

# 不同恢复措施对新疆伊犁退化草地 植被特征及多样性的影响

郑雨<sup>1</sup>, 姚慧芳<sup>1</sup>, 马秀枝<sup>1</sup>, 王敏怡<sup>1</sup>, 晁开瑞<sup>1</sup>, 马雅楠<sup>1</sup>, 林姝婧<sup>1</sup>, 吴昊<sup>1,2</sup>

(1. 内蒙古农业大学 林学院, 内蒙古 呼和浩特 010018;

2. 内蒙古自治区生态与农业气象中心, 内蒙古 呼和浩特 010010)

**摘要:** [目的] 分析围栏封育、补播和禁牧 3 种恢复措施对新疆伊犁不同类型退化草地植被特征与多样性的影响, 为伊犁退化草地植被恢复和区域畜牧业可持续发展提供科学依据。[方法] 以新疆伊犁退化草地为研究对象, 选取 22 个样地开展实地调查, 设置自由放牧区为对照, 分析围栏封育、补播、禁牧 3 种措施对山地草甸、低地草甸、温性草甸、温性荒漠草原、高寒草甸、高寒草原 6 类草地的植被恢复效果。[结果] ① 围栏封育后, 6 类草地的植被高度、盖度、地上生物量和凋落物生物量分别增加 66%, 50%, 48% 和 52%, 辛普森指数等多样性指标显著提升 ( $p < 0.05$ ); 补播后群落植被盖度、地上生物量及辛普森指数分别显著增加 57%, 70% 和 10% ( $p < 0.05$ ); 禁牧后山地草甸的植物种类、群落植被盖度和地上生物量分别显著增加 32%, 51% 和 29% ( $p < 0.05$ )。② 围栏封育对温性荒漠草原恢复响应最突出, 其辛普森指数、植物种类、群落盖度和地上生物量增幅均高于其他草地类型; 补播对高寒草甸生产力提升效果最优, 地上生物量和植被盖度增幅显著高于温性荒漠草原; 禁牧仅在山地草甸表现出短期恢复效应。③ 退化草地植被特征与多样性指数间存在显著关联性, 地上生物量与凋落物生物量、植被盖度呈极显著正相关 ( $p < 0.01$ ), 地上生物量、群落植被盖度、凋落物生物量和植物种类分别与裸地面积呈显著负相关 ( $p < 0.05$ )。④ 3 种恢复措施对伊犁退化草地恢复均有效果, 其中补播是提升群落植被盖度和地上生物量的最有效措施。[结论] 围栏封育、补播、禁牧均可显著促进新疆伊犁退化草地植被恢复, 且不同措施的恢复效果存在草地类型特异性, 补播提升群落生产力效果最优。

**关键词:** 新疆伊犁; 围栏封育; 补播; 禁牧; 植被恢复; 多样性指数

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2026)02-0111-10

中图分类号: S157.1

**文献参数:** 郑雨, 姚慧芳, 马秀枝, 等. 不同恢复措施对新疆伊犁退化草地植被特征及多样性的影响[J]. 水土保持通报, 2026, 46(2): 111-120. Zheng Yu, Yao Huifang, Ma Xiuzhi, et al. Influence of different restoration measures on vegetation characteristics and diversity of degraded grasslands in Ili, Xinjiang [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2026, 46(2): 111-120.

DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2026.02.013

CSTR: 32312.14.stbctb.2026.02.013

## Influence of different restoration measures on vegetation characteristics and diversity of degraded grasslands in Ili, Xinjiang

Zheng Yu<sup>1</sup>, Yao Huifang<sup>1</sup>, Ma Xiuzhi<sup>1</sup>, Wang Minyi<sup>1</sup>, Chao Kairui<sup>1</sup>, Ma Yanan<sup>1</sup>, Lin Shujing<sup>1</sup>, Wu Hao<sup>1,2</sup>

(1. College of Forestry, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot, Inner Mongolia 010018, China;

2. Inner Mongolia Autonomous Region Ecological and Agrometeorological Center, Hohhot, Inner Mongolia 010010, China)

**Abstract:** [Objective] The restoration effects of three measures: fenced enclosure, reseeding and grazing prohibition, on the vegetation characteristics and diversity of different types of degraded grasslands in Ili, Xinjiang were analyzed in order to provide a scientific basis for vegetation restoration of degraded grasslands and sustainable development of regional animal husbandry in Ili. [Methods] Taking the degraded grasslands in Ili, Xinjiang as the research objects, 22 sample plots were selected for field investigation, with free grazing areas serving as the

收稿日期: 2025-07-27

修回日期: 2025-11-18

采用日期: 2025-11-21

资助项目: 第三次新疆综合科学考察项目“新疆重要草地生产力现状调查及提升潜力评估”(2022xjkk0403)

第一作者: 郑雨(1995—), 男(汉族), 内蒙古自治区乌兰察布市人, 硕士研究生, 研究方向为森林生态学。Email: 1359406260@qq.com。

通信作者: 马秀枝(1974—), 女(汉族), 内蒙古自治区呼和浩特市人, 教授, 博士, 博士研究生导师, 主要从事全球变化生态学。Email: luckmxy@imau.edu.cn。

control. The vegetation restoration effects of fenced enclosure, reseeded, and grazing prohibition on six grassland types—mountain meadow, lowland meadow, temperate meadow, temperate desert steppe, alpine meadow, and alpine steppe—were analyzed. [Results] ① After fenced enclosure, vegetation height, coverage, aboveground biomass, and litter biomass of the six grassland types increased significantly by 66%, 50%, 48%, and 52%, respectively, and diversity indices such as the Simpson index also showed significant increases ( $p < 0.05$ ). After reseeded, community vegetation coverage, aboveground biomass, and the Simpson index increased significantly by 57%, 70%, and 10%, respectively ( $p < 0.05$ ). After grazing prohibition, plant species, community vegetation coverage, and aboveground biomass of the mountain meadow increased significantly by 32%, 51%, and 29%, respectively ( $p < 0.05$ ). ② Fenced enclosure showed the most prominent restoration response in the temperate desert steppe, with increases in the Simpson index, plant species, community coverage, and aboveground biomass all higher than those in other grassland types. Reseeded had the optimal effect on improving productivity in the alpine meadow, with increases in aboveground biomass and vegetation coverage significantly higher than those in the temperate desert steppe. Grazing prohibition only exhibited short-term restoration effects in the mountain meadow. ③ Significant correlations were found between vegetation characteristics and diversity indices of degraded grasslands. Aboveground biomass was extremely significantly positively correlated with litter biomass and vegetation coverage ( $p < 0.01$ ), while aboveground biomass, community vegetation coverage, litter biomass, and plant species were significantly negatively correlated with bare land area ( $p < 0.05$ ). ④ All three restoration measures were effective for restoring degraded grasslands in Ili, among which reseeded was the most effective measure for improving community vegetation coverage and aboveground biomass. [Conclusion] Fenced enclosure, reseeded, and grazing prohibition can significantly promote the vegetation restoration of degraded grasslands in Ili, Xinjiang, and the restoration effects of different measures are specific to grassland types. Reseeded has the best effect on improving community productivity.

