



石先罗,章卫,张思金,等.噁嗪草酮对稻田杂草的防效及其生物安全性评价[J].江西农业大学学报,2024,46(1):97-105.
SHI X L,ZHANG W,ZHANG S J,et al.Weed control efficacy and biosafety evaluation of Oxazicloromefone[J].Acta agriculturae universitatis Jiangxiensis,2024,46(1):97-105.

噁嗪草酮对稻田杂草的防效 及其生物安全性评价

石先罗^{1,2},章 卫²,张思金²,陆健刚²,李保同^{1*}

(1.江西农业大学 农学院,江西 南昌 330045;2.江西水利职业学院,江西 南昌 330013)

摘要:【目的】探明除草剂噁嗪草酮对稻田杂草的防效及对稻田生物的毒性效应。【方法】在江西省南昌市经济技术开发区江西农业大学农业科技园稻田进行大田实验研究,施用不同剂量10%噁嗪草酮悬浮剂并与除草剂25 g/L五氟磺草胺OD、10%啶草醚WP及10%苄嘧磺隆WP进行对照,最终测定其在早稻和晚稻中对稗草、千金子、异形莎草及鸭舌草的防效。利用室内模拟的方法研究10%噁嗪草酮悬浮剂及原药对斑马鱼的急性毒性试验,利用室内培养法研究噁嗪草酮原药对羊角月牙藻的急性毒性试验,利用人工土壤法及滤纸接触法研究噁嗪草酮原药对土壤生物赤足爱胜蚓的急性毒性研究。【结果】田间防效试验结果表明10%噁嗪草酮SC在推荐剂量下在早稻与晚稻中对稗草和千金子平均防效分别为92.6%及92.3%,对异形莎草和鸭舌草平均防效分别为70.5%及61.8%。10%噁嗪草酮SC和噁嗪草酮原药对斑马鱼药后96 h- EC_{50} >1 000 mg/L,噁嗪草酮对成年斑马鱼为低毒,噁嗪草酮对羊角月牙藻药后72 h- EC_{50} >800 mg/L,根据急性毒性试验结果噁嗪草酮对羊角月牙藻属于低毒农药;对赤足爱胜蚓的急性毒性试验结果表明,滤纸接触法测定结果可判定噁嗪草酮属于微毒农药(48 h- LC_{50} >1 000 μ g/cm²),而人工土壤法测定结果可判定噁嗪草酮属于低毒农药(14 d- LC_{50} >1 000 mg/kg)。【结论】10%噁嗪草酮悬浮剂对稻田中的稗草及千金子具有较好的防除效果,对异形莎草和鸭舌草防效较差,生物急性毒性试验结果表明,噁嗪草酮对水生生物斑马鱼及羊角月牙藻均表现为低毒,对土壤生物赤足爱胜蚓也为低毒。噁嗪草酮对稻田环境中的生物较为安全。

关键词:除草剂;噁嗪草酮;防效;生物毒性;稗草;千金子

中图分类号:S451.2;TQ450.7 文献标志码:A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

文章编号:1000-2286(2024)01-0097-09



Weed control efficacy and biosafety evaluation of Oxazicloromefone

SHI Xianluo^{1,2},ZHANG Wei²,ZHANG Sijin²,LU Jiangang²,LI Baotong^{1*}

(1.Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045; 2.Jiangxi Water Conservancy Vocational College, Nanchang 330013, China)

Abstract: [Objective] This study aims to investigate the efficacy of the herbicide oxazicloromefone on weeds in rice fields and its toxicity effects on rice field organisms. [Method] A field experiment was conducted

收稿日期:2023-08-20 修回日期:2023-10-18

基金项目:“十三五”国家重点研发计划项目(2017YFD0301604)

Project supported by National Key Research and Development Projects in the 13th Five-Year Plan(2017YFD0301604)

作者简介:石先罗,讲师,博士,orcid.org/0000-0001-6248-7326,shixianluo@sina.com; *通信作者:李保同,教授,博士,博士生导师,主要从事农药学研究,orcid.org/0000-0002-9435-4509,libt666@163.com。

in the Agricultural Science and Technology Park of Jiangxi Agricultural University in Nanchang Economic and Technological Development Zone, Jiangxi Province. The efficacy of different doses of 10% oxazicloromefone SC concentrate were compared with that of the controls including the 25 g/L pentachlorosulfuron OD, 10% pyrimethanil WP, and 10% bensulfuron methyl WP. The efficacy of oxadiazon against barnyardgrass, proso millet, and miscanthus in early and late rice was determined. The acute toxicity of 10% oxazicloromefone SC concentrate and technical product to zebra fish was studied using indoor simulation methods. The acute toxicity of oxazicloromefone technical product to *Selenastrum capricornutum* was studied using indoor cultivation methods. The acute toxicity of oxazicloromefone technical product to soil organism *Eisenia foetida* was studied using artificial soil method and filter paper contact method. [Result] The field efficacy test results showed that at the recommended dose, the average efficacy of 10% oxazicloromefone SC against barnyardgrass and proso millet in early and late rice was 92.6% and 92.3%, and the average efficacy against miscanthus and *Scirpus variabilis* was 70.5% and 61.8%. According to the acute toxicity test results, the 96 h- EC_{50} of 10% oxazicloromefone SC and oxazicloromefone technical product to zebra fish was higher than 1 000 mg/L, indicating that oxazicloromefone was low toxic to adult zebra fish. The 72 h- EC_{50} of oxazicloromefone technical product to *Selenastrum capricornutum* was higher than 800 mg/L, indicating that oxazicloromefone was low toxic to *Selenastrum capricornutum*. The acute toxicity test results of oxazicloromefone technical product to *Eisenia foetida* showed that the filter paper contact method could determine that oxazicloromefone was a low toxic pesticide (48 h- LC_{50} > 1 000 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$), while the artificial soil method could determine that oxazicloromefone was a low toxic pesticide (14 d- LC_{50} > 1 000 mg/kg). [Conclusion] 10% oxazicloromefone SC has good control effect on barnyardgrass and water hyacinth in rice fields, and it has poor control effect on *Scirpus variabilis* and *Iris heterophylla*. The acute toxicity test results showed that oxazicloromefone was low toxic to zebra fish and *Selenastrum capricornutum*, and also low toxic to earthworm *Eisenia foetida*. Oxazicloromefone is relatively safe for organisms in the rice field environment.

