余长娥,钟恒,王康,等.环嗪酮与草甘膦混配对恶性杂草斑茅的协同除草效果[J].华中农业大学学报,2026,45(2):207-215.
DOI:10.13300/j.cnki.hnlkxb.2026.02.022

环嗪酮与草甘膦混配对恶性杂草斑茅的协同除草效果

余长娥[1],钟恒[1],王康[1],陈光耀[1],王文卓[2,3],冯唐奇[2,3],马洪菊[2,3]

1.中国长江电力股份有限公司,宜昌 443000;2.果蔬园艺作物种质创新与利用全国重点实验室,武汉 430070;
3.华中农业大学植物科学技术学院,武汉 430070

摘要 为筛选防控恶性杂草斑茅的高效除草剂,评估了环嗪酮和草甘膦对斑茅的室内和田间除草活性,并探讨了二者混配对斑茅的联合作用。结果显示,3 375 g/hm²5%环嗪酮颗粒剂处理后30 d,斑茅枯黄,处理后60 d枯死,至处理后120 d仍不返青。2 306.25 g/hm²41%草甘膦异丙胺盐水剂处理后14 d,斑茅枯黄,处理后60 d返青并恢复生长。环嗪酮和草甘膦对斑茅的联合作用结果表明,562.5 g/hm²环嗪酮和384.375 g/hm²草甘膦异丙胺盐联合处理对斑茅表现为增效作用,防效达100%。结果表明,562.5 g/hm²环嗪酮和384.375 g/hm²草甘膦异丙胺盐混用配方对斑茅展现出优异防控效果。

关键词 斑茅;环嗪酮;草甘膦异丙胺盐;田间药效试验;联合作用

中图分类号 S451.22+9 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2026)02-0207-09

斑茅(*Saccharum arundinaceum* Retz.)是一种植株高大[1]、茎秆粗壮[2-3]、根系发达且穿透力强的禾本科甘蔗属多年生高大丛生杂草[4-5],其株高可达6 m,茎秆直径可超过2 cm,细胞壁含有高碳水化合物,不仅可以广泛生长于甘蔗、棉花、茶园和柑橘园等农作物生态系统中,影响作物生长[6-8];还能生长在水利枢纽工程坝区大坝结构缝等坝区工业用地,对大坝坝体结构构成严重威胁。斑茅生物量巨大,茎叶生物量可达8.23 kg/m²[9],冬季干枯植株直立率达95%以上,不易倒伏腐烂,会残留大量生物质,对附近气体绝缘金属封闭输电线路等设施设备形成重大火灾隐患。此外,斑茅繁殖能力极强,既可通过分蘖进行高效无性繁殖,又能借助种子实现有性繁殖,在水利枢纽工程坝区等区域快速扩散[10-13],不仅威胁旱地作物与山地果园生产安全,更对水利枢纽工程坝区的水利水电关键基础设施构成直接风险。

目前,人工和机械除草是水利枢纽工程坝区防治斑茅的主要措施,其中,三峡水利枢纽工程坝区斑茅等杂草的防控成本高达20万元/年。但由于斑茅生长快,竞争能力和抗逆性强,人工、机械和激光除草措施都很难根除斑茅;而且当前也没有登记的有效防除斑茅的除草剂。因此,研究斑茅的高效防控策略对保障坝区坝体结构完整性和水电基础设施安全具有重要意义。近年来的研究表明,草甘膦(glyphosate)作为内吸传导型广谱灭生性除草剂,对黑麦草(*Lolium perenne* L.)、稗草(*Echinochloa crus-galli* L.)、狗牙根(*Cynodon dactylon* L.)和芦苇(*Phragmites australis* Cav.)等禾本科杂草具有显著的防治效果[14-15]。环嗪酮(hexazinone)是一种三氮苯类除草剂,通过抑制光合作用发挥作用,对禾本科杂草的防效显著[16-18]。但草甘膦和环嗪酮在水利枢纽工程坝区等特殊场景(如混凝土坝体、大坝结构缝)中对恶性杂草斑茅的防治效果尚未明确。此外,长期单一使用草甘膦易导致杂草对其产生抗药性[19-21];芦苇等多年生杂草的发达根系也限制着草甘膦对这些多年生杂草的防治效果[22]。除草剂混配和复配是通过协同作用增加药效的重要方式之一,也有助于突破单一除草剂的局限性,提高药效,延长除草剂的使用寿命。

基于此,本研究针对水利枢纽工程坝区这一特殊生态场景中斑茅危害问题,采用室内生物测定和田间药效试验评估了5%环嗪酮颗粒剂(granule,GR)和41%草甘膦异丙胺盐水剂(aqueous solution,AS)对斑茅的防治效果,并评价了草甘膦异丙胺盐与

收稿日期:2025-06-05
基金项目:中国长江电力股份有限公司科研项目(2123020019)
余长娥,E-mail:yu_change@ctg.com.cn
通信作者:马洪菊,E-mail:mahongju@mail.hzau.edu.cn

环嗪酮混配的联合作用，以期为水利枢纽工程坝区等特殊场景下斑茅的高效防控提供理论支撑，为其他生境恶性杂草斑茅的防治提供借鉴。

1 材料与方法

1.1 供试药剂及材料

试验所用的除草剂见表1。斑茅种子采集于湖北省宜昌市三峡大坝坝区和湖北省武汉市华中农业大学荒坡，种子晒干后储存于低温低湿储藏柜中备用。

1.2 试验地概况

斑茅室内生物测定材料生长地为武汉市华中农业大学双控温室基地。斑茅田间药效试验位于湖北省宜昌市三峡大坝坝区边坡及发电站周边(30°49′8″N，110°59′55″E)。室内生物测定试验供试斑茅为5～7叶期；田间药效试验供试斑茅长势一致，平均丛茎长0.5 m。