**Keywords:** Ili, Xinjiang; fenced enclosure; reseeded; grazing prohibition; vegetation restoration; diversity index

草地是陆地生态系统的重要组成部分,全球陆地面积的 45% 被草地所覆盖,草地在维持畜牧业的发展起到了关键作用。中国草地面积  $2.65 \times 10^8 \text{ hm}^2$ , 对环境保护和畜牧业发展都具有极其重要的价值。草地是陆地生态系统的重要组成部分,中国西北天然草地是中国重要的绿色生态屏障,长期放牧引起草地退化,已成为生态研究的热点<sup>[1]</sup>。新疆作为中国五大牧区之一,天然草地面积为  $5.70 \times 10^7 \text{ hm}^2$ , 占全疆的 34.4%。长期以来,受气候变化与过度放牧双重影响,新疆草地退化现象十分严重,退化面积高达 80%, 包括轻度退化、中度退化和重度退化<sup>[2]</sup>。草地退化主要体现在草地植被覆盖度降低、生物多样性减少以及可食用牧草的比例下降,不仅阻碍草地生态系统正常功能的发挥,还极大地限制了当地畜牧业的可持续健康发展。因此,对退化草地实施生态修复并提高生产力,已成为推动该区域生态文明建设以及实现畜牧业高质量发展的迫切需求<sup>[3]</sup>。

多位学者开展了有关不同恢复措施的研究,如围栏、补播、禁牧、人工播种和草地施肥等在时间和空间上对退化草地的影响<sup>[4]</sup>。针对新疆伊犁草地退

化的现状,选择兼具生态有效性、经济可行性与区域适用性的植被恢复措施,筑牢区域生态屏障,保障畜牧业可持续发展,维护边疆生态与社会稳定具有重要意义。围栏封育是通过修建围栏来封闭草地,禁止进行割草和放牧活动,促进退化草地的自然恢复。因此它是一种成本低,效果快且便捷的草地恢复方式<sup>[5]</sup>。补播作为主动恢复措施,通过播种苜蓿等适应性强,固氮能力突出的物种(苜蓿可提升土壤氮含量),能在短期内快速提升植被盖度与生物量,较自然恢复效率提升 2~3 倍,尤其适合中度以上退化草地<sup>[6]</sup>;禁牧仅通过政策调控限制放牧活动,无须基础设施投入,在伊犁山地草甸等交通不便区域具有显著经济优势,且能快速促进植被再生<sup>[7]</sup>。它不仅有助于植被恢复,增加草地植物的多样性,还能优化土壤养分结构,提高土壤有机碳含量,进而增强养分的可利用性。

国内外学者围绕退化草地恢复措施开展了大量系统性研究,形成了丰富的理论与实践基础。Travers 等<sup>[8]</sup>基于半干旱林地观测发现,放牧干扰能够改变草本植物的生长动态,而围封等“去干扰”措施可使植被生产力在 3~5 a 内提升 30%~50%;

Dijkstra等<sup>[9]</sup>聚焦热带地区,发现氮硫配施可辅助恢复措施提升退化草地土壤肥力,但该结论在干旱半干旱区的适用性尚未验证。蒋翔等<sup>[10]</sup>对人工草地进行了研究,相较于草地被动恢复,人工草地作为一种主动的恢复手段,其恢复效果更为优越,这可能是因为主动恢复方法能够更迅速、更明显地产生成效。

本研究以伊犁地区6种典型草地类型(山地草甸、低地草甸、温性草甸、温性荒漠草原、高寒草甸、高寒草原)为对象,针对伊犁“山谷-盆地-河谷平原”独特地貌导致的草地异质性,量化分析不同恢复措施在特定草地类型中的效果,为区域“精准修复”提供数据支撑,为新疆退化草地的植被恢复提供理论基础和数据支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于新疆伊犁哈萨克自治州,地势呈现西低东高的特点,东、北、南三面环山。该地区气候温和湿润,北部凉爽,南部温热,受地形影响显著,山地降水充沛,空气湿润;平原降水少,气候干燥。受西风系统和地形抬升影响,伊犁河谷冬春多连续降雪,夏秋有短期降水,年降水量自平原的200 mm增至山区的1 000 mm,年平均气温2.8~9.2℃。草原类型多样,主要包括温性草甸、温性荒漠草原、低地草甸、山地草甸、高寒草原、高寒草甸等。草场主要优势种有无芒雀麦(*Bromus inermis*)、羊茅(*Festuca ovina*)、伊犁绢蒿(*Seriphidium transiliense*)、冷蒿(*Artemisia frigida*)、苜蓿(*Medicago sativa*)、草木樨(*Melilotus suaveolens*)等。

### 1.2 试验设计

本研究在伊犁州(不含塔城、阿勒泰地区)选择了23个典型样地(图1),涵盖多种草地修复措施。根据植被分类及退化标准<sup>[11]</sup>,样地草地类型有山地草甸、低地草甸、温性草甸、温性荒漠草原、高寒草原和高寒草甸。22个样地按围栏封育、补播和禁牧3种方式分类(表1),其中,围栏封育措施涵盖14个样区(围封年限均 $\geq 5$  a),苜蓿补播措施涵盖6个样区,禁牧措施涵盖2个样区。每种措施都有对应的自由放牧区,每组随机设置3个50 cm $\times$ 50 cm大小的样方,各样方的直线距离约50 m。

### 1.3 样品采集和指标测定

2024年8月,对各样地植被进行调查(表2)。详细记录每个样方内的植物群落构成,测量不同物种的植株高度和盖度,并从地表割取植物样本,测定其鲜

重。在105℃下对这些样本进行30 min的杀青处理后,再将其置于65℃下烘干至恒重,并进行称重。

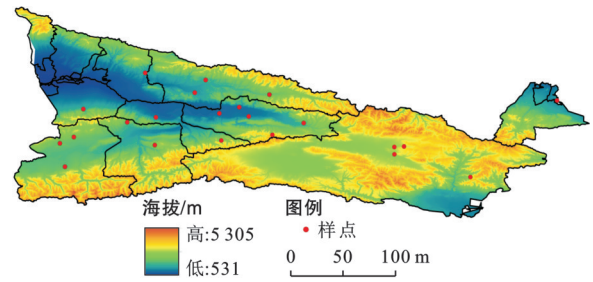


图1 伊犁州地形及样点位置

Fig.1 Topography of Ili and location of experimental sample plots

### 1.4 数据处理

运用Shapiro-test函数对原始数据进行正态分布检验,对不符合正态分布的数据进行对数转换,以满足Pearson相关性分析的条件。不同修复措施对草地植被特征和多样性指数的影响采用响应比(response ratio, RR)衡量,计算公式如下<sup>[12]</sup>:

$$RR = \ln \left( \frac{T}{N} \right)$$

式中: $T$ 为围栏封育、补播和禁牧措施的各指标(群落植被高度、群落植被盖度、地上生物量、凋落物生物量、裸地面积、辛普森指数、植物种类、均匀度指数、优势度指数)实测值; $N$ 为放牧区的各指标实测值。当响应比大于0时,表明该处理对对应指标有显著的正向影响,反之为负向影响。

