

麦草畏和 2,4-滴二甲胺盐在天然草原土壤和牧草中的消解动态研究

王玉灵, 牛树君, 赵峰, 余海涛, 张新瑞, 胡冠芳
(甘肃省农业科学院植物保护研究所, 甘肃 兰州 730070)

摘要: 除草剂混用组合麦草畏+2,4-滴二甲胺盐能有效防除天然草原优势毒草黄帚橐吾等, 施用除草剂后的安全放牧时间对确保家畜安全至关重要。为确定施用除草剂后的安全放牧时间和制定农药最大残留限量标准提供参考, 利用超高效液相色谱串联质谱检测方法, 对甘肃碌曲天然草原土壤和牧草中 480 g/L 麦草畏水剂和 55% 2,4-滴二甲胺盐水剂的残留消解动态进行了研究。结果表明, 480 g/L 麦草畏水剂和 55% 2,4-滴二甲胺盐水剂在天然草原土壤和牧草中的残留消解动态曲线均符合一级动力学方程, 在土壤中的半衰期分别为 1.8、4.7 d, 在牧草中的半衰期分别为 6.5、13.6 d。且 480 g/L 麦草畏水剂较 55% 2,4-滴二甲胺盐水剂更易在土壤和牧草中快速消解, 但二者均属于易降解除草剂。依据这 2 种除草剂在牧草中的残留量和国内外最大残留限量标准进行评价, 认为在天然草原喷施除草剂组合 480 g/L 麦草畏水剂+55% 2,4-滴二甲胺盐水剂防除草原优势毒草黄帚橐吾等时, 在施药后 30~45 d 放牧, 对牛、羊等家畜安全。

关键词: 麦草畏; 2,4-滴二甲胺盐; 天然草原; 土壤; 牧草; 消解动态

中图分类号: S812.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-2172(2025)09-0866-07

doi: 10.3969/j.issn.2097-2172.2025.09.015

Degradation Dynamics of Dicamba and 2,4-D dimethylamine Salt in the Soil and Pasture of Natural Grasslands

WANG Yuling, NIU Shujun, ZHAO Feng, YU Haitao, ZHANG Xinrui, HU Guanfang
(Institute of Plant Protection, Gansu Academy of Agricultural Sciences, Lanzhou Gansu 730070, China)

Abstract: Combination of dicamba and 2,4-D dimethylamine salt can control many species of poisonous weeds including *Ligularia virgaurea* in natural grasslands. The safe grazing interval after herbicide application is crucial for livestock safety. In order to ensure safe grazing interval after herbicides application and provide reference for establishing the maximum residue limit (MRL) standards of pesticides, the degradation dynamics of 480 g/L dicamba aqueous solution and 55% 2,4-D dimethylamine salt aqueous solution in soil and forage of natural grassland in Luqu, Gansu, were investigated using ultra-high performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry. Results showed that the dissipation dynamics of both 480 g/L dicamba aqueous solution and 55% 2,4-D dimethylamine salt aqueous solution in soil and forage followed the first-order kinetic equation. The half-lives in soil were 1.8 and 4.7 d, respectively, while those in forage were 6.5 and 13.6 d, respectively. Moreover, 480 g/L dicamba aqueous solution dissipated more rapidly in soil and forage than 55% 2,4-D dimethylamine salt aqueous solution, although both were easily degradable herbicides. Based on the residue levels of these two herbicides in forage and the evaluation against domestic and international MRL standards, it is suggested that grazing can be safely carried out 30 to 45 d after spraying the herbicide mixture of 480 g/L dicamba aqueous solution + 55% 2,4-D dimethylamine salt aqueous solution in natural grasslands to control dominant poisonous weeds such as *Ligularia virgaurea*.

Key words: Dicamba; 2,4-D Dimethylamine salt; Natural grassland; Soil; Forage; Degradation dynamic

天然草原是畜牧业发展的物质基础, 也是维持自然生态平衡的重要成分^[1]。近几十年来, 受超载放牧、滥垦滥挖、草原干旱、人口增长等因素影响, 全国重点牧区 90% 的可利用天然草原呈

收稿日期: 2024-09-14; 修订日期: 2025-05-15

基金项目: 甘肃省 2020 年草原生态修复治理科技支撑项目; 大熊猫祁连山国家公园(甘肃片区)科技创新联盟科技支撑项目(GYCX[2020]03-1); 国家现代农业产业技术体系(CARS-14-1-22)。

