

DOI: 10.11686/cyxb2025163

http://cyxb.magtech.com.cn

刘瞳, 苏日力格, 姜娜, 等. 狼毒大戟扩散对呼伦贝尔草原植物群落演替及土壤理化性质的影响. 草业学报, 2026, 35(5): 72—84.

LIU Tong, Surilige, JIANG Na, et al. Impacts of *Euphorbia fischeriana* invasion on plant community succession and soil physicochemical properties in Hulunbuir grassland. Acta Prataculturae Sinica, 2026, 35(5): 72—84.

## 狼毒大戟扩散对呼伦贝尔草原植物群落演替及土壤理化性质的影响

刘瞳<sup>1,2</sup>, 苏日力格<sup>1,3</sup>, 姜娜<sup>1</sup>, 庞波<sup>1</sup>, 乌日力格<sup>1,3</sup>, 杨陶阳<sup>1,2</sup>, 张海芳<sup>1\*</sup>, 赵建宁<sup>1,2</sup>, 杨殿林<sup>1</sup>

(1. 农业农村部环境保护科研监测所, 天津 300191; 2. 东北农业大学资源与环境学院, 黑龙江 哈尔滨 150006; 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)

**摘要:** 狼毒大戟是典型草原有毒植物, 近年来在呼伦贝尔草原快速蔓延形成危害, 然而其扩散机制及生态影响尚不明晰, 本研究旨在通过生态位分析探讨狼毒大戟扩散对植物群落的重构机制, 以及对土壤养分的影响。结果表明, 随着狼毒大戟扩散程度的增加, 草地植物群落中优势物种由胡枝子(优势度 25.93%) 替换为狼毒大戟(优势度 18.90%), 狼毒大戟重度危害区植物群落生物量相较于无危害对照区显著下降 27%, 群落间主要植物的生态位宽度呈明显收缩, 群落主要植物间生态位重叠指数平均值由 0.55 上升至 0.65, 种间竞争加剧。另一方面狼毒大戟的种群扩散显著增加了土壤全氮、速效磷、铵态氮的含量, 其含量相对对照区分别显著提升 41.0%、29.8%、19.8%。土壤有机质含量呈先下降后上升趋势。研究结果表明, 狼毒大戟通过“肥力岛”效应重构退化草地土壤养分含量, 并提升了其与群落其他植物间的竞争优势, 同时降低草地生产力。因此, 控制狼毒大戟的扩散并促进本土植物恢复成为草地修复的关键。

**关键词:** 狼毒大戟; 生态位; 群落结构; 肥力岛效应; 草地生产力

## Impacts of *Euphorbia fischeriana* invasion on plant community succession and soil physicochemical properties in Hulunbuir grassland

LIU Tong<sup>1,2</sup>, Surilige<sup>1,3</sup>, JIANG Na<sup>1</sup>, PANG Bo<sup>1</sup>, WURILIGE<sup>1,3</sup>, YANG Tao-yang<sup>1,2</sup>, ZHANG Hai-fang<sup>1\*</sup>, ZHAO Jian-ning<sup>1,2</sup>, YANG Dian-lin<sup>1</sup>

1. Agro-environmental Protection Institute, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Tianjin 300191, China; 2. College of Resources and Environment, Northeast Agricultural University, Harbin 150006, China; 3. College of Life Sciences and Technology, Inner Mongolia Normal University, Hohhot 010022, China

**Abstract:** The toxic plant *Euphorbia fischeriana* has spread rapidly in the Hulunbuir grassland in recent years, posing a significant ecological threat. However, its invasion mechanisms and ecological impacts remain unclear. This niche analysis study aimed to elucidate the restructuring mechanisms of plant communities and soil nutrient dynamics following *E. fischeriana* colonization. Results revealed that as the invasion intensity of *E. fischeriana* increased, the dominant species in the grassland community shifted from *Lespedeza bicolor* (dominance: 25.93%) to *E. fischeriana* (dominance: 18.90%). In severely invaded areas, plant community biomass decreased significantly by

收稿日期: 2025-04-29; 改回日期: 2025-08-28

基金项目: 国家重点研发计划(2023YFF1304102)资助。

作者简介: 刘瞳(1996—), 男, 天津人, 在读硕士。E-mail: happyzhj09@sina.com

\* 通信作者 Corresponding author. E-mail: zhanghaifang01@caas.cn

27% compared to control plots. Concurrently, the niche breadth of major plant species contracted markedly, and the average niche overlap index among community plants increased from 0.55 to 0.65, indicating intensified interspecific competition. Furthermore, the population expansion of *E. fischeriana* resulted in significantly elevated soil nutrient levels. Total nitrogen, available phosphorus, and ammonium nitrogen contents increased by 41.0%, 29.8%, and 19.8%, respectively, relative to controls. Soil organic matter exhibited an initial decline followed by a gradual rise. These findings suggest that *E. fischeriana* restructures soil nutrient availability in degraded grasslands through a “fertility island effect”, that provides enhanced its competitive advantage over native plants while reducing grassland productivity. This dual impact of *E. fischeriana* threatens the sustainable development of local animal husbandry. In conclusion, controlling *E. fischeriana* proliferation and restoring native plant communities are critical for grassland rehabilitation. This study highlights the necessity of balancing invasive species management with soil nutrient regulation to mitigate ecological degradation.

**Key words:** *Euphorbia fischeriana*; niche; community structure; fertility island effect; grassland productivity

呼伦贝尔草原位于内蒙古东北部,草原面积为 995.08 万  $\text{hm}^2$ ,是我国传统的畜牧业生产基地之一,同样也是我国北方重要的绿色生态屏障<sup>[1-2]</sup>。近十几年来由于气候变化和人为过度利用等诸多因素的协同作用,呼伦贝尔草原出现不同程度退化,表现为植物盖度下降,草地生产力降低以及土壤品质下降,草原退化严重影响草原生态系统服务功能和畜牧业可持续发展。值得注意的是,草原退化过程中群落中的伴生有毒植物凭借其有毒、耐贫瘠等特性不断扩散,挤占原生牧草生存空间,降低草地载畜能力,成为草原退化的典型标志<sup>[3-4]</sup>。据统计,草原毒害草面积约占可利用草原面积的 14.84%,每年因草原毒害草造成直接经济损失超过几十亿元<sup>[5-6]</sup>。近年来狼毒大戟(*Euphorbia fischeriana*)在呼伦贝尔草原呈现快速蔓延、局地爆发成灾趋势。狼毒大戟是大戟科大戟属多年生草本植物,作为草原典型毒害草之一,具有一般植物无法比拟的抗性,如耐旱、耐寒、耐贫瘠等<sup>[7]</sup>,对植物群落结构和土壤养分循环产生深远影响。

基于上述呼伦贝尔草原面临的严峻形势,尤其是狼毒大戟等有毒植物的快速蔓延对草原生态系统的冲击,深入探究其背后生态学机理至关重要。种间竞争是影响植物群落生物量以及物种多样性变化的最重要因素之一。生态位理论在理解各种生态过程,如种群进化和群落演替方面发挥着关键作用。其中生态位宽度和生态位重叠是量化植物种群生态位的重要指标,可进一步量化种群的资源利用效率、竞争/共存关系。研究指出,入侵植物拥有比本土植物更广泛的生态位,如毛叶山柳菊(*Hieracium pilosella*)可以改变其资源利用模式和生态位需求,实现对本土物种的竞争性排斥<sup>[8-9]</sup>。生态位重叠则表示群落中两个物种共享和竞争特定资源的程度,生态位重叠的程度越高表明物种之间的生态相似性越相近,竞争也更为激烈。黄波等<sup>[10]</sup>对不同类型退化草地植物种间关系的研究显示,毒害草型退化草地中,毒害草和本土种的生态位重叠值增加,种间竞争程度加剧。

目前针对草原有毒植物扩散的研究主要聚焦于对群落多样性及土壤养分特征的影响,其竞争优势尚未在生态位维度上充分研究,其资源利用策略是否通过生态位宽度扩张或生态位重叠驱动群落重构尚未可知。因此,本研究以内蒙古呼伦贝尔狼毒大戟型退化草地为对象,从生态位维度研究狼毒大戟的扩散蔓延对植物群落结构与土壤养分特征的影响,为内蒙古狼毒大戟型退化草地修复提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