1.3 5%环嗪酮GR和41%草甘膦异丙胺盐AS对斑茅的室内生物活性测定

参照NY/T 1155.4—2006《农药室内生物测定试验准则 除草剂第4部分：活性测定试验 茎叶喷雾法》设计试验，(1)催芽：挑选大小一致的斑茅种子，放入垫有2层滤纸的培养皿中，置于恒温培养箱内培养至露白，恒温培养箱设置温度为光周期12 h，28 ℃；暗周期12 h，25 ℃。(2)将试验土壤定量装至外口径13 cm花盆的4/5处，土壤完全湿润后，将已催芽露白的供试斑茅种子均匀播于土壤表面，每盆分别播种15粒，覆土1.5 cm，置于28 ℃的双控温室内培养，光暗周期12 h/12 h，定期补水。(3)培养斑茅至5～7叶期，使用ASS-4型自动控制农药喷洒系统进行土壤喷雾处理，采用TeeJet 8003VS扇形喷头，喷药量450 L/hm^2，工作压强0.28 MPa。(4)本试验选用了5%环嗪酮GR和41%草甘膦异丙胺盐AS，每种除草剂设置4个处理，每个处理设置3个重复，以清水处理为对照。使用5%环嗪酮GR药剂的4个处理施用量(按有效成分计，下同)分别为：1 125、1 687.5、2 250、3 375 g/hm^2；使用41%草甘膦异丙胺盐AS药剂的4个处理施用量分别为：768.75、1 153.125、1 537.5、2 306.25 g/hm^2。41%草甘膦异丙胺盐AS处理后21 d，统计斑茅的存活株数、地上部分鲜质量和干质量。5%环嗪酮GR药效显现慢，处理后45 d，统计斑茅的存活株数、地上部分鲜质量和干质量。

1.4 5%环嗪酮GR和41%草甘膦异丙胺盐AS对斑茅的田间药效试验

试验共设计3个处理，分别为5%环嗪酮GR处理、41%草甘膦异丙胺盐AS处理和清水对照处理，每个处理3个重复，每个处理小区面积为40 m^2。采用随机区组设计，于2024年3月29日喷施除草剂共1次，喷施前进行刈割至株高为50 cm左右，喷施方式为茎叶喷雾(对照为清水处理)，施药器械为SX-MD16E-2电动喷雾器(市下控股有限公司)带扇型喷头，喷头型号：LECHLER LU120-015。分别以5%环嗪酮GR和41%草甘膦异丙胺盐AS的室内生物测定效果最优剂量(3 375 g/hm^{2}和2 306.25 g/hm^2)对斑茅进行定向茎叶喷雾处理。处理后7、14、21、30、45、60、90和120 d进行观测，并拍照记录。

1.5 环嗪酮和草甘膦混配的联合作用试验

供试斑茅培养方法同本文“1.3”的方法。待斑茅生长至5～7叶期，使用ASS-4型自动控制农药喷洒系统进行土壤喷雾处理，采用TeeJet 8003VS扇形喷头，喷药量450 L/hm^2，工作压强为0.28 MPa。准确称取一定量98%环嗪酮原药和95%草甘膦原药，配

表1 试验供试药剂

Table 1 Tested reagents

编号 Number	供试药剂 Tested pesticide	登记证号 Registration number	生产企业 Manufacturer	推荐剂量(按有效成分计)/(g/hm^2) Recommended dose (effective components)
1	5%环嗪酮颗粒剂 5% hexazinone GR	PD20212217	广西瑞施特生物科技有限公司 Guangxi Ruishite Biotechnology *Co.*, *Ltd.*	1 500～2 250 (森林防火道 For forest firebreaks)
2	41%草甘膦异丙胺盐水剂 41% glyphosate isopropylamine salt AS	PD73-88	拜耳股份公司 Bayer AG	922.5～1 537.5 (棉花免耕田 For cotton no-till fields)
3	98%环嗪酮原药 98% hexazinone technical	PD20097521	山东潍坊润丰化工股份有限公司 Shandong Weifang Rainbow Chemical *Co.*, *Ltd.*	—
4	95%草甘膦原药 95% glyphosate technical	PD343-2000	拜耳股份公司 Bayer AG	—

置成 6 个环嗪酮剂量梯度（0、562.5、1 125、2 250、4 500、9 000 g/hm^2）和 6 个草甘膦剂量梯度（0、384.375、768.75、1 537.5、3 075、6 150 g/hm^2），并分别将 6 个剂量的环嗪酮与 6 个剂量的草甘膦进行混配，共计 36 个处理。每个处理设置 4 个重复，待药液在斑茅叶片上晾干，转移斑茅至 28 ℃的双控温室内培养，分别于药后 21、45 d 统计各处理存活株数，计算环嗪酮和草甘膦的联合防治作用。

1.6　数据统计与分析

1）室内生物测定试验数据统计与分析。室内生物测定试验分别于 5% 环嗪酮 GR 处理后 45 d，41% 草甘膦异丙胺盐 AS 处理后 21 d 统计各处理组和对照组斑茅的存活株数、地上部分鲜质量和干质量，并参照高兴祥等[23]和 Feng 等[24]的方法计算株防效、鲜质量防效和干质量防效，利用 Duncan's 多重比较进行差异显著性分析。

2）田间药效试验数据统计与分析。田间药效试验效果以处理后 7、14、21、30、45、60、90 和 120 d 的观测结果为评价指标，基于斑茅的药害症状，将药剂处理后斑茅的生长情况描述为 4 个等级：Ⅰ、正常生长：斑茅叶片正常生长，没有任何药害症状；Ⅱ、枯黄：植株叶片变黄、萎蔫；Ⅲ、枯死：叶片和茎秆干枯、死亡；Ⅳ、返青：植株枯萎后重新长出新的绿叶片。

3）环嗪酮和草甘膦异丙胺盐混配联合作用评价。采用 Gowing 法和等效线法，计算环嗪酮和草甘膦异丙胺盐混配后的理论防效。Gowing 法的计算公式如下：

$$E_0=X+\frac{Y(100-X)}{100}$$

式中：X 代表环嗪酮单用对斑茅的防效；Y 代表草甘膦异丙胺盐单用对斑茅的防效。E 代表环嗪酮与草甘膦异丙胺盐按比例混配后的实际防效；E_0 代表环嗪酮与草甘膦异丙胺盐按比例混配后的理论防效；当 $(E-E_0)>10\%$ 时为增效作用，$(E-E_0)<-10\%$ 时为减效作用，$10\%\leqslant(E-E_0)\leqslant-10\%$ 时为相加作用。

