DOI: 10. 11686/cyxb2025386 http://cyxb. magtech. com. cn
杨陶阳, 苏日力格, 乌日力格, 等. 狼毒大戟的化学防除效果及对其他植物群落的影响. 草业学报, 2026, 35(9): 129－141.
YANG Tao-yang, Surilige, Wurilige, *et al*. Efficacy of chemical control on *Euphorbia fischeriana* and its effect on other plant communities. Acta Prataculturae Sinica, 2026, 35(9): 129－141.

狼毒大戟的化学防除效果及对其他植物群落的影响

杨陶阳[1,2], 苏日力格[2,3], 乌日力格[2,3], 姜娜[2], 杨殿林[2], 红梅[4], 张海芳[2*], 赵建宁[1,2*]
(1. 东北农业大学资源与环境学院, 黑龙江 哈尔滨 150006; 2. 农业农村部环境保护科研监测所, 天津 300191; 3. 内蒙古师范大学生命科学与技术学院, 内蒙古 呼和浩特 010022; 4. 内蒙古民族大学农学院, 内蒙古 通辽 028043)

摘要: 狼毒大戟扩散蔓延是草地退化的典型标志, 严重威胁草地生态功能与畜牧业可持续发展。为筛选可高效、安全防除狼毒大戟的除草剂, 本研究以清水为对照(CK), 选用7种除草剂, 于狼毒大戟盛花期喷施, 30 d后评估了防除效果, 翌年返青期测定狼毒大戟的再生力, 施药当年和翌年植物生长旺盛期调查植物群落特征, 系统分析除草剂对植物群落结构、多样性和生产力的影响, 以此评估施用除草剂对其他植物的安全性。结果表明: 1)短期防效方面, 三氯吡氧乙酸和草甘膦对狼毒大戟的株防效与鲜重防效均高达100%; 相比之下, 其余5种除草剂的株防效和鲜重防效均低于65%, 防除效果不佳; 2)持续抑制能力方面, 三氯吡氧乙酸处理能完全抑制翌年狼毒大戟的萌发和生长, 而翌年草甘膦处理区的狼毒大戟种群密度恢复至1. 76 株·m^{-2}, 地下休眠芽再生力强; 3)三氯吡氧乙酸处理提升了莎草科和禾本科植物的重要值及生物量, 施药当年群落Shannon-Wiener指数和Pielou均匀度指数分别较CK显著提高7. 6%和15. 46%; 至翌年, 三氯吡氧乙酸处理区禾本科与莎草科生物量合计占比达88. 77%, 促进群落向禾本科－莎草科优势方向稳定演替, 但多样性指数与对照无显著差异; 4)草甘膦处理严重抑制了非靶标植物生长, 导致杂类草、莎草科和禾本科植物的生物量较CK分别显著下降了86. 05%、63. 58%和90. 80%; 同时, 物种丰富度指数和Shannon-Wiener指数也分别显著下降了54. 44%和20. 58%; 5)TOPSIS-多准则决策模型分析表明, 三氯吡氧乙酸防除狼毒大戟兼具高效、可持续、对非靶标植物安全的优点, 可在防除狼毒大戟的同时促进植物群落恢复, 是治理狼毒大戟型退化草地的优选方案。

关键词: 狼毒大戟; 化学防除; 三氯吡氧乙酸; 植物群落结构; 生态恢复

Efficacy of chemical control on *Euphorbia fischeriana* and its effect on other plant communities

YANG Tao-yang[1,2], Surilige[2,3], Wurilige[2,3], JIANG Na[2], YANG Dian-lin[2], HONG Mei[4], ZHANG Hai-fang[2*], ZHAO Jian-ning[1,2*]
1. *College of Resources and Environment*, *Northeast Agricultural University*, *Harbin* 150006, *China*; 2. *Agro-Environmental Protection Institute*, *Ministry of Agriculture and Rural Affairs*, *Tianjin* 300191, *China*; 3. *College of Life Sciences and Technology*, *Inner Mongolia Normal University*, *Hohhot* 010022, *China*; 4. *College of Agriculture*, *Inner Mongolia Minzu University*, *Tongliao* 028043, *China*

Abstract: The proliferation of *Euphorbia fischeriana* is a common indicator of grassland degradation, posing a serious threat to ecosystem functions and the sustainable development of animal husbandry. To screen for herbicides that can efficiently and safely control *E. fischeriana*, this study used pure water as a control (CK) and seven

收稿日期: 2025-09-23; 改回日期: 2025-11-27
基金项目: 国家重点研发计划(2023YFF1304102)和内蒙古师范大学研究生科研创新基金资助项目(GXJJS25033)资助。
作者简介: 杨陶阳(2000－), 女, 广西来宾人, 硕士。E-mail: yangtaoyang0909@163. com
*通信作者 Corresponding author. E-mail: zhanghaifang01@caas. cn; zhaojianning@caas. cn

herbicides were applied as treatments during the full bloom growth stage of *E. fischeriana*. Control efficacy was evaluated 30 days after application, and the regeneration ability of *E. fischeriana* was measured during regreening after winter in the following year. Plant community characteristics were investigated during the peak growth periods of the application year and the subsequent year. The effects of the herbicides on community structure, diversity, and productivity were analyzed to evaluate their efficacy for controlling *E. fischeriana* and safety for other plants. The results showed that: 1) Regarding short-term efficacy, both triclopyr and glyphosate achieved 100% control efficacy in terms of plant count and fresh weight. In contrast, the other five herbicides showed poor results, with both plant and fresh weight control efficacies lower than 65%. 2) In terms of sustained suppression, triclopyr treatment completely inhibited the germination and growth of *E. fischeriana* in the following year. However, in the glyphosate treatment area, the population density of *E. fischeriana* recovered to 1.76 plants·m^{-2}, indicating strong regeneration from dormant buds. 3) Triclopyr treatment increased the importance values and biomass of Cyperaceae and Poaceae. In the application year, the Shannon-Wiener index and Pielou evenness index of the community increased significantly by 7.6% and 15.46%, respectively, compared with CK. By the following year, the combined biomass of Poaceae and Cyperaceae in the triclopyr treatment area accounted for 88.77%, promoting the stable succession of the community towards Poaceae-Cyperaceae dominance, while diversity indices showed no significant difference from the control. 4) Glyphosate treatment severely inhibited the growth of non-target plants, resulting in significant decreases in the biomass of forbs, Cyperaceae, and Poaceae by 86.05%, 63.58%, and 90.80%, respectively, compared to CK. Additionally, the species richness index declined by 54.44% and the Shannon-Wiener index declined by 20.58% ($P<0.05$). 5) Analysis using the TOPSIS multi-criteria decision-making model indicated that triclopyr combines the advantages of high efficacy, sustained elimination of *E. fischeriana*, and safety for non-target plants. Triclopyr promoted plant community restoration while controlling *E. fischeriana*, making it the optimal solution among the tested herbicides for managing grasslands degraded by *E. fischeriana*.

Key words: *Euphorbia fischeriana*; chemical control; triclopyr; plant community structure; ecological restoration

草原作为覆盖地球约40%陆地表面的重要生态系统[1],在维持生物多样性、调节气候与水文过程以及驱动生物地球化学循环等方面具有重要作用[2-3]。然而,受气候变化和人类活动的双重影响,全球草原退化日益严重[4]。我国70%的草原存在不同程度的退化[5]。其中,毒害草的滋生与扩张是草原退化的早期信号[6]。毒害草通过强大的竞争与化感作用,逐步取代可食牧草,导致草地生产力下降、生物多样性减少以及生态系统服务功能退化,最终可能使草地生态系统趋于不可逆退化[7-8]。

呼伦贝尔草原位于欧亚草原最东端,是我国北方重要的生态屏障和畜牧业基地[9-10]。该地区已记录的有毒植物共46种,受毒草中度及以上危害的面积达2.43×10^4 hm^2[11],其中狼毒大戟(*Euphorbia fischeriana*)因其分布广泛、危害严重,成为当地最具破坏性的有毒植物之一。狼毒大戟为大戟科多年生有毒草本植物,具有发达根系、多种子和强抗逆性等特点[12],通过早返青、高大株型、深根系及强光合能力等生态策略高效掠夺土壤水分和养分[13],同时释放化感物质抑制邻近牧草生长[14],最终驱动群落向以狼毒大戟为单一优势种的退化方向演替。狼毒大戟全株富含大戟树脂、生物碱等剧毒成分,牲畜误食可导致中枢神经麻痹、消化道损伤甚至死亡[15-16]。据统计,我国年均因毒草致死的牲畜约84万头,经济损失达29.01亿元[17]。因此,有效防控狼毒大戟对遏制草地退化、保障畜牧业发展及生态恢复至关重要。