试验样地位于内蒙古呼伦贝尔市陈巴尔虎旗(49°33′56.51″ N, 119°22′19.68″ E),海拔 741.7 m,属中温带半湿润和半干旱大陆性气候,冬季寒冷漫长,夏季凉爽短促,年均气温  $-1.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,年均降水量 320 mm,主要集中在 6—8 月,占全年降水量的 66.40%。样地优势植物以黄芩(*Scutellaria baicalensis*)、线叶菊(*Filifolium sibiricum*)、胡枝子(*Lespedeza bicolor*)和柄状薹草(*Carex pediformis*)为主,土壤类型为栗钙土。

## 1.2 试验设计与样本采集

2023年7月植物生长高峰期,在陈巴尔虎旗巴彦哈达苏木乡天然草原狼毒大戟危害区沿东、南、西、北4个方向各设一条样带。参照狼毒大戟综合防治技术规程(DB1507/T 96—2023)中的方法<sup>[11]</sup>,按照狼毒大戟的危害度分别设:对照CK(危害度0%)、轻度危害 $T_1$ (危害度 $\leq 30\%$ )、中度危害 $T_2$ ( $30\% < \text{危害度} \leq 45\%$ )和重度危害 $T_3$ (危害度 $> 45\%$ )的100 m $\times$ 100 m样地,在每个样地内按S取样法设置6个1 m $\times$ 1 m样方。样地间间隔不小于1000 m,样方间间隔不小于10 m。对样方内植物的种类、盖度和生物量等进行调查分析。每种植物现场鉴定后,用卷尺测量植物自然高度,通过样方框测量植被盖度,随后贴地面刈割,根据植物种类装入对应信封袋,带回实验室烘干并称重。土壤样本则由在每个样方内按“S”型取样法采集10个重复土壤样本(直径5 cm,深度20 cm)的混合物组成。采用四分法混合并收集土壤样品。然后将土壤样品过筛后,用无菌塑料容器运到实验室,并用干冰包装,每种处理设置6次重复。

## 1.3 土壤理化性质测定

土壤pH采用pH仪(pHS-3E,中国上海)以1:5的土水比测定,含水量采用烘干法测定;土壤有机质含量使用水合热重铬酸钾氧化比色法测定,速效磷含量采用碳酸氢钠浸提钼锑抗比色法测定<sup>[12]</sup>。铵态氮、硝态氮含量使用氯化钙浸提,连续流动分析仪(Seal analytical AA3,德国)测定<sup>[13]</sup>;全氮含量测定在催化条件下( $K_2SO_4$ : $CuSO_4$ : $Se=100:10:1$ 混合物)在石墨消化炉(SH220N,中国山东)380 $^{\circ}C$ 下消煮3.5 h,使用连续流动分析仪测定<sup>[14]</sup>;全磷含量采用硫酸—高氯酸消煮,连续流动分析仪测定<sup>[15]</sup>。

## 1.4 统计分析

利用Excel 2019计算植物物种重要值以及生态位宽度,使用R studio中的spaa包计算物种之间Levins生态位宽度及Pianka生态位重叠指数。使用R studio对土壤理化指标及群落多样性指数进行单因素方差分析(ANOVA)并使用Tukey HSD法进行多重比较;利用Canoco 5.0软件对优势物种重要值矩阵进行去势对应分析(detrended correspondence analysis, DCA),DCA排序前4个轴中最大值为0.95,适合进一步开展冗余分析(redundancy analysis, RDA)。在冗余分析中通过前向选择(forward selection)法和蒙特卡洛检验(Monte Carlo test,循环次数499)筛选影响显著( $P < 0.05$ )的环境因子,探讨环境因子对优势物种分布的影响。使用R studio和Canoco 5.0软件进行作图。

种群重要值:采用重要值(importance value, IV)来反映植物群落中物种优势度。分别计算每种植物的相对多度(relative abundance, A)、相对盖度(relative coverage, C)和相对生物量(relative biomass, B),得到某种植物相对重要值。计算公式如下:

$$IV = (A + C + B) / 3$$

$$A(\%) = (A_i / A_T) \times 100$$

$$C(\%) = (C_i / C_T) \times 100$$

$$B(\%) = (B_i / B_T) \times 100$$

式中: $A_i$ 为物种*i*的株数; $A_T$ 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*的生物量; $B_T$ 为群落中所有物种的生物量之和。

$\alpha$ 多样性指数:选择丰富度指数(S)、Shannon-Wiener多样性指数(H)、Simpson指数(D)以及Pielou均匀度指数(E)用于评估不同处理间植物多样性。计算公式如下:

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

$$D = 1 - \sum_{i=1}^S P_i^2$$

$$E = H / \ln S$$

式中:S为样方中物种总数; $P_i$ 为第*i*个物种的相对重要值。

生态位及生态位重叠:选取Levins生态位宽度( $B_i$ )以及Pianka生态位重叠指数( $O_{jk}$ )用以计算植物的生态位

宽度以及生态位重叠指数。

$$B_i = 1 / \left( \sum_{j=1}^r P_{ij}^2 \right)$$

$$O_{ik} = \sum_{j=1}^r P_{ij} P_{kj} / \sqrt{\sum_{j=1}^r P_{ij}^2 \sum_{k=1}^r P_{kj}^2}$$

式中:  $B_i$  为物种  $i$  的生态位宽度;  $O_{ik}$  为物种  $i$  和物种  $k$  的生态位重叠指数;  $P_{ij}$  和  $P_{kj}$  为物种  $i$  与物种  $k$  在资源  $j$  上的重要值占该物种在所有资源水平上的重要值的比例;  $r$  为样方总数。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同狼毒大戟危害度下植物群落结构变化

调查发现,狼毒大戟在 CK、 $T_1$ 、 $T_2$ 、 $T_3$  危害度下植物种类分别为 32、29、28、36 种(表 1)。狼毒大戟种群的扩散对草地群落结构有较为明显的影响,从表 1 和表 2 可以看出,随着狼毒大戟的扩散程度的加剧,群落中优势物种发生更迭。在狼毒大戟未扩散区,优势种为豆科牧草胡枝子(优势度 25.93%)。随狼毒大戟扩散程度的加剧,群落中的优势植物逐渐替换为黄芩(25.00%)、线叶菊(优势度 20.33%),最终形成以狼毒大戟(优势度 18.90%)为优势植物的退化草地。在狼毒大戟的扩散过程中,群落中优势物种多数呈下降趋势,如胡枝子、瓣蕊唐松草、羊草、贝加尔针茅的重要值从 CK 的 25.93%、8.48%、5.58%、4.50%,下降至重度危害的 13.66%、2.18%、1.91%、0.11%。此外,随着狼毒大戟扩散,群落中其他植物的变化情况也有所不同。如伴生种沙参的重要值先上升后下降,黄芩则表现出先升后降的变化。

另一方面从生产力角度进一步分析(表 2),群落优势物种胡枝子、瓣蕊唐松草、线叶菊、贝加尔针茅在  $T_3$  处理的地上生物量显著低于 CK。相比之下,沙参的生物量呈逐渐上升趋势并在  $T_3$  处理显著高于 CK;黄芩的生物量呈先升后降趋势,在  $T_1$  时最大且显著高于其他处理。总体而言,植物群落地上生物量呈下降趋势,CK 显著高于其他处理。

从群落生物多样性的角度分析(表 3),狼毒大戟的扩散对丰富度的影响呈“初期抑制、后期恢复”的趋势,丰富度指数在  $T_2$  处理时显著低于对照组(CK),但在  $T_3$  处理时显著回升。此外,狼毒大戟的扩散并未对 Shannon-Wiener、Simpson 和 Pielou 指数造成显著影响。