等效线法基于剂量-反应回归关系比较并评价环嗪酮和草甘膦异丙胺盐混配联合作用。首先，分别求出环嗪酮与草甘膦异丙胺盐单剂对斑茅的 LD_{50}（导致斑茅死亡一半的草甘膦异丙胺盐剂量），分别记为 A 与 B。以草甘膦异丙胺盐剂量为横坐标、环嗪酮剂量为纵坐标建立坐标系，连接点（B，0）与点（0，A）绘制理论相加等效线。其次，将两药剂按若干固定质量配比混配，测定各混配组合的 LD_{50}，并折算为对应坐标点（即该 LD_{50} 中两组分的实际剂量）。最后，比较实测点与理论线的相对位置：若点分布于线左下方为增效作用，落于线上为相加作用，落于线右上方为拮抗作用。

2　结果与分析

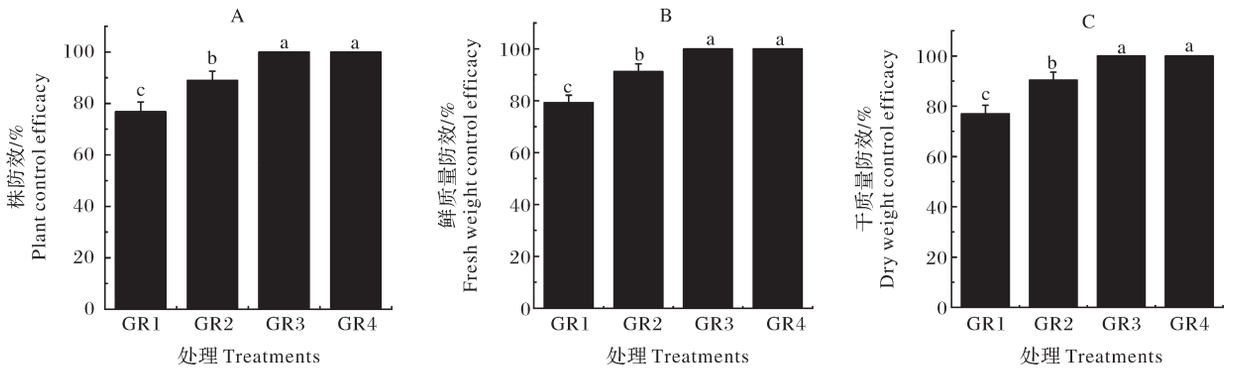
2.1　5% 环嗪酮 GR 和 41% 草甘膦异丙胺盐 AS 对斑茅的室内防治效果

为评价 5% 环嗪酮 GR 对斑茅的室内防治效果，在温室条件下，测定 1 125、1 687.5、2 250 和 3 375 g/hm^2 5% 环嗪酮 GR 对斑茅的防治效果。结果显示，5% 环嗪酮 GR 处理后 45 d，2 250 g/hm^2 和 3 375 g/hm^2 剂量的 5% 环嗪酮 GR 对斑茅的株防效、鲜质量防效和干质量防效均达 100%，显著高于 1 687.5 g /hm^2 剂量处理（其株防效、鲜质量防效和干质量防效分别为 88.99%、91.25% 和 90.40%）（图 1）。可见，5% 环嗪酮 GR 对斑茅具有良好的防治效果。

为评价 41% 草甘膦异丙胺盐 AS 对斑茅的室内防治效果，在温室条件下，测定 768.75、1 153.125、1 537.5 和 2 306.25 g/hm^2 剂量下 41% 草甘膦异丙胺盐 AS 对斑茅的防治效果。结果显示，在最低剂量 768.75 g/hm^2 下，41% 草甘膦异丙胺盐 AS 表现出抑制斑茅生长的作用，但对植株的致死作用较差，其对斑茅的鲜质量防效为 54.36%，株防效仅为 14.42%；在 1 537.5 g/hm^2 和 2 306.25 g/hm^2 剂量处理下，对斑茅的株防效、鲜质量防效和干质量防效为 75.33%～87.99%（图 2）。可见，41% 草甘膦异丙胺盐 AS 对斑茅的防效较差。

2.2　5% 环嗪酮 GR 和 41% 草甘膦异丙胺盐 AS 对斑茅的田间防治效果

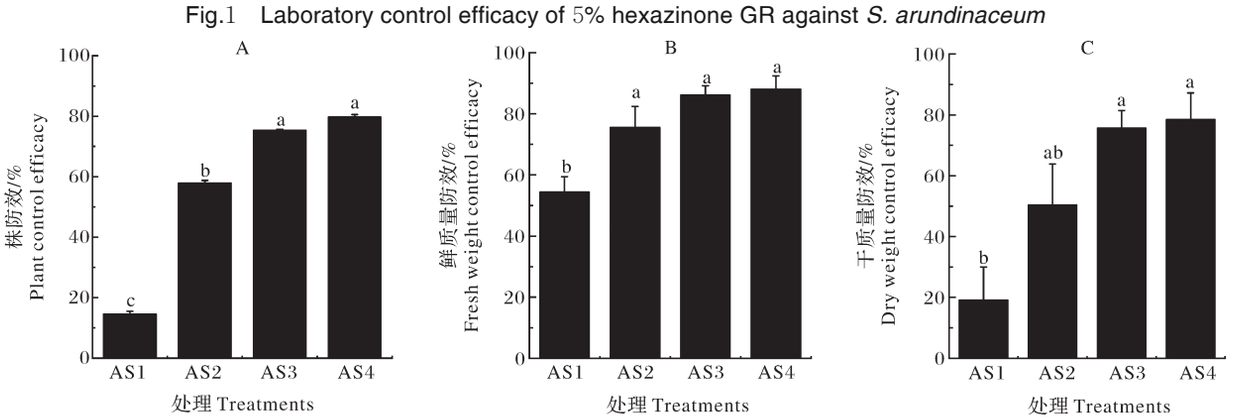
5% 环嗪酮 GR 和 41% 草甘膦异丙胺盐 AS 对斑茅的田间防治效果如图 3 所示。3 375 g/hm^2 剂量下 5% 环嗪酮 GR 处理后，斑茅生长缓慢；至处理后 30 d，斑茅开始出现枯黄药害症状；至药后 60 d，植株完全枯死。值得注意的是，该药剂持效期可长达 120 d 以上，在此期间未观察到斑茅返青现象，表明其对斑茅具有彻底的杀灭效果。2 306.25 g/hm^2 剂量下 41% 草甘膦异丙胺盐 AS 对斑茅表现出良好的速效性，药剂处理后 14 d，斑茅植株呈现枯黄状态；处理后 45 d，部分植株开始出现严重枯黄状态；但到药后 60 d，斑茅植株开始返青，后逐步恢复生长；至药后



