



不同退化高寒草地分级管理下短期植被恢复效果评价

邓粤华 徐祎 罗俊文 洛藏昂毛 卡着才让 祁学忠 周喜 李文金

Evaluation of short-term vegetation recovery under hierarchical management of different degraded alpine grasslands

DENG Yuehua, XU Yi, LUO Junwen, LuoZang'angmao, Kazhuocairang, QI Xuezhong, ZHOU Xi, LI Wenjin

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2025-0293>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

恢复年限对高寒中间锦鸡儿群落组成和多样性的影响

Chronosequence influences plant composition and diversity of *Caragana intermedia* plantations in an alpine sandy area

草业科学. 2022, 39(7): 1303 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2022-0026>

光伏组件遮阴对喀斯特地区植物群落结构的影响

Effects of partial shading by photovoltaic panels on grassland community structure in Karst area

草业科学. 2023, 40(12): 2982 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2022-0445>

退化程度对玛沁高寒草甸植物群落及土壤持水能力的影响

Effects of degradation degree on plant communities and soil water holding capacity of Maqin alpine meadow

草业科学. 2022, 39(2): 235 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2021-0388>

松嫩草甸草原植物群落物种组成和多样性对刈割和长期放牧的响应

Responses of plant communities, species composition, and diversity to mowing and long-term grazing in the Songnen meadow steppe

草业科学. 2024, 41(2): 271 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2022-0771>

不同放牧强度对高寒草甸植物实生苗更新的影响

Effects of different grazing intensities on plant seedling regeneration in an alpine meadow

草业科学. 2022, 39(9): 1869 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2021-0731>

黄河上游白河干流全段植物群落特征及生物多样性

Research on plant community characteristics and biodiversity in the whole section of the main stream of Baihe River in the upper reaches of the Yellow River

草业科学. 2023, 40(4): 848 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2022-0303>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI: 10.11829/j.issn.1001-0629.2025-0293

邓粤华, 徐祎, 罗俊文, 洛藏昂毛, 卡着才让, 祁学忠, 周喜, 李文金. 不同退化高寒草地分级管理下短期植被恢复效果评价. 草业科学, 2025, 42(7): 1609-1619.

DENG Y H, XU Y, LUO J W, Luozang'angmao, Kazhuocairang, QI X Z, ZHOU X, LI W J. Evaluation of short-term vegetation recovery under hierarchical management of different degraded alpine grasslands. Pratacultural Science, 2025, 42(7): 1609-1619.

不同退化高寒草地分级管理下短期 植被恢复效果评价

邓粤华¹, 徐 祎¹, 罗俊文², 洛藏昂毛², 卡着才让²,
祁学忠², 周 喜¹, 李文金¹

(1. 兰州大学生态学院, 甘肃 兰州 730000; 2. 河南蒙古族自治县草原工作站, 青海 河南 811599)

摘要: 青藏高原高寒草地退化严重, 威胁区域生态安全与牧民生计。研究“分区—分类—分级”的生态修复模式是当前草原生态恢复发展的首要目标。然而基于退化程度分级管理下植被恢复成功与否很少进行评价。本研究以青海省河南蒙古族自治县不同退化等级的高寒草地为研究对象, 基于分级管理的恢复措施(轻度退化草地采取围栏封育, 中度和重度退化草地采取鼠害防治+有机肥+人工补播的综合措施)对不同退化等级高寒草地进行了恢复, 通过与未退化草地的植物多样性与地上生物量以及群落组成进行比较, 计算恢复影响大小指数(RII), 评价不同退化等级高寒草地采用对应的分级管理措施后的植被恢复效果。分级管理恢复实施两年后: 1) 轻度退化草地通过围栏封育的植物多样性的恢复效果与原生未退化草地最接近, 中度和重度退化草地在植物多样性上与未退化草地还存在较大差异。2) 退化草地植物生物量均显著高于未退化草地(RII显著大于0), 尤其是禾本科生物量显著增加。然而, 中度、重度退化草地豆科、莎草科和杂草的生物量都显著低于未退化草地(RII显著小于0), 轻度退化草地豆科生物量与未退化草地无显著差异。3) 退化草地的植物群落组成与未退化草地原生系统仍存在显著差异, 完全恢复仍需更长时间。本研究为高寒草地分级恢复策略的优化提供了理论依据和实践参考。

关键词: 高寒草地; 退化; 植物功能群; 植物多样性; 植物生物量; 植物群落组成

文献标识码: A 文章编号: 1001-0629(2025)07-1609-11

Evaluation of short-term vegetation recovery under hierarchical management of different degraded alpine grasslands

DENG Yuehua¹, XU Yi¹, LUO Junwen², Luozang'angmao², Kazhuocairang², QI Xuezhong², ZHOU Xi¹, LI Wenjin¹

(1. School of Ecology, Lanzhou University, Lanzhou 730000, Gansu, China;

2. Grassland Station in Henan Mongolis Autonomous County, Henan 811599, Qinghai, China)

Abstract: The alpine grassland on the Qinghai-Tibet Plateau has severely degraded, threatening regional ecological security and the livelihoods of herdsman. Studying the ecological restoration model of “zoning—classification—grading” is the primary goal of the ecological restoration and development of grasslands. However, the success of vegetation restoration under hierarchical management based on the degree of degradation is rarely evaluated. This study used the alpine grasslands of different degradation grades in Henan County, Qinghai Province, as the research object. Based on the restoration measures

收稿日期: 2025-05-09 接受日期: 2025-06-16

基金项目: 中央林草科技推广示范项目[青(2023)TG10]; 2023年青海省“昆仑英才——高端创新创业人才”项目[青财行字(2022)1201号]; 甘肃省科技重大专项计划(23ZDNA009)