本研究使用R语言4.4.2版本中“Metafor”计算响应比;采用ArcGIS 10.8绘制研究区位置分布图;通过Origin 2018软件绘制森林图和回归分析图;通过“Hmisc”程序包完成Pearson相关性分析,探讨草地植被特征与多样性指数的关系。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同恢复措施对新疆伊犁地区退化草地的影响

由图2可知,辛普森指数在围栏封育和补播措施下分别显著增加21%( $p < 0.5$ )和10%( $p < 0.05$ ),植物种类在围栏封育和禁牧措施下增加21%( $p < 0.05$ )和32%( $p < 0.05$ );均匀度指数在围栏封育措施下增加9%( $p < 0.05$ )。植被高度在围栏封育措施下增加66%( $p < 0.05$ ),植被盖度在围栏封育、补播和禁牧措施下分别增加50%,57%和51%( $p < 0.05$ )。地上生物量在围栏封育和补播措施下增加48%和70%( $p < 0.05$ ),凋落物生物量在围栏封育措施下增加52%( $p < 0.05$ )。

表 1 样地基础信息

Table 1 Basic information of study area

措施	草地类型	样地号	经度	纬度	海拔高度/m
围栏封育	高寒草甸(AM)	1	86.483°E	42.624°N	2 650
	温性荒漠草原(TDS)	9	83.413°E	43.416°N	949
	低地草甸(LM)	11	83.032°E	43.103°N	1 025
	温性荒漠草原(TDS)	12	83.281°E	43.537°N	1 021
	温性荒漠草原(TDS)	13	82.126°E	43.405°N	963
	高寒草甸(AM)	15	82.111°E	43.042°N	2 278
	山地草甸(MM)	16	81.729°E	43.341°N	2 115
	温性草甸(TM)	17	80.989°E	43.148°N	1 920
	低地草甸(LM)	18	80.795°E	43.065°N	1 793
	温性荒漠草原(TDS)	20	81.120°E	43.512°N	1 584
	温性荒漠草原(TDS)	21	81.978°E	43.985°N	1 092
	高寒草甸(AM)	22	82.665°E	43.726°N	1 138
	山地草甸(MM)	23	83.005°E	43.456°N	1 563
	温性草甸(TM)	24	83.699°E	43.701°N	1 749
补播	低地草甸(LM)	4	87.683°E	43.625°N	1 066
	高寒草原(AS)	5	85.429°E	43.017°N	2 633
	高寒草原(AS)	6	85.564°E	43.024°N	2 753
	高寒草甸(AM)	7	85.431°E	42.921°N	2 516
	温性荒漠草原(TDS)	19	80.865°E	42.760°N	1 719
	高寒草甸(AM)	25	82.815°E	43.892°N	1 366
禁牧	山地草甸(MM)	8	84.173°E	43.331°N	1 545
	山地草甸(MM)	14	83.740°E	43.176°N	1 344

表 2 植被与多样性指标

Table 2 Vegetation and diversity indices

类别	指标	类别	指标
植被指标	植被高度(VH)	多样性指标	辛普森指数(S)
	植被盖度(CC)		植物种类(SR)
	地上生物量(AGB)		均匀度指数(E)
	凋落物生物量(LB)		优势度指数(D)
	裸地面积(BA)		

注:VH为群落植被高度;CC为群落植被盖度;AGB为地上生物量;LB为凋落物生物量;BA为裸地面积;S为辛普森指数;SR为植物种类;E为均匀度指数;D为优势度指数。下同。

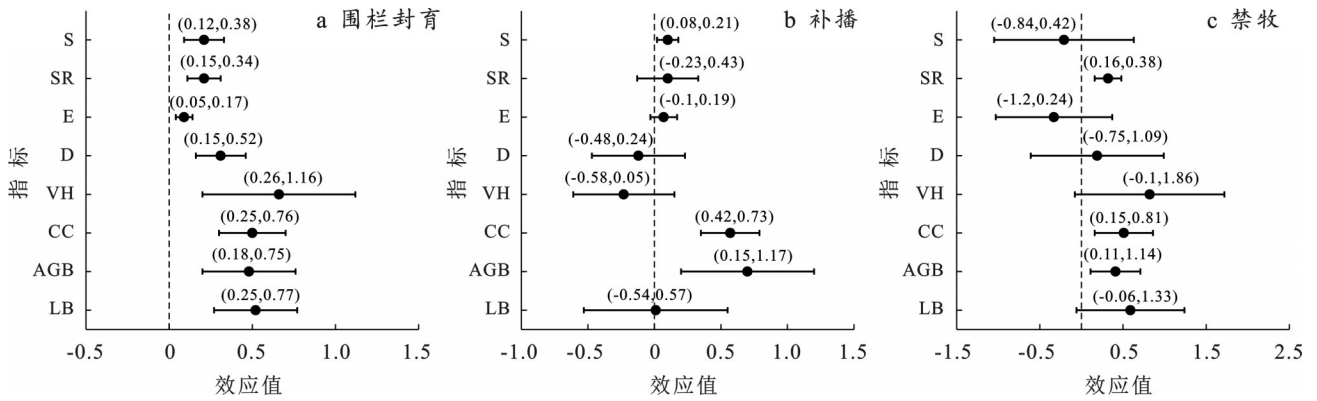
## 2.2 围栏封育对不同草地类型植被的影响

研究结果(图 3)表明,围栏封育措施下,高寒草甸、山地草甸、低地草甸、温性草甸和温性荒漠草原的辛普森指数分别增加 32%, 19%, 15%, 31% 和 66% ( $p < 0.05$ );高寒草甸、低地草甸、温性草甸和温性荒漠草原的植物种类分别增加 25%, 25%, 53% 和 36% ( $p < 0.05$ );山地草甸和温性荒漠草原的优势度指数增加 53% 和 38% ( $p < 0.05$ );山地草甸、低地草甸、

温性草甸和温性荒漠草原的植被高度分别增加 77%, 40%, 98% 和 64% ( $p < 0.05$ );山地草甸、低地草甸、温性草甸和温性荒漠草原的植被盖度分别增加 29%, 30%, 52% 和 73% ( $p < 0.05$ );高寒草甸、山地草甸、低地草甸、温性草甸和温性荒漠草原的地上生物量分别增加 34%, 41%, 42%, 41% 和 53% ( $p < 0.05$ );低地草甸、温性草甸和温性荒漠草原的凋落物生物量分别增加 57%, 25% 和 63% ( $p < 0.05$ )。

## 2.3 补播对不同草地类型植被特征和多样性指数的影响

由图 4 可知,补播措施下,低地草甸的均匀度指数增加 89% ( $p < 0.05$ );高寒草原的植被高度增加 40% ( $p < 0.05$ );高寒草原、高寒草甸、低地草甸和温性荒漠草原的植被盖度分别增加 42%, 81%, 62% 和 60% ( $p < 0.05$ );高寒草原、高寒草甸和温性荒漠草原的地上生物量增加 52%, 89% 和 83% ( $p < 0.05$ );高寒草原、高寒草甸和低地草甸的凋落物生物量分别增加 55%, 50% 和 26% ( $p < 0.05$ )。