目前,针对草原毒害草的防治措施主要采用化学、机械、生物及生态替代等[18]。其中,化学防除因见效快、成本低和防控好等优势,成为规模化治理的首选方案[19]。然而,现有关于狼毒大戟的研究多集中于其化学成分提取与药理作用分析[20-21],针对其防除药剂筛选的应用研究相对匮乏。若除草剂选择和使用不当,不仅难以根除目标毒害草,还可能对非靶标植物(尤其是优良牧草)造成药害,进而严重破坏群落稳定性。因此,借鉴同类毒草的防治经验尤为重要。Lym[22]的研究表明灭生性内吸除草剂草甘膦对乳浆大戟(*Euphorbia esula*)的防效显著;新型

吡啶氧乙酸类除草剂三氯吡氧乙酸对阔叶杂草具有高度选择性，已被美国环保署（Environmental Protection Agency，EPA）证实其在牧场使用的安全性，且能有效防除瑞香狼毒（*Stellera chamaejasme*）而使牧草不减产[23-24]；氯氨吡啶酸与氯氟吡氧乙酸作为我国登记在册的草原除草剂，对黄帚橐吾（*Ligularia virgaurea*）和黄花棘豆（*Oxytropis ochrocephala*）等毒害草防除效果优异[25-26]；苯磺隆作为磺酰脲类内吸型除草剂，多用于阔叶杂草治理[27]；氟磺胺草醚和乙羧氟草醚等二苯醚类除草剂因见效快、杀草谱广，也常用于多年生阔叶杂草的应急治理[28]。尽管上述除草剂在农林领域应用广泛，但针对狼毒大戟的专项防控及其对植物群落影响的研究尚显不足，尤其是除草剂施用后的持续防控效果及植物群落的恢复特征。为此，本研究通过野外试验，系统对比上述 7 种除草剂的短期防效及对狼毒大戟翌年再生的抑制能力，并综合评估施药后植物群落结构、物种多样性与生产力的变化，旨在筛选出兼顾高效防控与生态安全性的最优药剂，以期为狼毒大戟型退化草地的精准治理与生态恢复提供理论依据和技术支撑。

1　材料与方法

1.1　试验区概况

试验地位于内蒙古呼伦贝尔市鄂温克旗锡尼河东苏木境内（48°46′ N，120°02′ E），海拔 752 m。该地区为温带大陆性气候，年均气温 −2～3 ℃，年平均降水量 320～400 mm，无霜期 90～120 d，土壤类型为典型黑钙土，草地类型为草甸草原。由于草地退化，毒草大量滋生，已退化为以狼毒大戟、星毛委陵菜（*Potentilla acaulis*）、寸草（*Carex duriuscula*）等为优势的植物群落。伴生种有矮斗菜叶绣线菊（*Spiraea aquilegiifolia*）、山葱蓂（*Noccaea thlaspidioides*）、柄状薹草（*Carex pediformis*）、羽茅（*Achnatherum sibiricum*）、婆婆纳（*Veronica incana*）、冰草（*Agropyron cristatum*）、麻花头（*Klasea centauroides*）、小叶锦鸡儿（*Caragana microphylla*）、蓬子菜（*Galium verum*）等。样地为狼毒大戟重度危害区，其盖度在 45% 以上，密度约为 7 万株·hm^{-2}，株高为 30～40 cm，物候期为 4 月萌发、5 月进入盛花期。

1.2　试验设计

从中国农药信息网（http://www.chinapesticide.org.cn/）上登记的草原、牧场及农田的除草剂品种中，选择 7 种针对阔叶杂草的茎叶处理剂作为筛选对象。试验共设 8 个处理，包括 5 种内吸传导型除草剂（三氯吡氧乙酸、草甘膦、苯磺隆、氯氨吡啶酸、氯氟吡氧乙酸）、2 种触杀型除草剂（氟磺胺草醚、乙羧氟草醚）以及清水空白对照（CK），详见表 1。采用完全随机区组设计，每个处理 4 次重复，共计 32 个试验小区，小区面积为 25 m^2，相邻小区之间设有 2 m 宽的隔离带。于狼毒大戟的盛花期，将除草剂的设计用量按 450 L·hm^{-2} 兑水，CK 处理喷施同等体积的清水，采用 3WBD-16 型背负式恒压手动喷雾器（台州市），人工均匀点喷，施药后 24 h 内无降水。

1.3　调查方法与指标测定

1.3.1　除草剂防除效果调查　在施药前，记录各小区内狼毒大戟的初始株数。施药后 30 d（2024 年 6 月中旬），目测评估各处理区内狼毒大戟的药害级别，统计小区内狼毒大戟存活株数，并随机选取 5 株测量地上部分鲜重。于翌年 5 月（2025 年 5 月中旬），在各小区内调查狼毒大戟的再生情况，包括其密度、盖度、高度和地上生物量。其中，密度使用个数法[29]；高度为植物自然高度的平均值；通过测量植株的冠幅直径并结合样方内的植株密度，估算得出盖度值，减少了主观误差；地上生物量采取分种齐地刈割测定，将剪下的植物装入纸袋后称其鲜重，带回实验室于 65 ℃烘箱中烘至恒重。同时，在每个小区随机挖掘 3 株狼毒大戟的完整根系，用清水洗净后，统计根颈处的休眠芽数量，计算平均值以代表该小区单株地下休眠芽数。

1.3.2　植物群落调查　于施药后 30 d（2024 年 6 月中旬），在各小区内设置 1 个 1 m×1 m 的固定样方。调查并记录样方内所有植物的物种名称、密度、盖度和高度。齐地面刈割样方内所有植物的地上部分，分物种装袋，在 65 ℃烘箱内烘干至恒重后称量干重。对样方中出现的植物物种按功能群进行分类，分为杂草（forbs）、莎草类（Cyperaceae）、禾本类（Gramineae）和豆科（Leguminosae）4 大类。翌年 7 月（2025 年 7 月中旬），对防效最优的三氯吡氧乙酸处理区进行植物群落调查，以全面评估其群落恢复状况，方法同上。

1.4 数据处理及统计分析

1.4.1 药害级别 分级标准参照《农药生物活性测试标准操作规范——除草剂卷》[30]。1级：生长正常，无受害症状；2级：轻微药害，受害面积＜10%；3级：中等药害，预计能恢复；4级：药害较重，难以恢复；5级：药害严重，不能恢复。

1.4.2 防除效果 计算株防效(plant control efficiency, CE_p)和鲜重防效(fresh weight control efficiency, CE_w)

$$CE_p(\%)=\left(1-\frac{N_{t1}\times N_{c0}}{N_{t0}\times N_{c1}}\right)\times 100$$

$$CE_w(\%)=\frac{W_c-W_t}{W_c}\times 100$$

式中：N_{t0}为处理区药前基数；N_{t1}为处理区药后基数；N_{c0}为对照区药前基数；N_{c1}为对照区药后基数；W_t为处理区鲜重；W_c为对照区鲜重。

1.4.3 重要值(important value, IV)及相对地上生物量(relative aboveground biomass, B)按照测得的样方数据(密度、盖度、地上生物量)，分别计算每种植物的相对多度(D)、相对盖度(C)、相对地上生物量(B)，进而计算每个样方中各物种的重要值(IV)。

$$IV=\frac{D+C+B}{3}$$

$$D(\%)=\left(\frac{D_i}{D_T}\right)\times 100$$

$$C(\%)=\left(\frac{C_i}{C_T}\right)\times 100$$

$$B(\%)=\left(\frac{B_i}{B_T}\right)\times 100$$

式中：D_i为物种i的株数；D_T为群落中所有物种的株数之和；C_i为物种i的分盖度；C_T为群落中所有物种的盖度之和；B_i为物种i(或功能群)的地上生物量；B_T为群落中所有物种的地上生物量之和。