作者简介: 王玉灵(1988—), 女, 甘肃武山人, 助理研究员, 硕士, 研究方向为农田杂草和植物源农药。Email: wyl19880922@126.com。

通信作者: 胡冠芳(1963—), 男, 山东郯城人, 研究员, 博士, 研究方向为农田杂草和植物源农药。Email: huguanfang@126.com。

执笔人: 牛树君。

现不同程度退化,其中严重退化面积高达30%,并且每年以0.5%的速度递增,年均退化面积约达200万 hm^2 [2-5]。瑞香狼毒(*Stellera chamaejasme* L.)、黄花棘豆(*Oxytropis ochrocephala* Bunge)、披针叶野决明(*Thermopsis lanceolata* R. Br.)、黄帚橐吾[*Ligularia virgaurea*(Maxim.) Mattf.]、狼毒大戟(*Euphorbia fischeriana* Steud.)等草原毒草根系发达、抗逆性强(耐旱、耐寒、耐瘠薄、耐盐碱),较之优良牧草具有更强的环境适应性,而牧草的逐年减少有利于毒草的大量滋生繁衍,草原逆向演替造成草原毒草化,毒草的严重危害是造成草原生态失衡的重要生态学问题之一,是草原退化的一个重要指标,严重制约了草原畜牧业经济的可持续发展,给草原生态环境平衡和牧区社会稳定发展带来极为不利的影[1,4]。

麦草畏(Decamba)属苯甲酸类内吸传导型除草剂,用于防除禾本科作物田一年生和多年生阔叶杂草,草原上主要用于防除疯草类毒草如黄花棘豆(*Oxytropis ochrocephala* Bunge)等[5],其易挥发,在高温条件下施用易对阔叶作物造成漂移药害。2,4-滴二甲胺盐(2,4-D dimethyl amine salt)属苯氧乙酸类激素型选择性除草剂,用于防除水稻、小麦、玉米、高粱、甘蔗等禾本科作物田阔叶杂草,其对水生生物有毒,可能对水体环境产生不良影响,目前未见其用于防除草原毒草的文献报道。国内于红妍等[6]、牛艳等[7]、邢平等[8]、王秀梅等[9]、王晓菁等[10]研究了氨基吡啶酸和二氯吡啶酸在植株和土壤中的消解动态,牛树君等[11]探明了2,4-滴二甲胺盐在甘肃省肃南裕固族自治县天然草原土壤和牧草中的残留消解动态,而关于麦草畏在植物和土壤中的消解动态研究,国内外均未见文献报道。近年来,我们在从事天然草原毒草综合防控技术研究过程中,发现了除草剂480 g/L麦草畏水剂+55% 2,4-滴二甲胺盐水剂混用组合可有效防除天然草原毒草黄帚橐吾,且对可食牧草安全,因此确定施药后的安全放牧时间对其推广应用具有重要指导意义。基于国内外尚缺乏麦草畏和2,4-滴二甲胺盐在牧草中的残留消解动态参考数据,为此,我们开展了这2种除草剂在天然草原牧草中的残留消解动态研究,旨在确定施用除草剂后的安全放牧时间,同时评

价2种除草剂的残留期长短,为制定农药最大残留限量标准提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

1.1.1 供试仪器设备 Waters ACQUITY 超高效液相色谱仪、Waters XEVO TQ-XS 三重四级杆质谱仪,美国Waters公司;JY2002电子分析天平(百分之一),上海舜宇恒平科学仪器有限公司;UMV2多管旋涡混合器,北京优晟联合科技公司;ZP-200振荡器,太仓市实验设备厂;ROBOT COUPE-R8切割机,ROBOT COUPE公司;TDZ5-WS台式低速离心机、H1650-W台式高速离心机,长沙湘仪离心机仪器有限公司;50 mL塑料离心管、精密移液枪、Master-S30UV纯水机以及其他实验室常用仪器设备,上海和泰仪器有限公司;0.22 μm 尼龙有机滤膜、2 mL净化管(含50 mg PSA+10 mg PC+150 mg无水 MgSO_4)、2 mL净化管(含50 mg PSA+150 mg无水 MgSO_4),博纳艾杰尔科技有限公司。卫士牌WS-18 D型背负式电动喷雾器(双圆锥雾喷头,喷雾压力4 MPa),山东卫士植保机械有限公司生产。