注:S为辛普森指数;SR为植物种类;E为均匀度指数;D为优势度指数;VH为植被高度;CC为植被盖度;AGB为地上生物量;LB为凋落物生物量。下同。

图 2 草地植被特征和多样性指数对不同恢复措施的响应比

Fig.2 Response ratios of grassland vegetation characteristics and diversity indices to different restoration measures

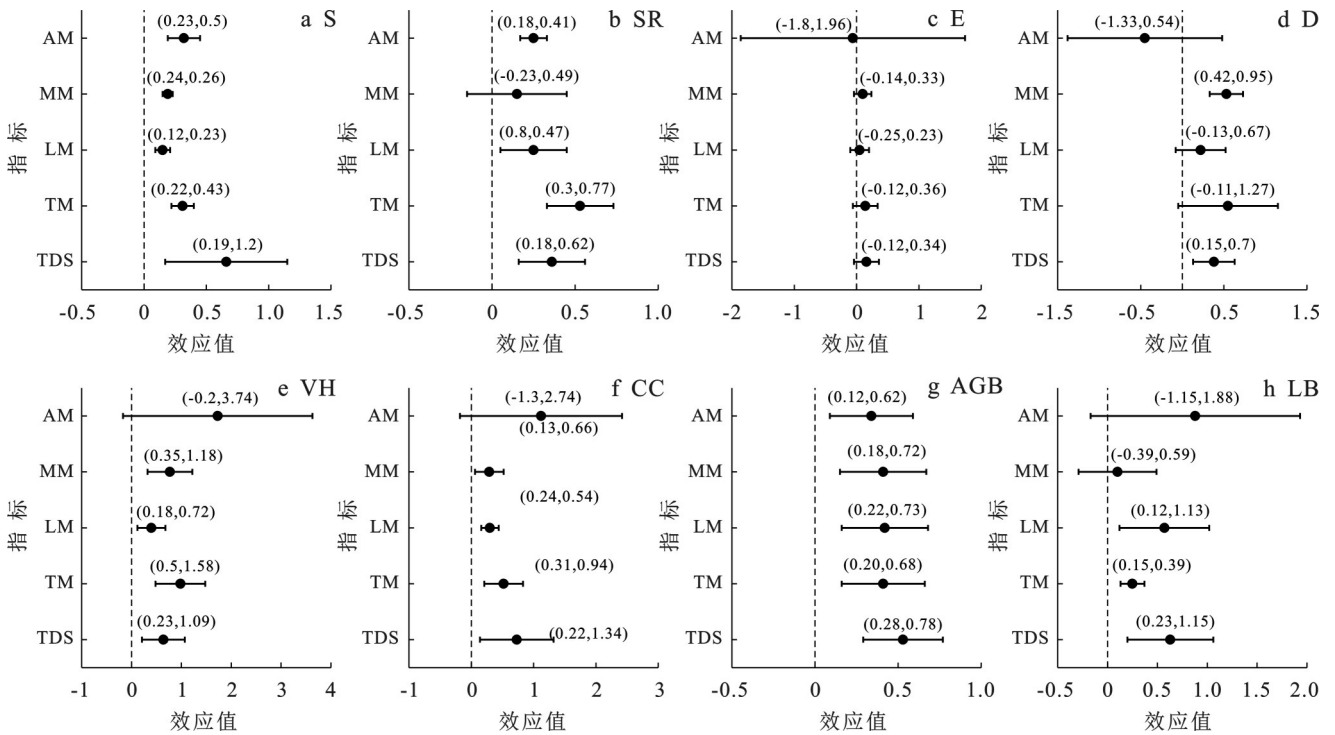


图 3 不同草地类型的植被特征和多样性指数对围栏封育措施的响应比

Fig.3 Response ratios of vegetation characteristics and diversity indices of different grassland types to fenced enclosure measures

#### 2.4 禁牧对山地草甸植被特征和多样性的影响

禁牧措施下,山地草甸的植物种类、植被盖度和地上生物量分别增加 32%, 51% 和 29% ( $p < 0.05$ )。辛普森指数、均匀度指数、优势度指数、植被高度和凋落物生物量无显著变化(图 5)。

#### 2.5 植被特征和多样性指数各因子间的相关性分析

研究结果(图 6)表明,凋落物生物量与地上生物量、植被盖度均呈极显著正相关( $p < 0.001$ );地上生物量和植物种类与植被盖度呈极显著正相关( $p < 0.01$ );植物种类和均匀度指数与辛普森指数呈极显

著正相关( $p < 0.001$ );辛普森指数、植物种类和均匀度指数分别与优势度指数呈极显著负相关( $p < 0.001$ );地上生物量、植被盖度、凋落物生物量和植物种类分别与裸地面积呈显著负相关( $p < 0.05$ )。

群落植被高度与盖度对辛普森指数及优势度指数具有显著正向效应,地上生物量对凋落物生物量亦存在显著正向影响;同时,辛普森指数和优势度指数对凋落物生物量也表现出显著正向效应。与之相反,群落植被高度和盖度对植物种类数量及均匀度指数则具有显著负向效应(详见图 7)。