Keywords: herbicide; Oxazicloromefone; control efficacy; biotoxicity; *Echinochloa crusgalli*; *Leptochloa chinensis*

【研究意义】稻田杂草是稻田生态系统中重要组成部分,杂草在生长过程中与作物争水肥、争空间、争阳光,从而影响作物产量与品质。长期以来,稻田杂草主要依赖化学农药进行防治,因此,寻找高效、低毒、广谱及低残留的除草剂对于水稻生产显得十分重要^[1]。同时,由于除草剂的广泛使用,在施用过程中不可避免的进入到土壤环境及水生环境中,对土壤生物及水生生物造成危害^[2-3]。因此,农药的急性毒性试验是评估农药对生态环境风险的重要途径,开展农药的急性毒性试验有利于快速判别农药的生态毒性^[4-6]。【前人研究进展】饶镭等^[7]通过茎叶喷雾法研究了除草剂双环磺草酮对水稻田杂草的防效,结果表明当施用剂量为 300 g/hm²时对水稻安全,此时对杂草的防效为 65.38%~90.79%,当施用剂量增加后,水稻出现明显的药害现象并出现减产,但 35% 双环磺草酮悬浮剂与其他除草剂复配对杂草的防效显著提升并有增产的效果;贾浩然等^[8]利用 10% 嘧草醚可湿性粉剂对双季稻杂草的防效开展了研究,结果表明当 10% 嘧草醚施用量在 45~120 g/hm²时对稗草防效超过 90%,对阔叶类杂草效果较差,但与其他除草剂如苄嘧磺隆或五氟磺草胺复配后能明显扩大除草谱,对阔叶类杂草及异形莎草具有较好的防效。Zhu 等^[9]研究了人工土壤及自然土壤中毒死蜱对赤子爱胜蚯蚓的急性毒性及慢性毒性,结果表明土壤理化性质可能对农药毒性产生影响,人工土壤的试验结果可能会被低估;关于农药对水生生物的毒性试验研究较多,主要包括对斑马鱼、各种藻类及大型溞类的急性、慢性毒性试验^[10]。Fan 等^[11]研究了 2 种杀菌剂苯醚甲环唑和烯酰吗啉对水生生物斑马鱼胚胎的联合毒性,结果表明 2 种杀菌剂表现相加作用;Wang 等^[12]研究了 5 种常见农药(吡虫啉、阿特拉津、毒死蜱、丁草胺和 λ -三氯氟氰菊酯)对斑马鱼幼鱼单一及复合毒性,结果表明与各类农药的单一毒性相比,水环境中同时存在多种农药可能会导致毒性增加,从而对水生生态系统造成严重损害;Nagai 等^[13]研究了 20 种除草剂对 5 种附生藻类生长的抑制效果及对藻类的作用方式,结果发现绿藻对 2 种作用模式组原卟啉原氧化酶抑制剂和超长链脂肪酸合成抑制剂的除草剂最敏感,而硅藻对 1 种作用模式组 4-羟基苯基-丙酮酸双加氧酶抑制剂的除草剂最敏感,蓝藻对 1 种作用

模式组乙酰乳酸合酶抑制剂的除草剂最敏感;Ueda 等^[14]使用高效高通量微板毒性测定法研究了浮萍和 6 种藻类对 7 种除草剂的相对敏感性,结果表明除草剂对藻类及浮萍的毒性主要取决于除草剂的作用点位。【本研究切入点】开展大田实验,分别施用不同剂量的 10% 噁嗪草酮悬浮剂同时与其他除草剂对照试验,测定其对稻田杂草稗草、千金子、异形莎草及鸭舌草的防效。同时,开展室内急性毒性试验,测定其对水生生物斑马鱼、羊角月牙藻和土壤生物赤字爱胜蚓的生物毒性,为噁嗪草酮在稻田的科学使用与安全性评价提供参考。

1 材料与方法

1.1 试剂及主要材料

试验药剂:噁嗪草酮原药,江苏省常熟力菱精细化工有限公司;10% 噁嗪草酮悬浮剂,山东先达农化股份有限公司;10% 苄嘧磺隆可湿性粉剂,江苏快达农化股份有限公司;25 g/L 五氟磺草胺可分散油悬浮剂,美国陶氏益农公司;10% 嘧草醚可湿性粉剂,北京新禾丰有限公司;高岭土 AR 500 g,天津科密欧有限公司;碳酸钙 AR 500 g,天津登峰精细化工有限公司;泥苔藓,南昌某园艺有限公司;工业沙,南昌市政沙场。

