

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1787.2019.04.010

3 种酰胺类稻田除草剂对克氏原螯虾的急性毒性

吴雷明¹, 韩光明¹, 王守红^{1*}, 张家宏¹, 寇祥明¹, 毕建花¹,
王桂良¹, 唐鹤军², 李 兵³, 徐 荣¹, 朱凌宇¹

¹江苏里下河地区农业科学研究所, 江苏 扬州 225007; ²江苏普兴循环农业发展有限公司,
江苏 扬州 225654; ³扬州市龙道生态农业有限公司, 江苏 扬州 225615

摘要:【目的】研究稻虾共作模式条件下, 稻田封闭除草剂对克氏原螯虾产生的急性毒性。【方法】采用半静态试验方法, 研究 3 种酰胺类除草剂(乙草胺、丙草胺和丁草胺)对克氏原螯虾的急性毒性, 计算 3 种酰胺类除草剂对克氏原螯虾的安全浓度, 并分析其 LC₅₀ 衰减规律。【结果】随着暴露时间和除草剂浓度的增加, 虾体侧躺, 步行足和游泳足活动频率降低, 最终死亡。乙草胺对克氏原螯虾的 96 h 半致死浓度(LC₅₀)和安全浓度(SC)分别为 0.0707 和 0.0146 mL · L⁻¹; 丙草胺对克氏原螯虾的 96 h LC₅₀ 和 SC 分别为 0.0119 和 0.0021 mL · L⁻¹; 丁草胺对克氏原螯虾的 96h LC₅₀ 和 SC 分别为 0.0073 和 0.0014 mL · L⁻¹。乙草胺、丙草胺及丁草胺除草剂 LC₅₀ 随着暴露时间延长呈下降趋势, 符合双曲线衰减模型, 回归方程分别为: ① $y_1 = 2.0840x^{-0.7380}$ ($R^2 = 0.9973$); ② $y_2 = 0.1106x^{-0.4930}$ ($R^2 = 0.9872$); ③ $y_3 = 0.2236x^{-0.7480}$ ($R^2 = 0.9990$)。克氏原螯虾对 3 种除草剂的敏感性由高到低依次为: 丁草胺>丙草胺>乙草胺。【结论】乙草胺和丙草胺可在稻田综合种养生产过程中按常规剂量使用, 而丁草胺按常规剂量使用可能存在较大的风险。

关键词: 克氏原螯虾; 酰胺类除草剂; 急性毒性; 安全浓度

Acute toxicity of three amide herbicides to *Procambarus clarkii*

WU Leiming¹, HAN Guangming¹, WANG Shouhong^{1*}, ZHANG Jiahong¹, KOU Xiangming¹,
BI Jianhua¹, WANG Guiliang¹, TANG Hejun², LI Bing³, XU Rong¹, ZHU Lingyu¹

¹Agricultural Science Institute of Jiangsu Lixiahe District, Yangzhou, Jiangsu 225007, China; ²Jiangsu Puxing Circular
Agriculture Development Co., Ltd., Yangzhou, Jiangsu 225654, China; ³Yangzhou Longdao Ecological
Agriculture Co., Ltd., Yangzhou, Jiangsu 225615, China

Abstract: 【Aim】The widespread use of the herbicides in paddy fields may have some negative effects on *Procambarus clarkii* under the freshwater crayfisho-rice co-culture system. 【Method】Acute toxicity of three amides herbicides (etochlor, proxychlor and butochlor) on *P. clarkii* was studied using semi-static laboratory procedures to calculate the safe exposure concentrations (SC) and analyze the median lethal concentrations (LC₅₀) attenuation law. 【Result】The crayfish lay on its side, the motion frequency of pereopods and pleopods decreased, and finally died with the increase of exposure time and drug concentration. The LC₅₀ (96 h) and SC of acetochlor, pretilachlor and butachlor in crayfish were 0.0707 and 0.0146 mL · L⁻¹, 0.0119 and 0.0021 mL · L⁻¹, and 0.0073 and 0.0014 mL · L⁻¹, respectively. The LC₅₀ declined with increased exposure time duration after 96 h of exposure, which basically meets hyperbola model. The regression equations were as follows; $y_1 = 2.0840x^{-0.7380}$ ($R^2 = 0.9973$); $y_2 = 0.1106x^{-0.4930}$ ($R^2 = 0.9872$); $y_3 = 0.2236x^{-0.7480}$ ($R^2 = 0.9990$). The sensitivity of three herbicides in crayfish from highest to lowest was butachlor, pretilachlor and acetochlor. 【Conclusion】Under the conventional dose, acetochlor and pretilachlor could be used in the freshwater crayfisho-rice co-culture system, while butochlor might have a greater risk in conventional doses.