A：株防效 Plant control efficacy；B：鲜质量防效 Fresh weight control efficacy；C：干质量防效 Dry weight control efficacy. GR1：1 125 g/hm^2；GR2：1 687.5 g/hm^2 GR3：2 250 GR4：3 375 g/hm^2，不同小写字母代表不同处理间差异显著（$P<0.05$），下同。Different lowercase letters indicate significant differences among the different treatment groups ($P<0.05$), the same as below.

图1 5%环嗪酮GR处理对斑茅的室内防治效果

Fig.1 Laboratory control efficacy of 5% hexazinone GR against *S. arundinaceum*



A：株防效 Plant control efficacy；B：鲜质量防效 Fresh weight control efficacy；C：干质量防效 Dry weight control efficacy。AS1：768.75 g/hm^2；AS2：1 153.125 g/hm^2；AS3：1 537.5 g/hm^2；AS4：2 306.25 g/hm^2.

图2 41%草甘膦异丙胺盐AS处理对斑茅的室内防治效果

Fig.2 Laboratory control efficacy of 41% glyphosate isopropylamine salt AS against *S. arundinaceum*

120 d，处理组斑茅植株已完全恢复生长，其生长状态与对照组无显著差异。

2.3 环嗪酮和草甘膦混配对斑茅的联合防治作用

基于上述室内生物测定试验和田间药效试验结果，草甘膦异丙胺盐对斑茅表现出较好的速效性，药后短期内即可使斑茅呈现显著的枯黄状态。然而，由于斑茅根系发达，草甘膦异丙胺盐难以达到根除效果，导致其无法实现对斑茅的彻底根除，易出现复发问题。相较之下，环嗪酮对斑茅的防治效果优异，可以根除斑茅，但其起效慢。鉴于2种药剂在防控特性上的互补性，为探索更高效的斑茅防治策略，采用Gowing法评价了环嗪酮和草甘膦异丙胺盐混配的联合作用。研究结果表明，环嗪酮和草甘膦异丙胺盐混配处理后21 d，562.5 g/hm^{2}和1 125 g/hm^{2}环嗪酮分别与384.375 g/hm^{2}草甘膦异丙胺盐混配处理对斑茅的防治效果均表现为增效作用，株防效分别为60.05%和86.11%（表2～表4）。环嗪酮和草甘膦异丙胺盐混配处理后45 d，562.5 g/hm^{2}和1 125 g/hm^{2}环嗪酮分别与384.375 g/hm^{2}草甘膦异丙胺盐混配处理对斑茅的防治效果均表现为增效作用，株防效均达100%（表2～表4）。进一步通过等效线法评价环嗪酮和草甘膦异丙胺盐的联合作用。环嗪酮和草甘膦异丙胺盐混配处理后21 d，环嗪酮剂量为562.5 g/hm^{2}的基础下，草甘膦异丙胺盐对斑茅的LD_{50}值为151.9 g/hm^2；草甘膦异丙胺盐剂量为384.375 g/hm^{2}的基础下，环嗪酮对斑茅的LD_{50}值为147.3 g/hm^2。562.5 g/hm^{2}环嗪酮与384.375 g/hm^{2}草甘膦异丙胺盐混配组合的LD_{50}值均在理论等效线的下方，表明562.5 g/hm^{2}环嗪酮与384.375 g/hm^{2}草甘膦异丙胺盐混配处理对斑茅的防治效果表现为增效作用（图4A）。环嗪酮和草甘膦异丙胺盐混配处理后45 d，562.5 g/hm^{2}环嗪酮与384.375 g/hm^{2}草甘膦异丙胺盐混配处理对斑茅的