第一作者: 邓粤华(2000-), 女, 湖南桃江人, 在读硕士生, 研究方向为恢复生态学。E-mail: dengyh2023@lzu.edu.cn

通信作者: 李文金(1980-), 男, 甘肃民勤人, 教授, 博士, 主要从事草地恢复和保护工作。E-mail: liwj@lzu.edu.cn

<http://cykx.lzu.edu.cn>

of hierarchical management (fencing and enclosure for slightly degraded grasslands, and comprehensive measures of rodent control + organic fertilizer + artificial reseedling for moderately and severely degraded grasslands), the alpine grasslands of different degradation grades were restored. By comparing with the non-degraded grasslands, the Restoration Impact Magnitude Index (RII) was determined to evaluate the vegetation restoration effect of alpine grasslands with different degradation grades after adopting corresponding hierarchical management measures. The results showed that: 1) The plant diversity restoration of slightly degraded grassland through enclosure was more similar to that of the original non-degraded grassland, whereas there were still significant differences in diversity between moderately and severely degraded grasslands and non-degraded grasslands. 2) Regardless of the degree of degradation of the grassland, plant biomass (especially grass biomass) was significantly higher two years after the restoration and implementation of hierarchical management compared to that in non-degraded grassland (the RII value was significantly greater than 0). The biomass of leguminous plants, Cyperaceae, and weeds in moderately and severely degraded grasslands was significantly lower than that in non-degraded grasslands (the RII value was significantly less than 0), whereas there was no significant difference in the biomass of leguminous plants in slightly degraded grasslands and non-degraded grasslands. 3) Two years after the implementation of the hierarchical management restoration, there were still significant differences in the composition of the plant community of the degraded grassland compared with non-degraded grassland, and complete restoration will still take a longer time. This study provides a theoretical basis and practical reference for optimization of the hierarchical restoration strategy of alpine grasslands.

Keywords: alpine grassland; degradation; plant functional groups; plant diversity; plant biomass; plant community composition

Corresponding author: LI Wenjin E-mail: liwj@lzu.edu.cn

青藏高原被誉为“亚洲水塔”，草地面积达 15.14 万 km²，是我国重要的生态安全屏障和畜牧业基地^[1]。然而，受全球气候变暖和人类活动(如超载放牧)的影响^[2]，青藏高原高寒草地退化问题日益严峻。据统计，青藏高原草地退化面积已超过 30%，其中“黑土滩”等重度退化导致植被盖度低于 20%，有毒、有害草种群数量激增，严重威胁区域草地生产力等生态安全和牧民生计^[2-3]。

为应对高寒草地退化问题，有学者提出了以兼具生产功能和生态功能为目标的“近自然恢复”措施^[4]，主要包括轮牧、围栏封育等自然恢复以及补播改良、施肥、人工建植、鼠害防治等人工辅助修复^[5-6]。围栏封育通过减少放牧压力促进植被自然恢复，适用于轻度退化草地，但其恢复效率在中重度退化草地中较低^[7]。补播改良通过引入适应当地气候的乡土草种[如垂穗披碱草(*Elymus nutans*)、紫花苜蓿(*Medicago sativa*)]和豆科植物，尤其是在土壤贫瘠化严重的中重度退化草地中可有效提高植被盖度和生产力^[8-9]。施肥通过补充土壤养分(如氮、磷)促进植物生长，但其长期效果依赖于土壤微生物群落的稳定性^[10]。此外，鼠害防治作为高寒草地恢复的

重要环节，可减少鼠类对植被和土壤的破坏，为植被恢复创造有利条件^[1]。可见，不同措施适用于不同退化等级的退化草地，但现有研究大多针对单一恢复措施对不同退化草地的恢复效果评价^[1, 11]，尚未开展针对不同退化等级草地，采用与之适配的多样化恢复措施，并系统评价其恢复效果的相关研究。

目前评估植被恢复程度基本上以退化草地本身作为对照基准^[12]。这种研究设计仅能反映退化状态的相对改善，难以准确判定生态恢复的真实成效。从科学角度来看，生态恢复的终极目标应是通过重建生态系统结构和恢复正常功能，使其趋近于未退化健康草地的理想状态^[13]。为了评估生态恢复的效果，需要建立多维度的恢复成效评估体系。国际生态恢复学会科学与政策工作组(Society for Ecological Restoration International Science & Policy Working Group, SER)强调，使用何种参考是生态恢复成功与否的关键，它能明确恢复目标及评估依据^[14]。然而，Wortley 等^[15]通过对 301 篇关于陆地生态恢复项目文章的回顾，40% 的研究使用了代表恢复前退化状态的“负面对照”(恢复前退化系统)，38% 的研究使用了退化前系统定义的“积极对照”(未退化的

健康系统), 22% 的研究同时使用了这两种参考方法。恢复成功通常被定义为向现有或已存在的功能生态系统的转变(即积极对照), 而非仅从退化状态改善^[13-14]。因此, 恢复成效的评估必须引入未退化健康草地作为参照系。此外, 参考地点的选择也至关重要^[16]。参考地点应选择与恢复地点相似生境类型的地理区域, 并面临过类似的自然干扰^[17-18], 通过系统比较恢复系统与参考系统的植物群落组成、生物多样性指数、初级生产力水平以及土壤健康等关键指标, 建立多维度的恢复成效评估体系。只有当恢复草地恢复成效评估体系的综合指标相较原生未退化草地的偏离度处于可接受阈值内^[19], 方可判定为恢复成功, 否则视为未达到恢复目标。

当前高寒草地恢复研究多关注单一措施对特定退化等级的短期效果, 但不同退化等级草地的生态阈值和恢复潜力存在显著差异。所以如何针对退化等级制定差异化恢复策略, 并系统评估其生态成效(如植物多样性与生产力的协同恢复), 是亟待解决的科学问题^[19]。因此, 本研究以青海省黄南藏族自治州河南蒙古族自治县优干宁镇不同退化等级的高寒草地为研究对象, 通过分级管理(按退化等级差异化干预)恢复措施, 系统评估分级管理恢复措施下不同退化等级草地的植物多样性与生产力恢复效果, 旨在为高寒草地分级管理恢复提供科学依据和实践参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于青海省黄南藏族自治州河南蒙古族自治县北部的优干宁镇(34°44' N, 101°34' E; 海拔 3514 m), 地处青海省东南部。该地 2023 年年平均气温 -0.3~1.3 °C, 年平均降水量 588.5 mm, 年无霜期约 12 d, 年日照时长 2551.8~2577.2 h, 年牧草生长期 149 d, 属典型的高原寒冷气候。全县草地面积 66.2 万 hm^2 , 其中可利用面积 64.5 万 hm^2 , 占草地总面积的 97.5%。天然草地共分两类, 即山地草甸类和高寒草甸类。据 2023 年 9 月份生态环境状况调查^[20]结果, 截至 2023 年 9 月全县天然草地退化面积 17.8 万 hm^2 , 占草地总面积的 26.9%, 其中轻度退化面积约 2.3 万 hm^2 , 中度退化面积约 10.5 万 hm^2 , 重度退化面积约 5.0 万 hm^2 (黑土滩型)。天然草地类