Key words: *Procambarus clarkii*; amide herbicides; acute toxicity; safe concentration

收稿日期(Received): 2019-03-18 接受日期(Accepted): 2019-05-17

基金项目: 江苏省克氏原螯虾产业技术体系项目(JFRS-03); 江苏省自主创新资金项目[CX(19)3052]; 江苏省重点研发计划(现代农业)(BE2018352, BE2018355-4, BE2018366); 江苏省水稻产业技术体系项目[SXGC(2017)168]; 扬州市重点研发计划(现代农业)(YZ2018028); 高邮市重点研发计划项目(现代农业与社会发展)(GY201714, GY201811)

作者简介: 吴雷明, 男, 助理研究员。研究方向: 水产动物种质资源与种苗工程。E-mail: leiming4854@163.com

* 通信作者(Author for correspondence), E-mail: yzwish@126.com

稻渔生态种养高效模式,可将高产、优质、安全、高效有机统一,能够满足农产品的质量和安全、保护环境的需求(陈灿等,2015),是促进农业持续发展、保证粮食安全的有效途径。水产养殖与农业系统相结合,互利共惠的同时,两者不同的组成要素和生产需求会产生矛盾,稻田农药对养殖动物的毒性作用就是其中之一。农药环境行为是指农药在环境中迁移转化这一复杂过程中发生的各种变化,主要包括物理、化学及生物过程,其中生物过程主要指农药在环境生物体内富集、代谢以及毒性效应(张平,2016)。农药施用过程中,仅有约 1% 作用于靶生物(丁中海等,2004),80%~90% 进入土壤(姚国君,2017),剩余部分通过间接途径进入水环境。农药防治病虫草害的同时,也会通过直接或间接途径进入土壤和水体环境,对其他非靶标生物包括鸟类、鱼、有益昆虫以及非目标植物产生毒性(林涛等,2015; Garcia *et al.*, 2011)。

稻田综合种养模式可显著降低稻飞虱和纹枯病 Rice sheath blight 发生率(分别降低 44.74% 和 54.35%)(谢坚,2011)。稻蟹养殖共作系统对杂草的防控效率为 26.53%~44.33%,不投喂任何饲料情况下对杂草防控效率为 50% 以上(吕东锋,2011)。在稻田共作养殖系统中,水产养殖动物虽通过其生命活动对水稻的病虫草害和杂草有较好的生物防治效果(李娜娜,2013),但不能完全防控病虫草害,仍需辅助化学方法。稻虾综合种养生产过程中,农户对药物的选择存在一定的主观性和盲目性,造成较大的养殖风险和食品安全隐患。乙草胺、丙草胺及丁草胺作为广泛应用的酰胺类芽前除草剂,具有高效性、选择性,主要用于防除禾本科杂草(陈叶玉和徐海松,2010; 付右胜等,2017; 韦德萍,2017)。3 种药剂在土壤中的降解半衰期分别为 15.3、8.3~14.0 及 7 d(刘菲菲,2013; 王文博,2012)。如何处理水稻病虫草害化学防治与克氏原螯虾 *Procambarus clarkii* Girard 养殖之间的矛盾,是稻虾综合种养成功的关键之一。

目前,稻渔综合种养方面的研究主要集中在 3 个方面:稻田综合种养技术(张家宏等,2018; Zhang *et al.*, 2017);农药对稻田养殖动物的安全性(Tu *et al.*, 2013);稻田综合种养模式对社会、环境及经济的影响(寇祥明等,2018)。本文研究了乙草胺、丙草胺和丁草胺 3 种商品制剂对克氏原螯虾的急性