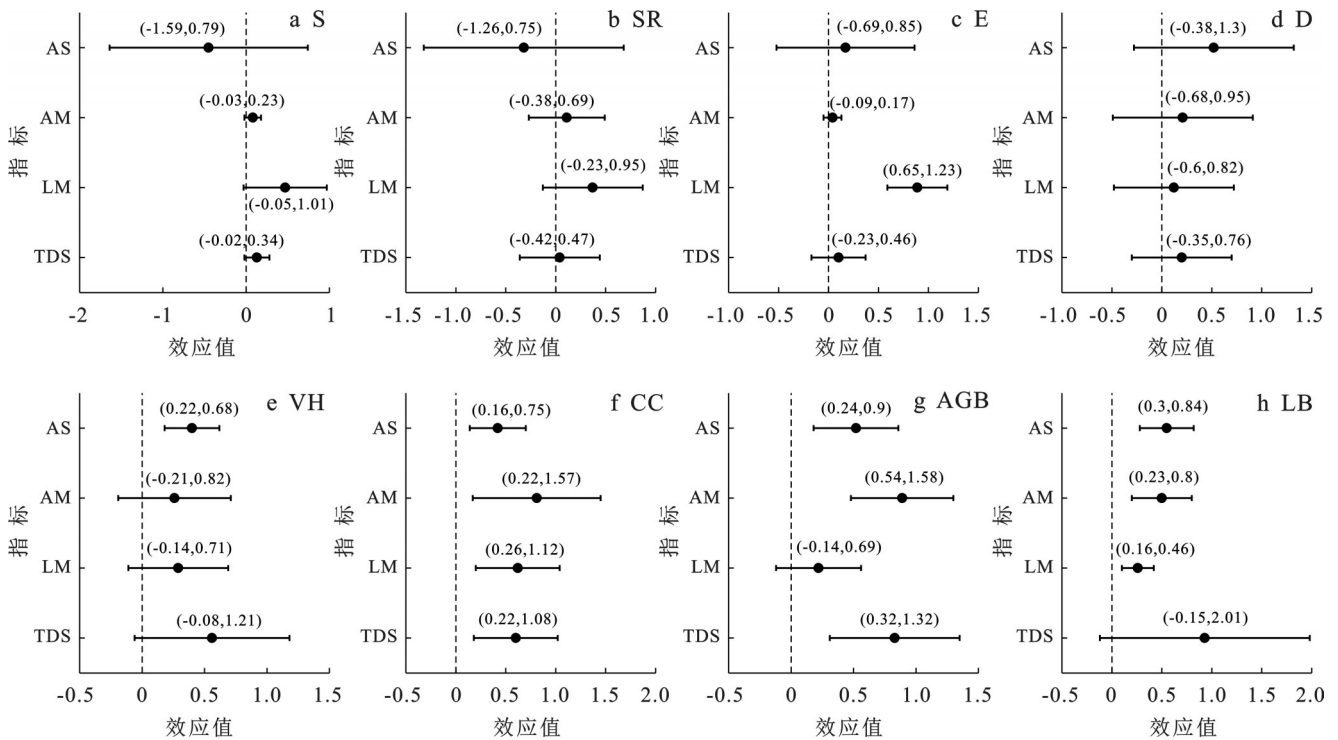


图 4 不同草地类型的植被特征和多样性指数对补播措施的响应比

Fig.4 Response ratios of vegetation characteristics and diversity indices of different grassland types to reseeding measures

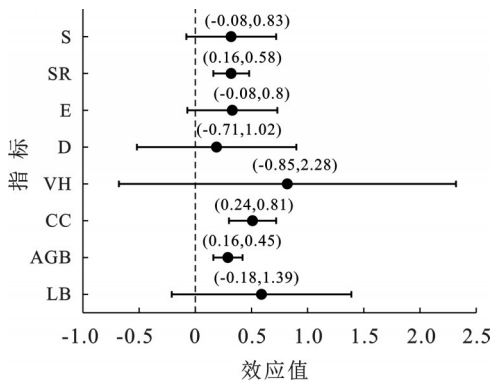


图 5 山地草甸植被特征和多样性指数对禁牧措施的响应比

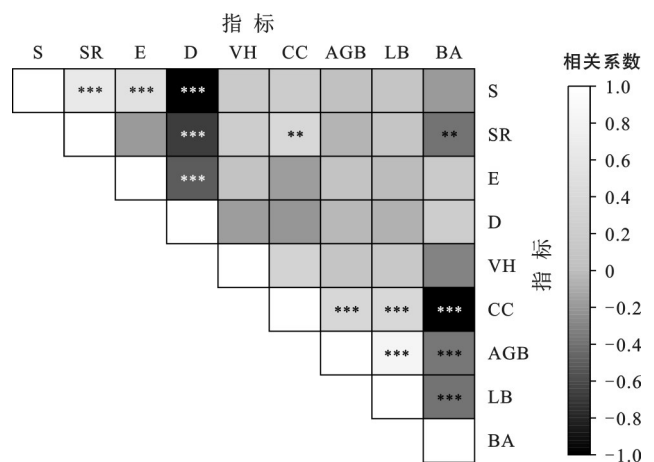
Fig.5 Response ratios of mountain meadow vegetation characteristics and diversity indices to grazing prohibition measures

### 3 讨论

#### 3.1 围栏封育措施对新疆退化草地的影响

围栏封育作为一种低成本且广泛应用的草地恢复措施,在全球多个生态系统中已被证实能有效促进植被恢复。本研究结果进一步验证该措施在伊犁多种草地类型中的适用性,其核心机制是通过消除放牧干扰、促进资源利用和优化群落结构的连锁反应,实现植被与多样性的协同提升。一方面,围封措施直接终止家畜对植被的啃食和土壤践踏行为,为植物创造无干扰的生长环境,刺激分蘖活动,加速植株的生长进程,对植物群落高度、盖度、地上生物量

和凋落物生物量有显著的正效应。另一方面,在解除采食压力后,优势种(如无芒雀麦、羊茅)获得快速扩繁的生态位,通过增大叶片面积提高光合作用效率,进而促进碳元素同化能力的增强。这种正向效应不仅体现在群落优势度的提高上,更通过群落植被高度、盖度、地上生物量等指标的同步增长,使草地整体生产力得到质的提升,表明围栏封育不仅促进生物量积累,更推动群落结构向更复杂、更稳定的方向演化<sup>[13]</sup>。



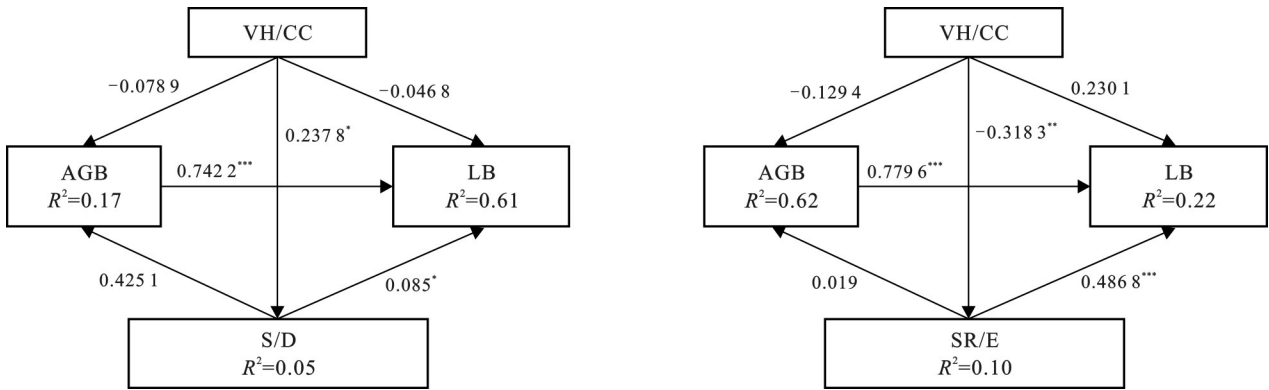
注:\*,\*\*和\*\*\*分别表示在  $p < 0.05$ ,  $p < 0.01$  和  $p < 0.001$  水平下差异显著。

图 6 退化草原植物群落指标的相关系数

Fig.6 Correlation coefficients of plant community indices in degraded grasslands

围封对多样性指数的正向效应存在草地类型差异,温性荒漠草原的辛普森指数增加 66%,植物种类增加 36%,显著高于高寒草甸(辛普森指数增加 32%,植物种类增加 25%),这可能与荒漠草原的初始退化程度有关,围封前荒漠草原裸地面积占比达

25%~30%,物种基数低,恢复潜力更大;而高寒草甸初始物种丰富度较高,围封后新增物种的“边际效益”减弱<sup>[14]</sup>。围栏封育措施对群落结构产生影响,减弱了群落内优势种的优势,改变了种群的结构。