型以高寒草甸为主, 主要优势牧草为莎草科、禾本科及杂类草。研究地点的土壤类型主要为高寒草甸土。

1.2 研究方法

1.2.1 退化等级划分

河南蒙古族自治县内 90% 以上的天然草地存在不同程度的退化, 依照 GB 19377-2003 (天然草地退化、沙化、盐渍化的分级指标) 及 DB63/T 981-2011 (高寒草原退化等级划分) 的相关规定, 并结合退化高寒草地群落特征, 将研究区高寒草甸划分为轻度退化 (light degradation, LD, 植被盖度 70%~85%)、中度退化 (moderate degradation, MD, 植被盖度 50%~70%) 和重度退化 (severe degradation, SD, 植被盖度 30%~50%) 3 个等级(表 1), 每个等级均选取具有代表性的区域进行深入研究, 与没有退化的原生植被 (None degradation, C, 优势种以莎草科嵩草属为主, 植被盖度 > 85%) 进行对比。

1.2.2 试验设计

试验地为河南蒙古族自治县优干宁镇不同退化程度高寒草地, 于 2023 年 5 月中旬开展不同退化高寒草地恢复措施。选择的补播草种为当地乡土牧草, 包括同德短芒披碱草 (*Elymus breviaristatus*)、青海草地早熟禾 (*Poa pratensis* 'Qinghai')、青海中华羊茅 (*Festuca sinensis* 'Qinghai') 和杂花苜蓿 (*Medicago rivularis* 'Vassilcz')。轻度退化草地采用围栏封育 + 第 2 年返青季休牧的自然恢复模式; 中度退化草地实施围栏封育 + 鼠害防治 + 人工沟耙补播 (乡土草种 + 豆科牧草) + 施肥的近自然综合管理措施。总播种量 $75.0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 混播组合为同德短芒披碱草 $30.0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ + 青海草地早熟禾 $15.0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ + 中华羊茅 $75.0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ + 杂花苜蓿 $15.0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$; 重度退化草地实施围栏封育 + 鼠害防治 + 人工沟耙补播 (乡土草种 + 豆科牧草) + 施肥的近自然综合管理措施。总播种量 $105.0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 混播组合为同德短芒披碱草 $45 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ + 青海草地早熟禾 $22.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ + 中华羊茅 $22.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ + 杂花苜蓿 $15.0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。为防止家畜破坏, 样地建设完成后进行围栏防护。同时选择周边未退化的高寒草地作为对照, 该对照草地为冬季牧场。

1.2.3 植被调查

于 2024 年每年植物生长最旺盛时 (7 月中旬)

表 1 高寒草原退化等级标准
Table 1 Grassland degradation level criteria in an alpine system

退化等级 Degradation level	简称 Abbreviation	植物群落 优势种 Dominant plant species	禾本科植物 盖度 Grass cover/%	可食牧草 生物量比例 Proportion of biomass of edible forage/%	草地品质 Grassland quality
原生未退化草地 Native non-degraded grassland	ND	禾本科牧草 Gramineae forage	> 30%	> 70%	质量优良, 未退化 Good quality, not degraded
轻度退化草地 Lightly degraded grassland	LD	禾本科牧草 + 杂类草 Gramineae forage + forbs	20%~30%	50%~70%	质量中等, 比原生植被下降一级 The quality is moderate, 1 level lower than the native vegetation
中度退化草地 Moderately degraded grassland	MD	杂类草 Forbs	10%~20%	30%~50%	质量差, 比轻度退化植被下降一级 The quality is poor, 1 level lower than the lightly degraded vegetation
重度退化草地 (沙化或 潜在沙化草地) Severely degraded grassland (desertified or potentially desertified grassland)	SD	毒杂草 Malignant weed	< 10%	< 30%	质量很差, 比中度退化植被下降一级 The quality is very poor, 1 level lower than the moderately degraded vegetation

进行植被调查和样品采集。每个退化等级与相似生境类型的原生未退化高寒草地作为对照, 每个处理设置 4 个重复样地 (100 m × 100 m), 共设置 16 个样地, 样地间隔 ≥ 50 m 以避免空间干扰。每个样地依照 5 点取样法设置 5 个 1 m × 1 m 的样方, 采用样方法开展物种多样性调查, 包括植被种类、盖度、高度。完成植被调查后将样方内的所有植物齐地刈割, 按照禾本科、杂类草、豆科、莎草, 凋落物分类放置于信封中, 带回实验室置于 70 ℃ 烘箱中烘干 48 h 后称重记录。

1.2.4 数据分析

本研究通过计算物种多样性指标, 包括物种丰富度 (S), Shannon-Wiener 指数 (H) 和 Pielou 均匀度指数 (J), 分析不同修复措施对物种多样性的影响, 相关计算公式如下:

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

$$J = H / \ln S .$$

式中: S 为出现在样方内的物种数, P_i 为样方中物种 i 的丰度占样方内所有物种丰度的比例^[21]。自然拓殖种为除了人工补播的草种以外的植物种。

计算恢复影响大小指数 (relative interaction index, RII) 及其 95% 置信区间, 以反映分级恢复措施对高寒退化草地植物多样性与生物量的恢复效果。RII 定义为恢复组与对照组之间的相对差异, 正 (或

负) 值分别表示恢复组比对照组的值较大 (或较小)。RII 的值计算如下:

$$RII = \frac{(X_t - X_c)}{(X_t + X_c)} .$$

式中: X_t 和 X_c 分别表示分级恢复后草地 (恢复组) 和未退化草地 (对照组) 的生态指标平均值。RII 的值范围从 -1 到 1, 正 (或负) 值表示分级恢复后草地植物多样性或生物量超过 (或低于) 未退化草地, RII 值的 95% 置信区间与零值没有交点说明恢复效果 (或正或负) 显著, 反之则不显著。