毒性,探讨稻虾综合种养模式下采用化学方法防控杂草的可行性。

1 材料与方法

1.1 试验对象

克氏原螯虾来自江苏普兴循环农业发展有限公司(119°E, 32°N)。选择规格整齐、附肢齐全、无伤病的克氏原螯虾幼虾为试验对象,其平均体重为 (3.9 ± 0.6) g。暂养 3 d,让幼虾排空粪便、适应小水体的环境,选择活动能力强、健康的个体进行试验。

1.2 试验药品

试验所用药剂:50% 乙草胺乳油(山东中石药业有限公司);500 g·L⁻¹ 丙草胺乳油[先正达(苏州)作物保护有限公司];50% 丁草胺乳油(江苏绿利来股份有限公司)。试验药品首先用蒸馏水配成母液,临用时按要求稀释成所需浓度,现配现用。

1.3 试验方法

3 种除草剂浓度按等对数间距设计。50% 乙草胺乳油浓度梯度为 0.0125、0.0250、0.0500、0.1000、0.2000、0.4000、0.8000 mL·L⁻¹,500 g·L⁻¹ 丙草胺乳油浓度梯度为 0.0025、0.0050、0.0100、0.0200、0.0400、0.0800 mL·L⁻¹,50% 丁草胺乳油浓度梯度为 0.0025、0.0050、0.0100、0.0200、0.0400、0.0800 mL·L⁻¹,清水作对照组,每组 3 个重复,每个重复放 6 尾幼虾。试验在容积为 5 L 的黑色塑料水族箱中进行,试验用水为经过 24 h 充分曝气的自来水,每个试验容器盛放水和药液的总体积为 3 L。按照每 667 m² 最高推荐使用剂量,平均水深 0.05 m,计算稻田乙草胺、丙草胺及丁草胺的平均用药浓度,分别为 0.0050、0.0020、0.0040 mL·L⁻¹。

由于试验药品存在降解的特性,且克氏原螯虾新陈代谢排出废物,使水质发生变化,故试验过程均采用“半静态法”,每 24 h 更换 1 次相同浓度的药液,试验周期为 96 h。试验期间不投饵。

1.4 数据收集和处理

试验开始后,前 12 h 每隔 1 h 观察一次,12~96 h 每隔 6 h 观察一次。每次观察和记录克氏原螯虾活动情况,包括克氏原螯虾的中毒症状、是否死亡及死亡个体数量。死亡个体评判标准:以细玻璃棒触及腹部,经多次刺激无反应则判断为死亡,及时捞出死亡个体。

采用直线回归法计算各受试农药的浓度对数与死亡率之间的关系表达式,并依据关系表达式计

算对克氏原螯虾 24、48、72 及 96 h 半致死浓度 (LC_{50})。根据安全浓度 (SC) 公式: $SC = 0.3 \times TLm_{48} / (TLm_{24} / TLm_{48})^2$, 计算 3 种除草剂对克氏原螯虾的安全浓度, 其中 TLm_{48} 为 48 h 的 LC_{50} , TLm_{24} 为 24 h 的 LC_{50} 。

2 结果与分析

2.1 克氏原螯虾在 3 种除草剂溶液中的急性毒性症状

试验初期, 低浓度除草剂组克氏原螯虾活动情况基本正常, 与空白组几乎没有差别。高浓度除草剂处理组, 3 种除草剂处理组克氏原螯虾急性中毒症状基本相似。首先, 克氏原螯虾活动剧烈, 存在打斗现象, 随后逐渐处于安静状态, 部分趴在水面交界处, 发生缺氧现象。其次, 随着暴露时间增加, 克氏原螯虾行动减缓, 反应迟钝, 甚至昏迷平躺, 呈现假死现象。克氏原螯虾受惊吓后, 则迅速逃游, 片刻后又侧翻, 沉入水底。随暴露时间进一步延长, 大多数克氏原螯虾步行足与游泳足微微摆