### 2.2 不同危害度下狼毒大戟与伴生种生态位分析

生态位宽度是物种所能利用的各种资源的综合指标,生态位宽度占据较大生态位的植物种群通常具有更强的环境适应能力和较高的资源利用效率。本研究显示不同狼毒大戟危害度下,群落中 10 种主要物种的生态位宽度发生明显变化(表 4)。在狼毒大戟未扩散区域,柄状藁草(5.86)的生态位宽度最宽,胡枝子(5.78)次之,在狼毒大戟扩散后,在轻度危害区,狼毒大戟的生态位宽度达到 5.70,仅次于群落优势种柄状藁草(5.95),排名位于第二位,在中度和重度危害区,其生态位宽度进一步扩张,在重度危害区生态位宽度达到 5.81,成为群落的优势种。相对应的群落中其他主要植物的生态位存在不同程度的变化,其中大部分植物的生态位呈收缩趋势,如胡枝子生态位宽度由 5.78 下降至 5.39;瓣蕊唐松草由 4.78 下降至 3.42;羊草由 3.44 下降至 1.89,贝加尔针茅由 2.96 下降至 1.00。这表明狼毒大戟的扩散侵占了其他植物的生态位空间,导致其他植物生物量明显降低。然而也有不同趋势,如黄芩在狼毒大戟扩散初期具有一定的竞争优势,生态位宽度达到 5.50,优势度与生物量也达到峰值,然而随着狼毒大戟扩散程度的加剧,其适应性逐渐减弱。此外沙参的生态位宽度呈上升趋势,由 2.47 上升至 5.72,显示出较好的适应性。

生态位重叠在一定情况下能够反映出物种之间的竞争情况(图 1)。在所调查的草地群落之中,群落中优势物种之间的生态位重叠指数平均值存在明显变化:随狼毒大戟危害度增加呈上升趋势,从低到高依次为狼毒大戟未扩散区(0.55)、轻度扩散区(0.59)、中度扩散区(0.61)、重度扩散区(0.65)。另一方面,群落优势植物之间生态位重叠指数大于 0.50 的数量,由轻度危害的 16 对上升至重度危害的 22 对。以上结果表明群落主要物种之间资源利用的竞争程度随狼毒大戟危害度的加剧而变得更为激烈。

表1 狼毒大戟不同危害度处理下植物群落优势度

Table 1 Dominance of plant community under different infestation levels of *E. fischeriana* (%)

序号No.	植物名 Plant name	CK	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>3</sub>	序号No.	植物名 Plant name	CK	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>3</sub>
1	柄状藜草 <i>C. pediformis</i>	16.63	16.46	17.33	17.96	23	直立黄芩 <i>Scutellaria orthocalyx</i>	—	—	—	1.54
2	线叶菊 <i>F. sibiricum</i>	16.98	12.24	20.33	15.80	24	防风 <i>Saposhnikovia divaricata</i>	0.49	—	0.73	0.14
3	胡枝子 <i>L. bicolor</i>	25.93	11.33	10.79	13.66	25	冷蒿 <i>Artemisia frigida</i>	0.46	0.30	—	0.48
4	黄芩 <i>S. baicalensis</i>	3.87	25.00	13.73	10.74	26	地榆 <i>Sanguisorba officinalis</i>	0.21	0.32	0.58	—
5	狼毒大戟 <i>E. fischeriana</i>	—	8.30	16.93	18.90	27	二裂叶委陵菜 <i>Potentilla bifurca</i>	0.28	—	—	0.45
6	瓣蕊唐松草 <i>Thalictrum petaloideum</i>	8.48	2.61	3.35	2.18	28	草地早熟禾 <i>Poa pratensis</i>	—	—	0.42	0.30
7	羊草 <i>Leymus chinensis</i>	5.58	6.99	1.51	1.91	29	蓬子菜 <i>Galium verum</i>	0.06	0.29	0.15	0.19
8	沙参 <i>Adenophora stricta</i>	1.59	3.32	4.50	3.92	30	山韭 <i>Allium senescens</i>	0.23	—	0.35	—
9	贝加尔针茅 <i>Stipa baicalensis</i>	4.50	3.08	0.27	0.11	31	鸢葱 <i>Takhtajaniantha austriaca</i>	—	—	0.11	0.36
10	棉团铁线莲 <i>Clematis hexapetala</i>	2.15	1.14	1.38	2.59	32	猪毛蒿 <i>Artemisia scoparia</i>	—	0.16	0.24	0.06
11	花苜蓿 <i>Medicago ruthenica</i>	3.57	2.74	0.36	0.17	33	轮叶委陵菜 <i>Potentilla verticillaris</i>	0.12	0.07	—	0.24
12	细叶白头翁 <i>Pulsatilla turczaninowii</i>	1.87	1.25	0.49	1.08	34	野鸢尾 <i>Iris dichotoma</i>	—	—	0.34	—
13	裂叶蒿 <i>Artemisia laciniata</i>	0.33	2.70	0.91	0.18	35	狗舌草 <i>Senceto campestris</i>	0.19	0.09	—	—
14	北柴胡 <i>Bupleurum chinense</i>	0.59	0.39	1.87	1.35	36	羽茅 <i>Achnatherum sibiricum</i>	—	—	—	0.28
15	囊花鸢尾 <i>Iris ventricosa</i>	0.58	0.96	1.02	1.00	37	星毛委陵菜 <i>Potentilla acaulis</i>	—	—	—	0.27
16	菊叶委陵菜 <i>Potentilla tanacetifolia</i>	1.11	0.77	1.25	0.46	38	柳叶婆婆纳 <i>Veronica linariifolia</i>	—	0.09	0.12	0.05
17	牧马豆 <i>Thermopsis lanceolata</i>	1.21	0.70	—	1.21	39	大头委陵菜 <i>Potentilla conferta</i>	0.21	—	—	—
18	北麻花头 <i>Serratula komarovii</i>	2.47	0.36	—	0.12	40	洽草 <i>Koeleria macrantha</i>	—	—	—	0.16
19	大黄花 <i>Cymbaria daurica</i>	0.23	0.42	0.23	1.25	41	石竹 <i>Dianthus chinensis</i>	0.10	—	—	—
20	多叶棘豆 <i>Oxytropis myriophylla</i>	0.51	0.73	0.57	0.14	42	粗根鸢尾 <i>Iris tigridia</i>	0.09	—	—	—
21	大野豌豆 <i>Vicia sinogigantea</i>	0.46	0.75	0.14	0.39	43	柳穿鱼 <i>Linaria vulgaris</i>	—	—	—	0.05
22	大针茅 <i>Stipa grandis</i>	0.63	0.64	—	0.30						

CK: 无危害度 No hazard degree; T<sub>1</sub>: 轻度危害度 Mild hazard degree; T<sub>2</sub>: 中度危害度 Moderate hazard degree; T<sub>3</sub>: 重度危害度 Severe hazard degree. —: 无数据 No data. 下同 The same below.

表 2 狼毒大戟不同危害度下群落主要植物地上生物量

Table 2 Aboveground biomass of dominant plant species under different infestation levels of *E. fischeriana* ( $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ )

项目 Item	CK	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>3</sub>
狼毒大戟 <i>E. fischeriana</i>	0±0d	24.79±4.79c	39.76±2.79b	52.91±6.02a
线叶菊 <i>F. sibiricum</i>	60.96±18.55a	22.08±8.91b	29.29±5.11b	34.87±6.50b
柄状薹草 <i>C. pediformis</i>	37.71±3.76a	26.21±3.20b	29.79±3.16ab	31.96±3.98ab
胡枝子 <i>L. bicolor</i>	87.76±11.28a	26.92±7.54b	16.90±3.73b	27.71±3.91b
黄芩 <i>S. baicalensis</i>	8.66±5.02b	74.83±20.75a	30.56±3.98b	27.04±7.34b
沙参 <i>A. stricta</i>	4.45±2.45b	5.71±1.81ab	9.08±2.90ab	11.55±1.22a
棉团铁线莲 <i>C. hexapetala</i>	14.97±11.23a	2.79±2.63a	3.36±2.40a	8.99±3.36a
瓣蕊唐松草 <i>T. petaloideum</i>	26.22±6.70a	2.28±0.72b	3.03±2.03b	2.34±1.15b
贝加尔针茅 <i>S. baicalensis</i>	12.44±5.16a	3.85±1.52b	0.10±0.10b	0.13±0.13b
羊草 <i>L. chinensis</i>	9.03±5.12a	7.01±5.46a	1.13±1.13a	1.29±1.01a
其他植物 Other plants	35.22±5.29a	18.45±3.69b	7.93±1.94b	12.70±4.07b
合计 Total	297.40±23.74a	202.47±18.31b	170.93±6.57b	217.06±14.40b

数据为平均值±标准误,同行不同小写字母表示不同处理间差异显著( $P<0.05$ ),下同。Data are presented as mean±standard error. Different lowercase letters within the same row indicate significant differences among different treatments ( $P<0.05$ ). The same below.