本研究还使用非度量多维尺度分析 (NMDS) 来比较恢复后的草地 (恢复组) 和未退化草地 (对照组) 的植物物种组成。该分析基于 Bray-Curtis 距离矩阵, 通过 vegan 包中的 MetaMDS 函数进行。进一步使用 vegan 包的 adonis2 进行多变量方差分析 (PERMANOVA), 以确定不同处理组之间植物群落组成的显著差异。

本研究使用 Excel 2019 进行数据整理, 使用 R 4.4.3 进行数据分析与绘图, “vegan”包用来计算物种多样性指数, 使用 “ggplot2” 包进行图片绘制。

2 结果

2.1 分级管理下物种多样性的恢复效果

对比不同退化等级高寒草地在分级管理措施下的物种多样性恢复情况发现, 各退化草地的多样性

指标 (丰富度、Shannon-Wiener 指数、均匀度) 均低于未退化草地 ($RII < 0$), 但恢复效果呈现明显的等级差异 (图 1)。轻度退化草地在围栏封育措施下恢复效果最佳, 其物种丰富度恢复至未退化草地的 82%, Shannon-Wiener 指数与均匀度指数与未退化草地均无显著差异 (图 1A); 而中度退化草地在综合恢复措施 (补播 + 施肥) 下, 物种丰富度恢复至未退

化草地的 75%, 自然拓殖种物种丰富度恢复至未退化草地的 67%, Shannon-Wiener 指数与均匀度指数恢复至未退化草地的 84%、93%, 自然拓殖种 Shannon-Wiener 指数恢复至未退化草地的 86%, 但上述指标均与未退化草地差异显著 (图 1B); 重度退化草地在综合恢复措施 (补播 + 施肥) 下, 物种丰富度恢复至未退化草地的 71%, Shannon-Wiener 指数

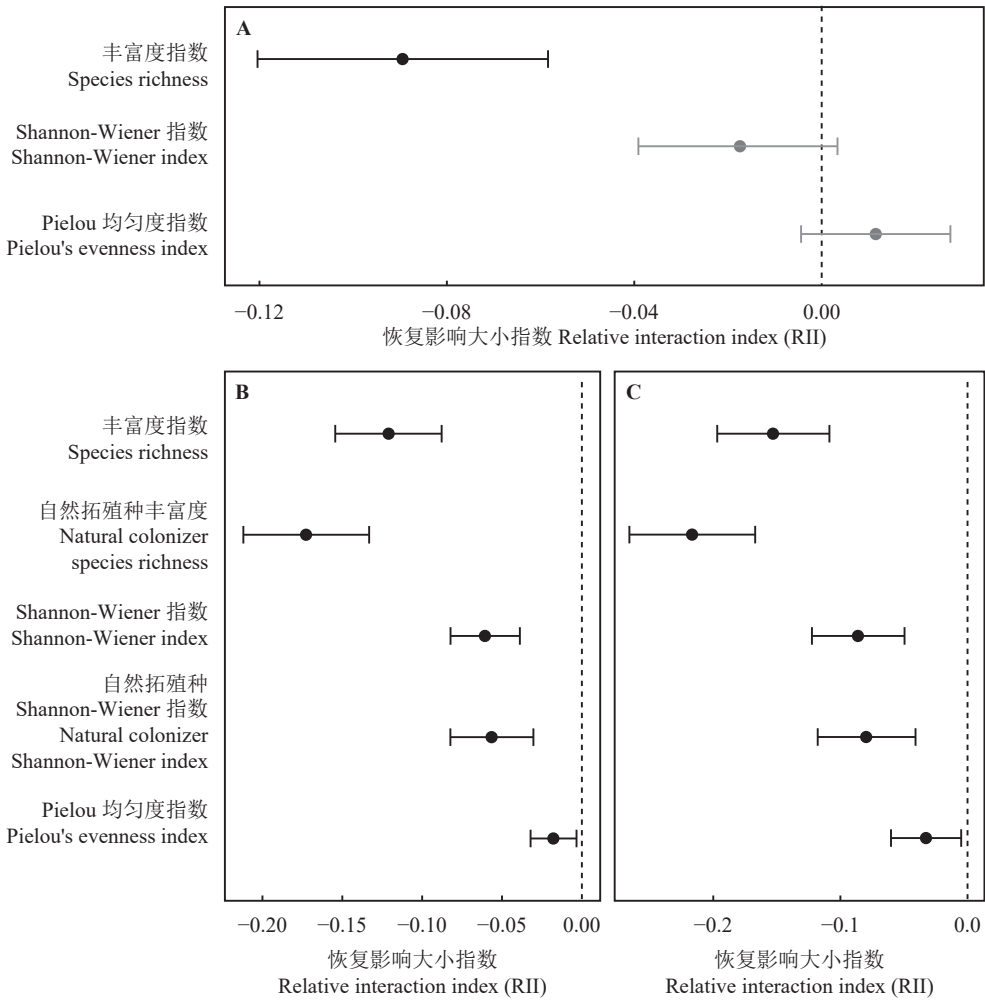


图 1 分级管理恢复措施下轻度、中度、重度退化草地物种多样性恢复影响大小指数

Figure 1 Relative interaction index of hierarchical management restoration measures on the recovery of species diversity in degraded grasslands was classified into light, moderate, and severe

黑色表示不同恢复措施对物种多样性的影响显著低于 (或高于) 未退化草地 ($P < 0.05$); 灰色表示差异不显著 ($P \geq 0.05$)。A 图为轻度退化草地+围栏封育, B 图为中度退化草地 + 围栏封育 + 鼠害防治 + 补播 (同德短芒披碱草 $30.0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ + 青海草地早熟禾 $15.0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ + 中华羊茅 $75.0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ + 杂花苜蓿 $15.0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) + 施肥, C 图为重度退化草地 + 围栏封育 + 鼠害防治 + 补播 (同德短芒披碱草 $45 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ + 青海草地早熟禾 $22.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ + 中华羊茅 $22.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ + 杂花苜蓿 $15.0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) + 施肥; 下图同。

