011, 32(3): 37 - 39
Shi L P, Bo R, Wang S X, et al. Analysis of chlorfenapyr TC by HPLC [J]. Pesticide Science and Administration,

2011, 32(3): 37 - 39 (in Chinese)
[4] 柴建萍, 谢道燕, 陈送, 等. 新型杀虫剂虫螨腈对家蚕毒性实验[J]. 蚕桑通报, 2010, 41(1): 16 - 18
Chai J P, Xie D Y, Chen S, et al. The test on toxicity of a newly pesticide chlorfenapyr to silkworm [J]. Bulletin of Sericulture, 2010, 41(1): 16-18 (in Chinese)
[5] 忻亮峰, 唐光传. 溴虫腈的高效液相色谱法测定[J]. 农药, 2002, 41(2): 16
Xin L F, Tang G C. Determination of chlorfenapyr by high-performance liquid chromatography [J]. Pesticides, 2002, 41(2): 16 (in Chinese)
[6] 毕富春, 吴国旭. 虫螨腈毛细管柱气相色谱法分析[J]. 农药科学与管理, 2003, 24(9): 7 - 8
Bi F C, Wu G X. Quantitative analysis of chlorfenapyr by GC with capillary column [J]. Pesticide Science and Administration, 2003, 24(9): 7 - 8 (in Chinese)
[7] 皇甫伟国, 陈国, 杨挺. 蔬菜中溴虫腈残留量检测方法研究[J]. 浙江农业学报, 2007, 19(2): 119 - 122
Huang-Fu W G, Chen G, Yang T. Residue detection of chlorfenapyr in vegetables [J]. Acta Agriculturae Zhejian-gensis. 2007. 19(2): 119 - 122 (in Chinese)
[8] 杜志峰, 郭新东, 罗海英, 等. 固相萃取-气相色谱法测定蜂蜜中的溴虫腈[J]. 现代食品科技, 2007, 23(3): 80 - 82
Du Z F, Guo X D, Luo H Y, et al. Determination of chlorfenapyr in honey by solid-phase extraction and GC chromatography [J]. Modern Food Science and Technology. 2007. 23(3): 80 - 82 (in Chinese)
[9] 杜红霞, 李慧冬, 邬元娟, 等. 气相色谱法测定桃中虫螨腈残留量[J]. 山东农业科学, 2009, (3): 113 - 114
Du H X, Li H D, Wu Y J, et al. Determination of chlorfenapyr residue in peach by GC [J]. Shandong Agricultural Sciences, 2009, (3): 113 - 114 (in Chinese)
[10] 郭新东, 杜志峰, 黄孟基, 等. 气相色谱法测定食用植

- 物油中的溴虫腈[J]. 粮油食品科技, 2007, 15(1): 27 – 28.
- Guo X D, Du Z F, Huang M J, et al. Determination of chlorfenapyr in edible vegetable oil by GC [J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2007, 15(1): 27 – 28 (in Chinese)
- [11] 陈九星, 曹永松, 王跃龙, 等. 溴虫腈在甘蓝及土壤中的残留检测及降解动态[J]. 环境科学学报, 2005, 25 (10): 1373 – 1377.
- Chen J X, Cao Y S, Wang Y L, et al. Residue detection and dissipation of chlorfenapyr in cabbage and soil [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2005, 25(10): 1373 – 1377 (in Chinese)
- [12] 麦燕玲, 钟国华, 胡美英, 等. 溴虫腈土壤和甘蓝微量残留量的气相色谱法测定[J]. 农药, 2004, 43(5): 233 – 235
- Mai Y L, Zhong G H, Hu M Y, et al. Determination of chlorfenapyr residues in cabbage and soil by gas chromatography [J]. Chinese Journal of Pesticides, 2004, 43 (5): 233 – 235 (in Chinese)
- [13] 陈丽萍, 林芑华, 李顺芳. 溴虫腈在蔬菜上残留量的气相色谱法检测[J]. 现代农药, 2008, 7(3): 32 – 34.
- Chen L P, Lin X H, Li S F. Determination of chlorfenapyr residues in vegetable by gas chromatography [J]. Modern Agrochemicals, 2008, 7(3): 32 – 34 (in Chinese)
- [14] 刘斐, 郭正元, 刘慧琳, 等. 溴虫腈在稻田环境中的降解动态研究[J]. 湖南农业科学, 2012, (7): 71 – 73.