1.2 供试生物

(1) 斑马鱼(*Barchydonio rerio*)购自山东一溪月生物科技有限公司,体长约(2±0.5) cm、质量(0.3±0.05) g、大小形态健康程度基本一致,置于室内温度(23±1) °C 下培养驯化 7 d 以上,在此期间每日喂食 2 次并按时清理粪便残渣,死亡率低于 5% 方可开展正式试验。正式试验前 24 h 停止喂食,试验期间不喂食,所需试验用水为爆气 24 h 以上自来水,每日光照 12~16 h。

(2) 羊角月牙藻(*Pseudokirchneriella subcapitata*)购自中国科学院水生生物研究所淡水藻种库,无菌条件下转接至 BG11 培养液培养,培养温度(23±1) °C,光照强度为 5 000 lx,连续转接 3 次以上,使藻处于对数生长期。

(3) 赤字爱胜蚓(*Eisenia fetida*)由江西省林业科学院林业有害生物防治研究所提供。试验前在人工气候箱中进行培养驯化 7 d 以上,选择明显带环且健康状况良好、月龄在 2 个月以上、体质量 0.3~0.5 g 的蚯蚓供试。

1.3 噁嗪草酮及其复配制剂对稻田杂草的防效试验

1.3.1 试验设计

试验在江西南昌市经济技术开发区江西农业大学农业科技园稻田进行,供试品种分别为“赣早粳 3 号”(早稻)和“万象优华占”(晚稻)。试验共设计 7 个处理(表 1),3 次重复,小区面积 30 m²,随机区组排列,小区间用薄膜筑田埂隔开,独立灌排,防止相互干扰。

表 1 防效试验处理设计
Tab.1 Design of prevention effect test treatment

序号 Serial number	处理 Treatment	有效成分剂量/(g·hm ⁻²) Effective dosage	制剂量/(mL·hm ⁻²) Dosage
1	10% 噁嗪草酮 SC	30	300
2	10% 噁嗪草酮 SC	45	450
3	10% 噁嗪草酮 SC	60	600
4	10% 苄嘧磺隆 WP	30	300
5	25 g/L 五氟磺草胺 OD	30	1 200
6	10% 嘧草醚 WP	45	450
7	空白对照(CK)	0	0

1.3.2 施药时间及方式

水稻移栽后 6 d,早稻和晚稻分别于 2021 年 4 月 28 日和 8 月 2 日,采用 SX-MD16E-2L 型电动喷雾器(浙江市下喷雾器有限公司)喷雾,667 m²药液用量 30 L,药后 24 h 未遇降水。施药后田间保持 3~5 cm 水

层7 d,其他同正常田间管理。

1.3.3 田间调查

于用药后3,7,15,30 d观察药剂对水稻幼苗生长情况,施药后30 d(即早稻于5月28日,晚稻于9月1日)调查各处理组内杂草株数。每小区随机选择4个点,每点0.25 m²,调查杂草的株数,按下式计算防效,用邓肯氏新复极差(DMRT)法对试验数据进行统计分析。

$$\text{株防效} = (\text{对照区株数} - \text{施药区株数}) / \text{对照区株数} \times 100\% \quad (1)$$

1.4 噁嗪草酮对3种生物的安全性评价

1.4.1 噁嗪草酮对斑马鱼的毒性测定

参照国际OECD试验准则和我国《化学农药环境安全评价试验准则》设计整个试验,利用静态法评价除草剂噁嗪草酮对斑马鱼的急性毒性。选用2 L不同质量浓度的噁嗪草酮溶液,放入10条健康的斑马鱼,试验设1 000,800,600,400,200,100,50 mg/L等7个质量浓度梯度,每个质量浓度处理重复3次,并清水处理作空白对照。处理后96 h,记录不同时间段成年斑马鱼死亡情况,并参照《化学农药环境安全评价试验准则》第12部分来判断噁嗪草酮对斑马鱼的急性毒性,农药对鱼类的毒性等级划分以药后96 h的致死中浓度值为标准。

1.4.2 噁嗪草酮对羊角月牙藻的毒性测定

参照OECD试验准则和国家《化学农药环境安全评价试验准则》,采用静态法测定噁嗪草酮对羊角月牙藻的急性毒性。在无菌条件下,将羊角月牙藻藻液接种到含有50 mL BG11培养基的100 mL的三角瓶中,每隔96 h接种1次,反复接种2~3次,取藻类生长对数期开展试验,测得羊角月牙藻细胞初始浓度为 $5 \times 10^3 \sim 5 \times 10^4 \text{ mL}^{-1}$ 。取噁嗪草酮原药用0.1%吐温水溶液配制成质量浓度分别为50,100,200,400,800 mg/L工作溶液,分别取50 mL上述溶液置于250 mL三角瓶,再分别加入50 mL羊角月牙藻,充分混匀后,同时设置0.1%吐温水溶液作空白对照,置于无菌培养箱中培养。于处理后每隔24 h取样通过分光光度计测定羊角月牙藻的吸光度值,直到72 h试验结束。通过如下公式计算生物量增长抑制率及生长抑制率。