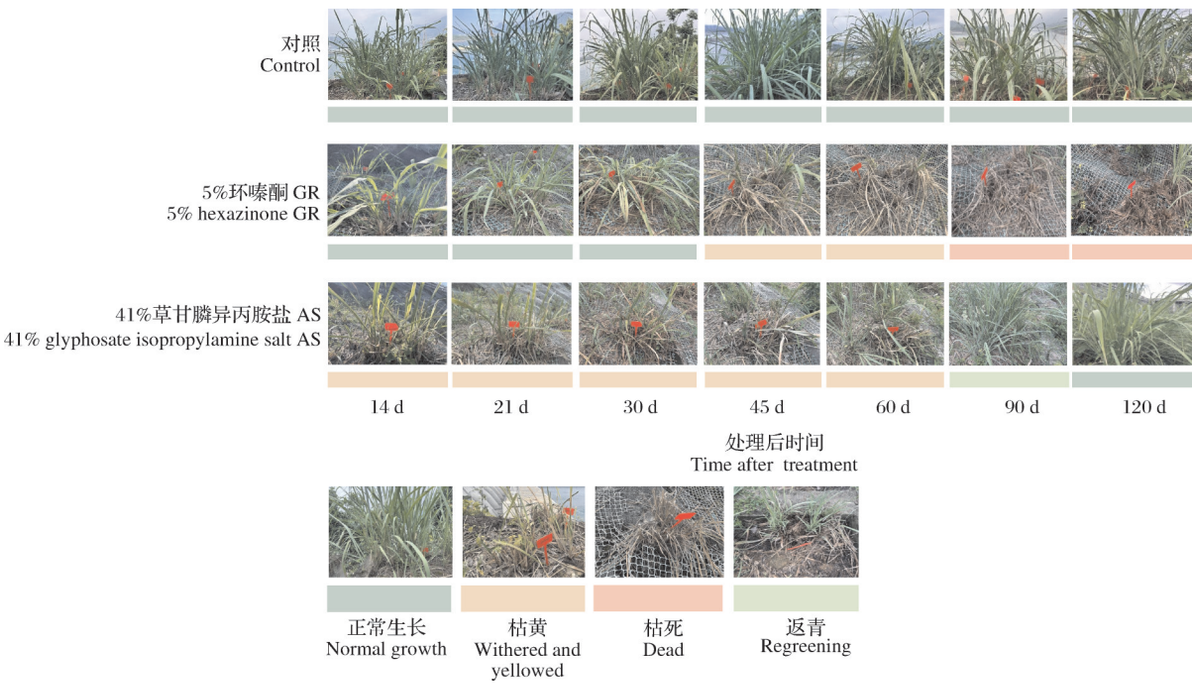


图 3　5% 环嗪酮 GR 和 41% 草甘膦异丙胺盐 AS 对斑茅的田间防治效果

Fig.3　Field control efficacy of 5% hexazinone GR and 41% glyphosate isopropylamine salt AS against *S. arundinaceum*

表 2　环嗪酮和草甘膦异丙胺盐混配对斑茅的株防效

Table 2　Plant control efficacy of hexazinone and glyphosate isopropylamine salt mixtures against *S. arundinaceum*　%

环嗪酮/(g/hm²) Hexazinone	混配处理后 21 d 21 d mixture treatment						混配处理后 45 d 45 d mixture treatment					
	草甘膦异丙胺盐/(g/hm²) Glyphosate isopropylamine salt						草甘膦异丙胺盐/(g/hm²) Glyphosate isopropylamine salt					
	0	384.375	768.75	1 537.5	3 075	6 150	0	384.375	768.75	1 537.5	3 075	6 150
0	0 (0)	10.00 (10.00)	51.87 (6.36)	55.18 (12.40)	57.20 (10.28)	59.18 (15.61)	0 (0)	25.87 (7.72)	100 (0)	100 (0)	100 (0)	100 (0)
562.5	44.09 (7.65)	60.05 (5.11)	60.67 (9.78)	72.40 (3.55)	65.75 (13.69)	100 (0)	45.57 (11.85)	100 (0)	89.72 (7.08)	100 (0)	100 (0)	100 (0)
1 125	43.46 (5.35)	86.11 (4.81)	71.48 (9.98)	100 (0)	100 (0)	100 (0)	82.56 (6.42)	100 (0)	98.08 (1.92)	100 (0)	100 (0)	100 (0)
2 250	83.65 (6.81)	92.50 (2.50)	100 (0)	100 (0)	100 (0)	100 (0)	95.83 (4.17)	100 (0)	100 (0)	100 (0)	100 (0)	100 (0)
4 500	100 (0)	100 (0)	100 (0)	100 (0)	100 (0)	100 (0)	100 (0)	100 (0)	100 (0)	100 (0)	100 (0)	100 (0)
9 000	100 (0)	100 (0)	100 (0)	100 (0)	100 (0)	100 (0)	100 (0)	100 (0)	100 (0)	100 (0)	100 (0)	100 (0)

注：括号内数据为株防效的标准误。Note：The data in parentheses indicate the standard error (SE) of the plant control efficiency.

防治效果也表现为增效作用(图 4B)。

以上结果表明，环嗪酮和草甘膦异丙胺盐混配的最佳比例为环嗪酮 562.5 g/hm² 和草甘膦异丙胺盐 384.375 g/hm²。562.5 g/hm² 环嗪酮与 384.375 g/hm² 草甘膦异丙胺盐混配处理不仅显著提高了对斑茅的防治效果，还显著减少了环嗪酮和草甘膦异丙胺盐的使用量。

3　讨　论

斑茅根系发达、生物量大、分布广泛、传播能力和生命力极强，不仅对水利枢纽工程坝区大坝混凝土结构安全构成潜在威胁，还埋下重大火灾隐患。目前，斑茅的防治方法主要为人工机械除草等物理防治方法。然而，坝区斑茅防治的作业区域坡度陡、高差大，对作业人员构成极大人身安全风险；且斑茅

表3 环嗪酮和草甘膦异丙胺盐混配对斑茅的理论防效

Table 3 Theoretical control efficacy E_0 of hexazinone and glyphosate isopropylamine salt mixtures against *S. arundinaceum*