动, 此时人为触碰, 则无力逃游, 随后死亡。克氏原螯虾在部分农药试液中存在蜕壳现象, 高浓度处理组蜕壳虾均死亡。

2.2 3 种除草剂对克氏原螯虾死亡率的影响

乙草胺、丙草胺及丁草胺对克氏原螯虾死亡率的影响大致相似 (图 1)。在乙草胺 $0.0125\text{ mL} \cdot \text{L}^{-1}$ 、丙草胺 $0.0025\text{ mL} \cdot \text{L}^{-1}$ 、丁草胺 $0.0025\text{ mL} \cdot \text{L}^{-1}$ 低浓度组及对照组中, 未发现死亡个体。在同一暴露时间内, 随着除草剂浓度的增加, 死亡率逐渐上升。在乙草胺 $0.8000\text{ mL} \cdot \text{L}^{-1}$ 处理组、丙草胺 $0.0800\text{ mL} \cdot \text{L}^{-1}$ 处理组及丁草胺 $0.0800\text{ mL} \cdot \text{L}^{-1}$ 处理组中, 24 h 时死亡率已达到 100%。同一除草剂浓度条件下, 随着暴露时间的延长, 除草剂对克氏原螯虾的毒性作用也增强, 但同时存在仅在前期死亡率升高, 后期死亡率不变的现象。乙草胺 $0.0250\text{ mL} \cdot \text{L}^{-1}$ 处理组 48 h 死亡率为 11.11%, 后期死亡率维持不变; 丙草胺 $0.0050\text{ mL} \cdot \text{L}^{-1}$ 处理组 24 h 死亡率为 5.56%, 后期死亡率维持不变。

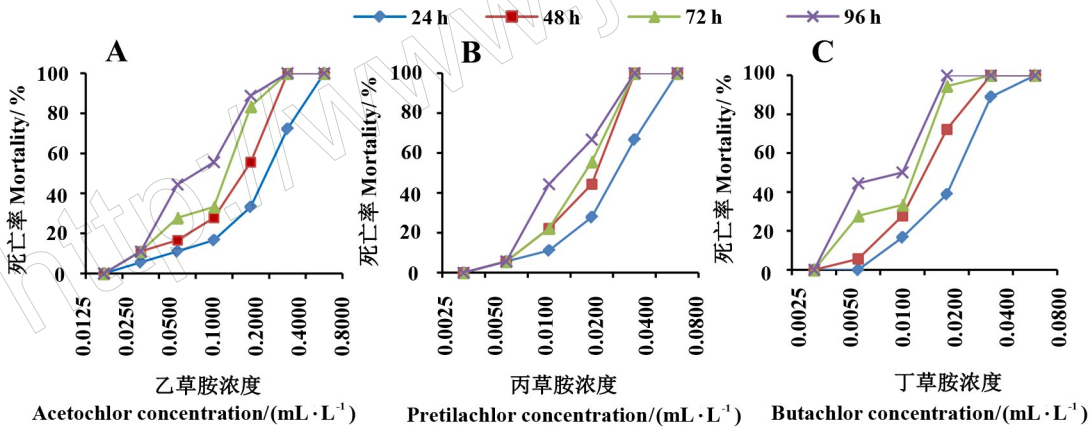


图 1 3 种除草剂对克氏原螯虾暴露 24、48、72 和 96 h 死亡率的影响
Fig.1 Effect of three paddy herbicide sealants on mortality of *P. clarkii* for 24, 48, 72 and 96 h

2.3 3 种除草剂对克氏原螯虾的半致死浓度和安全浓度

3 种稻田除草剂对克氏原螯虾急性毒性回归方程、 LC_{50} 及 SC 见表 1。乙草胺、丙草胺及丁草胺对克氏原螯虾 24、48 和 96 h 的 LC_{50} 均呈逐渐下降趋势, 其对克氏原螯虾的 SC 分别为 0.0146 、 0.0021 和 $0.0014\text{ mL} \cdot \text{L}^{-1}$ 。以 SC 作为衡量克氏原螯虾对这 3 种除草剂的敏感性标准, 由强到弱依次为: 丁草胺 > 丙草胺 > 乙草胺。3 种除草剂在稻田中的商品推荐用量为 0.0050 、 0.0020 和 $0.0040\text{ mL} \cdot \text{L}^{-1}$ 。乙草胺、丙草胺和丁草胺对克氏原螯虾的 SC 分别为