表 3 植物群落丰富度及多样性

Table 3 Plant community richness and diversity

指标 Index	CK	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>3</sub>
丰富度指数 Species richness index (S)	18.33±0.76a	15.00±0.82b	13.83±0.70b	19.60±0.51a
Shannon-Wiener 指数 Shannon-Wiener index (H)	2.18±0.04a	2.09±0.09a	2.12±0.06a	2.22±0.07a
Simpson 指数 Simpson index (D)	0.84±0.01a	0.83±0.02a	0.85±0.01a	0.83±0.01a
Pielou 指数 Pielou index (E)	0.75±0.01a	0.77±0.03a	0.81±0.02a	0.78±0.01a

### 2.3 不同狼毒大戟危害度下土壤理化性质变化

本研究表明狼毒大戟在不同的危害梯度下土壤理化指标呈不同的变化趋势(表 5),其中各处理的土壤 pH 维持在 7.68~7.88,总体呈弱碱性,入侵区与狼毒大戟未入侵区相比无显著差异( $P>0.05$ )。土壤含水量为 13.52%~14.67%,且不同危害度之间并无显著差异( $P>0.05$ ),这表明狼毒大戟扩散未显著改变土壤酸碱度以及土壤含水量。土壤有机质含量呈“V”型变化趋势,其中狼毒大戟轻度危害阶段有机质含量由 61.31  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$  下降至 57.67  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,相较于对照显著降低 5.94% ( $P<0.05$ ),随后有机质含量逐渐上升,重度危害下土壤有机质含量达到峰值,为 69.31  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,与 CK 相比显著上升 13.05% ( $P<0.05$ )。土壤全氮含量呈上升趋势,由对照的 1.04  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$  上升至重度危害的

1.41  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,土壤铵态氮和硝态氮含量呈不同的变化趋势,其中重度危害度下土壤铵态氮含量相较于对照上升 19.80%,与此相对土壤硝态氮含量则从 15.49  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  下降至 13.12  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,显著降低 15.30%。土壤速效磷含

表 4 狼毒大戟不同危害度下群落主要植物的生态位宽度

Table 4 Niche breadth of dominant community plant species under different infestation levels of *E. fischeriana*

植物名 Plant name	CK	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>3</sub>
狼毒大戟 <i>E. fischeriana</i>	—	5.70	5.93	5.81
柄状薹草 <i>C. pediformis</i>	5.86	5.95	5.86	5.77
线叶菊 <i>F. sibiricum</i>	4.36	3.17	5.60	5.39
胡枝子 <i>L. bicolor</i>	5.78	5.16	4.15	5.39
黄芩 <i>S. baicalensis</i>	2.38	5.50	4.23	4.45
沙参 <i>A. stricta</i>	2.47	3.84	4.27	5.72
棉团铁线莲 <i>C. hexapetala</i>	1.78	1.22	3.57	4.44
瓣蕊唐松草 <i>T. petaloideum</i>	4.78	3.78	3.03	3.42
羊草 <i>L. chinensis</i>	3.44	1.95	1.00	1.89
北柴胡 <i>B. chinense</i>	—	—	2.64	3.52
贝加尔针茅 <i>S. baicalensis</i>	2.96	4.00	1.00	1.00

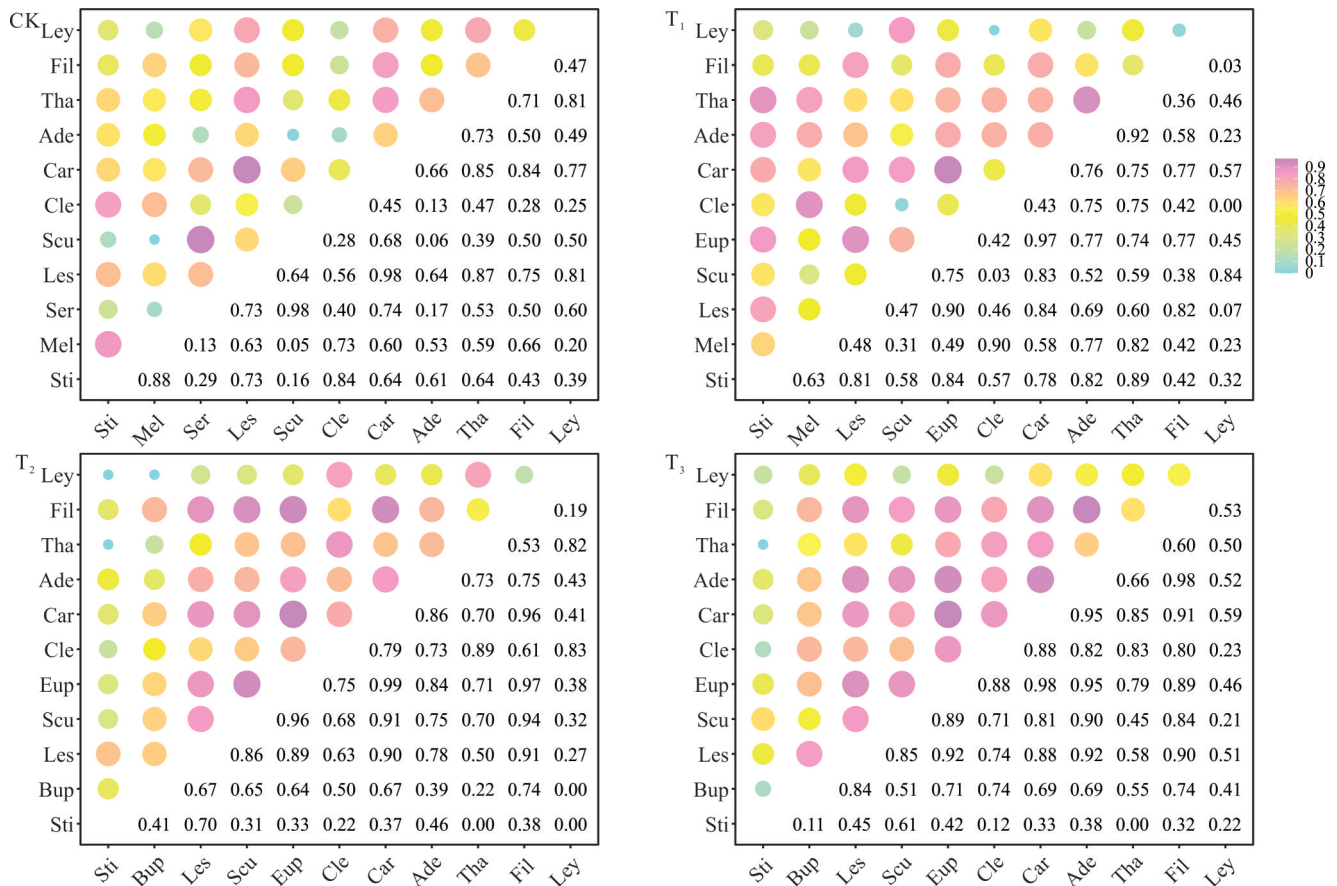


图1 狼毒大戟不同危害度下草地主要物种生态位重叠指数

Fig. 1 Niche overlap index of dominant grassland species under different infestation levels of *E. fischeriana*

Sti: 贝加尔针茅 *S. baicalensis*; Mel: 花苜蓿 *M. ruthenica*; Ser: 北麻花头 *S. komarovii*; Les: 胡枝子 *L. bicolor*; Scu: 黄芩 *S. baicalensis*; Cle: 棉团铁线莲 *C. hexapetala*; Car: 柄状薹草 *C. pediformis*; Ade: 沙参 *A. stricta*; Tha: 瓣蕊唐松草 *T. petaloideum*; Fil: 线叶菊 *F. sibiricum*; Ley: 羊草 *L. chinensis*; Bup: 北柴胡 *B. chinense*; Eup: 狼毒大戟 *E. fischeriana*. 下同 The same below.