Black indicates that the impact of restoration measures on plant biomass is significantly lower (or higher) than that of non-degraded grassland (C) when the grassland is classified as light (LD), moderate (MD), or severe (SD) ($P < 0.05$); gray indicates that the difference is not significant compared with non-degraded grassland ($P \geq 0.05$). Figure A represents lightly degraded grassland + fencing enclosure. Figure B represents moderately degraded grassland + fencing enclosure + rodent control + reseeding ($30.0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ of *Elymus brevيارistatus*, $15.0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ of *Poa pratensis* ‘Qinghai’, $75.0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ of *Festuca sinensis* ‘Qinghai’, and $15.0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ of *Medicago rivularis* ‘Vassilcz’) + fertilization. Figure C represents severely degraded grassland + fencing enclosure + rodent control + reseeding ($45 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ of *Elymus brevيارistatus*, $22.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ of *Poa pratensis* ‘Qinghai’, $22.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ of *Festuca sinensis* ‘Qinghai’, and $15.0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ of *Medicago rivularis* ‘Vassilcz’) + fertilization; This is applicable for the following figures as well.

与均匀度指数恢复至未退化草地的 81% 和 90%，自然拓殖种的丰富度与 Shannon-Wiener 指数恢复至未退化草地的 62% 和 83%，均与未退化草地差异显著 (图 1C)。综上，分级管理措施短期对轻度退化草地恢复效果显著优于其他退化等级草地，中度退化草地与重度退化草地恢复效果无较大区别；在多种恢复参考指标中，对于不同退化等级的高寒草地，均匀度指数均是最接近未退化草地的指标。

2.2 分级管理下植物生物量的恢复效果

分级管理措施恢复下退化草地总生物量均高于未退化草地，但不同功能群生物量呈现差异化响应。3 种退化程度分级恢复下，总生物量和禾本科植物的生物量均超过未退化草地 ($R_{II} > 0$)，且差异显著。豆科、莎草科和杂草的生物量均未超过未退化草地 ($R_{II} < 0$)。除轻度退化草地在围栏封育措施下，豆科生物量与未退化草地差异不显著外，其他功能群的生物量均显著少于未退化草地 ($R_{II} < 0$) (图 2)。

2.3 分级管理下植物群落组成的恢复效果

根据 NMDS 分析结果，未退化草地与分级恢复后的不同退化高寒草地在 NMDS1 和 NMDS2 轴上均呈现明显分离，这说明不同退化高寒草地通过分级恢复后在植物群落组成上与未退化草地差异较大 (图 3)。分级恢复后，不同程度退化草地与未退化草地的植物群落组成存在显著差异，且排序结果的 Stress 值小于 0.2，表明排序结果可信。通过 Adonis 检验进一步验证，各组之间的差异具有高度显著性 ($P = 0.001$, $R^2 = 0.27$)，同时 Stress 值为 0.18，这充分说明二维排序图能够较为准确地反映高维数据之

间的距离关系。

3 讨论

草地分级管理是一种创新的资源经营理念，是兼顾生态保护和生产发展的管理新范式^[22]，草地群落的植被结构和土壤状况的差异会导致恢复措施对高寒草地的影响随退化等级的不同而变化^[23]，因此退化草地的治理需要针对不同退化等级采用不同措施。

3.1 分级管理恢复下植物多样性的恢复效果

本研究表明，分级管理措施下不同退化等级高寒草地物种多样性仍显著小于未退化草地，但恢复效果因退化程度而异。轻度退化草地在围栏封育措施下多样性指标 (如 Shannon-Wiener 指数和均匀度) 接近未退化草地，这与李振威等^[24]的研究结果一致，即围栏封育能有效减轻放牧压力，促进乡土植物自然恢复，然而需注意，在小尺度评估中，可能因本地种扩散高估被动恢复效果^[25]。然而，中度和重度退化草地的多样性恢复效果较差，尤其是自然拓殖种丰富度仅为未退化草地的 67%、62%，这一现象突出反映了在退化严重区域实施快速恢复策略 (如补播) 时常见的“生产力—多样性权衡”问题。补播恢复措施引入的补播草种 (如禾本科和豆科植物) 凭借其高效的资源捕获能力 (如光、养分) 和快速生长特性成为优势种，导致群落竞争格局改变^[26]。例如，在重度退化草地中，补播的禾本科和豆科快速占据生态位，抑制了原生莎草科和杂类草的生态位扩展，从而降低了均匀度。类似结

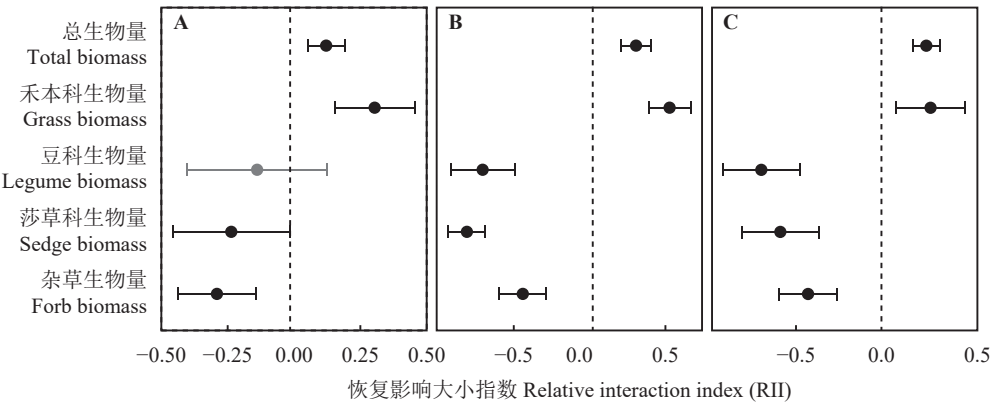


图 2 分级管理恢复措施下轻度、中度、重度退化草地植物生物量恢复影响大小指数

Figure 2 Relative interaction index of hierarchical management restoration measures on the recovery of plant biomass under light, moderate, and severe grassland degradation