1.1.2 供试试剂及药剂 供试试剂为二氯吡啶酸标准品,100.2 $\mu\text{g}/\text{mL}$,北京曼哈格生物科技有限公司;氨基吡啶酸标准品,99.8 $\mu\text{g}/\text{mL}$,北京曼哈格生物科技有限公司;麦草畏标准品,100.2 $\mu\text{g}/\text{mL}$,北京曼哈格生物科技有限公司;2,4-滴二甲胺盐标准品,100 $\mu\text{g}/\text{mL}$,农业农村部环境保护科研监测所;甲酸,≥99%,上海麦克林生化科技有限公司;乙腈(色谱纯),≥99.9%,Sigma-Aldrich公司;去离子水、氯化钠(分析纯),国药集团化学试剂有限公司。供试药剂为55% 2,4-滴二甲胺盐水剂(安徽兴隆化工有限公司生产)和480 g/L麦草畏水剂(浙江拜克生物科技有限公司生产)。供试喷雾助剂为“迈丝”植物油增效剂(北京广源益农化学有限责任公司生产)。

1.1.3 防除对象 草原优势毒草黄帚橐吾[*Ligularia virgaurea*(Maxim.) Mattf.]。

1.2 试验地概况

试验地位于甘南藏族自治州碌曲县玛艾镇天然草原(34° 33' 33" N、102° 12' 13" E)。当地海拔3 308 m,年均日照时数2 357.8 h,年降水量

633 ~ 782 mm, 其中 7—9 月的降水量占 56.53%, 年蒸发量 1 200 ~ 1 350 mm, 年均气温 3.3 °C, 无霜期 56 d。土壤类型为亚高山草甸土, 属于川西藏东高原高寒灌丛草甸区, 主要植物种类有垂穗披碱草 (*Elymus nutans* Griseb.)、草地早熟禾 (*Poa pratensis* var. *pratensis*)、细叶珠芽蓼 (*Polygonum viviparum* var. *angustum*)、异针茅 (*Stipa aliena* Keng)、羊茅 (*Festuca ovina* L.)、细裂委陵菜 (*Potentilla chinensis* Ser. var.)、秦艽 (*Gentiana macrophylla* Pall.)、黄帚橐吾 [*Ligularia virgaurea* (Maxim.) Mattf.]、箭叶橐吾 [*Ligularia sagitta* (Maxim.) Mattf.]、长叶碱毛茛 [*Halerpestes ruthenica* (Jacq.) Ovcz.]、瑞香狼毒 (*Stellera chamaejasme* L.)、龙胆 (*Gentiana scabra* Bunge)、马先蒿 (*Pedicularis sylvatica* L.)、山萇蓉 [*Anisodus tanguticus* (Maxim.) Pascher]、毛茛 (*Ranunculus japonicus* Thunb.) 等。

1.3 试验方法

1.3.1 施药方法 在电动喷雾器中先加清水 7.5 L, 然后依次加入 55% 2, 4-滴二甲胺盐水剂 25 mL、480 g/L 麦草畏水剂 20 mL、植物油增效剂 30 mL, 再将清水加至 15.0 L 均匀喷施在预先划出的试验区内, 试验区面积 333.3 m²。相隔 600 m 设置等面积不施药区作为对照。于 2021 年 7 月 23 日第 1 次施药, 施药当天天气晴朗, 气温 10 ~ 23 °C、湿度 60% ~ 65%、风力 0 ~ 1 级。施药区药剂施用剂量为 55% 2, 4-滴二甲胺盐水剂 750 mL/hm²+480 g/L 麦草畏水剂 600 mL/hm²+ 植物油增效剂 900 mL/hm² 兑水 450 kg, 对照不施药区喷施等量清水。

1.3.2 取样方法 受雨雪天气影响, 取样时间未严格按照标准 NY/T 788—2018《农药残留试验准则》规定的采用间隔期为施药后 0、1、3、7、14、21、30、45、60 d 执行, 在其基础取样时间略有改动^[11]。即施药后 0、1、3、5、7、21、27、37、50、60 d 每 667 m² 按对角线 5 点取样, 每点剪取牧草地上部分 300 g, 将 5 点牧草样品剪成长 2 ~ 3 cm