$$I_y = (Y_c - Y_t) / Y_c \times 100\% \quad (2)$$

$$I_r = (\mu_c - \mu_t) / \mu_c \times 100\% \quad (3)$$

$$\mu_{i-j} = (\ln X_j - \ln X_i) / (t_j - t_i) \quad (4)$$

上式中: I_y 为处理组中生物量抑制百分率,%; I_r 为处理组生长率抑制百分率,%; μ_{i-j} 为*i-j*期间平均生长率; Y_c 及 Y_t 分别为对照组生物量和处理组生物量, mL^{-1} ; μ_c 及 μ_t 分别为对照组生长率平均值和处理组生长率平均值; X_i 和 X_j 分别为*i*和*j*时间点藻类的生物量, mL^{-1} 。

同时采用SPSS19.0软件中概率单位-浓度对数直线回归方法进行结果分析,计算药后72 h的 EC_{50} 。根据《化学农药环境安全评价试验准则》第14部分来判断噁嗪草酮对藻类的急性毒性。

1.4.3 噁嗪草酮对赤字爱胜蚓的毒性测定

(1)滤纸接触法。滤纸接触法参照欧洲共同体推荐的滤纸接触法(OECD,1984)。选用经培养驯化的带环且健康状况良好、月龄在2个月以上、体质量0.3~0.5 g的蚯蚓进行试验,对赤字爱胜蚓清肠培养24 h以上。取直径为10 cm的培养皿及滤纸,配制不同浓度梯度噁嗪草酮(分别为1 000,800,600,400,200,100,50 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$),将配制好的不同浓度梯度的溶液用移液枪均匀涂在滤纸上面,然后将其放在通风橱内自然通风24 h以上。挑选已清肠的蚯蚓10条置于不同浓度梯度的培养皿中,利用保鲜膜覆盖培养皿口,并利用昆虫针扎破保鲜膜以便于通风,最后将培养皿放置在温度为 $(20 \pm 1)^\circ\text{C}$ 、湿度约75%的恒温培养箱中培养。分别于药后24 h和48 h调查并记录蚯蚓死亡数,以蚯蚓前尾部对机械刺激无反应视为死亡。并根据《化学农药环境安全评价试验准则》第15部分来判断噁嗪草酮对蚯蚓的急性毒性:当 $\text{LC}_{50} \leq 1.0 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ 为剧毒;当 $1.0 \mu\text{g}/\text{cm}^2 < \text{LC}_{50} \leq 10.0 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ 为高毒;当介于 $10.0 \mu\text{g}/\text{cm}^2 < \text{LC}_{50} \leq 100.0 \mu\text{g}/\text{cm}^2$,为中毒;当介于 $100.0 \mu\text{g}/\text{cm}^2 < \text{LC}_{50} \leq 1\,000.0 \mu\text{g}/\text{cm}^2$,为低毒;当 $\text{LC}_{50} > 1\,000.0 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ 此时为微毒。

(2)人工土壤法。人工土壤法试验参照《化学农药环境安全评价试验准则》第15部分:蚯蚓急性毒性试验》进行试验设计。将供试除草剂噁嗪草酮用乙腈溶解后均匀混合于10 g石英砂中,等待乙腈完全挥

发后与 490 g 人工土壤充分混匀,加入蒸馏水调节人工土壤含水量至 35%。将不同浓度噁嗪草酮(1 000, 800, 600, 400, 200, 100, 50 mg/kg)的土壤分别放入规格为 500 mL 标准玻璃瓶中,再向玻璃瓶中分别加入 10 条经过驯养的赤芽爱胜蚓。用保鲜膜封住试验所用的玻璃瓶口,然后用昆虫针将保鲜膜扎数个小孔便于通风,将其置于恒温恒湿的培养箱中进行培养。噁嗪草酮共设 1 000, 800, 600, 400, 200, 100, 50 mg/kg 等 5 个浓度梯度,每个浓度处理重复 3 次,同时设不含药剂的空白对照组和助剂作对照。在试验分别进行到第 7 d 和 14 d 观察蚯蚓死亡情况并记录死亡数量。

1.5 数据处理与分析

试验数据用 Excel 2020 及 SPSS 19.0 统计软件进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 噁嗪草酮对杂草的防效

根据结果表 2 所示,10% 噁嗪草酮 SC 30~60 g/hm² 处理药后 30 d 对早稻和晚稻稗草防效分别为 90.4%~94.7% 和 90.1%~93.6%;对千金子防效分别为 89.7%~91.5% 和 91.5%~96.4%;对异形莎草防效分别为 70.2%~76.7% 和 67.6%~70.7%;对鸭舌草防效分别为 61.1%~67.6% 和 55.1%~64.3%。统计分析结果表明,在推荐剂量及以上(45 g/hm²、60 g/hm²)10% 噁嗪草酮悬浮剂对稻田禾本科杂草稗草和千金子与 25 g/L 五氟磺草胺 OD 及 10% 嘧草醚 WP 的防效无显著性差异。相对比与 10% 苄嘧磺隆 WP 对稗草和千金子具有显著防效,但对异形莎草与鸭舌草的防效无显著性差异。