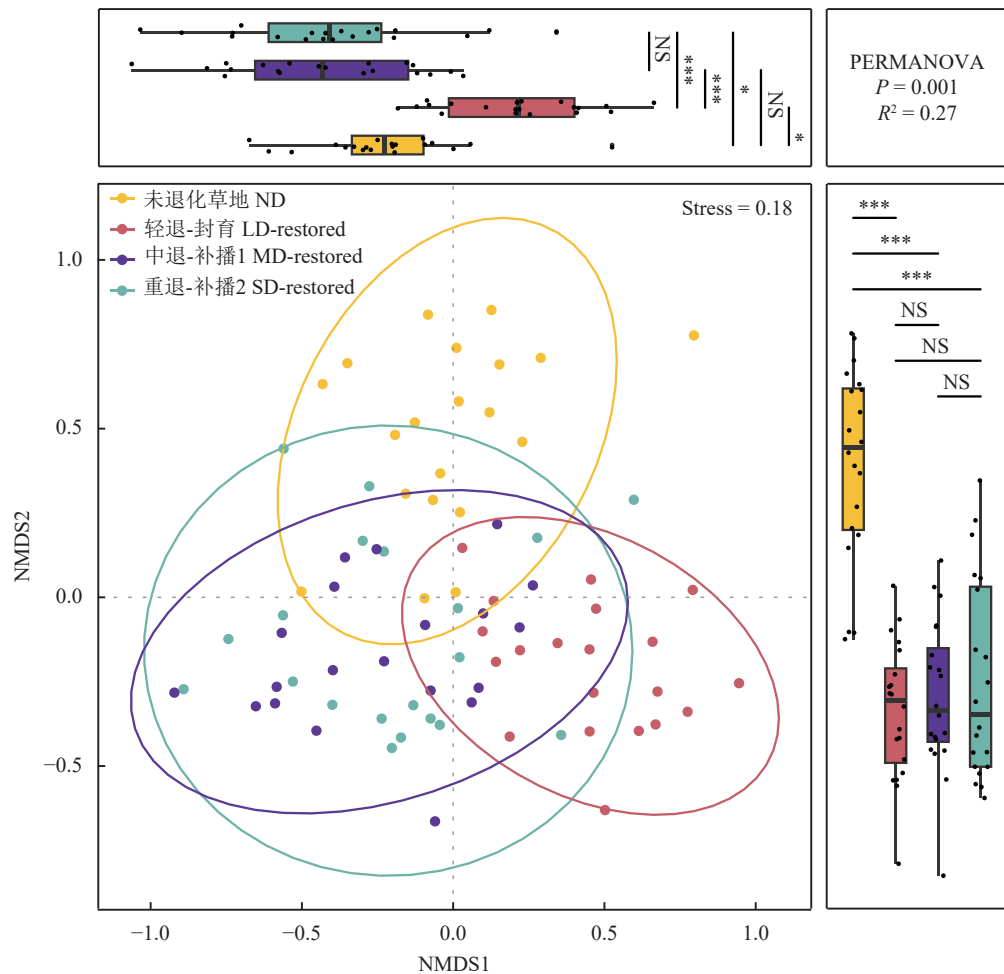


图 3 不同退化高寒草地分级恢复处理组以及未退化草地植物群落组成的非度量多维尺度分析图

Figure 3 Non-quantitative multidimensional scaling (NMDS) analysis of plant community composition in different degraded alpine grassland restoration treatment groups and non-degraded grassland

基于 Bray-Curtis 距离的非度量多维尺度 (NMDS) 揭示了不同退化高寒草地分级恢复处理组以及未退化草地植物群落组成的差异。NMDS1 和 NMDS2 轴表示基于物种组成的样地排序。Adonis 检验用于评估沿每个 NMDS 轴的组之间的显著差异。显著性水平: NS, 不显著; *, $P < 0.05$; **, $P < 0.01$; ***, $P < 0.001$ 。

Non-metric multidimensional scaling (NMDS) based on Bray-Curtis distance revealed differences in plant community composition among different degraded grassland restoration treatment groups and non-degraded grasslands. The NMDS1 and NMDS2 axes represent site sorting based on species composition. Adonis-tests were used to evaluate significant differences between groups along each NMDS axis. NS, not significant; *, $P < 0.05$; **, $P < 0.01$; ***, $P < 0.001$ 。

果在常涛等^[27]对黑土滩混播恢复的研究中也有报道,其发现补播初期禾本科植物盖度显著增加,但杂类草多样性恢复滞后。与 Li 等^[28]的 Meta 分析结果一致,人工补播虽能快速提升生产力,但可能以牺牲部分原生种为代价,导致群落均匀度短期内降低。尽管群落植物多样性的恢复效果有限,但轻度退化已达到一定恢复效果,因此,未来需继续优化补播策略(如调整禾豆比例、选择竞争力适中的草种、采用更接近自然的混播模式)并延长恢复周期,为自然拓殖种提供更宽松的竞争环境以实

现生态系统的全面恢复,并结合适度放牧或轮牧管理以维持群落稳定性^[29]。

3.2 分级管理恢复下植物生物量的恢复效果

草地生物量是评估草地生产力、生态健康状况和碳循环能力的重要指标之一^[30]。中度和重度退化草地经补播后总生物量都显著超过未退化草地,已经成功恢复,这与董全民等^[31]在三江源区的研究结果相吻合,即补播结合施肥可以显著提高“黑土滩”草地的生产力。禾本科生物量也显著超过未退化草地,这可能与补播的同德短芒披碱草等乡土草种的

适应性有关,它们具有较强资源捕获能力^[32]。并且补播的豆科植物通过固氮作用提高了土壤氮有效性,进而优化种间互作提升生产力^[33-34]。然而豆科、莎草科和杂类草的生物量仍显著低于未退化草地,表明当前补播策略(翻耕的种子添加)能长期维持本地种优势,加剧功能群竞争,从而限制其均衡恢复,在恢复初期造成功能群的替代^[25,35]。杂类草生物量与未退化草地的显著差异表明补播措施有效抑制了黄帚橐吾(*Ligularia virgaurea*)等毒害草的扩张,这与赵宝玉等^[36]提出的“竞争排斥—资源调控”机制一致。此外,施肥措施通过快速补充土壤氮素,优先促进具有高氮响应能力的补播禾本科植物生长^[37],但长期可能加剧物种竞争,导致了植物功能群单一化,物种多样性下降,降低群落稳定性^[38]。这与 Bai 和 Cotrufo^[39]提出的“生产力—多样性权衡”理论一致。