的小段后混合均匀, 用四分法称取 200 g 样品 2 份, -20 °C 条件下冷冻保存待测。同时在上述 5 点各挖取土样(深度 0 ~ 10 cm)300 g, 混合后用细筛筛除石块、枯草、草根等杂质, 用四分法称取 200 g 样品 2 份, -20 °C 条件下冷冻保存待测。注意上次取样之处下次不能再取, 应选取新的样点。在不施药对照区按上述方法采集和保存牧草和土壤样品, 只取样 1 次。

1.4 样品提取与纯化

1.4.1 土壤 称取 10.0 g 土壤样品于 50 mL 离心管中, 依次加入水 1.0 mL、乙腈 20.0 mL 和甲酸 2.0 mL, 涡旋提取 5 min, 加入 NaCl 3 g 后涡旋 1 min, 以 4 000 r/min 离心 5 min, 取 1.5 mL 上清液于 2 mL 离心管中(含 50 mg PSA+150 mg 无水硫酸镁), 涡旋 1 min 后以 12 000 r/min 离心 2 min, 过 0.22 μm 尼龙滤膜, 待测。

1.4.2 牧草 称取 3.0 g 牧草样品于 50 mL 离心管中, 加入水 20.0 mL 后 240 r/min 振荡 10 min, 再依次加入乙腈 20.0 mL 和甲酸 2.0 mL, 240 r/min 振荡 1 h, 加入 NaCl 5 g 后 240 r/min 振荡 5 min, 以 4 000 r/min 离心 5 min, 取 1.5 mL 上清液于 2.0 mL 离心管中(含 50 mg PSA+10 mg PC+150 mg 无水硫酸镁), 涡旋 1 min 后以 12 000 r/min 离心 3 min, 过 0.22 μm 尼龙滤膜, 部分样品以乙腈为溶剂, 稀释样品, 混匀后待测。牧草样品 0 ~ 1 d 稀释 50 倍, 3 ~ 7 d 稀释 10 倍, 21 ~ 67 d 未稀释。

1.5 色谱/质谱条件

色谱柱: Waters ACQUITY BEH C₁₈ 柱 (2.1 mm × 100 mm, 粒径 1.7 μm); 进样量: 土壤样品 1 μL; 牧草样品 3 μL; 流动相: A-乙腈/B-0.1% 甲酸水; 流速: 0.3 mL/min; 柱箱温度: 40 °C^[11]。

液相梯度洗脱程序: 0 min 时, 为 10%A; 0 ~ 3.0 min 时, 10%A ~ 90%A; 3.0 ~ 4.0 min 时, 90%A; 4.0 ~ 4.2 min 时, 90%A ~ 10%A; 4.2 ~ 6.0 min 时, 10%A^[11]。

表 1 麦草畏和 2, 4-滴二甲胺盐质谱检测参数

除草剂	保留时间 /min	定性离子对 /(m/z)	定量离子对 /(m/z)	锥孔电压 /V	碰撞能量 /V
麦草畏	2.55	218.9/175.4	218.9/175.4	4	10
		218.9/144.9		4	14
2,4-滴二甲胺盐	2.84	218.9/124.9	218.9/160.9	18	34
		218.9/160.9		18	18

离子源为电喷雾离子源 ESI, 扫描方式为正离子源 / 负离子源, 毛细管电压为 3.0 kv, 去溶剂气温度为 400 °C, 去溶剂气流速为 700 L/h, 离子源温度为 150 °C; 检测方式为多重反应检测(MRM)^[11]。具体质谱检测参数见表 1。

1.6 回收率与相对标准偏差(RSD)的测定

在空白土壤样品中分别添加浓度为 0.01、0.10、0.20 mg/kg 的麦草畏和 2, 4-滴二甲胺盐混合标准溶液, 进行添加回收实验^[11], 每浓度重复 5 次, 在 1.5 色谱 / 质谱条件下测定土壤中除草剂的回收率和相对标准偏差。在空白牧草样品中分别添加浓度为 0.5、1.0 mg/kg 的麦草畏和 2, 4-滴二甲胺盐混合标准溶液, 进行添加回收实验^[11], 每浓度重复 3 次, 在 1.5 色谱 / 质谱条件下测定牧草回收率中除草剂的回收率和相对标准偏差。

1.7 残留量计算

样品残留量依据外标法计算^[12], 其计算公式为:

$$R = A_{\text{样}} / A_{\text{标}} \times C_{\text{标}} \times V_{\text{定}} \times f / m$$