1.4.4 植物群落多样性指数 采用物种丰富度指数(R)、Shannon-Wiener指数(H)以及Pielou均匀度指数(E)计算。

$$R=S$$

$$H=-\sum_{i=1}^{S}P_i\ln(P_i)$$

表1 试验处理概况

Table 1 Overview of the experimental treatments

处理 Treatment	除草剂 Herbicides	有效成分及剂型 Active ingredient & formulation	用量 Dosage	适用场景 Recommended application	传导类型 Conduction type	作用机理 Mechanism of action	生产厂家 Manufacturer
H_1	三氯吡氧乙酸 Triclopyr	48%乳油48% emulsifiable concentrate (EC)	4.20 L·hm^{-2}	牧场；阔叶杂草 Grazing land; broadleaf weeds	内吸传导型 Systemic conduction type	合成激素类 Synthetic auxin	科迪华农业科技有限责任公司 Corteva Agricultural Technology Co., Ltd.
H_2	草甘膦 Glyphosate	41%水剂41% aqueous solution (AS)	4.60 L·hm^{-2}	非耕地；阔叶杂草 Non-arable land; broadleaf weeds	内吸传导型 Systemic conduction type	5-烯醇丙酮莽草酸-3-磷酸合酶抑制剂 5-enolpyruvylshikimate-3-phosphate synthase (EPSP) inhibitors	侨昌现代农业有限公司 Qiaochang Modern Agriculture Co., Ltd.
H_3	苯磺隆 Tribenuron-methyl	75%水分散粒剂 75% water dispersible granule (WDG)	16.00 g·hm^{-2}	麦田；阔叶杂草 Wheat field; broadleaf weeds	内吸传导型 Systemic conduction type	乙酰乳酸合成酶抑制剂 Acetolactate synthase (ALS) inhibitors	山东胜邦绿野化学有限公司 Shandong Shengbang Green Chemical Co., Ltd.
H_4	氯氨吡啶酸 Aminopyralid	21%水剂21% AS	0.45 L·hm^{-2}	草原；阔叶杂草 Grassland; broadleaf weeds	内吸传导型 Systemic conduction type	合成激素类 Synthetic auxin	科迪华农业科技有限责任公司 Corteva Agricultural Technology Co., Ltd.
H_5	氯氟吡氧乙酸 Fluroxypyr	20%乳油20% EC	0.90 L·hm^{-2}	草原；阔叶杂草 Grassland; broadleaf weeds	内吸传导型 Systemic conduction type	合成激素类 Synthetic auxin	天津市华宇农药有限公司 Tianjin Huayu Pesticide Co., Ltd.
H_6	氟磺胺草醚 Fomesafen	25%水剂25% AS	1.00 L·hm^{-2}	大豆田；阔叶杂草 Soybean field; broadleaf weeds	触杀型 Contact type	原卟啉原氧化酶抑制剂 Protoporphyrinogen oxidase (PPO) inhibitors	山东滨农科技有限公司 Shandong Binnong Technology Co., Ltd.
H_7	乙羧氟草醚 Fluoroglycofen-ethyl	10%微乳剂10% microemulsion (ME)	75.00 g·hm^{-2}	大豆田；阔叶杂草 Soybean field; broadleaf weeds	触杀型 Contact type	原卟啉原氧化酶抑制剂 PPO inhibitors	河南瀚斯作物保护有限公司 Henan Hansi Crop Protection Co., Ltd.
CK	清水 Clear water	无 Nothing	450 L·hm^{-2}	无 Nothing	无 Nothing	无 Nothing	无 Nothing

$$E=\frac{H}{\ln(S)}$$

式中：S为样方中物种总数；P_i为物种i的相对重要值。

采用Excel对数据进行整理和计算，为检验不同除草剂处理中狼毒大戟各指标和植被群落物种多样性指数、地上生物量的差异，采用单因素方差分析（one-way ANOVA）对样本数据进行比较，经过方差齐性（Levene's test）检验后，采用最小显著差异法（least significant difference，LSD）进行多重比较，$P<0.05$表示差异显著，$P<0.01$表示差异极显著。本研究中株防效和鲜重防效的数据不符合正态性，多组比较采用Kruskal-WallisH检验，图表数据均采用平均值±标准误表示。采用R 4.4.3（R Development Core Team）plyr数据包的TOPSIS-多准则决策模型，综合评价各处理对狼毒大戟的防除效果和再生力以及对非靶标植物群落的影响，从而筛选出最优除草剂。采用Origin 2021软件进行作图。

2　结果与分析

2.1　不同除草剂对狼毒大戟的防除效果

施药30 d后，各除草剂处理对狼毒大戟的防除效果差异显著（表2）。三氯吡氧乙酸和草甘膦处理对狼毒大戟的防除效果较好，药害级别均达5级，株防效和鲜重防效均高达100%，完全清除了狼毒大戟的地上部分。苯磺隆处理防效次之，药害级别为3级，其株防效与鲜重防效分别为63.00%和58.58%。相比之下，氯氨吡啶酸、氯氟吡氧乙酸、氟磺胺草醚和乙羧氟草醚处理的效果较差，株防效为5.23%～18.36%，鲜重防效为3.31%～15.93%，均未能有效控制狼毒大戟的生长。

为评估除草剂的持续抑制能力，对施药翌年狼毒大戟的再生状况进行了调查（表3）。结果表明，三氯吡氧乙酸处理表现出最优的持续抑制能力。在三氯吡氧乙酸处理区，翌年狼毒大戟的再生密度、盖度、株高和地上生物量指标均为0，且其地下的休眠芽数量也降至0，这表明三氯吡氧乙酸处理彻底清除了狼毒

表2　7种除草剂对狼毒大戟的株防效和鲜重防效

Table 2　Control effect of seven herbicides on plant and fresh weight control efficiency of *E. fischeriana* (%)

处理 Treatment	药害级别 Injury level	株防效 Plant control efficiency	鲜重防效 Fresh weight control efficiency
H_1	5	100.00±0.00a	100.00±0.00a
H_2	5	100.00±0.00a	100.00±0.00a
H_3	3	63.00±4.32ab	58.58±5.22ab
H_4	2	15.28±1.54ab	12.06±1.10ab
H_5	2	18.36±3.44ab	15.93±1.26ab
H_6	1	7.70±1.43ab	6.63±3.06ab
H_7	1	5.23±2.57b	3.31±0.59b

不同小写字母表示不同除草剂间差异显著（$P<0.05$）。下同。Different lowercase letters indicate significant differences among different herbicides at the 0.05 level. The same below.

表3　7种除草剂处理对狼毒大戟翌年生长的影响

Table 3　Effects of seven herbicide treatments on the growth of *E. fischeriana* in the following year

处理 Treatment	密度 Density (plant·m^{-2})	盖度 Coverage (%)	株高 Plant height (cm)	地上生物量 Aboveground biomass (g·m^{-2})	地下休眠芽 Root suckering bud (buds·plant^{-1})
CK	5.79±0.18a	67.75±1.31a	21.22±0.31a	146.06±3.68a	10.25±1.31a
H_1	0.00±0.00e	0.00±0.00f	0.00±0.00d	0.00±0.00d	0.00±0.00b
H_2	1.76±0.11d	12.50±1.44e	15.67±0.22c	49.62±4.78c	9.75±0.48a
H_3	1.99±0.06d	25.00±2.04d	15.14±0.11c	54.37±3.80c	9.00±0.41a
H_4	3.83±0.15b	45.50±2.10b	20.56±0.88ab	89.31±2.88b	9.75±0.85a
H_5	3.30±0.12c	36.25±3.15c	19.74±0.48b	75.59±2.92b	9.75±0.85a
H_6	5.48±0.25a	62.50±3.23a	20.38±0.48ab	138.73±9.55a	9.75±1.03a
H_7	5.41±0.25a	62.50±3.23a	20.18±0.39ab	140.82±5.90a	10.25±0.85a

大戟的地上部分，还破坏了其地下休眠芽，从根本上杜绝了次年狼毒大戟的生长和扩张。相比之下，草甘膦处理区狼毒大戟种群出现显著恢复，其休眠芽数量与CK无显著差异($P>0.05$)。苯磺隆处理对狼毒大戟的密度、盖度和地上生物量也有一定的抑制作用，但效果弱于三氯吡氧乙酸。氯氨吡啶酸处理显著降低了狼毒大戟的密度、盖度和地上生物量，但对株高和休眠芽数量影响不显著($P>0.05$)；而氯氟吡氧乙酸处理除降低密度、盖度和地上生物量外，还显著降低了株高($P<0.05$)，但对休眠芽数量无显著影响($P>0.05$)。氟磺胺草醚和乙羧氟草醚处理的各项指标与CK均无显著差异($P>0.05$)，表明这两种除草剂几乎无效。