%

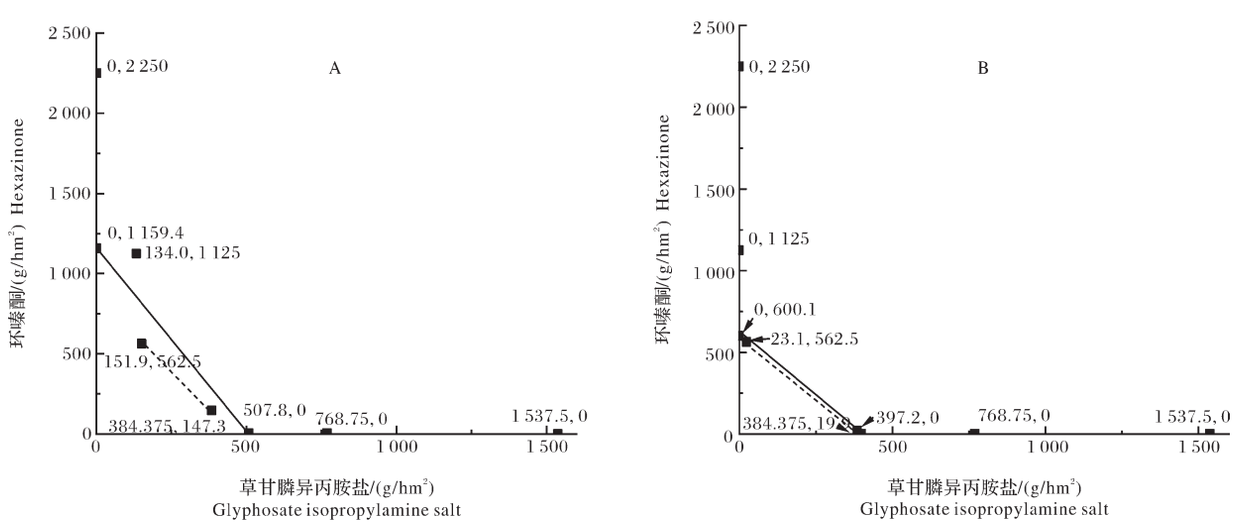
环嗪酮/(g/hm²) Hexazinone	混配处理后21 d 21 d mixture treatment					混配处理后45 d 45 d mixture treatment				
	草甘膦异丙胺盐/(g/hm²) Glyphosate isopropylamine salt					草甘膦异丙胺盐/(g/hm²) Glyphosate isopropylamine salt				
	384.375	768.75	1 537.5	3 075	6 150	384.375	768.75	1 537.5	3 075	6 150
562.5	49.69	73.11	74.96	76.07	77.19	59.69	100	100	100	100
1 125	49.15	72.82	74.69	75.82	76.95	87.11	100	100	100	100
2 250	85.33	92.16	92.70	93.0 2	93.35	96.89	100	100	100	100
4 500	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
9 000	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

表4 环嗪酮和草甘膦异丙胺盐混配对斑茅的联合作用评价(Gowing法)

Table 4 Evaluation of the joint action of hexazinone and glyphosate isopropylamine salt mixtures against *S. arundinaceum* (Gowing method)

环嗪酮/(g/hm²) Hexazinone	混配处理后21 d 21 d mixture treatment					混配处理后45 d 45 d mixture treatment				
	草甘膦异丙胺盐/(g/hm²) Glyphosate isopropylamine salt					草甘膦异丙胺盐/(g/hm²) Glyphosate isopropylamine salt				
	384.375	768.75	1 537.5	3 075	6 150	384.375	768.75	1 537.5	3 075	6 150
562.5	++	−	+	+	++	++	+	+	+	+
1 125	++	+	++	++	++	++	+	+	+	+
2 250	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
4 500	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
9 000	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+

注 Note:++:增效效果 Synergistic effect;+:相加效果 Additive effect;−:拮抗效果 Antagonistic effect.



A:混配处理后21 d的联合作用 Joint action after 21 d mixture treatment;B:混配处理后45 d的联合作用 Joint action after 45 d mixture treatment.

图4 环嗪酮和草甘膦异丙胺盐混配对斑茅的联合作用评价(等效线法)

Fig.4 Evaluation of the joint action of hexazinone and glyphosate isopropylamine salt mixtures against *S. arundinaceum* (equivalent line method)

生长力旺盛，每年需进行多次清除，物理防治成本高昂。此外，尚未有专门用于坝区防治斑茅等恶性杂草的除草剂登记。本研究发现5%环嗪酮GR对斑茅的防效显著且持效期长，但起效慢；41%草甘膦异丙胺盐AS速效性较好、但防治效果一般。基于Gowing法和等效线法明确了环嗪酮和草甘膦异丙胺盐混配展现出增效效果，其最佳增效混用配方为环嗪酮562.5 g/hm^{2}和草甘膦异丙胺盐384.375 g/hm^2。

本研究结果表明，5%环嗪酮GR对斑茅具有优异的防治效果和较长的持效期，但药效发挥较慢。田间条件下，施药后30 d斑茅始现枯黄症状，至60 d植株全部枯死；此后直至120 d仍未返青。相比之下，41%草甘膦异丙胺盐AS对斑茅表现出较好的速效性，药后14 d斑茅即呈现枯黄状态，但由于其根系发达，草甘膦无法达到根除效果，药后60 d开始返青。除草剂合理混配有助于提高除草效果，并降低单一药剂的使用量和成本[25-27]。环嗪酮和草甘膦异丙胺盐混配的联合作用评价试验表明，环嗪酮和草甘膦异丙胺盐混配处理对斑茅的防治效果表现出增效或相加作用。特别是562.5 g/hm^{2}环嗪酮和384.375 g/hm^{2}草甘膦异丙胺盐混配处理对斑茅的防治效果表现为增效作用，不仅显著提高了斑茅的防治效果，还显著减少了环嗪酮和草甘膦异丙胺盐的使用量。这可能是速效性较好的内吸传导型草甘膦异丙胺盐促进了环嗪酮在靶标杂草斑茅体内的传导，进而提高了其对斑茅的防治效果。迄今，环嗪酮仅在森林、森林防火道、蓝莓和甘蔗上登记(http://www.chinapesticide.org.cn/)，推荐剂量为1 500～2 250 g/hm^2。研究报道环嗪酮在禾本科甘蔗属甘蔗植株和土壤中的半衰期低于13.88 d[18,28]。环嗪酮在草莓园使用后90 d和100 d，蓝莓样品中残留量均低于0.01 mg/kg，低于美国、日本和韩国制定的最大残留限量值(分别为0.6、0.2和0.05 mg/kg)[29]。草甘膦在玉米、柑橘、橡胶、桑、棉花、棉花免耕田、非耕地等作物田和场所登记，其中在棉花免耕田推荐剂量为922.5～1 537.5 g/hm^2。本研究发现，562.5 g/hm^{2}环嗪酮和384.375 g/hm^{2}草甘膦异丙胺盐混配对斑茅表现出优异防效，并显著降低了环嗪酮和草甘膦异丙胺盐的用量。然而，水利枢纽工程坝区邻近水体、生态敏感，本研究中的环嗪酮和草甘膦异丙胺盐混配剂对水利枢纽工程坝区生态环境的影响尚未明确。因此，进一步深入研究坝区除草剂的精准施用技术，探究环嗪酮和草甘膦异丙胺盐混配剂对环境和非靶标生物的潜在影响，对构建水利枢纽工程坝区斑茅的高效绿色防控技术具有重要意义。

参考文献 References

[1] 何顺长.云南省甘蔗野生资源植物开发利用前景的探讨[J].云南农业大学学报，1987，2(1)：105-111.HE S C.Discussion on the development and utilization prospect of sugarcane wild resources plants in Yunnan Province[J].Journal of Yunnan Agricultural University，1987，2(1)：105-111 (in Chinese).