式中, R 为残留量 (mg/kg), $A_{\text{样}}$ 为样品峰面积, $A_{\text{标}}$ 为标样峰面积, $C_{\text{标}}$ 为标样浓度, $V_{\text{定}}$ 为定容体积, f 为稀释倍数, m 为样品称样量。

2 结果与分析

2.1 制作标准曲线

将麦草畏和 2, 4-滴二甲胺盐混合标准溶液用乙腈稀释配得一系列标准溶液, 浓度分别为 5、10、50、100、500 ng/mL, 在 1.5 色谱 / 质谱条件

下进行测定, 以溶液浓度与检测离子峰面积作标准曲线, 其中 y 为峰面积, x 为标准溶液浓度, 麦草畏线性方程为 $y=14.361x-20.357$, 相关系数(R^2)为 0.999 7; 2, 4-滴二甲胺盐线性方程为 $y=627.25x-2\ 201.4$, 相关系数(R^2)为 0.999 8。

2.2 麦草畏和 2, 4-滴二甲胺盐的回收率与相对标准偏差(RSD)

从表 2 可以看出, 当在土壤中添加麦草畏和 2, 4-滴二甲胺盐混合标准溶液浓度为 0.01、0.10、0.20 mg/kg 时, 麦草畏回收率介于 71.5% ~ 107.5%, 相对标准偏差为 4.9% ~ 8.9%; 2, 4-滴二甲胺盐回收率介于 76.5% ~ 87.5%, 相对标准偏差为 4.0% ~ 5.1%, 二者均符合农药残留检测要求。

从表 3 可以看出, 当在牧草中添加麦草畏和 2, 4-滴二甲胺盐混合标准溶液浓度为 0.5、1.0 mg/kg 时, 麦草畏的回收率介于 91.2% ~ 109.7%, 相对标准偏差为 1.7%、6.9%; 2, 4-滴二甲胺盐回收率介于 103.0% ~ 111.1%, 相对标准偏差为 1.7%、2.7%, 符合农药残留检测要求。

2.3 残留消解动态

碌曲县玛艾镇天然草原除草剂残留检测结果(表 4、表 5)表明, 土壤中麦草畏和 2, 4-滴二甲胺盐的残留量均于施药后 1 d 达到最大值, 消解规律符合动力学一级方程, 其中麦草畏一级动力学方程为 $y=0.579\ 2e^{-0.391x}$, 决定系数为 0.924 4, 半衰期为 1.8 d; 2, 4-滴二甲胺盐一级动力学方程为 $y=0.662\ 5e^{-0.146x}$, 决定系数为 0.992 0, 半

表2 土壤中2种除草剂的添加回收率与相对标准偏差(RSD)

除草剂	添加浓度 (mg/kg)	回收率/%					平均值	相对标准偏差(RSD) /%
		1	2	3	4	5		
麦草畏	0.01	86.9	106.2	107.5	95.7	104.6	100.2	8.7
	0.10	88.9	73.3	76.3	71.5	75.2	77.0	8.9
	0.20	82.0	82.4	90.3	89.6	82.4	85.3	4.9
2,4-滴二甲胺盐	0.01	87.0	92.3	81.5	84.3	87.5	86.5	4.6
	0.10	81.1	86.2	76.5	85.8	86.0	83.1	5.1
	0.20	80.9	78.4	84.0	81.8	87.1	82.4	4.0

表3 牧草中2种除草剂的添加回收率与相对标准偏差(RSD)

除草剂	添加浓度 (mg/kg)	回收率/%			平均值	相对标准偏差(RSD) /%
		1	2	3		
麦草畏	0.5	109.7	95.7	101.7	102.4	6.9
	1.0	93.4	94.3	91.2	93.0	1.7
2,4-滴二甲胺盐	0.5	107.5	109.6	111.1	109.4	1.7
	1.0	103.0	108.3	103.7	105.0	2.7

表 4 土壤中麦草畏和 2, 4-滴二甲胺盐的残留量

施药后取样时间 /d	麦草畏 /(mg/kg)	2,4-滴二甲胺盐 /(mg/kg)
0	0.418	0.562
1	0.511	0.659
3	0.132	0.385
5	0.068	0.319
7	0.047	0.238
21	<0.01	0.025
27	<0.01	0.015
37	<0.01	<0.01
50	<0.01	<0.01
60	<0.01	<0.01
消解方程	$y=0.579\ 2e^{-0.391x}(R^2=0.924\ 4)$	$y=0.662\ 5e^{-0.146x}(R^2=0.992\ 0)$
半衰期/d	1.8	4.7