2.2 化学防除狼毒大戟对草地植物群落结构的影响

化学防除明显改变了退化草地的植物群落结构(表4)。群落调查共记录植物42种，分属19科。CK处理中，狼毒大戟为绝对优势物种，其重要值高达34.70%。施用不同除草剂后，狼毒大戟在群落中的优势地位发生明显变化。三氯吡氧乙酸处理当年，狼毒大戟的重要值即降至0，其优势地位被寸草取代，重要值为25.67%，且提高了羊草、羽茅等禾本科植物的重要值；翌年，狼毒大戟在三氯吡氧乙酸处理区未萌发，群落优势种演替为寸草、冰草和草地早熟禾，重要值分别为21.17%、20.52%和17.42%。相比之下，草甘膦处理虽清除了狼毒大戟(重要值下降为0)，但导致禾本科和豆科植物重要值呈下降趋势，寸草成为新的绝对优势种，重要值高达42.80%，群落结构趋于简单化。其余5种处理(H_3～H_7)中，未能根本改变狼毒大戟的优势地位。

2.3 化学防除狼毒大戟对草地植物多样性的影响

化学防除显著影响了群落的多样性指数(图1)。与CK相比，三氯吡氧乙酸处理显著降低了物种丰富度指数，但Shannon-Wiener指数和Pielou均匀度指数分别显著提高7.6%和15.46%($P<0.05$)。相反，草甘膦处理对群落多样性造成了显著的负面影响，其物种丰富度指数和Shannon-Wiener指数较CK分别显著降低54.44%和20.58%($P<0.05$)。苯磺隆处理的物种丰富度指数显著低于CK，Pielou均匀度指数显著提高14.43%($P<0.05$)，Shannon-Wiener指数较CK提高5.26%，但未达显著水平。氯氨吡啶酸和氯氟吡氧乙酸处理下物种丰富度指数均显著低于CK($P<0.05$)，对Shannon-Wiener指数和Pielou均匀度指数均无显著影响($P>0.05$)。氟磺胺草醚和乙羧氟草醚处理的物种丰富度指数及Pielou均匀度指数较CK均无显著差异($P>0.05$)，而在Shannon-Wiener指数上，乙羧氟草醚处理显著低于CK($P<0.05$)。

翌年，三氯吡氧乙酸处理的物种丰富度指数(21.75)、Shannon-Wiener指数(2.30)和Pielou均匀度指数(0.75)与CK相比均有所降低，但差异不显著($P>0.05$)，表明三氯吡氧乙酸处理对群落多样性的负面影响较小，群落结构趋于稳定恢复(图2)。

2.4 化学防除狼毒大戟对草地植物地上生物量的影响

化学防除显著改变了草地植物群落的地上生物量(图3)。三氯吡氧乙酸处理下，由于彻底清除了狼毒大戟，群落总地上生物量较CK显著下降71.35%($P<0.05$)，但莎草科和禾本科植物生物量分别较CK显著增加44.67%和156.21%($P<0.05$)，豆科植物生物量略高于CK，但差异不显著($P>0.05$)。草甘膦处理全面抑制了植物群落的生产力，其中杂类草、莎草科和禾本科植物的生物量分别较CK显著下降86.05%、63.58%和90.80%。苯磺隆处理下群落总地上生物量、狼毒大戟生物量和杂类草生物量均显著低于CK($P<0.05$)，但禾本科植物的生物量显著提高($P<0.05$)。氯氨吡啶酸和氯氟吡氧乙酸处理显著降低了群落总地上生物量和狼毒大戟生物量，但莎草科、禾本科和豆科植物生物量与CK无显著差异($P>0.05$)。氟磺胺草醚和乙羧氟草醚处理下，狼毒大戟、杂类草、莎草科、禾本科及豆科植物生物量与CK均无显著差异($P>0.05$)。

至翌年，CK处理区群落地上总生物量为299.90 g·m^{-2}，三氯吡氧乙酸处理较CK显著降低28.33%($P<0.05$)。但三氯吡氧乙酸处理改变了群落内的生物量分配格局，禾本科和莎草科植物生物量在群落中的占比合计达88.77%，其中禾本科植物生物量占比大幅提升至66.54%，成为群落的绝对优势功能群，表明群落向着以优良牧草为主导的高生产力方向演替(图4)。

表 4　喷施除草剂后草地植物群落物种组成及其重要值的变化

Table 4　Changes in species composition and importance values of the grassland plant community after herbicide application (%)

科 Family	植物物种名 Plant species name	重要值 Important values									
		当年 Application year								翌年 Following year	
		CK	H_1	H_2	H_3	H_4	H_5	H_6	H_7	CK	H_1
大戟科 Euphorbiaceae	狼毒大戟 *E. fischeriana*	34.70	0.00	0.00	27.40	30.92	30.29	32.95	33.80	27.76	0.00
蔷薇科 Rosaceae	鸡冠茶 *Sibbaldianthe bifurca*	—	1.35	6.31	—	1.21	0.69	1.74	5.23	1.41	1.98
	轮叶委陵菜 *Potentilla verticillaris*	—	0.94	—	—	—	—	—	—	—	—
	菊叶委陵菜 *Potentilla tanacetifolia*	1.45	6.17	4.59	1.56		9.63	0.36	6.50	5.14	1.80
	星毛委陵菜 *P. acaulis*	17.08	2.67	13.12	12.57	16.48	6.67	10.42	12.86	14.66	—
	耧斗菜叶绣线菊 *S. aquilegiifolia*	3.63	—	—	—	—	—	1.46	—	0.37	—
菊科 Asteraceae	麻花头 *K. centauroides*	1.67	—	6.43	0.88	3.97	4.25	—	—	—	—
	冷蒿 *Artemisia frigida*	1.43	3.92	2.26	—	2.76	—	8.24	—	2.21	2.45
	漏芦 *Rhaponticum uniflorum*	0.36	—	—	—	—	—	1.92	1.37	—	0.36
	鸦葱 *Scorzonera austriaca*	0.35	0.53	—	1.16	—		—	0.55	—	0.32
	山柳菊 *Hieracium umbellatum*	—	—	—	0.96	2.69	—	0.89	—	—	—
	狗舌草 *Senecio campestris*	—	—	—	—	—	1.18	—	2.11	0.68	0.33
	火绒草 *Leontopodium leontopodioides*	1.21	—	—	2.60	—	—	—	—	—	—
	阿尔泰狗娃花 *Aster altaicus*	—	6.41	—	—	—	—	—	—	—	—
	猪毛蒿 *Artemisia scoparia*	0.39	—	—	—	—	—	—	—	—	—
毛茛科 Ranunculaceae	唐松草 *Thalictrum aquilegiifolium*	0.38	2.05	12.45	—	6.36	1.99	—	—	0.30	—
	棉团铁线莲 *Clematis hexapetala*	—	—	3.25	—	—	1.46	0.44	0.56	0.36	0.84
	细叶白头翁 *Pulsatilla turczaninovii*	—	15.34	4.70	0.87	—	—	—	—	—	0.35
鸢尾科 Iridaceae	囊花鸢尾 *Iris ventricosa*	—	0.74	—	0.86	—	—	—	0.51	—	—
	粗根鸢尾 *Iris tigridia*	—	—	—	—	—	—	—	0.43	0.78	0.32
紫草科 Boraginaceae	鹤虱 *Lappula myosotis*	0.37	0.79	—	—	0.63	4.29	0.92	—	—	—
石竹科 Caryophyllaceae	山蚂蚱草 *Silene jenisseensis*	0.60	4.60	—	2.40	—	—	2.40	—	—	—
玄参科 Scrophulariaceae	婆婆纳 *V. incana*	2.38	—	—	—	0.53	—	0.67	—	2.53	—
百合科 Liliaceae	山韭 *Allium senescens*	—	0.71	—	2.39	—	0.57	0.40	—	—	—
十字花科 Brassicaceae	山萮菜 *N. thlaspidioides*	3.35	—	—	—	—	—	0.83	0.66	1.15	—
罂粟科 Papaveraceae	野罂粟 *Oreomecon nudicaulis*	0.38	—	—	0.76	—	—	1.04	1.12	—	1.77
报春花科 Primulaceae	点地梅 *Androsace incana*	0.36	—	—	—	—	2.23	0.53	1.14	—	—
车前科 Plantaginaceae	车前 *Plantago asiatica*	—	1.26	—	1.60	—	1.59	0.35	—	—	—
茜草科 Rubiaceae	蓬子菜 *G. verum*	0.40	—	—	—	—	—	—	3.10	1.14	1.07
伞形科 Apiaceae	北柴胡 *Bupleurum chinense*	—	—	—	—	—	—	—	1.24	—	—
唇形科 Lamiaceae	多裂叶荆芥 *Schizonepeta multifida*	—	—	—	—	—	—	—	—	5.42	—
莎草科 Cyperaceae	寸草 *C. duriuscula*	15.98	25.67	42.80	22.61	21.35	22.16	25.10	12.80	17.03	21.17
	柄状薹草 *C. pediformis*	3.48	—	—	—	—	—	—	8.16	—	—
禾本科 Gramineae	狼针草 *Stipa baicalensis*	—	—	2.10	3.67	1.63	4.73	—	1.45	1.92	—
	冰草 *A. cristatum*	1.62	3.08	—	1.25	2.16	3.38	—	0.68	—	20.52
	草地早熟禾 *Poa pratensis*	1.10	1.96	—	4.32	1.88	—	5.57	—	2.84	17.42
	羊草 *Leymus chinensis*	—	7.83	—	2.42	0.84	0.51	—	—	3.24	14.56
	羽茅 *A. sibiricum*	2.98	9.11	—	5.50	3.46	3.05	1.65	2.75	3.68	9.02
	洽草 *Koeleria macrantha*	2.88	—	—	—	0.58	—	1.65	0.43	0.99	—
	画眉草 *Eragrostis pilosa*	—	—	—	—	—	—	—	—	0.72	1.87
豆科 Leguminosae	胡枝子 *Lespedeza bicolor*	0.36	—	1.97	—	—	—	0.46	1.19	4.74	3.51
	小叶锦鸡儿 *C. microphylla*	1.17	4.85	—	4.22	2.56	1.32	—	1.36	0.92	0.32