轻度退化草地围封后总生物量、禾本科生物量也显著超过未退化草地,原因可能是围栏隔离牲畜,避免其对草地的踩踏和啃食,使围栏内以往被破坏的禾本科植物通过种子繁殖重新占据生态位,实现轻度退化草地的逐步恢复^[40]。莎草科和杂类草的生物量仍显著低于未退化草地,这可能是因为围栏封育加剧了群落内物种间对水分和营养物质的竞争压力,使得竞争力较弱的植物功能群因资源获取不足而生长发育受阻^[41]。

3.3 分级管理恢复下植物群落组成的恢复效果

草地植被恢复过程中,群落结构变化最为明显。尽管植物总生物量在恢复后超过未退化草地,但其群落组成与原生系统仍存在较大差异(图 3)。这种差异可能是由于禁牧所造成的。草食动物在其放牧活动中优先选择适口性较高的食物,长期的放牧会有助于在草食动物和植物之间形成一种协同进化^[42]。但长期的禁牧几乎中断了这种共生进化,

导致植物群落与外部生物环境之间的主要相互作用模式逐渐从地上(食草动物)转移到地表(植物之间)或地下(例如土壤资源、微生物和土壤小动物)^[43]。物种之间的竞争,特别是对光资源的竞争,也是导致群落组成发生变化的原因之一^[44]。植物群落组成的变化可能影响生态系统的长期稳定性,如土壤碳固存能力和抗干扰性^[45-46]。因此,未来需关注恢复草地的群落演替动态,并结合土壤微生物调控进一步优化恢复效果。

4 结论

本研究通过对青海省河南县优干宁镇高寒草地的分级管理恢复试验,探讨了不同退化程度草地的恢复效果。研究发现:1) 分级管理恢复措施实施两年后,物种丰富度和植物多样性仍低于未退化草地。轻度退化草地通过围栏封育恢复的恢复效果与原生未退化草地最接近,中度和重度退化草地在多样性上与未退化草地还存在较大差异。2) 分级管理恢复措施实施两年后,退化草地的植物生产力显著提升。中度和重度退化草地通过鼠害防治、人工沟耙补播和施肥等综合管理措施,突破土壤贫瘠化和种子库限制,实现了快速恢复,在生物量上超过原生未退化草地。尤其是禾本科植物的生物量在所有退化草地中均超过未退化草地,成为生产力提升的主要贡献者。豆科、莎草科和杂草的生物量普遍下降,表明恢复措施改变了群落结构,抑制了部分原生植物的生长。3) 植物群落组成与原生未退化草地仍存在显著差异,完全恢复仍需更长时间或采取辅助措施。总体而言,分级管理在短期内对生产力的恢复效果优于对多样性的恢复效果,未来需进一步完善恢复措施,重点关注长期群落演替动态的引导和土壤微生物群落的调控,以实现生态系统结构(多样性)与功能(生产力、稳定性)的协同恢复。

参考文献 References:

- [1] 贺金生, 刘志鹏, 姚拓, 孙书存, 吕植, 胡小文, 曹广民, 吴新卫, 李黎, 卜海燕, 朱剑霄. 青藏高原退化草地恢复的制约因子及修复技术. 科技导报, 2020, 38(17): 66-80.
- HE J S, LIU Z P, YAO T, SUN S C, LYU Z, HU X W, CAO G M, WU X W, LI L, BU H Y, ZHU J X. Analysis of the main constraints and restoration techniques of degraded grassland on the Tibetan Plateau. Science & Technology Review, 2020, 38(17): 66-80.