[2] 沈万宽.斑茅的杂交利用价值探讨[J].甘蔗，2002，9(3)：1-5.SHEN W K.Discussion of the value of intergeneric crosses of *Saccharum*×*Erianthus*[J].Sugarcane，2002，9(3)：1-5 (in Chinese with English abstract).

[3] HU Y D，ZHANG L L，HU J G，et al.Assessments of *Erianthus arundinaceus* as a potential energy crop for bioethanol and biomethane production[J].BioResources，2017，12(4)：8786-8802.

[4] KOMOLWANICH T，TATIJARERN P，PRASERTWASU S，et al.Comparative potentiality of Kans grass (*Saccharum spontaneum*) and Giant reed (*Arundo donax*) as lignocellulosic feedstocks for the release of monomeric sugars by microwave/chemical pretreatment[J].Cellulose，2014，21(3)：1327-1340.

[5] DEVI C，KHWAIRAKPAM M.Management of lignocellulosic green waste *Saccharum spontaenum* through vermicomposting with cow dung[J].Waste management，2020，113：88-95.

[6] 张木清，洪艺珣，李奇伟，等.中国斑茅种质资源分子多态性分析[J].植物资源与环境学报，2004，6(1)：1-6.ZHANG M Q，HONG Y X，LI Q W，et al.Molecular polymorphic analyses for the germplasms of *Erianthus arundinaceus* collected in China[J].Journal of plant resources and environment，2004，6(1)：1-6 (in Chinese with English abstract).

[7] DENG Z H，ZHANG M Q，LIN W L，et al.Analysis of disequilibrium hybridization in hybrid and backcross progenies of *Saccharum officinarum*×*Erianthus arundinaceus*[J].Agricultural sciences in China，2010，9(9)：1271-1277.

[8] 黄玉新，张革民，周珊，等.斑茅割手密复合体与甘蔗杂交后代F_1改良效率分析[J].作物杂志，2025(3)：23-29.HUANG Y X，ZHANG G M，ZHOU S，et al.Analysis of the improvement efficiency of F_1 hybrids between intergeneric hybrid (*Tripidium arundinaceum*×*Saccharum spontaneum*) and sugarcane[J].Crops，2025(3)：23-29 (in Chinese with English abstract).

[9] 闫芸芸，刘健，甘礼惠，等.能源植物斑茅在不同生长时期的产量与组分变化[J].热带作物学报，2014，35(12)：2349-2354.YAN Y Y，LIU J，GAN L H，et al.Variation of yield and composition of energy plant *Erianthus arundinaceum* during different growth stages[J].Chinese journal of tropical crops，

2014,35(12):2349-2354 (in Chinese with English abstract).

[10] KUMAR R, APPUNU C, ANNA DURAI A, et al. Genetic confirmation and field performance comparison for yield and quality among advanced generations of *Erianthus arundinaceus*, *E. bengalense* and *Saccharum spontaneum* cyto-nuclear genome introgressed sugarcane intergeneric hybrids [J]. Sugar tech, 2015, 17(4): 379-385.

[11] PREMACHANDRAN M N, LEKSHMI M, VIOLA V R, et al. Androgenic diploids of *Erianthus* arundinaceus with paternal chloroplast and mitochondrial genomes in backcross progeny of *Saccharum*×*Erianthus* intergeneric hybrids [J]. Tropical plant biology, 2019, 12(1): 21-31.

[12] 王天顺,陈伟,蒋文艳,等.Cd、Zn、Pb、Cu复合污染对斑茅生长及吸收富集的影响[J].河南农业科学,2020,49(5):97-103. WANG T S, CHEN W, JIANG W Y, et al. Effects of combined pollution of Cd, Zn, Pb and Cu on growth and absorption enrichment responses of *Saccharum arundinaceum* Retz [J]. Journal of Henan agricultural sciences, 2020, 49(5): 97-103 (in Chinese with English abstract).

[13] MEENA M R, GOVINDARAJ P, KUMAR R A, et al. Biomass and energy potential of *Erianthus arundinaceus* and *Saccharum spontaneum*-derived novel sugarcane hybrids in rainfed environments [J/OL]. BMC plant biology, 2024, 24(1): 198 [2025-06-05]. https://doi.org/10.1186/s12870-024-04885-0.

[14] GONZÁLEZ-TORRALVA F, GIL-HUMANES J, BARRO F, et al. Target site mutation and reduced translocation are present in a glyphosate-resistant *Lolium multiflorum* Lam. biotype from Spain [J]. Plant physiology and biochemistry, 2012, 58: 16-22.

[15] YONCE M H, SKROCH W A. Control of selected perennial weeds with glyphosate [J]. Weed science, 1989, 37(3): 360-364.

[16] 马永林,马跃峰,郭成林,等.3种蔗田除草剂混配室内活性及对甘蔗安全性测定[J].广东农业科学,2014,41(3):90-93. MA Y L, MA Y F, GUO C L, et al. Activity test and sugarcane injury test of three herbicides combination for sugarcane in greenhouse [J]. Guangdong agricultural sciences, 2014, 41(3): 90-93 (in Chinese with English abstract).

[17] BARON J J, MONACO T J. Uptake, translocation, and metabolism of hexazinone in blueberry (*Vaccinium* sp.) and hollow goldenrod (*Solidago fistulosa*) [J]. Weed science, 1986, 34(6): 824-829.