—表示该物种在此样地调查样方中未出现。— indicates the absence of the species in the sampled quadrats during the field survey.

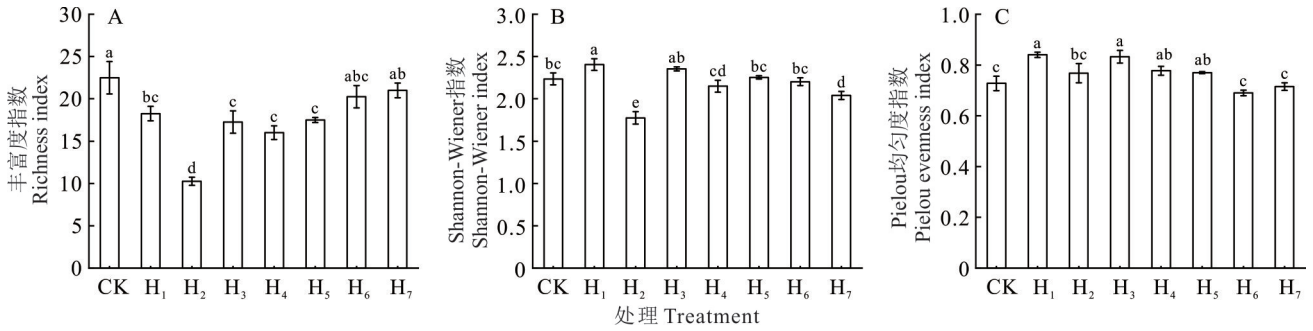


图1 喷施除草剂后当年草地植物群落多样性的变化

Fig. 1 Changes in diversity of the grassland plant community within the year after herbicide application

不同小写字母表示不同除草剂间差异显著($P<0.05$)。下同。Different lowercase letters indicate significant differences among different herbicides at the 0.05 level. The same below.

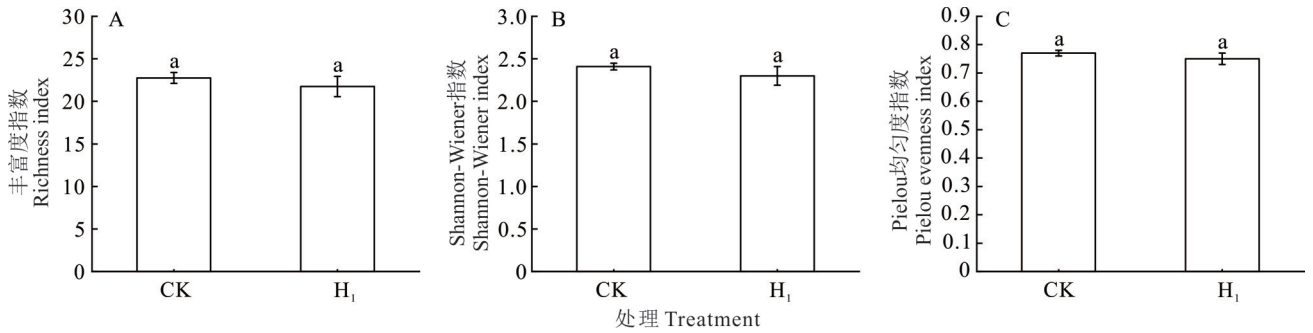


图2 喷施除草剂后翌年草地植物群落多样性的变化

Fig. 2 Changes in diversity of the grassland plant community in the following year after herbicide application

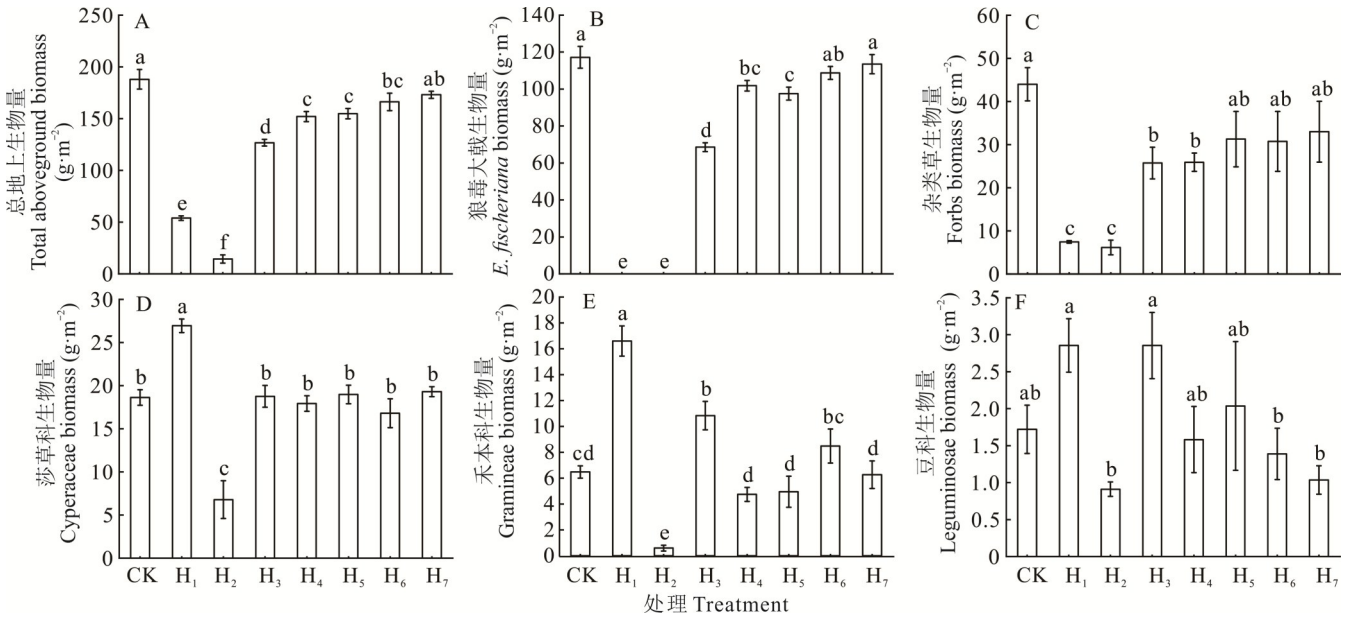


图3 喷施除草剂后当年草地植物群落地上生物量的变化

Fig. 3 Changes in aboveground biomass of the grassland plant community within the year after herbicide application