注:\*,\*\*和\*\*\*分别表示在 $p<0.05$ , $p<0.01$ 和 $p<0.001$ 水平下差异显著。

图 7 高度和盖度对植物多样性指数的影响

Fig.7 Effects of height and coverage on plant diversity indices

高山草甸、山地草甸、低地草甸、温性草甸和温性荒漠草原在封育后的均匀度指数均未表现出显著差异,这一现象的核心驱动因子是“优势种排挤效应”。研究区优势种(无芒雀麦、羊茅)具有极强的资源竞争能力,围封后,这些物种通过快速扩张冠层,形成“优势层片”,其地上部分遮挡导致下层伴生种(如冷蒿、伊犁绢蒿)的光照减弱,同时根系竞争加剧,消耗大量水分与养分,最终压缩弱势物种的生态位<sup>[15]</sup>。例如,温性草甸围封后植物种类仅增加 53%,远低于高度增长的 98%,表明高度提升主要由优势种贡献,而伴生种生长受到限制,导致群落内物种个体数量差异扩大,均匀度维持稳定。这与王健等提出的“围封导致生态环境均一化,优势种扩张挤压稀有物种”的观点高度契合。此外,围封后凋落物生物量显著增加(如低地草甸增加 57%),但伊犁地区夏季降水集中,凋落物分解速率较快,短期内未形成强物理屏障,因此均匀度未显著下降,仅维持原有水平<sup>[16]</sup>。

结合全球围栏封育的实践与研究,其生态效应既以隔离干扰源、促进生态恢复为核心共性,又因目标生态系统和干扰类型的差异表现出明显区域特异性,这与本研究伊犁退化草地的围封效果形成呼应与补充。森林生态系统中,瑞典南部围栏助力挪威云杉砍伐后苏格兰松生长,防有蹄类啃食并推动林分向针阔混交过渡,证明围栏在森林植被更新中的有效性<sup>[17]</sup>;热带牧场恢复中,肯尼亚巴林戈湖盆地围栏(社区管理最优)通过恢复本土植被,降低土壤容重,提升土壤碳氮与微生物量,配合本地豆类补播强

化了土壤养分<sup>[18]</sup>。同时,该区域 Njempes Flats 的公共围栏(13~23 a)与私人围栏(3~17 a)均能促进草本再生、提升草被覆盖,且公共围栏实现立草完全恢复,表明围栏效果与管理主体、年限相关,与伊犁不同草地类型围封效果差异呼应,凸显“管理模式匹配区域特征”的关键<sup>[19]</sup>。此外,Travers 等<sup>[8]</sup>指出干旱半干旱区围栏封育 3~5 a 可提升植被生产力 30%~50%,与伊犁(干旱半干旱区)围封后综合草地地上生物量增加 48% 高度吻合,印证围栏在此类区域的普适性,而伊犁因兼具温性荒漠草原、高寒草甸等类型,生产力提升幅度存在差异,该结果为全球干旱半干旱区围栏“区域精准应用”提供伊犁案例支撑。

### 3.2 补播措施对新疆退化草地的影响

Kiehl 等<sup>[20]</sup>在欧洲半自然草地研究中提出补播需优先选择本地种以防外来种入侵,本研究的做法与之相呼应。本研究选用本地适应性强且具固氮能力的苜蓿,不仅提升草地生产力,也未显著改变群落多样性,充分体现干旱半干旱区补播策略的区域适应性。苜蓿作为豆科植物,可通过根瘤菌固氮改善土壤氮素水平,不仅自身生长迅速,还为周边植物提供氮源,形成“互利共生”效应;同时,苜蓿的高密度生长可有效覆盖地面,减少水土流失,有利于群落稳定性的提升。本研究中,补播后植物种类、均匀度指数未发生显著变化,主要源于两方面原因:一是补播周期较短,引入的苜蓿尚未完全与原生群落融合,对建群种(如针茅)的替代效应较弱,物种组成仍以原生种为主;二是资源竞争平衡,苜蓿虽提升生产力,但

未形成垄断优势,原生伴生种仍可获取一定资源,因此多样性指数维持稳定,这与吴宛萍等<sup>[21]</sup>“补播短期内对多样性影响较小”的研究结果一致。

补播效果的草地类型差异同样值得关注。高寒草甸补播后地上生物量增加 89%、盖度增加 81%,显著高于温性荒漠草原(生物量增加 83%,盖度增大 60%),这是因为高寒草甸降水更充沛,且土壤有机质含量较高,更利于苜蓿生长;而荒漠草原干旱少雨,土壤贫瘠,限制苜蓿的固氮效率与生物量积累<sup>[22]</sup>。本研究中,补播仅采用苜蓿单一品种,未比较羊茅、无芒雀麦等本地物种的补播效果,无法确定“最优补播物种”;同时,未进行不同补播密度的比较,难以明确补播量与恢复效果的量化关系,有待于进一步研究。

与近年国际相关研究相比,本研究结果进一步印证补播在全球不同区域退化草地恢复中的普适性与区域特殊性。Bassett 等<sup>[23]</sup>在美国的研究中发现,补播可调节本地与外来物种的丰富度关系,助力本地物种恢复;美国爱荷华州的补播研究也显示,钻孔和广播 2 种补播方式具有相似的辛普森多样性和均匀度,钻孔种植还能让特定物种占据更多空间,形成更大斑块且捕获更多光照,其初始种子放置差异有助于优化植物分布、资源利用并潜在促进长期物种周转;而 Dijkstra 等<sup>[9]</sup>关于氮硫配施提升退化草地土壤肥力的研究,为补播措施的生态机理提供跨区域理论支撑。本研究结合新疆干旱半干旱区的区域特点,选用本地固氮物种苜蓿进行补播,既实现草地生产力的提升,又维持群落多样性。这一做法既呼应 Kiehl 等<sup>[20]</sup>所强调的优先选用本地物种的全球共识,也为干旱半干旱区这一特殊生态区域的补播实践提供典型案例,进一步丰富了全球退化草地主动恢复的研究体系。

### 3.3 禁牧对新疆退化草地的影响

近年来,多项国际研究指出,禁牧在热带地区结合施肥可显著提升土壤肥力。尽管本研究未涉及施肥,但在伊犁山地草甸中,短期禁牧可显著提升植物种类、植被盖度与地上生物量(分别增加 32%,51%,29%),说明在干旱区仅通过调控放牧压力即可实现快速植被恢复,这一结果与周睿等<sup>[24]</sup>“短期禁牧可快速恢复植被生长”的结论一致。禁牧条件下,植物可避免啃食导致的枝条断裂与光合器官损伤,再生能力显著增强,同时凋落物开始初步积累,为土壤提供少量有机质,间接支撑植被生长<sup>[7]</sup>。然而,禁牧后辛普森指数、均匀度指数无显著响应,禁牧积累的凋落物虽未完全分解,但已在地表形成物理屏障,阻碍种子与土壤的接触,导致新增物种多为耐干扰的伴生种,无法改变优势种(羊茅、无芒雀麦)的竞争格局<sup>[24]</sup>。

此外,禁牧可能面临“凋落物积累”的风险,长期禁牧,凋落物量可能增加到一定程度,会使分解速率低于积累速率,进一步抑制种子萌发与幼苗定居<sup>[7]</sup>。本研究中禁牧措施仅设 2 个山地草甸样地,仅能体现短期禁牧对山地草甸的恢复效果,存在一定的局限性,可能无法推广至其他退化草地类型,未来研究需增加禁牧样区数量和草地类型,使其更具有实际推广意义。