表5 不同狼毒大戟危害度下土壤理化性质

Table 5 Soil physicochemical properties under different infestation levels of *E. fischeriana*

指标 Index	CK	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>3</sub>
pH	7.68±0.12a	7.88±0.03a	7.74±0.07a	7.75±0.10a
土壤含水量 Soil water content (%)	14.67±0.67a	13.52±0.30a	14.20±0.53a	13.55±0.21a
有机质 Soil organic matter (g·kg <sup>-1</sup> )	61.31±1.35b	57.67±1.00c	59.28±0.38bc	69.31±0.37a
全氮 Total nitrogen (g·kg <sup>-1</sup> )	1.04±0.01b	1.32±0.05a	1.40±0.13a	1.41±0.05a
铵态氮 Ammonium nitrogen (mg·kg <sup>-1</sup> )	12.27±0.17a	11.39±0.41c	12.64±0.22bc	14.70±0.47a
硝态氮 Nitrate nitrogen (mg·kg <sup>-1</sup> )	15.49±0.40a	14.61±0.29a	14.57±0.52a	13.12±0.30b
全磷 Total phosphorus (g·kg <sup>-1</sup> )	0.48±0.02a	0.42±0.02ab	0.38±0.03b	0.40±0.03b
速效磷 Available phosphorus (mg·kg <sup>-1</sup> )	5.30±0.17b	5.47±0.11b	5.79±0.21b	6.88±0.30a

量相较于对照显著上升 29.81%，达到 6.88 mg·kg<sup>-1</sup> ( $P < 0.05$ )。与速效磷相反，土壤全磷含量呈下降趋势，相较于对照显著降低 16.67% ( $P < 0.05$ )。

#### 2.4 植被特征与土壤理化性质的关系

将群落植物的地上生物量、狼毒大戟地上生物量、土壤理化指标、多样性指数进行相关分析(图2),用于探究狼毒大戟扩散与土壤养分之间的关系,结果显示,狼毒大戟生物量与土壤中的速效磷、全氮含量呈极显著正相关

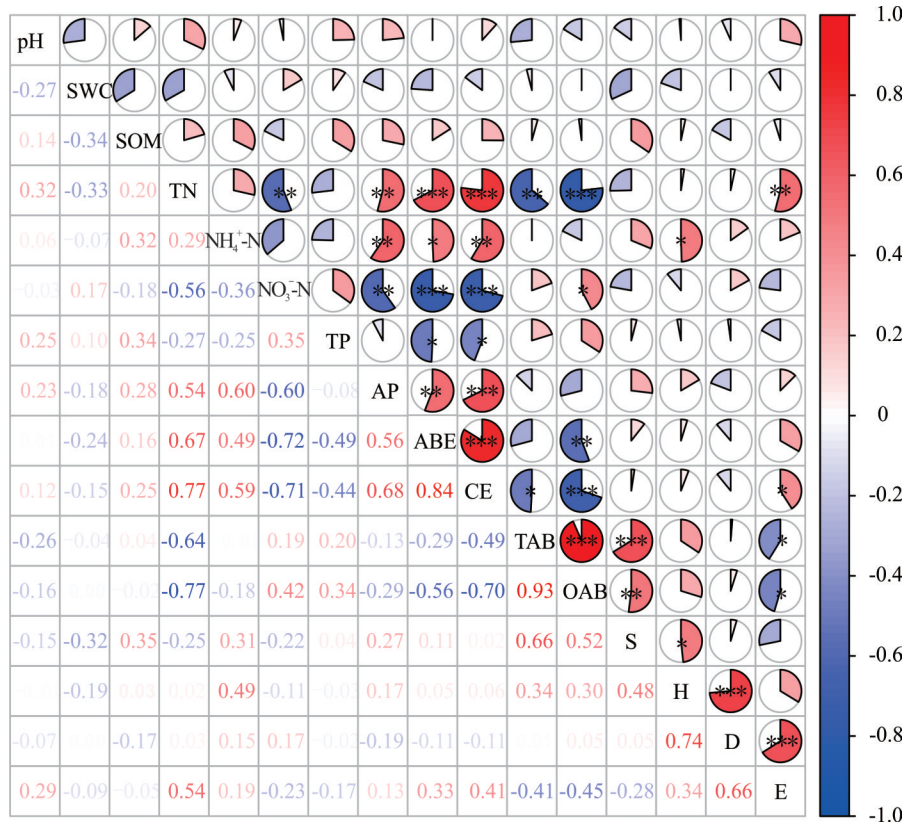


图 2 地上植物生物量、群落多样性指数与土壤理化因子的相关系数

Fig. 2 Correlation coefficient between aboveground plant biomass, community diversity indices, and soil physicochemical factors

\*:  $P < 0.05$ ; \*\*:  $P < 0.01$ ; \*\*\*:  $P < 0.001$ . SWC: 土壤含水量 Soil water content; SOM: 土壤有机质 Soil organic matter; AP: 速效磷 Available phosphorus; TN: 全氮 Total nitrogen; TP: 全磷 Total phosphorus; ABE: 狼毒大戟地上生物量 Aboveground biomass of *E. fischeriana*; CE: 狼毒大戟盖度 Coverage of *E. fischeriana*; TAB: 总地上生物量 Total aboveground biomass; OAB: 其他植物地上生物量 Other plants aboveground biomass; S: 物种丰富度 Species richness; H: Shannon-Wiener 指数 Shannon-Wiener index; D: Simpson 指数 Simpson index; E: Pielou 指数 Pielou index. 色阶条代表相关性, 红色表示正相关, 蓝色表示负相关, 颜色深浅表示相关性强弱。下同。The color bar reflects correlation coefficients: red indicates positive correlations, blue indicates negative correlations, with color intensity representing correlation strength. The same below.

( $P < 0.01$ ), 与土壤铵态氮含量呈极显著正相关( $P < 0.01$ ), 与硝态氮含量呈极显著负相关( $P < 0.001$ ), 与土壤全磷含量呈显著负相关( $P < 0.05$ )。以上结果表明狼毒大戟扩散对土壤速效养分含量影响明显。群落其他植物的生物量与土壤硝态氮含量呈显著正相关( $P < 0.05$ ), 与土壤全氮含量呈极显著负相关( $P < 0.001$ )。

使用冗余分析(RDA)探究狼毒大戟不同危害度下群落主要植物生物量与环境因子之间的关系(图 3)。RDA 轴第一轴解释率为 49.27%, RDA 轴第二轴解释率为 28.70%, 累计贡献率达到 77.97%。狼毒大戟在养分利用策略上与群落的主要植物呈现出明显分离, 且狼毒大戟与土壤含量增加的养分正相关, 群落其他植物与含量降低土壤养分如硝态氮、全磷含量正相关, 以上结果表明, 狼毒大戟通过调节土壤养分来创造适合生长的环境并维持竞争力。

### 3 讨论

#### 3.1 狼毒大戟扩散影响植物群落结构并降低草地生产力

物种组成是植物群落的基础特征, 植物群落结构变化通过物种优势度、生物量的差异来体现。本研究发现群落优势种随狼毒大戟危害度的增加而发生更迭, 植物中主要植物重要值与生物量下降, 群落植物地上生物量显著降低。这与毒害草型退化草地中的研究结果<sup>[16]</sup>相一致。研究表明, 在小尺度上生境的破碎化可能导致群落资源与空间容量下降, 加剧植被群落空间格局以及竞争关系的不确定性<sup>[17]</sup>。而过度放牧延长了植物群落的自然更新周期, 导致群落中植物生物量与盖度呈明显降低, 部分草地出现“空窗”, 为有毒植物扩散提供了良好的生长空

间<sup>[18]</sup>。另一方面是狼毒大戟的扩散还得益于自身较强的生态适应性,它具有较强的耐寒耐贫瘠能力、结实率高、种子库更新能力较强、繁殖能力较强<sup>[7]</sup>。此外狼毒大戟的根系分布范围较广,单株根系延伸范围可达 $1\text{ m}^3$ ,且单株根系鲜重最高可达约 $2\text{ kg}$ ,发达的根系既可以高效获取土壤中养分,又可以将植物光合产物存储于根内,从而增加植物的抗逆能力。同时狼毒大戟返青时间在5月上旬,相较于群落其他植物早 $14\text{ d}$ 左右<sup>[19]</sup>,使其在争夺草地的养分中占据有利地位,此外随着狼毒大戟的不断生长,其下郁闭度不断提高,一定程度上降低其他植物的光合利用效率,制约其他植物的生长。狼毒大戟作为春季植物,年生长时间较短(5月上旬萌发,7月上旬植株干枯进入高温休眠期),其生长速率较快。Tedersoo等<sup>[20]</sup>的研究表明快速生长植物的根际环境中倾向于积累病原真菌,降低菌根真菌的相对丰度。这种变化可能影响周围植物的养分获取增加致病性,从而削弱其竞争力,而狼毒大戟凭借自身的抗病性在群落的竞争中占据优势。综合以上结果表明狼毒大戟能显著影响植物群落,降低草地生产力。