表 5 牧草中麦草畏和 2, 4-滴二甲胺盐的残留量

施药后取样时间 /d	麦草畏 /(mg/kg)	2,4-滴二甲胺盐 /(mg/kg)
0	39.3	72.0
1	26.9	47.3
3	4.0	4.4
5	5.2	4.7
7	3.1	2.8
21	1.7	2.1
27	1.4	1.7
37	<0.5	1.2
50	<0.5	<0.5
60	<0.5	<0.5
消解方程	$y=13.766e^{-0.106x}(R^2=0.869\ 3)$	$y=11.06e^{-0.051x}(R^2=0.861\ 9)$
半衰期/d	6.5	13.6

衰期为 4.7 d。牧草中麦草畏和 2, 4-滴二甲胺盐的残留量在施药后 0 d 达到最大值, 消解规律符合动力学一级方程, 其中麦草畏一级动力学方程为 $y=13.766e^{-0.106x}$, 决定系数为 0.869 3, 半衰期为 6.5 d, 药后 37 d 牧草中的残留量为 <0.5 mg/kg; 2, 4-滴二甲胺盐一级动力学方程为 $y=11.06e^{-0.051x}$, 决定系数为 0.861 9, 半衰期为 13.6 d, 药后 50 d 牧草中的残留量 <0.5 mg/kg。依据半衰期评价, 麦草畏在土壤和牧草中的消解速度快于 2, 4-滴二甲胺盐, 但二者均属于易降解除草剂。

麦草畏在土壤中的原始沉积量为 0.418 mg/kg, 施药后 21 d 的残留量 <0.01 mg/kg, 消解率达

97.61% 以上; 在牧草中的原始沉积量为 39.300 mg/kg, 施药后 37 d 的残留量为 <0.5 mg/kg, 消解率达 98.30% 以上。2, 4-滴二甲胺盐在土壤中的原始沉积量为 0.562 mg/kg, 施药后 37 d 的残留量 <0.01 mg/kg, 消解率达 98.22% 以上; 在牧草中的原始沉积量为 72.000 mg/kg, 施药后 50 d 的残留量 <0.5 mg/kg, 消解率达 99.31% 以上。

我国食品安全国家标准《GB2763—2021 食品中农药最大残留限量标准》规定, 2, 4-滴二甲胺盐在小麦中的最大残留限量为 2.0 mg/kg, 麦草畏在玉米中为 0.5 mg/kg。据 WTO/FTA 咨询网报道, 2022 年加拿大相关部门制定了麦草畏最大残留限

量, 认定在未经加工农产品或加工商品中麦草畏最大残留限量为 1.0 mg/kg^[13]。依据麦草畏和 2, 4-滴二甲胺盐在牧草中的残留量和国内外最大残留限量标准评价, 在天然草原喷施除草剂组合 55% 2, 4-滴二甲胺盐水剂 750 mL/hm²+480 g/L 麦草畏水剂 600 mL/hm² 兑水 450 kg 防除草原优势毒草黄帚橐吾等时, 在施药后 30~40 d 即可放牧, 且对牛、羊等家畜安全。

3 讨论与结论

黄帚橐吾为菊科(Asteraceae)橐吾属(*Ligularia*)多年生草本植物, 是高寒牧区高寒草甸上的优势毒草, 牛羊采食后可致中毒^[14]。其种子和地下根状茎均可繁殖, 种群滋生蔓延可快速形成优势群落^[15-16], 进而降低植物物种多样性, 加剧高寒草地退化^[17], 其大量扩散是草地退化的标志之一^[18]。李小伟等^[19]调查结果表明, 甘南州天然草场分布较广, 其危害最为严重的毒草是黄帚橐吾和箭叶橐吾, 密度最高可达 120 株/m²。甘肃省天然草原中黄帚橐吾和箭叶橐吾的危害面积达 43.67 万 hm², 占全省毒草危害面积的 24.86%^[20]。黄帚橐吾除与可食牧草争取肥、水、光、热资源外, 还能通过化感作用抑制牧草生长^[21], 造成天然草原生产力下降、品质退化^[22], 基于此, 黄帚橐吾的科学防控对畜牧业生产和草原生态系统修复具有重要意义。