- Liu F, Guo Z Y, Liu H L, et al. Degradation dynamics of chlorfenapyr in paddy-field [J]. Hunan Agricultural Sciences, 2012, (7): 71 – 73 (in Chinese)
- [15] 任珂, 杨仁斌, 傅强. 虫螨腈在稻田环境及水稻中的残留分析方法[J]. 湖南农业科学, 2013, (7): 85 – 89
- Ren K, Yang R B, Fu Q. Residue analysis of chlorfenapyr in rice and paddy-field [J]. Hunan Agricultural Sciences, 2013, (7): 85 – 89 (in Chinese)
- [16] 吴迪, 罗雪婷, 潘洪吉, 等. 气相色谱法测定黄瓜、苹果中溴虫腈残留量[J]. 食品科学, 2010, 31(10): 269 – 271
- Wu D, Luo X T, Pan H J, et al. GC determination of chlorfenapyr residue in cucumbers and apples [J]. Food Science, 2010, 31(10): 269 – 271 (in Chinese)
- [17] 麦燕玲, 刘红梅, 刘承兰, 等. 溴虫腈在黄瓜和苋菜中的残留动态研究[J]. 华南农业大学学报, 2007, 28(1): 67 – 69
- Mai Y L, Liu H M, Liu C L, et al. Study on residue dynamics of chlorfenapyr in cucumber and amaranth [J]. Journal of South China Agricultural University, 2007, 28(1): 67 – 69 (in Chinese)
- [18] 张曼, 林安清, 许泓, 等. 气相色谱法测定茶叶中残留的溴虫腈[J]. 食品研究与开发, 2007, 28(10): 150 – 151
- Zhang M, Lin A Q, Xu H, et al. Determination of chlorfenapyr in tea by GC-ECD [J]. Food Research and Development, 2007, 28(10): 150 – 151 (in Chinese)
- [19] 李瑞菊, 丁蕊艳, 李慧冬, 等. 气相色谱法测定虫螨腈在小白菜和土壤中残留降解动态[J]. 山东农业科学, 2012, 44(7): 104 – 107
- Li R J, Ding X Y, Li H D, et al. Determination of degrading dynamics of chlorfenapyr in Brassica chinensis L. by GC [J]. Shandong Agricultural Sciences, 2012, 44 (7): 104 – 107 (in Chinese)
- [20] 张晟瑞, 潘艳, 孙晓燕, 等. 气相色谱-负化学电离质谱法(GC-NCIMS)对虫螨腈在茄子和土壤中残留的分析[J]. 分析测试学报, 2008, (S1): 134 – 136
- Zhang S R, Pan Y, Sun X Y, et al. The analysis of chlorfenapyr residue in eggplant and soil sample by using GC-MS method [J]. Journal of Instrumental Analysis, 2008, (S1): 134 – 136 (in Chinese)
- [21] 刘政军, 谷淑波, 王开运, 等. 溴虫腈在桑叶中的残留毒性与降解动态检测[J]. 蚕业科学, 2008, 34(4): 597 – 604
- Liu Z J, Gu S B, Wang K Y, et al. Determination of residual toxicity and degradation dynamics of chlorfenapyr in mulberry leaves [J]. Science of Sericulture, 2008, 34 (4): 597 – 604 (in Chinese)
- [22] 陈文团, 钟国华, 施楚新, 等. 溴虫腈在土壤的残留动态[J]. 生态环境, 2007, 16(5): 1441 – 1445
- Chen W T, Zhong G H, Shi C X, et al. Dynamic residue of chlorfenapyr in soil [J]. Ecology and Environment, 2007, 16 (5): 1441 – 1445 (in Chinese)
- [23] OECD. Guidelines for the testing of chemicals, No. 203 fish acute toxicity test [S]. Paris: OECD, 1992
- [24] 国家环境保护总局. 化学品测试方法[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2004
- National Environmental Protection Agency. Guidelines for Testing of Chemicals [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2004 (in Chinese)
- [25] 蔡道基, 杨佩芝, 龚瑞忠, 等. 《化学农药环境安全评价试验准则》[S]. 国家环保局, 1989
- Cai D J, Yang P Z, Gong R Z, et al. Chemical pesticide environmental safety evaluation guidelines [S]. State Environmental Protection Administration of China, 1989 (in Chinese)
- [26] 蔡道基, 杨佩芝, 龚瑞忠, 等. 《化学农药环境安全评价试验准则》[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1989
- Cai D J, Yang P Z, Gong R Z, et al. Chemical Pesticide Environmental Safety Evaluation Guidelines [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1989 (in Chinese)
- [27] Stratton G W. Effect of the solvent acetone on membrane integrity in the green alga *Chlorella pyrenoidosa* [J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 1989, 42: 754 – 760