据用药后 3, 7, 15, 30 d 观察,供试药剂各处理水稻生长发育正常,未发现缺苗、生长滞缓、叶片退绿、黄化和枯萎等不良现象。因此,10% 噁嗪草酮 SC 对水稻生长安全。

噁嗪草酮对禾本科杂草稗草和千金子具有良好的防治效果,对阔叶杂草异形莎草和鸭舌草防效相对较差。药后 3~30 d 对水稻生长安全,因此,10% 噁嗪草酮 SC 适宜用于稻田禾本科杂草的防治。对于阔叶杂草发生较重的稻田,可选择与苄嘧磺隆或五氟磺草胺复配混合使用。

表 2 10% 噁嗪草酮 SC 与其复配对水稻杂草防除效果
Tab.2 Effect of 10% Oxaziclonefone SC and its combination on weed control in rice

类型	序号	稗草	千金子	异形莎草	鸭舌草
Rice style	Serial number	<i>Echinochloa crusgalli</i>	<i>Leptochloa chinensis</i>	<i>Cyperus vaginalis</i>	<i>Monochoria vaginalis</i>
早稻 Early rice	1	90.4de	89.7d	70.2f	61.1e
	2	93.4bc	90.8cd	73.2e	62.6e
	3	94.7b	91.5bc	76.7d	67.6d
	4	67.1f	89.5d	93.1c	90.5b
	5	89.5e	91.8bc	96.3b	98.7a
	6	91.9cd	92.7b	66.8g	72.6c
	7	—	—	—	—
晚稻 Later rice	1	90.1e	91.5f	67.6e	55.1d
	2	91.8d	93.7e	67.8e	60.9c
	3	93.6c	96.4b	70.7d	64.3c
	4	72.5f	97.9a	91.6c	96.7a
	5	92.1cd	93.9de	98.3a	99.5a
	6	95.6b	94.9cd	72.2d	70.3b
	7	—	—	—	—

表中的序号为防效试验处理设计组相对应,列数据后字母表示在 5% 的水平差异显著性结果。
The serial numbers in the table correspond to the design group of the effectiveness test treatment, and the letters after the data column represent the significant differences at the 5% level.

2.2 噁嗪草酮对3种生物的安全性评价

2.2.1 噁嗪草酮对斑马鱼的急性毒性

在农药对水生生物的安全评价中,斑马鱼的急性毒性试验是最为常见的生物试验。本研究通过不同质量浓度的噁嗪草酮对成年斑马鱼的急性毒性试验,以评估噁嗪草酮对水生生物的风险。在室内选用10%噁嗪草酮SC和噁嗪草酮原药开展对斑马鱼的急性毒性试验,制剂和原药有效成分质量浓度50, 100, 200, 400, 600, 800, 1 000 mg/L处理药后48, 72, 96 h斑马鱼的死亡数均为0,由此说明噁嗪草酮对斑马鱼的毒性均为低毒。有研究^[15-17]发现噁嗪草酮的作用靶标与杀草隆、溴丁酰草胺等农药相同,主要是植物脂酰-酰基载体蛋白硫酯酶(FAT),而斑马鱼体内不存在植物脂酰-酰基载体蛋白硫酯酶,因此噁嗪草酮对斑马鱼非常安全。目前关于农药对斑马鱼毒性研究较多,吴若函等^[18]报道稻田中常见的6种除草剂对斑马鱼的急性毒性,其中噁唑·酰草胺乳油为高毒,噁唑·灭草松微乳剂和噁唑·氰氟乳油为中毒,其他4种除草剂均为低毒;朱少杰等^[19]试验了五氟磺草胺对斑马鱼胚胎及幼鱼的毒性,结果发现五氟磺草胺对幼鱼为中性毒性,但对斑马鱼胚胎为低毒。本试验仅检测了噁嗪草酮对成年斑马鱼的急性毒性,关于其对斑马鱼胚胎的影响与毒性机理有待深入研究。

2.2.2 噁嗪草酮对羊角月牙藻的急性毒性

(1)藻细胞密度与光密度的标准曲线。为便于测定羊角月牙藻的生长情况,本试验采用显微镜及细胞计数器来确定不同藻密度下的羊角月牙藻数量。吕旭阳等^[20]发现在波长680 nm下,吸光度与藻密度具有良好的线性关系。本试验在优化前人经验的基础上,建立了羊角月牙藻细胞密度与吸光度的标准曲线(图1),其线性关系为: $y=238.920x-1.14$, $R^2=0.991$ 。