本研究还发现,狼毒大戟的扩散对群落中物种多样性会造成影响。在重度扩散下狼毒大戟的丰富度显著高于中度危害。Zhang等<sup>[21]</sup>的研究表明草原有毒植物普遍具有刺激性气味,导致食草动物选择性避食,从而为伴生种的发育提供了空间。本研究Pielou指数呈先上升后下降趋势,表现出随着狼毒大戟扩散程度的加剧,草地群落逐渐呈现出均一化,而后逐渐复杂化的现象。王合云等<sup>[22]</sup>认为重度退化草原的均匀度最高,物种分布更加均一化,本研究中狼毒大戟扩散初期的结果与其相同。此现象表明狼毒大戟在扩散初期通过竞争作用排斥群落优势物种,进而造成物种丰富度下降,群落呈现均一化趋势,而在重度危害阶段狼毒大戟又为部分耐胁迫物种提供生态位,物种丰富度回升,群落均一化程度降低。另一方面,刘钟龄等<sup>[23]</sup>指出,退化群落的物种均匀度随着恢复演替进程逐渐降低,本研究中狼毒大戟重度扩散区的结果与其一致。这是由于在狼毒大戟重度危害阶段为部分耐胁迫物种提供生态位,植物丰富度上升。以上结果表明狼毒大戟的扩散在一定程度上起到生态涵养效应,在退化草地向荒漠化发展的过程中起到重要的防御作用。然而从草地资源利用的角度分析,狼毒大戟的扩散以耐受力强、生物量低的物种更替高生产力植物(如羊草、胡枝子等)为代价,导致群落总生物量下降 $27.0\%$ 。因此,狼毒大戟的扩散会加剧可食性牧草产量下降与家畜食物供应不足,可以通过物理刈割<sup>[24]</sup>、化学防控<sup>[7,25]</sup>、结合补播本地草种的方式<sup>[26]</sup>在防控狼毒大戟的同时恢复本地植物群落,提高牧草的生产力。

### 3.2 狼毒大戟扩散过程中植物群落演替特征及植物生态位变化

生态位理论是现代生态学的重要原理之一,生态位宽度反映了物种对环境资源的利用多样性或专一化程度,与物种的生态学、进化生物学特征、种间的相互适应以及相互作用具有紧密的联系<sup>[27-28]</sup>。也就是说某一种植物的生态位宽度越宽,表明对环境的适应能力越好,对环境资源的利用率越高。本研究显示随着狼毒大戟危害度的增加,群落中主要植物的生态位呈现出不同变化趋势。其中豆科植物中的胡枝子、花苜蓿,禾本科的贝加尔针茅、羊草等优势植物的生态位宽度呈现出明显收缩,而其他植物如沙参等则呈现持续扩张趋势。有研究表明土壤养分含量的变化是驱动植物生态位重构的重要因素之一。本研究发现,狼毒大戟扩散显著提高了土壤速效磷、铵态氮、全氮含量,形成资源主导型竞争策略。与马建国等<sup>[29]</sup>在黄帚橐吾(*Ligularia virgaurea*)型退化草地的研究结论一致,即有毒植物通过形成“肥力岛”的策略来压缩群落优势种的资源利用空间。此外本研究还发现狼毒大戟

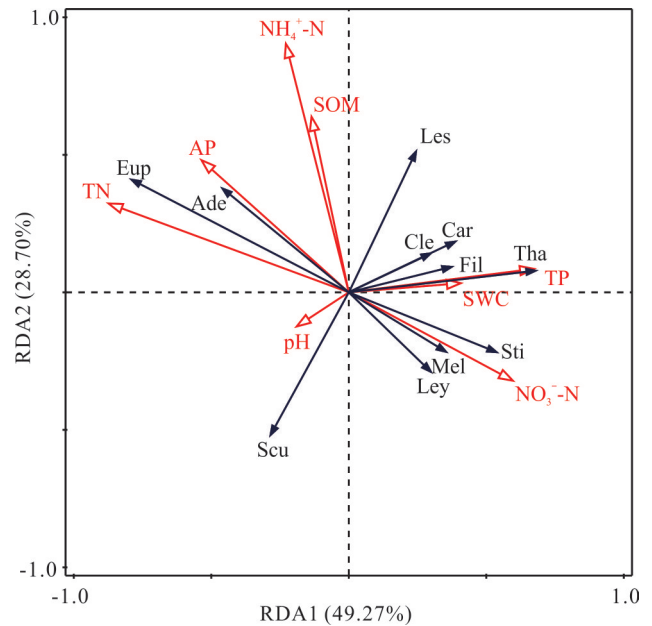


图3 群落主要植物与土壤理化因子的冗余分析

Fig. 3 Redundancy analysis (RDA) of main plant species and soil physicochemical factors in the community

可以通过养分含量来影响优势植物的生态位宽度。在本研究中羊草与贝加尔针茅、瓣蕊唐松草养分吸收策略上高度相似,狼毒大戟的入侵加剧了这种趋同性劣势,导致物种在相同资源维度上竞争,最终因资源获取不足而生态位收缩,生物量降低。与此同时,本研究还发现柄状藁草在狼毒大戟扩散过程中生态位变化不显著,沙参的生态位随狼毒大戟入侵呈现出升高趋势,这可能是由于植物的功能特性或者采取资源多维化利用策略降低与狼毒大戟的直接竞争,未来可采取对植物功能性状调查,或计算群落植物多维生态位模型的方法进一步探索物种间资源分配策略的互作机制。

生态位重叠表示种群间对资源的共享能力及环境资源的利用状况,反映了种群对相同生境条件下资源的利用状况、竞争关系及种间对生态空间资源利用的相似程度<sup>[30-32]</sup>。植物种群间生态位重叠值越高,种间竞争越激烈<sup>[33]</sup>。本研究发现随着狼毒大戟危害度的增加,群落生态位重叠指数由 0.55 上升至 0.65,且主要植物生态位重叠指数大于 0.50 的物种对数明显上升,以上结果表明狼毒大戟的扩散导致群落主要植物在重叠生态位维度上激烈争夺,造成优势物种生态位变窄,优势度降低,生物量下降。

### 3.3 狼毒大戟扩散对土壤理化性质的影响

土壤在草地生态系统中扮演着关键角色,既是物质和能量交换的载体,又是植物生长和养分的来源<sup>[4,34-35]</sup>。本研究发现狼毒大戟不同危害度下土壤有机质含量存在显著差异,呈先降低后升高的趋势,这与孙洁瑜<sup>[36]</sup>的研究结果一致。在轻度、中度危害时狼毒大戟加剧了物种间的竞争,造成群落的物种丰富度和生物量显著降低。Bai 等<sup>[37]</sup>的研究显示植物群落多样性可以通过影响地上和地下生物量分配、凋落物和根系分泌物碳输入影响土壤有机质的形成与积累,Spohn 等<sup>[38]</sup>的研究进一步表明土壤有机碳受到群落植物多样性的影响,同时植物地上生物量也与土壤有机碳含量相关。以上研究表明狼毒大戟可能通过影响群落生物多样性与生物量影响土壤有机质含量。另一方面有研究表明,草原有毒凋落物的积累与根系分泌物对土壤有机质积累起到重要作用<sup>[39]</sup>,这也是狼毒大戟重度危害度下土壤有机质含量增加的因素之一。氮在植物生长中起到关键作用,本研究发现,重度扩散的全氮含量显著高于 CK,这是由于狼毒大戟具有单轴生长的主根,入土的深度在 30~40 cm,能够获取土壤中深层的养分,随着狼毒大戟危害度加剧,其对土壤氮素的收集能力进一步增强,从而促进土壤氮素积累,提高土壤全氮含量。此外狼毒大戟根系内富含含氮化合物乳汁,其分泌物进入土壤也可能是造成土壤氮素积累的因素。有研究表明植物根系能通过分泌黄酮类化合物吸引根瘤菌到根际大量定殖,促进结瘤过程,增加土壤的铵态氮含量<sup>[40]</sup>。而狼毒大戟的根系中含有黄酮类物质<sup>[41]</sup>,由此推断狼毒大戟可能通过根系分泌物增加铵态氮和降低硝态氮的含量来创造出适合其生长的环境。磷是植物体内重要的化合物组分,通常分为全磷和速效磷两种基本形式,由于土壤中的无机磷通常以吸附态、蓄闭态为主,有机磷以高分子态为主,这些形态植物难以直接吸收利用,因此土壤中速效磷的含量往往成为影响植物生长的限制性因素<sup>[42]</sup>。在先前的研究中,瑞香狼毒(*Stellera chamaejasme*)、藜芦(*Veratrum nigrum*)、大狼毒(*Euphorbia jolkini*)等草原有毒植物在入侵扩散过程中能活化土壤无效态磷,增加速效磷含量,本研究与前人的研究结果一致<sup>[43-45]</sup>。这是由于入侵植物可以通过根系产生分泌活性物质或影响根际微生物群落来改变土壤速效磷的含量<sup>[46]</sup>。本研究发现土壤总磷含量随狼毒大戟扩散呈下降趋势并且在重度危害度时显著低于其他处理,这可能因狼毒大戟蔓延扩散后过度吸收导致土壤磷库消耗所致。未来可结合土壤磷形态进一步研究。在狼毒大戟生物量与土壤养分的 Spearman 分析中显示,狼毒大戟的生物量与土壤速效磷、铵态氮、全氮含量呈显著正相关,综上所述,狼毒大戟通过富集土壤养分形成“肥力岛”,为其扩散创造出有利的条件。