商品推荐使用量的 2.92、1.05 和 0.35 倍。

2.4 3 种除草剂对克氏原螯虾 LC_{50} 衰减变化规律

乙草胺、丙草胺及丁草胺除草剂对克氏原螯虾 LC_{50} 随着暴露时间延长呈下降趋势, 符合双曲线衰减模型 (图 2)。乙草胺对克氏原螯虾 LC_{50} 随暴露时间衰减回归方程为: $y = 2.0840x^{-0.7380}$ ($R^2 = 0.9973$)。丙草胺对克氏原螯虾 LC_{50} 随暴露时间衰减回归方程为: $y = 0.1106x^{-0.4930}$ ($R^2 = 0.9872$)。丁草胺对克氏原螯虾 LC_{50} 随暴露时间衰减回归方程为: $y = 0.2236x^{-0.7480}$ ($R^2 = 0.9990$)。

表 1 3 种稻田除草剂对克氏原螯虾急性毒性回归方程、LC₅₀ 及 SC

Table 1 Regression equations, LC₅₀ values and SC values of three paddy herbicide sealants in *P. clarkii*

除草剂 Herbicide	时间 Time/h	回归方程 Regression equation	致死中浓度 LC ₅₀ /(mL · L ⁻¹)	安全浓度 SC/(mL · L ⁻¹)
乙草胺 Acetochlor	24	$y = 0.5405x + 0.8817 (R^2 = 0.8612)$	0.1967	0.0146
	48	$y = 0.6117x + 1.0556 (R^2 = 0.8685)$	0.1235	
	96	$y = 0.7066x + 1.3129 (R^2 = 0.9791)$	0.0707	
丙草胺 Pretilachlor	24	$y = 0.6644x + 1.5806 (R^2 = 0.8814)$	0.0236	0.0021
	48	$y = 0.7935x + 1.9315 (R^2 = 0.8689)$	0.0157	
	96	$y = 0.8674x + 2.1681 (R^2 = 0.9655)$	0.0119	
丁草胺 Butachlor	24	$y = 0.9043x + 2.0253 (R^2 = 0.9573)$	0.0206	0.0014
	48	$y = 0.8858x + 2.1828 (R^2 = 0.9397)$	0.0126	
	96	$y = 1.0150x + 2.6690 (R^2 = 0.9294)$	0.0073	

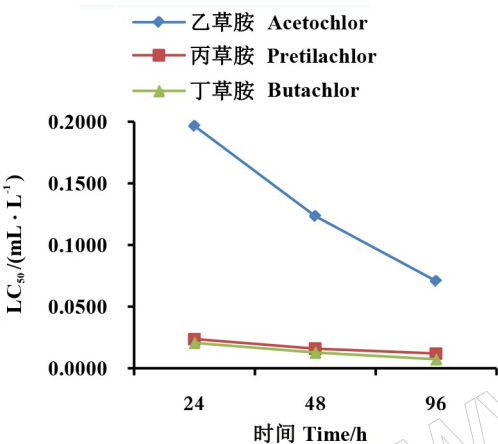


图 2 LC₅₀ 随暴露时间变化的双曲线衰减模型拟合

Fig.2 Fitting of LC₅₀ decreased with exposure time with hyperbolic decay model

3 讨论

3.1 克氏原螯虾对不同类型农药敏感性

稻虾综合种养是克氏原螯虾常见养殖模式之一,而稻田内往往易产生农药残留,对克氏原螯虾产生毒害作用(鲁耀鹏等,2017)。研究表明,不同农药种类对克氏原螯虾急性毒性效果不同。氯氰菊酯、宁南霉素、噻虫啉 3 种农药对克氏原螯虾的成活率没有影响,而毒死蜱则造成其大量死亡(王彬等,2010)。克氏原螯虾幼虾对毒死蜱非常敏感,毒死蜱可引发克氏原螯虾幼虾心脏、肝胰腺及鳃等多个组织发生病变(丁正峰等,2012;徐滨等,2014)。农药化学组成成分与其对克氏原螯虾的急性毒性密切相关。2%阿维菌素对克氏原螯虾幼虾毒性最大,10%草甘膦水剂对幼虾毒性最低(徐怡等,2010)。本文中克氏原螯虾对 3 种农药敏感性与上述结论略有不同,克氏原螯虾对 3 种农药的敏感性由高到低为丁草胺>丙草胺>乙草胺。3 种农药对一叶一心期水稻安全性为丁草胺>丙草胺>乙