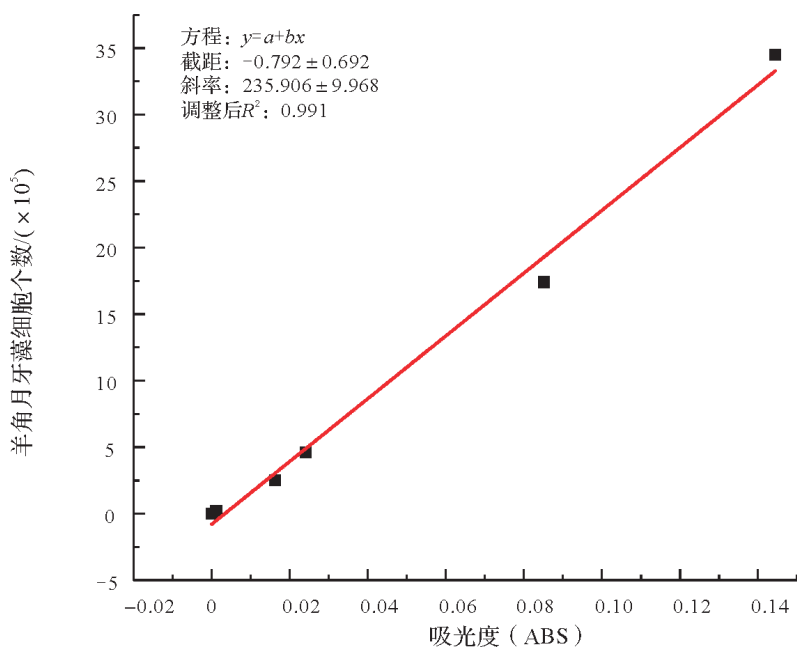


图1 羊角月牙藻与吸光度关系曲线

Fig.1 Relationship curve between *Pseudokirchneriella subcapitata* and absorbance

(2)噁嗪草酮对羊角月牙藻的藻密度的影响。噁嗪草酮对藻类的急性毒性试验结果见表3与图2,试验结果表明噁嗪草酮对羊角月牙藻生长有一定的抑制作用,抑制率为0.71%~2.03%,且随着噁嗪草酮药剂质量浓度增加而上升,但总体抑制效率处于较低水平, $EC_{50}>800$ mg/L,因此,噁嗪草酮对羊角月牙藻属于低毒农药,这可能是由于羊角月牙藻缺少噁嗪草酮的作用靶标“脂酰-酰基载体蛋白硫酯酶(FAT)”所致^[17]。宗照飞等^[21]研究了12种常见除草剂对羊角月芽藻毒性,结果表明作用点位为乙酰乳酸合成酶(ALS)的磺酰脲类除草剂和磺酰胺类除草剂对羊角月牙藻均表现为高毒,而长效除草剂草铵膦对羊角月牙藻毒性为低毒,本试验的研究结果与之相似。

表 3 噁嗪草酮对羊角月牙藻的生长抑制率及 72 h 急性毒性等级
Tab.3 Growth inhibition rate and 72 h acute toxicity grade of oxaziclomefone
on *Pseudokirchneriella subcapitata*

处理组 Treatment	羊角月牙藻密度/($\times 10^5$) <i>Pseudokirchneriella subcapitata</i>	平均生长率抑制率/% Mean of inhibition rate	72 h 的 EC_{50} 值	毒性等级 Toxicity grade
对照	7.3	—	—	—
50	6.87	0.71		
100	6.63	0.97		
200	6.27	1.39	$EC_{50}>800$	低毒
400	5.93	1.79		
800	5.74	2.03		

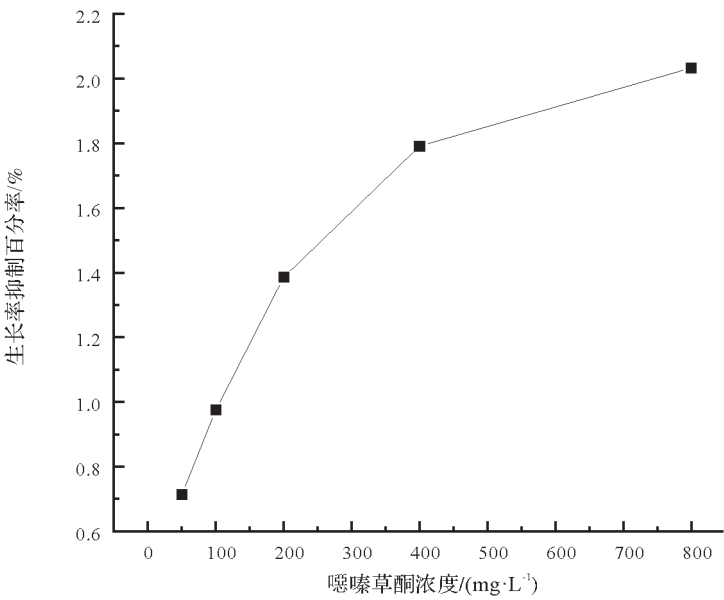


图 2 噁嗪草酮对羊角月牙藻的生长抑制率
Fig.2 Inhibition rate of oxazithrone on the growth of *Pseudokirchneriella subcapitata*

2.2.3 噁嗪草酮对蚯蚓的急性毒性

在土壤中蚯蚓被称为“生态系统工程师”,其占到土壤动物中总生物量的 60%~80%。与其他土壤生物不同,蚯蚓没有厚角质层的外壳,且主要通过皮肤直接接触或直接取食受污染的土壤中食物,因此蚯蚓非常容易受到土壤污染物的影响^[22]。大多数被蚯蚓吸收或者摄入的有毒物质都会经过生物积累并通过食物链传递给其他生物,有毒污染物质可能对蚯蚓不会造成损伤,但通过这种生物积累可能对其他生物造成损伤。同时蚯蚓毒理试验具有操作简单、成本低廉、易于观察、反应灵敏度高、测试终点具有生态毒理相关性等优点。因此,蚯蚓是土壤生态风险评估的重要生态指标。