目前, 我国大多数草场采取轮牧和划区放牧的方式应对草原退化、毒杂草灾害和过度载畜之问题, 轮牧和划区放牧也为草原毒杂草的防控提供了适宜的施药时期, 在确保对家畜安全的同时能有效防控毒杂草的危害, 实现草原生态可持续发展 and 永续利用。

影响除草剂降解的因素很多, 诸如除草剂剂型、剂量与施用方式、植物(作物)种类与环境因素(温度、湿度、光照、土壤有机质含量及含水量、土壤 pH、土壤微生物等)。本研究结果表明, 2, 4-滴二甲胺盐在土壤中的半衰期为 4.7 d, 与牛树君等^[11]利用肃南土壤样品研究获得的半衰期 8.6 d 存在较大差异, 充分证明除草剂的降解受多种因素之影响, 而本研究尚未涉及环境因素对除草剂降解影响之研究内容。在除草剂残留的降解方面, 今后之研究方向是探明除草剂在草原土壤、

水体、大气中的迁移、吸收、降解(光解、水解、微生物降解)规律, 除草剂在可食牧草不同部位(根、茎、叶、花、果实)的吸收、转运及代谢途径^[23]; 筛选高效降解菌(如假单胞菌、芽孢杆菌)、酶(如水解酶、氧化还原酶)促进除草剂的快速降解, 减轻残留污染, 有效保护生态环境^[24-26]; 研究施用生物炭等农艺措施对除草剂残留的削减作用^[27]; 研究以 β -环糊精和氧化石墨烯为原料制备的气凝胶对长残留除草剂的吸附效应, 为除草剂污染水环境修复提供有应用前景的新方法^[28]。

目前, 我国尚未制定麦草畏和 2, 4-滴二甲胺盐在牧草中的最大残留限量。本研究检测结果表明, 麦草畏和 2, 4-滴二甲胺盐在牧草中的检测极限(最小检测浓度)为 0.5 mg/kg。依据麦草畏和 2, 4-滴二甲胺盐在牧草中的残留量、检测极限和国内外最大残留限量标准, 建议麦草畏和 2, 4-滴二甲胺盐在牧草中的最大残留限量暂定为 1.0 mg/kg 和 2.0 mg/kg。

采用超高效液相色谱串联质谱检测方法, 研究了甘肃碌曲县天然草原土壤和牧草中麦草畏和 2, 4-滴二甲胺盐的残留消解动态。结果表明, 麦草畏和 2, 4-滴二甲胺盐在天然草原土壤和牧草中的残留量随施药后时间的延长而逐渐降低, 消解动态曲线符合一级动力学方程, 2 种除草剂在土壤中的半衰期分别为 1.8、4.7 d, 在牧草中的半衰期分别为 6.5、13.6 d, 虽然麦草畏在土壤和牧草中的消解速度快于 2, 4-滴二甲胺盐, 但二者均属于易降解除草剂。依据麦草畏和 2, 4-滴二甲胺盐在牧草中的残留量和国内外最大残留限量标准评价, 在天然草原喷施 55% 2, 4-滴二甲胺盐水剂 750 mL/hm²+480 g/L 麦草畏水剂 600 mL/hm² 兑水 450 kg 防除黄帚橐吾等, 在施药后 30~40 d 放牧对牛、羊等家畜安全, 该结论对草原优势毒草黄帚橐吾的科学防控具有重要指导意义。

参考文献:

- [1] 严杜建, 吴晨晨, 赵宝玉. 中国天然草地毒草灾害分布与防控技术的研究进展[J]. 贵州农业科学, 2016, 44(1): 104-109.
- [2] 中华人民共和国农业部. 中国草原发展报告[M]. 北京: 中国农业出版社, 2011.
- [3] 周启武, 赵宝玉, 路浩, 等. 中国西部天然草地疯草生态及动物疯草中毒研究与防控现状[J]. 中国农业