[18] 黄文源,张盈,段婷婷,等.环嗪酮和敌草隆在甘蔗和土壤中的残留及消解动态[J].农药,2022,61(5):350-357. HUANG W Y, ZHANG Y, DUAN T T, et al. Residue and dissipation dynamics of diuron and hexazinone in sugarcane and soil [J]. Agrochemicals, 2022, 61(5): 350-357 (in Chinese with English abstract).

[19] PAN L, YU Q, HAN H P, et al. Aldo-keto reductase metabolizes glyphosate and confers glyphosate resistance in *Echinochloa colona* [J]. Plant physiology, 2019, 181(4): 1519-1534.

[20] PAN L, YU Q, WANG J Z, et al. An ABCC-type transporter endowing glyphosate resistance in plants [J/OL]. PNAS, 2021, 118(16): e2100136118 [2025-06-05]. https://doi.org/10.1073/pnas.2100136118.

[21] 陈景超,崔海兰,于海燕,等.南繁基地牛筋草对草甘膦的抗药性研究[J].植物保护,2024,50(3):131-136. CHEN J C, CUI H L, YU H Y, et al. Study of glyphosate-resistant *Eleusine indica* in seed breeding base in Hainan [J]. Plant protection, 2024, 50(3): 131-136 (in Chinese with English abstract).

[22] WHITWELL T, BANKS P, BASLER E, et al. Glyphosate absorption and translocation in bermudagrass (*Cynodon dactylon*) and activity in horsenettle (*Solanum carolinense*) [J]. Weed science, 1980, 28(1): 93-96.

[23] 高兴祥,张倩,李美,等.环磺酮与莠去津复配的室内活性及其田间防治效果[J].植物保护学报,2020,47(2):459-460. GAO X X, ZHANG Q, LI M, et al. Indoor bioactivities of mixture of tembotrione and atrazine and its weed control effects in the field [J]. Journal of plant protection, 2020, 47(2): 459-460 (in Chinese with English abstract).

[24] FENG T Q, WU L, LEI T H, et al. Elegance in simplicity: hollow mesoporous silica inhibits pyraclonil metabolism to boost its herbicidal efficacy on *Echinochloa crus-galli* [J/OL]. Chemical engineering journal, 2025, 526: 171284 [2025-06-05]. https://doi.org/10.1016/j.cej.2025.171284.

[25] 徐淑芬,苏少泉,翟琦,等.大豆苗前除草剂多元混用的研究[J].植物保护学报,1987,14(1):65-70. XU S F, SU S Q, ZHAI Q, et al. A study on the multicomponent application of preemergence herbicides in soybean fields [J]. Journal of plant protection, 1987, 14(1): 65-70 (in Chinese with English abstract).

[26] 刘亚光,唐兴佳,刘蓝坤,等.黑龙江省稗草对三种玉米田常用除草剂抗药性研究[J].东北农业大学学报,2018,49(4):29-39. LIU Y G, TANG X J, LIU L K, et al. Study on resistances of *Echinochloa crusgalli* (L.) Beauv to three herbicides of corn field in Heilongjiang Province [J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2018, 49(4): 29-39 (in Chinese with English abstract).

[27] 秦培文,徐婧,王丹,等.唑嘧磺草胺、丙炔氟草胺与乙草胺混用的联合作用类型及对大豆田杂草的活性[J].农药学学报,2021,23(1):124-130. QIN P W, XU J, WANG D, et al. Type of joint effect and herbicidal activity in soybean field of the combination of flumetsulam, flumioxazin and acetochlor [J]. Chinese journal of pesticide science, 2021, 23(1): 124-130 (in Chinese with English abstract).

[28] 谢梦醒.环嗪酮·敌草隆在甘蔗、土壤中的残留消解动态及敌草隆的土壤吸附行为研究[D].合肥:安徽农业大学,2010. XIE M X. Residual dissipation dynamics of hexazinone and diu-

ron in sugarcane and soil and adsorption behavior of diuron in soil[D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2010 (in Chinese with English abstract).

[29] 何红梅,徐玲英,张昌朋,等.环嗪酮在蓝莓上的残留及其膳食风险评估[J].食品科学,2024,45(1):204-209.HE H M,XU L Y,ZHANG C P,et al.Quantitation and dietary risk assessment of hexazinone residue in blueberry fruit[J].Food science,2024,45(1):204-209 (in Chinese with English abstract).

Synergistic herbicidal effects of mixing hexazinone with glyphosate on *Saccharum arundinaceum* Retz.

YU Chang′e[1], ZHONG Heng[1], WANG Kang[1], CHEN Guangyao[1],
WANG Wenzhuo[2,3], FENG Tangqi[2,3], MA Hongju[2,3]

1.*China Yangtze Power Co.,Ltd., Yichang 443000, China*;
2.*National Key Laboratory for Germplasm Innovation & Utilization of Horticultural Crops, Wuhan 430070, China*;
3.*College of Plant Science & Technology, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China*

Abstract To screen for high-efficacy herbicides controlling the invasive weed *Saccharum arundinaceum*, the herbicidal activities of hexazinone and glyphosate against *S. arundinaceum* were evaluated under both laboratory and field conditions, and the combined effects of their mixture were investigated. The results showed that treatment with 5% hexazinone granules (3 375 g/hm^2) resulted in chlorosis in *S. arundinaceum* by 30 days after treatment (DAT), complete plant death by 60 DAT, and no regrowth at 120 DAT. 41% glyphosate isopropylamine salt AS(2 306.25 g/hm^2) induced rapid yellowing by 14 DAT, but was followed by regrowth by 60 DAT.The synergistic mixture of hexazinone (562.5 g/hm^2) and glyphosate isopropylamine salt (384.375 g/hm^2) achieved the control efficacy of 100%, completely eradicating *S. arundinaceum*. It is indicated that the mixed formulation of hexazinone (562.5 g/hm^2) and glyphosate isopropylamine salt (384.375 g/hm^2) has excellent control efficacy against *S.arundinaceum*.

Keywords *Saccharum arundinaceum* Retz.; hexazinone; glyphosate isopropylamine salt; field efficacy trials; combined effect

(责任编辑:葛晓霞)