为探明噁嗪草酮对土壤生物的安全性,采用滤纸接触法和人工土壤法测定了噁嗪草酮对赤字爱胜蚓的急性毒性。在滤纸接触法中,蚯蚓在接触高浓度噁嗪草酮原药后,部分蚯蚓出现身体卷曲,噁嗪草酮 800 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ 和 1 000 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ 处理药后 48 h 出现 1 条蚯蚓死亡,其他药剂处理和时间均未发现蚯蚓死亡,即 $LC_{50}>1\,000\,\mu\text{g}/\text{cm}^2$,根据滤纸接触法测定的毒性分级标准可判定噁嗪草酮属于微毒农药。利用人工土壤法测定噁嗪草酮对蚯蚓急性毒性,噁嗪草酮 50,100,200,400,600,800,1 000 mg/kg 处理药后 7 和 14 d 均未发现蚯蚓死亡,即 $LC_{50}>1\,000\,\text{mg}/\text{kg}$,根据蚯蚓急性毒性试验中提出的标准可判定噁嗪草酮对土壤中赤字爱胜蚓的毒性为低毒。

3 结论与讨论

通过大田试验研究噁嗪草酮对稻田杂草稗草、千金子、异形莎草及鸭舌草的防除效果及对水稻生长的安全性,田间试验结果表明,10%噁嗪草酮SC在推荐剂量45 g/hm²下对稗草和千金子平均防效分别为92.6%及92.3%,对异形莎草和鸭舌草平均防效分别为70.5%及61.8%,与同类除草剂(10%苄嘧磺隆WP、25 g/L五氟磺草胺OD及10%啶草醚WP)相比,10%噁嗪草酮SC对稻田禾本科杂草稗草和千金子具有较好的防除效果,而对阔叶杂草异形莎草和鸭舌草防效较差,药后3~30 d对水稻生长安全,因此,10%噁嗪草酮SC适宜用于稻田禾本科杂草的防治。

通过室内试验噁嗪草酮对赤子爱胜蚓、斑马鱼和羊角月牙藻的毒性响应,以评价噁嗪草酮对水稻生长和环境生物的安全性。10%噁嗪草酮SC和噁嗪草酮原药对斑马鱼药后96 h-EC₅₀>1 000 mg/L,噁嗪草酮对成年斑马鱼为低毒,噁嗪草酮对羊角月牙藻药后72 h-EC₅₀>800 mg/L,根据急性毒性试验结果噁嗪草酮对羊角月牙藻属于低毒农药;对赤子爱胜蚓的急性毒性试验结果表明,滤纸接触法测定结果可判定噁嗪草酮属于微毒农药(48 h-LC₅₀>1 000 μg/cm²),而人工土壤法测定结果可判定噁嗪草酮属于低毒农药(14 d-LC₅₀>1 000 mg/kg)。其主要原因可能是由于噁嗪草酮在水中溶解度较低等所致,O'Looney等^[23]发现噁嗪草酮主要通过抑制细胞膨胀来抑制植物生长,对细胞分裂影响较小。Johnen等^[24]发现噁嗪草酮是酰基ACP硫代酯酶(FAT)的抑制剂,生物体内不存在FAT,因此对生物毒性较小。

致谢:江西省水利厅科技项目(202124ZDKT14)和江西省教育厅科学技术研究项目(GJJ215905)同时对本研究给予了资助,谨致谢意!

参考文献 References:

- [1] 蒋欣东,康晓慧,陈万权,等.除草剂减量与激健混施对麦田杂草防效及产量特征影响[J].江西农业大学学报,2021,43(1):33-41.
JIANG X D, KANG X H, CHEN W Q, et al. Effect of herbicide reduction and vigorous stimulant application on weed control and wheat yield characteristics in wheat field[J]. Acta agriculturae universitatis Jiangxiensis, 2021, 43(1): 33-41.
- [2] BOJARSKI B, WITESKA M. Blood biomarkers of herbicide, insecticide, and fungicide toxicity to fish: a review[J]. Environmental science and pollution research, 2020, 27(16): 19236-19250.
- [3] CHEN S Y, ZHANG L J, CHEN H, et al. Enantioselective toxicity of chiral herbicide metolachlor to microcystis aeruginosa[J]. Journal of agricultural and food chemistry, 2019, 67(6): 1631-1637.
- [4] CHOUDRI B S, CHARABI Y, AHMED M. Pesticides and herbicides[J]. Water environment research, 2018, 90(10): 1663-1678.
- [5] LEWIS R W, BOTHAM J W. A review of the mode of toxicity and relevance to humans of the triketone herbicide 2-(4-methylsulfonyl-2-nitrobenzoyl)-1,3-cyclohexanedione[J]. Critical reviews in toxicology, 2013, 43(3): 185-199.
- [6] ANNETT R, HABIBI H R, HONTELA A. Impact of glyphosate and glyphosate-based herbicides on the freshwater environment[J]. Journal of applied toxicology, 2014, 34(5): 458-479.
- [7] 饶镭,邹子玉,刘浪,等.50%双环磺草酮悬浮剂及其混剂对移栽稻田杂草的防效和安全性[J].植物保护,2022,48(3):312-320.
RAO L, ZOU Z Y, LIU L, et al. The control effect and safety of benzobicyclon 50% SC and its mixture on the weeds in transplanted rice fields[J]. Plant protection, 2022, 48(3): 312-320.
- [8] 贾浩然,张月,李卫,等.啶草醚对双季稻田杂草的防效及后茬作物的安全性影响[J].植物保护,2020,46(5):242-247.
JIA H R, ZHANG Y, LI W, et al. Effects of pyriminobac-methyl on weeds in double-cropping rice fields and safety to rice and following crops[J]. Plant protection, 2020, 46(5): 242-247.
- [9] ZHU L, LI B, WU R L, et al. Acute toxicity, oxidative stress and DNA damage of chlorpyrifos to earthworms (*Eisenia fetida*): the difference between artificial and natural soils[J]. Chemosphere, 2020, 255: 126982.
- [10] BAMBINO K, CHU J. Zebrafish in toxicology and environmental health[J]. Current topics in developmental biology, 2017, 124: 331-367.