- 科学, 2013, 46(6): 1280-1296.
- [4] 赵宝玉, 刘忠艳, 万学攀, 等. 中国西部草地毒草危害及治理对策[J]. 中国农业科学, 2008, 41(10): 3094-3103.
- [5] 杨晨, 沙日扣, 苏日拉格, 等. 中国天然草原毒害草种类分布、毒性及防控及利用研究进展[J]. 家畜生态学报, 2022, 43(11): 88-96.
- [6] 于红妍, 候秀敏, 唐俊伟. 迈士通和紫薇清在高寒牧区牧草和土壤中残留的研究[J]. 青海草业, 2017, 26(2): 6-9.
- [7] 牛艳, 赵子丹, 姜瑞, 等. 氨基吡啶酸在油菜和土壤中的消解动态[J]. 江苏农业科学, 2013, 41(10): 306-308.
- [8] 邢平, 徐艳飞. 氨基吡啶酸在小麦、植株和土壤中的消解和残留[J]. 现代农药, 2019, 18(2): 41-44.
- [9] 王秀梅, 候志广, 禄忠斌, 等. 二氯吡啶酸在油菜及土壤中的残留动态研究[J]. 吉林农业大学学报, 2006, 28(4): 430-432.
- [10] 王晓菁, 牛艳, 赵子丹, 等. 二氯吡啶酸在油菜和土壤中的消解动态研究[J]. 河南农业科学, 2013, 42(12): 94-97.
- [11] 牛树君, 王玉灵, 赵峰, 等. 氨基吡啶酸、二氯吡啶酸和 2, 4-滴二甲胺盐在天然草原土壤和牧草中的消解动态[J]. 植物保护, 2025, 51(2): 141-146.
- [12] 王玉灵, 胡冠芳, 牛树君, 等. 2 种除草剂对胡麻田杂草的示范效果及其在胡麻籽中的残留量检测[J]. 安徽农业科学, 2018, 46(28): 132-136.
- [13] 中华人民共和国商务部. 加拿大制定麦草畏最大残留限量[EB/OL]. (2022-02-11)[2025-04-10]. <https://www.canada.ca/en/health-canada/services/consumer-product-safety/pesticides-pest-management/public-protecting-your-health-environment/pesticides-food/maximum-residue-limits-pesticides.html>.
- [14] 林永明. 牛羊黄帚囊草中毒病的发生与诊治[J]. 中国畜禽种业, 2011, 7(2): 73.
- [15] 余钱雯, 王玉琴, 王宏生, 等. 放牧和围封下黄帚囊草退化型草地植物化学计量学及土壤养分特征的变化[J]. 中国草地学报, 2023, 45(6): 73-82.
- [16] 马瑞君, 杜国祯, 刘左军, 等. 青藏高原东部三种囊吾属植物更新对策的研究—I 从开花到种子萌发[J]. 草业学报, 2002, 11(2): 29-36.
- [17] 黄立铭. 黄南州天然草地毒草调查与防治[J]. 四川草原, 2006(5): 24-26.
- [18] 石国玺. 高寒草甸退化指示物质黄帚囊草的菌根生态学[D]. 兰州: 兰州大学, 2014.
- [19] 李小伟, 孙坤, 马瑞君, 等. 甘南州天然草场有毒植物及其防治对策[J]. 草业科学, 2003, 20(10): 60-63.
- [20] 郭亚洲, 张睿涵, 孙瞰, 等. 甘肃天然草地毒草危害、防控与综合利用[J]. 草地学报, 2017, 25(2): 243-256.
- [21] 王玉琴, 宋梅玲, 周睿, 等. 高寒草甸不同黄帚囊草密度斑块的植物群落结构特征[J]. 草地学报, 2022, 30(9): 2264-2272.
- [22] 吕晓英, 吕胜利. 甘南州草地畜牧业的可持续性发展问题[J]. 草业科学, 2002, 19(7): 1-4.
- [23] 徐从玲, 杨勇, 菊超, 等. 咪唑啉酮类除草剂残留污染修复研究进展[J]. 现代农药, 2023, 22(5): 37-45; 48.
- [24] 王新, 侯佳文, 柳文睿, 等. 残留酰胺类除草剂降解的研究进展[J]. 湖北农业科学, 2021, 60(7): 10-14; 29.
- [25] 王新, 倪子钧, 李兆兴, 等. 磺酰胺类除草剂的微生物降解研究进展[J]. 环境化学, 2020, 39(5): 1357-1367.
- [26] 杨峰山, 杨思源, 孙丛, 等. 水稻田除草剂微生物降解的研究进展[J]. 中国农学通报, 2021, 37(6): 123-129.
- [27] 路忻, 李祥华, 马双龙, 等. 磁性生物炭材料降解土壤中残留农药的实验研究[J]. 环境卫生工程, 2022, 30(3): 46-53.
- [28] YAO T, CHEN H, LUO Y. Preparation of β -cyclodextrin-reduced graphene oxide aerogel and its application for adsorption of herbicides[J]. Journal of Cleaner Production, 2024, 468(25): 143109.