2.5 不同除草剂的综合评价

为客观筛选最优除草剂方案,本研究采用TOPSIS-多准则决策模型进行综合评价(图5)。评价指标包括株防效、鲜重防效、持续抑制能力、植物群落多样性和生产力。结果表明,各处理的综合表现排序为:$H_1>H_3>H_2>$

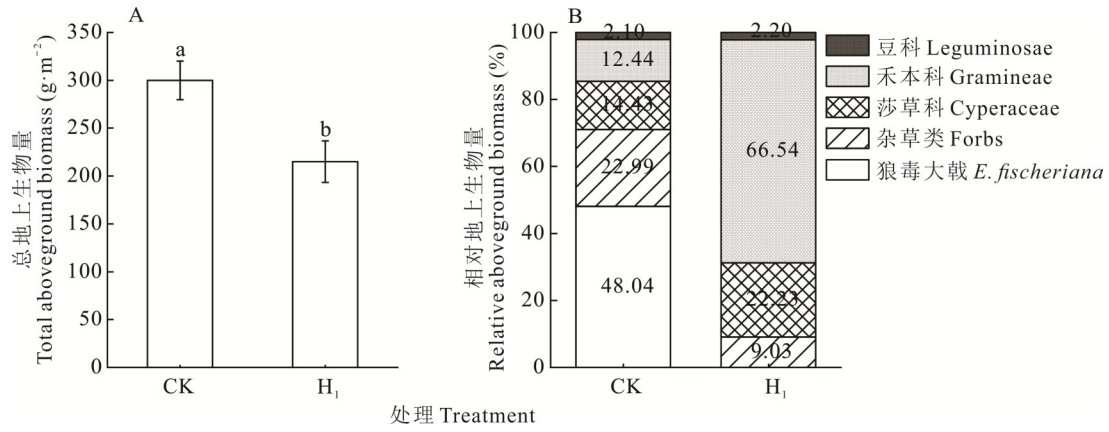


图 4　喷施除草剂后翌年草地植物群落地上生物量的变化

Fig. 4　Changes in aboveground biomass of the grassland plant community in the following year after herbicide application

H_5>H_4>H_6>H_7。三氯吡氧乙酸处理贴合度最高，为 0.95；乙羧氟草醚处理贴合度最低，仅为 0.22。因此，确定三氯吡氧乙酸是狼毒大戟型退化草地的理想药剂。

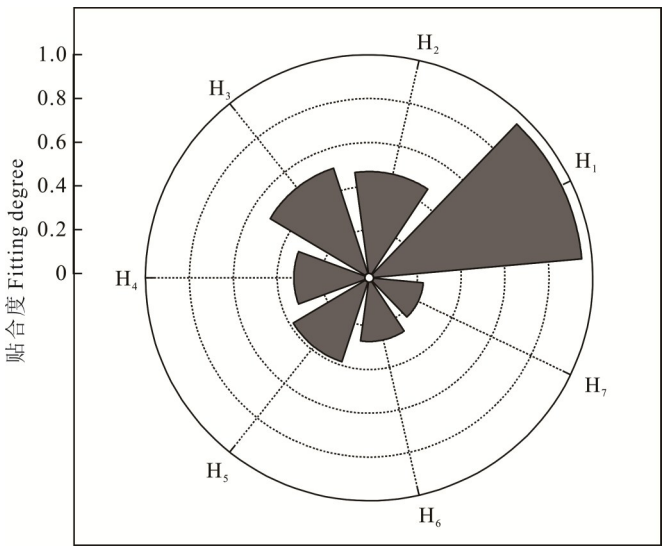


图 5　不同除草剂的综合评价

Fig. 5　Comprehensive evaluation of different herbicides

3　讨论

3.1　不同除草剂防除狼毒大戟效果的差异

株防效和鲜重防效是评价除草剂药效的关键指标[31]。本研究结果显示，在施药 30 d 后，三氯吡氧乙酸与草甘膦处理的株防效和鲜重防效均达到 100%，显著优于其他供试药剂。苯磺隆、氯氨吡啶酸和氯氟吡氧乙酸等内吸型除草剂防治效果较差，可能与当地用药习惯导致狼毒大戟产生抗药性，或施药剂量不足有关；而氟磺胺草醚和乙羧氟草醚为触杀型除草剂，缺乏内吸传导性且易受草原干燥多风环境影响，对狼毒大戟生长基本无抑制作用。

狼毒大戟为多年生宿根植物，其种群的维持与扩张高度依赖于根颈部休眠芽在翌年的萌发与返青，因此有效灭杀地下休眠芽是实现彻底防除的关键。本研究翌年调查发现，仅三氯吡氧乙酸处理区未发现存活休眠芽，表现出卓越的持续抑制能力；而草甘膦处理区狼毒大戟种群密度恢复至 1.76 株·m^{-2}，且地下休眠芽数量与对照无差异。盛花期光合产物向根部输送旺盛，利于药剂随同化产物向根系传导[32−33]。有研究表明在盛花期对有毒植物小花棘豆（*Oxytropis glabra*）喷施除草剂，可显著提高致死率[34]。三氯吡氧乙酸通过干扰植物的核酸代谢及破坏维管束组织，耗尽根部贮藏物质，从而彻底杀灭植株[35−36]。因此，三氯吡氧乙酸能深入狼毒大戟地下根茎系统，有效破坏休眠芽的活力，这与康旭东[37]喷施三氯吡氧乙酸可以有效致死瑞香狼毒根部的研究发现具有一致性，从根本上杜绝了种群的翌年复苏。草甘膦通过抑制 5-烯醇丙酮酰莽草酸-3-磷酸合成酶（5-enolpyruvate shikimate-3-phosphate synthase，EPSPS）阻断芳香族氨基酸合成从而迅速杀灭地上植株[38]，但对狼毒大戟深层根颈休眠芽的杀伤力不足，施用草甘膦防除互花米草（*Spartina alterniflora*）和加拿大一枝黄花（*Solidago canadensis*）中也发现了类似的结果[39−40]，这可能是因为一次性施药的剂量难以在深层根系中达到致死积累浓度，导致残存的休眠芽在翌年因缺乏竞争而迅速萌发，进一步印证了草甘膦在深根性杂草持续防控中的局限性。

3.2 化学防除狼毒大戟对植物群落的影响

除草剂作为草地毒害草防除的主要手段,能显著降低毒害草在草地群落中的分布[41]。然而,药剂的选择不仅要考虑防除效果,还必须充分考虑其对草地植物群落的安全性[42]。三氯吡氧乙酸对禾本科和莎草科植物具有高度安全性[43]。随着优势种狼毒大戟被有效清除,原先受其强烈抑制的禾本科与莎草科植物,在光照、水分和养分等资源竞争压力得到"释放"后[44],寸草、冰草和草地早熟禾等牧草凭借发达的根茎和分蘖能力,迅速占据生态位并逐渐成为群落中的优势种。值得注意的是,喷施三氯吡氧乙酸处理后,群落总地上生物量显著低于对照且翌年仍存在显著差异。这主要是由于狼毒大戟植株个体大,在群落生物量的占比较高,而莎草科和禾本科植物属于低矮密集的株型,虽通过补偿性生长实现了增产,但其新增的生物量难以完全填补狼毒大戟死亡后留下来的巨大生物量空缺。从群落功能角度看,禾本科和莎草科等植物生物量显著提高,群落生产力由"无效的高生物量"向"有效的高质量"转变,这说明了群落演替是一个渐进过程,优良牧草对生物量的累积需要更长的时间周期。综上所述,三氯吡氧乙酸成功推动了群落以禾本科-莎草科为主导的稳定群落演替,实现了草地群落功能的优化与提升。这一结果与赵成章等[45]关于三氯吡氧乙酸抑制瑞香狼毒生长并推动群落向禾本科转型的研究结论相吻合。