## 4 结论

本研究表明,狼毒大戟的扩散会对草地植物群落结构和土壤理化性质产生显著影响。随着其扩散程度的加剧,群落中优势物种发生更替,形成了以狼毒大戟为优势种的退化草地。生态位分析显示,狼毒大戟通过扩展生态位占据了更多资源,加剧了群落中其他植物的种间竞争强度,抑制了其他植物的生长,造成群落生物量显著降低。生物多样性随狼毒大戟的扩散程度不同呈现出不同的趋势,扩散前期因竞争抑制生物多样性降低,后期呈现出“避难所”效应,生物多样性有所恢复。在土壤养分方面,狼毒大戟扩散导致土壤全氮和速效磷、铵态氮含量显

著增加。总体而言,狼毒大戟通过改变植物群落结构和土壤养分循环,形成“肥力岛”并增强其竞争优势。未来草地修复应考虑控制狼毒大戟扩散并促进本土植物恢复,以维持呼伦贝尔草原生态系统的稳定性和生产力。

### 参考文献 References:

- [1] Gu C, Jia Z Q, Du B B, *et al.* Reviews and prospects of ecological restoration measures for degraded grasslands of China. *Ecology and Environmental Sciences*, 2022, 31(7): 1465–1475.  
古琛, 贾志清, 杜波波, 等. 中国退化草地生态修复措施综述与展望. *生态环境学报*, 2022, 31(7): 1465–1475.
- [2] Wang S X, Yang S L, Gao W, *et al.* Hulunbuir grassland resource area change analysis. *Inner Mongolia Prataculture*, 2008(1): 49–51.  
王世新, 杨胜利, 高娃, 等. 呼伦贝尔草原资源面积变化分析. *内蒙古草业*, 2008(1): 49–51.
- [3] 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 and Biochemistry*, 2009, 41(1): 86–91.
- [4] Zhang Y, Cui Z B, Wang T T, *et al.* Expansion of native plant *Stellera chamaejasme* L. alters the structure of soil diazotrophic community in a salinized meadow grassland, northeast China. *Agronomy*, 2021, 11(10): 2085.
- [5] Yang C, Sharikou, 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.
- [6] Zhou Q W, Zhao B Y, Lu H, *et al.* The research and control situation of ecology and animal poisoning of locoweed in western natural grassland of China. *Scientia Agricultura Sinica*, 2013, 46(6): 1280–1296.  
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. *中国农业科学*, 2013, 46(6): 1280–1296.
- [7] Chi X X, Guo S Q, Wang Z W, *et al.* Control methods of *Euphorbia fischeriana* in grassland. *Grassland and Prataculture*, 2022, 34(1): 47–50.  
迟晓雪, 郭司群, 王志伟, 等. 草原狼毒大戟防控方法研究. *草原与草业*, 2022, 34(1): 47–50.
- [8] Higgins S I, Richardson D M. Invasive plants have broader physiological niches. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2014, 111(29): 10610–10614.
- [9] Carboni L J, Biganzoli F, Cipriotti P A. Niche shifts drive the global distribution of a widespread plant invader of rangelands. *Biological Invasions*, 2024, 27(1): 25–27.
- [10] Huang B, Wang Y, Deng X B, *et al.* Study on the effects of different degradation types in alpine grasslands on plant diversity and interspecific relationships—A case study of Li County. *Journal of Sichuan Forestry Science and Technology*, 2024, 45(5): 85–91.  
黄波, 王悦, 邓小兵, 等. 高寒草地不同退化类型对植物多样性与种间关系的影响研究——以理县为例. *四川林业科技*, 2024, 45(5): 85–91.
- [11] Hulunbuir Forestry and Grassland Bureau. Technical specification for integrated control of *Euphorbia fischeriana* steud.: DB1507/T 96–2023. Hulunbuir: Hulunbuir Market Supervision and Administration Bureau, 2023: 3.  
呼伦贝尔市林业和草原局. 狼毒大戟综合防治技术规程: DB1507/T 96–2023. 呼伦贝尔市: 呼伦贝尔市市场监督管理局, 2023: 3.
- [12] Bao S D. Soil analysis in agricultural chemistry. Beijing: China Agriculture Press, 2008.  
鲍士旦. 土壤农化分析. 北京: 中国农业出版社, 2008.
- [13] Song S H, Wang R J, Xin Y, *et al.* Rapid determination of inorganic nitrogen in soil by spectrophotometry with microplate reader. *Chinese Journal of Inorganic Analytical Chemistry*, 2019, 9(2): 35–41.  
宋书会, 王汝健, 辛宇, 等. 全波长扫描式多功能读数仪-分光光度法测定土壤中无机氮. *中国无机分析化学*, 2019, 9(2): 35–41.
- [14] Rong G H, Zhou J Y, Wu H Y, *et al.* Comparative study on the flow analyzer and the Kjeldahl nitrogen analyzer for measuring soil total nitrogen. *Research of Soil and Water Conservation*, 2023, 30(1): 204–208.  
荣国华, 周景云, 吴鸿宇, 等. 流动分析仪与凯氏定氮仪测定土壤全氮含量之比较研究. *水土保持研究*, 2023, 30(1): 204–208.