从全球禁牧实践的多样性与成效来看,不同区域、不同生态背景下的禁牧案例既与新疆伊犁禁牧的核心效果形成呼应,也为伊犁禁牧措施的优化与长效化提供跨区域参考。阿根廷潘帕斯草原的禁牧研究表明,2 a 与 12 a 禁牧均能减少裸地面积,提升植物覆盖度,并通过改变植被与种子库组成使短期禁牧地块以外来物种为主,长期禁牧地块转向多年生草本主导,这与伊犁禁牧(主要针对山地草甸)显著提升植物种类(增加 32%)、群落盖度(增加 51%)的结果一致,其“禁牧年限-物种组成”规律还为伊犁不同退化程度草地制定差异化禁牧周期提供参考,尤其对恢复本土多年生优势草种的区域有借鉴意义<sup>[25]</sup>;西班牙北部再生煤矿区通过围栏排除有蹄类实施短期禁牧,能够提高土壤有机质、钾及镁的含量,改善植物群落结构并控制优势引进种的扩张。其禁牧、土壤、植被三者的协同效应,与伊犁禁牧优化土壤养分的效果相契合,而短期禁牧防控外来种的经验,对伊犁温性荒漠草原等区域也具有直接应用价值<sup>[26]</sup>;墨西哥北部保护区 5 a 禁牧实践表明,禁牧可清晰区分物种组成、增加牧草覆盖面积并提升生物多样性<sup>[27]</sup>。禁牧作为生态监测工具的思路,拓展了伊犁禁牧的功能,结合地貌异质性将禁牧地块设为监测样区,即可为精准禁牧提供有力支撑。综上所述,全球禁牧实践共同印证了排除放牧干扰作为退化植被与土壤恢复的核心路径,与伊犁禁牧的实施成效相互呼应。

### 3.4 植被特征与多样性指数的关联性机理

地上生物量与凋落物生物量、植被盖度呈极显著正相关( $p < 0.001$ ),表明生产力提升依赖于植被覆盖与凋落物的协同积累;而群落植被高度、盖度与植物种类、均匀度呈显著负相关。刘小丹等<sup>[13]</sup>的研究结果表明,当围封时长  $\geq 5$  a 时,群落物种多样性下降。当植被高度增加时,上层优势种(如无芒雀麦)通过提升株高获取更多光照资源,其相对盖度随之增加(如围封后温性荒漠草原盖度增加 73%),形成“遮光层”;下层物种因光照不足,光合碳积累减少,生长受到抑制,部分耐阴能力差的物种(如伊犁绢蒿)甚至消失,导致物种丰富度下降。同时,优势种生物量占比

显著提升,使得群落生物量分配不均衡性加剧,均匀度指数降低。例如,温性草甸围封后高度增加98%,但植物种类仅增加53%,且均匀度指数无显著变化,表明植被高度增加优先于多样性提升<sup>[14]</sup>。

随着围封时间的延长,优势种通过占据光照、水分等关键资源形成“垄断优势”。虽然群落整体物种数略有增加(如山地草甸植物种类增加25%),但新增物种多为耐阴、耐贫瘠的伴生种(如细叶苔草),其个体数量占比较少,无法改变优势种主导的群落结构<sup>[28]</sup>;同时,植被高度与盖度的提升加剧了群落内部的微环境异质性,会进一步抑制中生性伴生种的生长,最终导致物种丰富度与均匀度未随生产力同步提升,反而呈现负相关关系。这一结果表明在干旱半干旱区退化草地恢复中,长期无干扰围封可能打破“生产力与多样性协同提升”的平衡,需关注群落结构的稳定性维持<sup>[29]</sup>。此外,裸地面积与辛普森指数、物种丰富度呈显著负相关( $p < 0.05$ ),表明裸地减少是多样性提升的重要前提。补播与围封通过覆盖裸地,为更多物种提供生存空间,而禁牧因裸地减少幅度较小,多样性提升效果也更有限,这进一步说明“裸地治理”是退化草地恢复的关键环节<sup>[30]</sup>。

本研究存在一些不足之处。①缺乏围封年限数据,后续需设置不同围封时间梯度,明确植被与土壤恢复动态阈值,同时开展不同刈割强度模拟放牧试验,探索恢复后期可持续利用模式;②禁牧样本量不足,对研究结果有一定影响。上述问题有待后续完善试验设计予以解决。

## 4 结论

(1) 围栏封育、补播、禁牧3种措施对新疆伊犁6种典型退化草地(山地草甸、低地草甸、温性草甸、温性荒漠草原、高寒草甸、高寒草原)的植被恢复均具有显著促进作用( $p < 0.05$ ),其中补播是提升群落生产力的最优措施。补播后群落植被盖度、地上生物量分别显著增加57%和70%( $p < 0.05$ ),地上生物量增幅显著高于围栏封育(48%)和禁牧(29%);围栏封育可实现多指标均衡恢复,植被高度、凋落物生物量及辛普森指数提升显著( $p < 0.05$ );禁牧仅对山地草甸的植物种类、盖度和地上生物量有显著提升效果( $p < 0.05$ )。

(2) 不同恢复措施的效果存在显著的草地类型特异性( $p < 0.05$ )。围栏封育对温性荒漠草原的恢复响应最为突出,其辛普森指数、植物种类、植被盖度和地上生物量增幅均显著高于其他草地类型( $p < 0.05$ );补播措施的高寒草甸生产力提升效果最优,地上生物量

和植被盖度增幅显著高于温性荒漠草原( $p < 0.05$ );禁牧措施的适用范围较窄,仅在山地草甸表现出短期恢复效应,对其他草地类型的适用性需进一步验证。

(3) 退化草地植被特征与多样性指数间存在显著关联性( $p < 0.05$ )。地上生物量与凋落物生物量( $r = 0.79, p < 0.001$ )、植被盖度( $r = 0.42, p < 0.001$ )呈极显著正相关,表明植被覆盖与凋落物积累可协同促进生产力提升;植物种类、均匀度指数与辛普森指数呈极显著正相关( $r$ 分别为0.64和0.58, $p < 0.001$ ),与优势度指数呈极显著负相关( $r$ 分别为-0.65和-0.52, $p < 0.001$ );植被高度、盖度与物种丰富度、均匀度呈显著负相关( $p < 0.05$ ),表明优势种扩张对下层伴生种具有竞争抑制效应。