- [11] FAN R Q, ZHANG W J, JIA L, et al. Combined developmental toxicity of the pesticides difenoconazole and dimethomorph on embryonic zebrafish[J]. *Toxins*, 2021, 13(12): 235-243.
- [12] WANG Y H, YANG G L, DAI D J, et al. Individual and mixture effects of five agricultural pesticides on zebrafish (*Danio rerio*) larvae[J]. *Environmental science and pollution research*, 2017, 24(5): 4528-4536.
- [13] NAGAI T, TAYA K, YODA I. Comparative toxicity of 20 herbicides to 5 periphytic algae and the relationship with mode of action[J]. *Environmental toxicology and chemistry*, 2016, 35(2): 368-375.
- [14] UEDA K, NAGAI T. Relative sensitivity of duckweed *Lemna minor* and six algae to seven herbicides[J]. *Journal of pesticide science*, 2021, 46(3): 267-273.
- [15] 王威浩, 谭晓凤. 植物脂酰-酰基载体蛋白硫酯酶研究综述[J]. *经济林研究*, 2009, 27(2): 118-124.
WANG W H, TAN X F. Literature review of plant fatty Acyl-Acyl carrier protein thioesterase[J]. *Non-wood forest research*, 2009, 27(2): 118-124.
- [16] 金柳, 李萌晗, 郑育声, 等. 油棕乙酰基酰基载体蛋白硫酯酶 EgFATA 基因的克隆与功能分析[J]. *热带生物学报*, 2023, 14(4): 357-363.
JIN L, LI M H, ZHENG Y S, et al. Cloning and functional analysis of the fatty acyl-ACP thioesterase EgFATA in oil palm[J]. *Journal of tropical biology*, 2023, 14(4): 357-363.
- [17] JOHNNEN P, ZIMMERMANN S, BETZ M, et al. Inhibition of acyl-ACP thioesterase as site of action of the commercial herbicides cumyluron, oxaziclomefone, bromobutide, methyl dymron and tebutam[J]. *Pest management science*, 2022, 78(8): 3620-3629.
- [18] 吴若函, 郭晓瑜, 辛星, 等. 6种稻田除草剂对斑马鱼和大型溞的急性毒性[J]. *江苏农业科学*, 2021, 49(19): 223-226.
WU R H, GUO X Y, XIN X, et al. Acute toxicity of six rice field herbicides to zebrafish and *Daphnia magna*[J]. *Jiangsu agricultural sciences*, 2021, 49(19): 223-226.
- [19] 朱少杰, 臧传江, 李晨雨, 等. 五氟磺草胺对斑马鱼的毒性效应[J]. *农药*, 2019, 58(8): 601-603.
ZHU S J, ZANG C J, LI C Y, et al. Toxicity effect of penoxsulam on zebrafish[J]. *Agrochemicals*, 2019, 58(8): 601-603.
- [20] 吕旭阳, 张雯, 杨阳, 等. 分光光度法测定小球藻数量的方法研究[J]. *安徽农业科学*, 2009, 37(23): 11104-11105.
LYU X Y, ZHANG W, YANG Y, et al. Methodological research on measuring chlorella quantity by spectrophotometry[J]. *Journal of Anhui agricultural sciences*, 2009, 37(23): 11104-11105.
- [21] 宗照飞, 宋伟华, 张燕, 等. 12种除草剂对羊角月芽藻的毒性研究[J]. *农药科学与管理*, 2017, 38(2): 25-29.
ZONG Z F, SONG W H, ZHANG Y, et al. Study on toxicity of twelve herbicides to *Pseudokirchneriella subcapitata*[J]. *Pesticide science and administration*, 2017, 38(2): 25-29.
- [22] 刘亚光, 李晓妍, 吴绘鹏, 等. 氯氟吡啶酯对不同品种水稻安全性的研究[J]. *江西农业大学学报*, 2022, 44(1): 45-54.
LIU Y G, LI X Y, WU H P, et al. Study on safety effects of florypyrauxifen on different rice varieties[J]. *Acta agriculturae universitatis Jiangxiensis*, 2022, 44(1): 45-54.
- [23] O'LOONEY N, FRY S C. The novel herbicide oxaziclomefone inhibits cell expansion in maize cell cultures without affecting turgor pressure or wall acidification[J]. *New phytologist*, 2005, 168(2): 323-329.
- [24] JOHNNEN P, ZIMMERMANN S, BETZ M, et al. Inhibition of acyl-ACP thioesterase as site of action of the commercial herbicides cumyluron, oxaziclomefone, bromobutide, methyl dymron and tebutam[J]. *Pest management science*, 2022, 78(8): 3620-3629.