本研究发现草甘膦处理区的群落结构趋于简单化,寸草成为新的绝对优势种,可能是由于施药时狼毒大戟高大的株型和宽阔的冠层截获了大部分的药液,而莎草科等植物处于返青初期且植株矮小,受药较少。但由于草甘膦为广谱灭生性除草剂,加之草原环境易发生雾滴漂移,禾本科等非靶标植物仍遭受了严重的药害[46]。非靶标植物的大量死亡导致群落物种丰富度指数大幅下降54.44%,造成严重的生态位空缺,这与Rodriguez等[47]的研究结果一致。草甘膦无差别地清除了包括狼毒大戟在内的绝大多数植物,导致杂类草、莎草科和禾本科等各功能群生物量显著下降。这种群落结构的失衡与生境的裸露,反而为狼毒大戟利用其强大的地下休眠芽在翌年种群恢复创造了条件,从而可能加剧草地的退化风险。因此,草甘膦不宜用于草原狼毒大戟的防控,也不利于退化草地的生态恢复。

4 结论

1)三氯吡氧乙酸对狼毒大戟兼具短期的防除效果和持续的翌年再生抑制能力。2)三氯吡氧乙酸作为选择性除草剂,能有效保护禾本科与莎草科等非靶标植物,通过调控种间竞争关系,促进植物群落向以优良牧草为主导的结构正向演替。3)草甘膦虽当年防效显著,但其非选择性严重破坏了群落多样性与生产力,且无法有效抑制翌年狼毒大戟的再生,不利于生态系统的长期稳定与恢复。4)综合评价,三氯吡氧乙酸是当前实现呼伦贝尔狼毒大戟型退化草地生态治理的理想药剂,兼具高效、可持续、对非靶标植物安全的优点。

参考文献 References:

[1] Kemp D R, Han G D, Hou X Y, *et al*. Innovative grassland management systems for environmental and livelihood benefits. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2013, 110(21): 8369-8374.

[2] O'Mara F P. The role of grasslands in food security and climate change. Annals of Botany, 2012, 110(6): 1263-1270.

[3] Zhao Y Y, Liu Z F, Wu J G. Grassland ecosystem services: a systematic review of research advances and future directions. Landscape Ecology, 2020, 35(4): 793-814.

[4] Han D M, Wang G Q, Xue B L, *et al*. Evaluation of semiarid grassland degradation in North China from multiple perspectives. Ecological Engineering, 2018, 112(1): 41-50.

[5] Hou H Y, Yun X J, Zhou J W, *et al*. Assessing restoration effectiveness: a comparative analysis of ecological restoration methods in temperate degraded grassland of Inner Mongolia. Chinese Journal of Grassland, 2025, 47(2): 39-47.
侯慧扬, 运向军, 周建伟, 等. 不同修复方式在内蒙古退化温性草原植被生态修复中的应用效果综合评价. 中国草地学报, 2025, 47(2): 39-47.

[6] Yang S S, Sun J Y, Liu C, *et al*. *Stellera chamaejasme* expansion promotes the restoration of soil microbial diversity and ecosystem multifunctionality in degraded grasslands. Catena, 2024, 241(15): 112-120.

[7] Sun G, Luo P, Wu N, *et al*. *Stellera chamaejasme* L. increases soil N availability, turnover rates and microbial biomass in an alpine meadow ecosystem on the eastern Tibetan Plateau of China. Soil Biology & Biochemistry, 2009, 41(1): 86-91.

[8] Lu H, Wang S S, Zhou Q W, *et al*. Damage and control of major poisonous plants in the western grasslands of China—a review. Rangeland Journal, 2012, 34(4): 329—339.

[9] Zhao Y T, Hu C M, Dong X, *et al*. NDVI characteristics and influencing factors of typical ecosystems in the semi-arid region of northern China: A case study of the Hulunbuir grassland. Land, 2023, 12(3): 1589—1606.

[10] Zhang F, Wang Q, Li Y. Study on quantitative method of spatial and temporal dynamic monitoring of vegetation cover in Hulun Buir grassland. Journal of Natural Resources, 2010, 25(10): 1698—1708.
张峰, 王桥, 李营. 呼伦贝尔草原植被覆盖时空动态变化监测定量方法研究. 自然资源学报, 2010, 25(10): 1698—1708.

[11] Zhu B B, Wei J, Sun S H, *et al*. Distribution and prevention and control practice of common poisonous grasses in Hulunbuir grassland. Journal of Grassland and Forage Science, 2025, 46(3): 48—51.
朱宾宾, 伟军, 孙双红, 等. 呼伦贝尔草原常见毒害草区域分布与防控实践. 草学, 2025, 46(3): 48—51.

[12] Zhang Q. Effects and mechanisms of poisonous plants on plant community characteristics in Inner Mongolia meadow steppe. Changchun: Northeast Normal University, 2024.
张庆. 内蒙古草甸草原有毒植物对植物群落特征的影响及途径分析. 长春: 东北师范大学, 2024.

[13] Guo J M. Effects of interaction between *Stellera chamaejasme* and *Euphorbia fischeriana* on soil microenvironment of degraded grasslands in Inner Mongolia. Changchun: Northeast Normal University, 2024.
郭晶铭. 内蒙古退化草地狼毒-狼毒大戟相互作用对土壤微环境的影响. 长春: 东北师范大学, 2024.

[14] Deng Y Y. Secondary metabolites of three plants and their biological functions. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2019.
邓彦彦. 三种植物的次生代谢产物及生物功能研究. 沈阳: 沈阳农业大学, 2019.

[15] Peng F H. Study on the diversity and spatial distribution pattern of three common poisonous plants in meadow grassland of Dumont County. Daqing: Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2019.
彭芳华. 杜蒙县草甸草原三种常见有毒植物多样性及空间分布格局研究. 大庆: 黑龙江八一农垦大学, 2019.

[16] Zhou P. The effects of *Stellera* on the rhizospher microbial community and the protein expression profile of chamaejasme under drought stress. Xi'an: Northwest University, 2015.
周攀. 瑞香狼毒对根际微生物群落的影响及在干旱胁迫下狼毒蛋白表达谱的变化. 西安: 西北大学, 2015.

[17] Yang C, Sha R K, Surilage, *et al*. Research progress on distribution, toxicity, control and utilization of poisonous grass species in natural grassland of China. Journal of Domestic Animal Ecology, 2022, 43(11): 88—96.
杨晨, 沙日扣, 苏日拉格, 等. 中国天然草原毒害草种类分布、毒性及防控与利用研究进展. 家畜生态学报, 2022, 43(11): 88—96.

[18] Guo Y Z, Zhang R H, Sun T, *et al*. Harm, control and comprehensive utilization of poisonous weeds in natural grasslands of Gansu Province. Acta Agrestia Sinica, 2017, 25(2): 243—256.
郭亚洲, 张睿涵, 孙暾, 等. 甘肃天然草地毒草危害、防控与综合利用. 草地学报, 2017, 25(2): 243—256.

[19] Guo T, Yu Z H, Xue Y, *et al*. Screening and safety evaluation of herbicides for weed control in tobacco fields in Guizhou. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2024, 53(5): 112—122.
郭涛, 余知和, 薛原, 等. 贵州烟田杂草防控除草剂筛选与安全性评价. 河南农业科学, 2024, 53(5): 112—122.

[20] Shi Y X, He J, Zhang J, *et al*. Chemical constituents of *Euphorbia fischeriana*. Chinese Traditional and Herbal Drugs, 2020, 51(8): 2107—2111.
史影雪, 赫军, 张佳, 等. 狼毒大戟化学成分研究. 中草药, 2020, 51(8): 2107—2111.

[21] Wei J C, Gao Y N, Huang H H, *et al*. Euphorfinoids A and B, a pair of *ent*-atisane diterpenoid epimers from the roots of *Euphorbia fischeriana*, and their bioactivities. Natural Product Research, 2023, 37(8): 1300—1309.

[22] Lym R G. Leafy spurge (*Euphorbia esula*) control with glyphosate plus 2,4-D. Journal of Range Management, 2000, 53(1): 68—72.

[23] Xie H Q, Yang T Y, Zhao L, *et al*. Efficacy in control against *Stellera chamaejasme* L. and impact on forage grass yield of 48% Garlon EC. Journal of Grassland and Forage Science, 2018, 39(3): 38—40.
谢红旗, 杨廷勇, 赵磊, 等. 48%盖灌能乳油对草地狼毒的防治效果及牧草产量的影响. 草学, 2018, 39(3): 38—40.

[24] Pang N N, Cui Y, Hu J Y. Weather dependent dynamics of the herbicides florasulam, carfentrazone-ethyl, fluroxypyr-meptyl and fluroxypyr in wheat fields through field studies and computational simulation. Chemosphere, 2016, 165(1): 320—328.