## 参考文献 (References)

- [1] 范蒙恩,王佩尧,陈宇,等.未来不同气候情景下全球草地生态系统及净初级生产力时空动态分析[J].草地学报,2023,31(12):3597-3607.  
Fan Meng'en, Wang Peiyao, Chen Yu, et al. Spatial and temporal dynamics of global grassland and net primary productivity under different future climate scenarios [J]. Acta Agrestia Sinica, 2023,31(12):3597-3607.
- [2] 陈春波,李刚勇,彭建,等.新疆草地生态健康智能监测网络体系构建[J].草业科学,2023,40(5):1420-1434.  
Chen Chunbo, Li Gangyong, Peng Jian, et al. The systematic construction of a smart network for ecological health observation of grassland in Xinjiang [J]. Pratacultural Science, 2023,40(5):1420-1434.
- [3] Liu Dehong, Qi Xiaoying, Geng Ruonan, et al. Natural grasslands outperform artificial shrublands and forestlands in soil ecological environment improvement in severely degraded areas [J]. Rangeland Ecology & Management, 2025,99:40-49.
- [4] 郭子华,郝欢欢,马洁,等.修复措施对中国退化草地土壤有机碳组分的影响[J].应用生态学报,2025,36(11):3327-3338.  
Guo Zihua, Hao Huanhuan, Ma Jie, et al. Effects of restoration measures on soil organic carbon fractions in degraded grasslands in China. [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2025,36(11):3327-3338.
- [5] 郑雨,姚慧芳,晁开瑞,等.基于Meta分析的新疆退化草地围栏封育效果研究[J].草地学报,2025,33(9):3014-3023.  
Zheng Yu, Yao Hui Fang, Chao Kairui, et al. Study on the enclosure effects of degraded grassland in Xinjiang based on meta-analysis [J]. Acta Agrestia Sinica, 2025,33(9):3014-3023.
- [6] 包雨凡,罗玉红,李乐,等.基于Meta分析的补播对退化草原恢复的影响[J].中国农业资源与区划,2025,46(5):248-256.

- Bao Yufan, Luo Yuhong, Li Le, et al. Effects of reseed-  
ing on degraded grassland: A Meta-analysis [J]. Chinese  
Journal of Agricultural Resources and Regional Planning,  
2025,46(5):248-256.
- [7] 郎鹏,王勇辉,徐海量,等. 禁牧年限对温性荒漠草地群  
落特征及土壤因子的影响[J]. 草业科学,2022,39(3):  
431-442.
- Lang Peng, Wang Yonghui, Xu Hailiang, et al. Effects  
of grazing prohibition years on community characteristics  
and soil factors in temperate desert grassland [J]. Prata-  
cultural Science, 2022,39(3):431-442.
- [8] Travers S K, Berdugo M. Grazing and productivity alter  
individual grass size dynamics in semi-arid woodlands  
[J]. Ecography, 2020,43(7):1003-1013.
- [9] Dijkstra D D, Backes C, Santos A J M, et al. The com-  
bination of sulfur and nitrogen fertilization has a direct  
impact on the recovery process of degraded pastures in  
tropical climates [J]. Grassland Science, 2025,71(3):  
118-125.
- [10] 蒋翔,马建霞. 我国草地生态恢复对不同因素响应的  
Meta分析[J]. 草业学报,2021,30(2):14-31.
- Jiang Xiang, Ma Jianxia. The impact of different factors  
on the outcomes of grassland ecological restoration to in  
China: A Meta-analysis [J]. Acta Prataculturae Sinica,  
2021,30(2):14-31.
- [11] 梁元也,范连连,马学喜,等. 新疆北部六种草地类型土  
壤碳氮磷生态化学计量特征[J]. 干旱区研究,2024,41  
(10):1708-1718.
- Liang Yuanye, Fan Lianlian, Ma Xuexi, et al. Ecologi-  
cal stoichiometry of soil carbon, nitrogen, and phospho-  
rus in six grassland types in northern Xinjiang [J]. Arid  
Zone Research, 2024,41(10):1708-1718.
- [12] Shi Yujie, Wang Junfeng, Ao Yunna, et al. Responses  
of soil N<sub>2</sub>O emissions and their abiotic and biotic drivers  
to altered rainfall regimes and co-occurring wet N depo-  
sition in a semi-arid grassland [J]. Global Change Biol-  
ogy, 2021,27(19):4894-4908.
- [13] 刘小丹,张克斌,王晓,等. 围封年限对沙化草地群落结  
构及物种多样性的影响[J]. 水土保持通报,2015,35  
(3):39-43.
- Liu Xiaodan, Zhang Kebin, Wang Xiao, et al. Influ-  
ence of enclosure ages on community structure and spe-  
cies diversity of sandy grassland [J]. Bulletin of Soil and  
Water Conservation, 2015,35(3):39-43.
- [14] 王淮亮,刘凤婵,邢晓光,等. 不同恢复措施在冀北坝上  
退化草场的应用效应[J]. 水土保持通报,2025,45(6):  
67-76.
- Wang Huailiang, Liu Fengchan, Xing Xiaoguang, et  
al. Application effects of different restoration measures  
on degraded grasslands in Bashang area of northern  
Hebei Province [J]. Bulletin of Soil and Water Conser-  
vation, 2025,45(6):67-76.
- [15] 张雅娴,樊江文,李愈哲,等. 短期围栏封育后再利用对  
草地植物群落的影响[J]. 生态学报,2023,43(8):  
3295-3306.
- Zhang Yaxian, Fan Jiangwen, Li Yuzhe, et al. Effects  
of grassland reuse after short-term grazing exclusion on  
plant community [J]. Acta Ecologica Sinica, 2023,43  
(8):3295-3306.
- [16] 王健,张瑞强,阿比亚斯,等. 围封对内蒙古希拉穆仁草  
地物种多样性的影响[J]. 水土保持通报,2019,39(2):  
62-67.
- Wang Jian, Zhang Ruiqiang, A B, et al. Effects of  
enclosure on species diversity in Xilamuren grassland,  
Inner Mongolia [J]. Bulletin of Soil and Water Conser-  
vation, 2019,39(2):62-67.
- [17] Löf M, Sandell Festin E, Szydło M, et al. Restoring  
mixed forests through conversion of Norway spruce  
stands: Effects of fencing and mechanical site prepara-  
tion on performance of planted beech and natural tree  
regeneration [J]. European Journal of Forest Research,  
2023,142(4):763-772.
- [18] Mureithi S M, Verdoodt A, Gachene C K K, et al.  
Impact of enclosure management on soil properties and  
microbial biomass in a restored semi-arid rangeland,  
Kenya [J]. Journal of Arid Land, 2014,6(5):561-570.
- [19] Verdoodt A, Mureithi S M, Van Ranst E. Impacts of  
management and enclosure age on recovery of the her-  
baceous rangeland vegetation in semi-arid Kenya [J].  
Journal of Arid Environments, 2010,74(9):1066-1073.
- [20] Kiehl K, Kirmer A, Donath T W, et al. Species intro-  
duction in restoration projects: Evaluation of different  
techniques for the establishment of semi-natural grass-  
lands in central and northwestern Europe [J]. Basic and  
Applied Ecology, 2010,11(4):285-299.
- [21] 吴宛萍,马红彬,陆琪,等. 补播对宁夏荒漠草原植物群  
落及土壤理化性状的影响[J]. 草业科学,2020,37  
(10):1959-1969.
- Wu Wanping, Ma Hongbin, Lu Qi, et al. Effects of  
supplementary sowing on plant community and soil  
physical and chemical properties in Ningxia desert steppe  
[J]. Pratacultural Science, 2020,37(10):1959-1969.
- [22] 南万璐,谢应忠,彭文栋,等. 补播与围封对不同退化程  
度荒漠草地植被的恢复效果[J]. 草业科学,2024,41  
(5):1068-1077.
- Nan Wanlu, Xie Yingzhong, Peng Wendong, et al.  
Restoration effects of reseeded and enclosure on the  
vegetation of different degraded desert steppes [J].  
Pratacultural Science, 2024,41(5):1068-1077.