草胺(柏连阳,2000),与其对克氏原螯虾的安全性顺序不同,两者毒性作用机理差异仍需要进一步研究,以期为解决稻田封闭除草剂与水产健康养殖矛盾提供理论基础。

3.2 3 种除草剂对克氏原螯虾安全性评价

乙草胺、丙草胺和丁草胺对供试幼虾均有毒性作用,随着药液浓度的升高和幼虾暴露时间的延长,供试幼虾死亡率逐渐升高,可能其免疫系统及组织机能受到一定的损害(傅建炜等,2013a,2013b;史梦竹等,2013)。一般以 48 h LC₅₀ 值作为环境污染物对水生生物毒性的评价指标,将毒性强弱划分为 3 个等级(傅建炜等,2013a,2013b):LC₅₀>10 μL · L⁻¹(mg · L⁻¹) 为低毒,10~0.5 μL · L⁻¹(mg · L⁻¹) 为中等毒性,LC₅₀<0.5 μL · L⁻¹(mg · L⁻¹) 为剧毒。乙草胺、丙草胺及丁草胺对斑马鱼幼鱼 48 h LC₅₀ 分别为 3.60、4.69 和 3.73 mg · L⁻¹,为中等毒性(程艳红等,2107)。本文结果显示,乙草胺、丙草胺及丁草胺对克氏原螯虾 48 h LC₅₀ 分别为 123.5、15.7、12.6 μL · L⁻¹,三者对克氏原螯幼虾均属于低毒农药。需要注意的是,虽然丁草胺对克氏原螯虾为低毒农药,但其 SC 低于商品最高推荐使用量,同时,稻田生产过程中多种农药复合可能存在协同作用(魏勇超等,2018),造成农药对克氏原螯虾毒性作用的加强,实际生产过程中应尽量避免使用,确保克氏原螯虾正常养殖。

理论情况下,本文采用的乙草胺和丙草胺商品制剂可在稻虾综合种养模式下按照最高推荐用量范围内正常使用,而丁草胺对克氏原螯虾养殖可能存在较大的风险,稻虾综合种养实际生产过程,其环境组成和变化较试验条件更为复杂多变,在农业实际生产中的应用效果有待进一步验证。另外,农