[25] Chen C, Wang Q H, Mo C H, *et al*. Control efficiency of forefront on *Oxytropis ochrocephala* and its influence on rangeland vegetation. Grassland and Turf, 2015, 35(3): 72—77.

陈超, 王庆海, 莫重辉, 等. 迈士通除草剂对天然草地毒草黄花棘豆的防除效果及其植被的影响. 草原与草坪, 2015, 35(3): 72－77.

[26] Yu H Y, Li L X. Study on influence of applying herbicide to control *Ligularia virgaurea* on grassland vegetation. Qinghai Prataculture, 2018, 27(1): 7－10.
于红妍, 李林霞. 防除草地黄帚橐吾药剂筛选试验研究. 青海草业, 2018, 27(1): 7－10.

[27] Wu C X, Liu W T, Lu X T, *et al*. Resistance of three kinds of broadleaved weeds in wheat field to tribenuron-methyl in Henan province. Journal of Triticeae Crops, 2016, 36(9): 1264－1268.
吴翠霞, 刘伟堂, 路兴涛, 等. 河南省3种麦田阔叶杂草对苯磺隆的抗性. 麦类作物学报, 2016, 36(9): 1264－1268.

[28] Ge Y. Mechanism of soil fomesafen-contaminated remediation by different ecotypes of earthworms. Harbin: Northeast Agricultural University, 2025.
葛闫. 不同生态型蚯蚓对氟磺胺草醚污染土壤的修复机制研究. 哈尔滨: 东北农业大学, 2025.

[29] Bao P A, Wen Z L, Wang Y, *et al*. Effects of different forage reseeding patterns on plant community structure and soil characteristics in desert steppe. Acta Prataculturae Sinica, 2025, 34(10): 62－73.
鲍平安, 文志林, 王炎, 等. 不同牧草补播模式对荒漠草原植物群落结构及土壤特性的影响. 草业学报, 2025, 34(10): 62－73.

[30] Yang X L. Standard operating procedures for biological activity testing of pesticides－herbicides volume. Chinese Journal of Pesticide Science, 2017, 19(2): 188.
杨新玲. 农药生物活性测试标准操作规范——除草剂卷. 农药学学报, 2017, 19(2): 188.

[31] Duan G H, Wang M, Chen L, *et al*. Effects of three pre-emergence herbicides on weed control in *Atractylodes lancea* and their safety evaluation. Plant Protection, 2024, 50(2): 325－331.
段功豪, 王萌, 陈雷, 等. 三种苗前除草剂对茅苍术杂草防治效果及安全性评价. 植物保护, 2024, 50(2): 325－331.

[32] Feng L, Tian X S, Yue M F, *et al*. Chemical control abilities of 15 kinds of herbicides on the seedling and mature plants of ragweed (*Ambrosia artemisiifolia* L.). Chinese Agricultural Science Bulletin, 2011, 27(25): 117－120.
冯莉, 田兴山, 岳茂峰, 等. 15种除草剂对不同生长时期豚草的防效评价. 中国农学通报, 2011, 27(25): 117－120.

[33] Li L, Hu J Y, Li Z Y, *et al*. Evaluation of control effects of 10 herbicides and their combinations on *Achnatherum splendens*. Plant Protection, 2020, 46(3): 285－290.
李炼, 胡警匀, 栗振义, 等. 10种除草剂及组合对芨芨草的防效评价. 植物保护, 2020, 46(3): 285－290.

[34] Deng L, Xie L, He W, *et al*. Research progress on control methods for *Oxytropis glabra*. Xinjiang Animal Husbandry, 2015, 10(2): 10－12.
邓利, 谢丽, 何雯, 等. 小花棘豆防除方法的研究进展. 新疆畜牧业, 2015, 10(2): 10－12.

[35] Xu M T, Wang H, Xu J C, *et al*. Safety and bioactivity evaluation of triclopyr on wheat. Journal of Triticeae Crops, 2022, 42(9): 1162－1169.
许孟桃, 王惠, 许锦程, 等. 三氯吡氧乙酸对小麦的安全性及生物活性评价. 麦类作物学报, 2022, 42(9): 1162－1169.

[36] Li B. The synthesis of fluroxypyr-dodecyl as herbicide. Wuhan: Wuhan Institute of Technology, 2010.
李博. 氯氟吡氧乙酸十二酯的合成工艺研究. 武汉: 武汉工程大学, 2010.

[37] Kang X D. Experimental trials and explorations on chemical control of *Stellera chamaejasme* in alpine pastoral regions. Xinjiang Animal Husbandry, 2008, 12(3): 63－64.
康旭东. 高寒牧区化除狼毒草试验探索. 新疆畜牧业, 2008, 12(3): 63－64.

[38] Duke S O, Powles S B. Glyphosate: a once-in-a-century herbicide. Pest Management Science, 2008, 64(4): 319－325.

[39] Chu S H, Huang Q C, Li L, *et al*. Control effects of different glyphosate mixtures on *Solidago canadensis* L. China Plant Protection, 2025, 45(2): 79－82, 90.
褚世海, 黄启超, 李林, 等. 草甘膦不同复配剂对加拿大一枝黄花的防效比较. 中国植保导刊, 2025, 45(2): 79－82, 90.

[40] Qiao P Y, Wang A D, Xie B H, *et al*. Effects of herbicides on invasive *Spartina alterniflora* in the Yellow River Delta. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(15): 5627－5634.
乔沛阳, 王安东, 谢宝华, 等. 除草剂对黄河三角洲入侵植物互花米草的影响. 生态学报, 2019, 39(15): 5627－5634.

[41] Bao G S, Wang H S, Zeng H. Effects of adding organosilicon adjuvants to Langdujing on enhancing control effect and plant diversity of grassland communities. Pratacultural Science, 2015, 32(2): 263－268.
鲍根生, 王宏生, 曾辉. 有机硅助剂对"狼毒净"防除狼毒效果及草地植物群落多样性的影响. 草业科学, 2015, 32(2): 263－268.

[42] Cao J J, Gu T, Zhang Z C, *et al*. Research on herbicides for controlling *Solidago canadensis* L. in different habitats. Journal of Weed Science, 2024, 42(4): 82－90.
曹晶晶, 谷涛, 张自常, 等. 防除不同生境下加拿大一枝黄花的除草剂研究. 杂草学报, 2024, 42(4): 82－90.

[43] Chen W M, Xu L L, Wu J J, *et al*. Effect of two pyridine herbicides on *Stelleropsis tianschanica* community and evaluation on yield and selectivity to gramineous pastures. Journal of Weed Science, 2016, 34(1): 43－46, 48－49.
陈卫民, 徐林林, 吴加军, 等. 2种吡啶类除草剂对天山假狼毒群落影响和禾本科牧草产草量及安全性评价. 杂草学报, 2016, 34(1): 43－46, 48－49.

[44] Wang Y Q, Song M L, Bao G S, *et al*. Variation of C, N and P stoichiometry in plant and soil after removal *Stellera chamaejasme* in *Stellera chamaejasme* patches. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(15): 6280－6288.
王玉琴, 宋梅玲, 鲍根生, 等. 防除狼毒对狼毒斑块植物-土壤C、N、P化学计量特征的影响. 生态学报, 2021, 41(15): 6280－6288.

[45] Zhao C Z, Fan S Y, Yin C Q. Herbicide technology to combat poisonous weed containing degraded grassland. Acta Prataculturae Sinica, 2004, 40(4): 87－94.
赵成章, 樊胜岳, 殷翠琴. 喷施灭狼毒治理毒杂草型退化草地技术研究. 草业学报, 2004, 40(4): 87－94.

[46] Zhang X H, Liu L L, Fu X Y. The brief introduction of the properties applications and environmental residues of glyphosate herbicides. Leather Manufacture and Environmental Technology, 2023, 4(18): 57－59.
张旭鸿, 刘莲莲, 付晓燕. 简述草甘膦除草剂的特性、应用及环境残留. 皮革制作与环保科技, 2023, 4(18): 57－59.

[47] Rodriguez A M, Jacobo E J. Glyphosate effects on floristic composition and species diversity in the Flooding Pampa grassland (Argentina). Agriculture Ecosystems & Environment, 2010, 138(3/4): 222－231.