- [15] Peng Y Z, Xiao H C, Lin Y Y, *et al.* Determination of total phosphorus in soil using continuous flow analysis and ammonium molybdate spectrophotometry. *Journal of Fujian Normal University (Natural Science Edition)*, 2024, 40(3): 24–28, 53.  
彭园珍, 肖华翠, 林燕语, 等. 连续流动-钼酸铵分光光度法测定土壤全磷. *福建师范大学学报(自然科学版)*, 2024, 40(3): 24–28, 53.
- [16] Qin R M, Wei J J, Ma L, *et al.* Effects of *Pedicularis kansuensis* expansion on plant community characteristics and soil nutrients in an alpine grassland. *Plants*, 2022, 11(13): 1673.
- [17] Ren H, Zhao C Z, An L J. Spatial point patterns of *Stellera chamaejasme* and *Stipa krylovii* populations in degraded grassland of noxious and miscellaneous types based on Ripley's  $K(r)$  function. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2015, 29(1): 59–64.  
任珩, 赵成章, 安丽涓. 基于 Ripley 的  $K(r)$  函数的“毒杂草”型退化草地狼毒与西北针茅种群空间分布格局. *干旱区资源与环境*, 2015, 29(1): 59–64.
- [18] Yin H Y, Chu X H, Shan G L, *et al.* Study on the community structure and species diversity of degraded subalpine meadow with different coverages of *Euphorbia jolkini*. *Journal of Yunnan Agricultural University (Natural Science)*, 2019, 34(3): 473–478.  
尹海燕, 初晓辉, 单贵莲, 等. 不同大狼毒覆盖度退化亚高山草甸群落结构及物种多样性研究. *云南农业大学学报(自然科学)*, 2019, 34(3): 473–478.
- [19] Zhang P, Liang Y H, Zhao X L, *et al.* Artificial cultivation of *Euphorbia fischeriana* and development of biopesticides: A comprehensive study. *Shelterbelt Technology*, 2005(5): 87, 5.  
张萍, 梁延海, 赵雪岭, 等. 狼毒大戟人工栽培及其生物农药开发. *防护林科技*, 2005(5): 87, 5.
- [20] Tedersoo L, Bahram M, Zobel M. How mycorrhizal associations drive plant population and community biology. *Science*, 2020, 367(6480): eaba1223.
- [21] Zhang Z C, Sun J, Liu M, *et al.* Don't judge toxic weeds on whether they are native but on their ecological effects. *Ecology and Evolution*, 2020, 10(17): 9014–9025.
- [22] Wang H Y, Guo J Y, Dong Z, *et al.* Effect of degradation on the community structure and plant species diversity of *Stipa grandis* steppe. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2016, 30(3): 106–111.  
王合云, 郭建英, 董智, 等. 退化程度对大针茅草原植物群落结构特征及物种多样性的影响. *干旱区资源与环境*, 2016, 30(3): 106–111.
- [23] Liu Z L, Wang W, Hao D Y, *et al.* Discussion on the mechanism of degradation and restoration succession of Inner Mongolian grassland. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2002, 16(1): 84–91.  
刘钟龄, 王炜, 郝敦元, 等. 内蒙古草原退化与恢复演替机理的探讨. *干旱区资源与环境*, 2002, 16(1): 84–91.
- [24] Valliere J M, Balch S, Bell C, *et al.* Repeated mowing to restore remnant native grasslands invaded by nonnative annual grasses: Upsides and downsides above and below ground. *Restoration Ecology*, 2019, 27(2): 261–268.
- [25] Qu S M, Peng F H, He S Z, *et al.* Research on the effect of herbicides in controlling *Euphorbia fischeriana*. *Modern Animal Husbandry*, 2017(24): 63–65.  
曲善民, 彭芳华, 何树志, 等. 除草剂灭杀狼毒大戟效果研究. *当代畜牧*, 2017(24): 63–65.
- [26] Buisson E, Stradic S L, Silveira F A O, *et al.* Resilience and restoration of tropical and subtropical grasslands, savannas, and grassy woodlands. *Biological Reviews*, 2019, 94(2): 590–609.
- [27] Liu X M, Luo J F, Chen D Z, *et al.* Floristic assembly and dominant population niches in degraded grasslands on the Zoigê Plateau. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2019, 36(2): 289–297.  
刘学敏, 罗久富, 陈德朝, 等. 若尔盖高原不同退化程度草地植物种群生态位特征. *浙江农林大学学报*, 2019, 36(2): 289–297.
- [28] Xie C P, Fang Y, Fang Y M. Analysis on the tree stratum niche characteristics of *Quercus phillyraeoides* communities. *Science of Soil and Water Conservation*, 2011, 9(1): 108–114, 120.  
谢春平, 方彦, 方炎明. 乌冈栎群落乔木层种群生态位分析. *中国水土保持科学*, 2011, 9(1): 108–114, 120.
- [29] Ma J G, Li Y M, Wang S L, *et al.* Soil and vegetation characteristics during the formation of typical *Ligularia virgaurea* degraded grassland. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2023, 34(8): 2153–2160.  
马建国, 李玉满, 王树林, 等. 典型黄帚橐吾型退化草地形成过程中土壤和植被特征. *应用生态学报*, 2023, 34(8): 2153–2160.
- [30] Pianka E R. Niche overlap and diffuse competition. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 1974, 71(5): 2141–

2145.

- [31] Colwell R K, Futuyma D J. On the measurement of niche breadth and overlap. *Ecology*, 1971, 52(4): 567–576.
- [32] Xiang X, De K J, Lin W, *et al.* The ecological niche characteristics and interspecific associations of plant species in the alpine meadow of the Tibetan Plateau affected plant species diversity under nitrogen addition. *PeerJ*, 2024, 12: e18526.
- [33] Lv S J, Liu H M, Wu Y L, *et al.* Effect of grazing on niche of constructive and dominant species in the desert steppe. *Ecology and Environmental Sciences*, 2014, 23(10): 1600–1609.  
吕世杰, 刘红梅, 吴艳玲, 等. 放牧对荒漠草原建群种和优势种生态位的影响. *生态环境学报*, 2014, 23(10): 1600–1609.
- [34] Bao G S, Wang Y Q, Song M L, *et al.* Effects of *Stellera chamaejasme* patches on the surrounding grassland community and on soil physical-chemical properties in degraded grasslands susceptible to *S. chamaejasme* invasion. *Acta Prataculturae Sinica*, 2019, 28(3): 51–61.  
鲍根生, 王玉琴, 宋梅玲, 等. 狼毒斑块对狼毒型退化草地植被和土壤理化性质影响的研究. *草业学报*, 2019, 28(3): 51–61.
- [35] Song Z B, Yue P, Li X Y, *et al.* Variation and influencing mechanism of soil multifunctionality in grassland ecosystem. *Journal of Desert Research*, 2023, 43(6): 151–165.  
宋兆斌, 岳平, 李香云, 等. 草原生态系统土壤多功能性及影响机制研究进展. *中国沙漠*, 2023, 43(6): 151–165.
- [36] Sun J Y. Effects of *Stellera chamaejasme* expansion on microbial community structure and function in Inner Mongolia grassland. Yangling: Northwest A&F University, 2024.  
孙洁瑜. 狼毒扩张对内蒙古草地微生物群落结构与功能的影响. 杨凌: 西北农林科技大学, 2024.
- [37] Bai Y, Cotrufo M F. Grassland soil carbon sequestration: Current understanding, challenges, and solutions. *Science*, 2022, 377(6606): 603–608.
- [38] Spohn M, Bagchi S, Biederman L A, *et al.* The positive effect of plant diversity on soil carbon depends on climate. *Nature Communications*, 2023, 14(1): 6624.
- [39] 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: 108020.
- [40] Moscaticello R, Squartini A, Mariani P, *et al.* Flavonoid-induced calcium signalling in *Rhizobium leguminosarum* bv. *viciae*. *New Phytologist*, 2010, 188(3): 814–823.
- [41] Shi Y X, He J, Zhang J, *et al.* Study on chemical constituents of *Euphorbia fischeriana*. *Chinese Herb Medicine*, 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.
- [42] Helfenstein J, Ringeval B, Tamburini F, *et al.* Understanding soil phosphorus cycling for sustainable development: A review. *One Earth*, 2024, 7(10): 1727–1740.
- [43] Shan G L, Yin H Y, Liu Y, *et al.* Effect of *Euphorbia jolkinii* boiss proliferation on the soil nutrients and microbial characteristics of subalpine meadow in northwest Yunnan. *Journal of Yunnan Agricultural University (Natural Science)*, 2021, 36(3): 494–499.  
单贵莲, 尹海燕, 刘洋, 等. 大狼毒种群扩散增殖对滇西北亚高山草甸土壤养分及微生物特性的影响. *云南农业大学学报(自然科学)*, 2021, 36(3): 494–499.
- [44] Pang B, Hai X, Zhang H F, *et al.* Effects of spread of *Veratrum nigrum* on vegetation characteristics and soil physicochemical properties in mountain meadow steppe. *Ecology and Environmental Sciences*, 2024, 33(8): 1174–1181.  
庞波, 海香, 张海芳, 等. 藜芦扩散对山地草甸草地植被特征和土壤理化性质的影响. *生态环境学报*, 2024, 33(8): 1174–1181.
- [45] Cheng J N, Jin H, Zhang J L, *et al.* Effects of allelochemicals, soil enzyme activities, and environmental factors on rhizosphere soil microbial community of *Stellera chamaejasme* L. along a growth-coverage gradient. *Microorganisms*, 2022, 10(1): 158.
- [46] Margalef O, Sardans J, Maspons J, *et al.* The effect of global change on soil phosphatase activity. *Global Change Biology*, 2021, 27(22): 5989–6003.