药对克氏原螯虾摄食规律和生长发育的影响,以及除草剂通过富集作用在养殖动物体内累积和代谢情况仍需要进一步研究和探索。

参考文献

- 柏连阳, 2000. 芽前水田除草剂混用对水稻安全性的联合作用与机理研究. 博士学位论文. 长沙: 湖南农业大学.
- 陈灿, 黄璜, 郑华斌, 何斌, 2015. 稻田不同生态种养模式对稻米品质的影响. 中国稻米, 21(2): 17-19.
- 陈业玉, 徐海松, 2010. 水稻田几种常见化学除草剂特点及应用技术. 安徽农学通报, 16(19): 110-111.
- 程艳红, 葛婧, 胡高洁, 蔡磊明, 陈列忠, 蒋金花, 2017. 3种酰胺类除草剂对斑马鱼不同生长阶段的急性毒性效应. 生态毒理学报, 12(6): 171-178.
- 丁中海, 杨怡, 金洪钧, 单正军, 于红霞, 冯建舫, 张晓峰, 周家艳, 2004. 三种农药对斑马鱼的急性毒性和生物浓缩系数. 应用生态学报, 15(5): 888-890.
- 丁正峰, 薛晖, 王晓丰, 唐建清, 2012. 毒死蜱(CPF)对克氏原螯虾的急性毒性及组织病理观察. 生态与农村环境学报, 28(4): 462-467.
- 傅建炜, 李建宇, 史梦竹, 游泳, 魏辉, 2013a. 2,4-D二甲胺盐对草鱼、鲢鱼和鲫鱼的急性毒性. 生物安全学报, 22(2): 115-118.
- 傅建炜, 史梦竹, 李建宇, 游泳, 魏辉, 2013b. 草甘膦对草鱼、鲢鱼和鲫鱼的毒性. 生物安全学报, 22(2): 119-122.
- 付佑胜, 张国奇, 张惠, 董立尧, 2017. 丁草胺对水稻后茬作物幼苗生长的影响. 江苏农业科学, 45(13): 94-96.
- 寇祥明, 谢成林, 韩光明, 张家宏, 姚义, 王守红, 王桂良, 唐鹤军, 朱凌宇, 徐荣, 毕建花, 吴雷明, 陆佩玲, 2018. 3种稻田生态种养模式对稻米品质、产量及经济效益的影响. 扬州大学学报(农业与生命科学版), 39(3): 70-74.
- 李娜娜, 2013. 中国主要稻田种养模式生态分析. 硕士学位论文. 杭州: 浙江大学.
- 林涛, 游泳, 傅建炜, 李建宇, 史梦竹, 魏辉, 2015. 9种农药对家蚕和蚯蚓的急性毒性. 生物安全学报, 24(3): 248-251.
- 刘菲菲, 2013. 三种农药在水稻及其环境中的分布、迁移和残留研究. 硕士学位论文. 杭州: 浙江大学.
- 鲁耀鹏, 王冬梅, 张秀霞, 李军涛, 郑佩华, 冼健安, 2017. 淡水螯虾生理生态学与环境毒理学研究进展. 生物安全学报, 26(4): 266-272.
- 吕东锋, 王武, 马旭洲, 汪清, 王昂, 陈再忠, 唐士桥, 2011. 稻蟹共生对稻田杂草的生态防控试验研究. 湖北农业科学, 50(8): 1574-1578.
- 史梦竹, 傅建炜, 李建宇, 郑丽祯, 游泳, 魏辉, 2013. 使它隆对草鱼、鲢鱼和鲫鱼的急性毒性. 生物安全学报, 22(2): 123-126.
- 王彬, 杨玉松, 邱丛芳, 2010. 常用农药对稻田养殖克氏原螯虾的影响. 科技信息(8): 341.
- 王文博, 2012. 农作物和土壤中五种农药残留及消解动态研究. 硕士学位论文. 济南: 山东大学.
- 韦德萍, 2017. 苄嘧磺隆、乙草胺及其复配制剂的微生物降解和胁迫响应研究. 硕士学位论文. 贵阳: 贵州大学.
- 魏勇超, 王彦华, 雷成琦, 倪碧珩, 朱佳燕, 徐冬梅, 2018. 环境中多残留农药复合暴露对淡水绿藻和斑马鱼的联合毒性. 环境工程, 36(11): 185-189.
- 谢坚, 2011. 农田物种间相互作用的生态系统功能——以全球重要农业文化遗产“稻鱼系统”为研究范例. 博士学位论文. 杭州: 浙江大学.
- 徐滨, 朱祥云, 魏开金, 马宝珊, 2014. 四种稻田农药对克氏原螯虾的急性毒性研究. 淡水渔业, 44(5): 38-42.
- 徐怡, 刘其根, 胡忠军, 沈竑, 曹君楹, 童留青, 2010. 10种农药对克氏原螯虾幼虾的急性毒性. 生态毒理学报, 5(1): 50-56.
- 姚国君, 2017. 顺式氯氟菊酯及其代谢物的环境行为、生物毒性及其污染修复. 博士学位论文. 北京: 中国农业大学.
- 张家宏, 朱凌宇, 王守红, 寇祥明, 王桂良, 徐荣, 韩光明, 毕建花, 叶浩, 2018. 江苏里下河地区“四水”生态种养绿色生产技术. 湖北农业科学, 57(1): 24-26.
- 张平, 2016. 几种农药在动物模型中立体选择性降解及代谢组学研究. 博士学位论文. 北京: 中国农业大学.
- GARCIA M, SCHEFFEZYK A, GARCIA T, ROMBKE T, 2011. The effects of the insecticide lambda-Cyhalothrin on the earthworm *Eisenia fetida* under experimental conditions of tropical and temperate regions. *Environmental Pollution*, 159(2): 398-400.
- TU W Q, NIU L L, LIU W P, CHAO X, 2013. Embryonic exposure to butachlor in zebrafish (*Danio rerio*): endocrine disruption, developmental toxicity and immunotoxicity. *Eco-toxicology and Environmental Safety*, 89: 189-195.
- ZHANG J H, BI J H, ZHU L U, WANG S H, KOU X M, HAN G M, WANG G L, XU R, WU L M, TANG H J, 2017. Key techniques of an ecological pattern "Planting Rice in One Season and Breeding Red Swamp Crawfish in Three Seasons" for green production in Lixiahe Region of Jiangsu Province. *Agricultural Science & Technology*, 18(8): 1406-1409.

(责任编辑: 郭莹)