- [2] 郝爱华, 薛娴, 彭飞, 尤全刚, 廖杰, 段翰晨, 黄翠华, 董斯扬. 青藏高原典型草地植被退化与土壤退化研究. *生态学报*, 2020, 40(3): 964-975.
HAO A H, XUE X, PENG F, YOU Q G, LIAO J, DUAN H C, HUANG C H, DONG S Y. Different vegetation and soil degradation characteristics of a typical grassland in the Qinghai-Tibetan Plateau. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(3): 964-975.
- [3] WANG Z, ZHANG Y, YANG Y, ZHOU W, GANG C, ZHANG Y, LI J, AN R, WANG K, ODEH I. Quantitative assess the driving forces on the grassland degradation in the Qinghai-Tibet Plateau, China. *Ecological Informatics*, 2016(33): 32-44.
- [4] 贺金生, 卜海燕, 胡小文, 冯彦皓, 李守丽, 朱剑霄, 刘国华, 王彦荣, 南志标. 退化高寒草地的近自然恢复: 理论基础与技术途径. *科学通报*, 2020, 65(34): 3898-3908.
HE J S, BU H Y, HU X W, FENG Y H, LI S L, ZHU J X, LIU G H, WANG Y R, NAN Z B. Close-to-nature restoration of degraded alpine grasslands: Theoretical basis and technical approach. *Chinese Science Bulletin*, 2020, 65(34): 3898-3908.
- [5] HAN J G, ZHANG Y J, WANG C J, BAI W M, WANG Y R, HAN G D, LI L H. Rangeland degradation and restoration management in China. *The Rangeland Journal*, 2008, 30: 233-239.
- [6] 古琛, 贾志清, 杜波波, 何凌仙子, 李清雪. 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.
GU C, JIA Z Q, DU B B, HE L X Z, LI Q X. Reviews and prospects of ecological restoration measures for degraded grasslands of China. *Ecology and Environmental Sciences*, 2022, 31(7): 1465-1475.
- [7] YAN Y, XUYANG L. Is grazing exclusion effective in restoring vegetation in degraded alpine grasslands in Tibet, China?. *Peerj*, 2015, 3(6): 1020.
- [8] 李希来, 马昀峤, 段成伟, 柴瑜, 徐文印. 施肥和补播对不同坡向斑块化退化高寒草甸生物量和物种多样性的影响. *草地学报*, 2024, 46(5): 1-13.
LI X L, MA Y Q, DUAN C W, CHAI Y, XU W Y. Effects of fertilization and reseeding on biomass and species diversity of patchy degraded alpine meadows with different slope directions. *Acta Agrestia Sinica*, 2024, 46(5): 1-13.
- [9] 杨增增, 张春平, 董全民, 杨晓霞, 褚晖, 李小安, 魏琳娜, 张艳芬. 补播对中度退化高寒草地群落特征和多样性的影响. *草地学报*, 2018, 26(5): 1071-1077.
YANG Z Z, ZHANG C P, DONG Q M, YANG X X, CHU H, LI X A, WEI L N, ZHANG Y F. Effects of reseeding on plant community composition and diversity of moderately degraded alpine grassland in Qinghai-Tibetan Plateau. *Acta Agrestia Sinica*, 2018, 26(5): 1071-1077.
- [10] LI D, LI S, CHEN H, WU J. Reseeding promotes plant biomass by improving microbial community stability and soil fertility in a degraded subalpine grassland. *Geoderma*, 2025, 453: 117160.
- [11] DONG Q M, ZHAO X Q, WU G L, SHI J J, REN G H. A review of formation mechanism and restoration measures of “black-soil-type” degraded grassland in the Qinghai-Tibetan Plateau. *Environ Earth Sciences*, 2013, 70(5): 2359-2370.
- [12] 张小芳, 张春平, 杨增增, 李彩弟, 杨晓霞, 刘文亭, 俞旻, 董全民. 单播措施下三江源区高寒退化草地恢复效果评估. *草地学报*, 2022, 30(10): 2834-2844.
ZHANG X F, ZHANG C P, YANG Z Z, LI C D, YANG X X, LIU W T, YU Y, DONG Q M. Evaluation of restoration effect in alpine degraded meadow under single sowing in the Three Rivers Source Regions. *Acta Agrestia Sinica*, 2022, 30(10): 2834-2844.
- [13] BENAYAS J M R, NEWTON A C, BULLOCK J M. Enhancement of biodiversity and ecosystem services by ecological restoration: A Meta-analysis. *Science*, 2009, 325: 1121-1124.
- [14] Society for Ecological Restoration International Science & Policy Working Group. The SER Primer on Ecological Restoration. (2004-10-01) [2025-04-16]. <https://old.ser-rrc.org/resource/the-ser-international-primer-on/>.
- [15] WORTLEY L, HERO J M, HOWES M. Evaluating ecological restoration success: A review of the literature. *Restoration Ecology*, 2013, 21: 537-543.
- [16] PURCELL A H, FRIEDRICH C, RESH V H. An assessment of a small urban stream restoration project in northern California. *Restoration Ecology*, 2002, 10: 685-694.
- [17] RUIZ-JAEN M C, MITCHELL AIDE T. Restoration success: How is it being measured. *Restoration Ecology*, 2005, 13: 569-577.
- [18] DURBECQ A, JAUNATRE R, BUISSON E, CLUCHIER A, BISCHOFF A. Identifying reference communities in ecological restoration: The use of environmental conditions driving vegetation composition. *Restoration Ecology*, 2020, 28: 1445-1453.
- [19] HOBBS R J, HARRIS J A. Restoration ecology: Repairing the earth's ecosystems in the new millennium. *Restoration Ecology*,

- 2001, 9: 239-246.
- [20] 环境保护编辑部. 2023 年中国生态环境状况公报 (摘录). 环境保护, 2024, 52(11): 53-65.
Editorial Board of Environmental Protection. Excerpts from the 2023 Report on the State of China's Ecological Environment. Environmental Protection, 2024, 52(11): 53-65.
- [21] 方精云, 沈泽昊, 唐志尧, 王志恒. “中国山地植物物种多样性调查计划”及若干技术规范. 生物多样性, 2004(1): 5-9.
FANG J Y, SHEN Z H, TANG Z Y, WANG Z H. Peking University's survey plan for plant species diversity of China's mountains. Chinese Biodiversity, 2004(1): 5-9.
- [22] 赵新全, 周青平, 马玉寿, 董全民, 周华坤, 徐世晓, 施建军, 赵亮, 王文颖, 汪新川. 三江源区草地生态恢复及可持续管理技术创新和应用. 青海科技, 2017, 24(1): 13-19.
ZHAO X Q, ZHOU Q P, MA Y S, DONG Q M, ZHOU H K, XU S X, SHI J J, ZHAO L, WANG W J, WANG X C. Innovation and application of grassland ecological restoration and sustainable management technologies in Sanjiangyuan District. Qinghai Science and Technology, 2017, 24(1): 13-19.
- [23] 尚占环, 董全民, 施建军, 周华坤, 董世魁, 邵新庆, 李世雄, 王彦龙, 马玉寿, 丁路明, 曹广民, 龙瑞军. 青藏高原“黑土滩”退化草地及其生态恢复近 10 年研究进展: 兼论三江源生态恢复问题. 草地学报, 2018, 26(1): 1-21.
SHANG Z H, DONG Q M, SHI J J, ZHOU H K, DONG S K, SHAO X Q, LI S X, WANG Y L, MA Y S, DING L M, CAO G M, LONG R J. Research progress in recent ten years of ecological restoration for ‘black soil land’ degraded grassland on Tibetan Plateau: Concurrently discuss of ecological restoration in Sangiiangyuan Region. Acta Agrestia Sinica, 2018, 26(1): 1-21.
- [24] 李振威, 缪雨珏, 宗宁. 围栏封育对藏北高寒草地植物多样性与生态系统多功能性的影响. 草地学报, 2025, 33(2): 596-608.
LI Z W, MIAO Y J, ZONG N. Effects of grazing exclusion on plant diversity and ecosystem multifunctionality of alpine grassland in Northern Xizang. Acta Agrestia Sinica, 2025, 33(2): 596-608.
- [25] O'REILLY-NUGENT A, BLUMENTHAL D M, WANDRAG E M, DUNCAN R P, CATFORD J A. Active restoration after three decades: Seed addition increases native dominance compared to landscape-scale secondary succession. Journal of Applied Ecology, 2024, 61: 2997-3006.
- [26] LIN Y, CHEN Z, YU G R, YANG M, HAO T X, ZHU X J, ZHANG W K, HAN L, LIU Z G, MA L X, DOU X J, LUO W X. Spatial patterns of light response parameters and their regulation on gross primary productivity in China. Agricultural and Forest Meteorology, 2024, 345: 109833.
- [27] 常涛, 李珊, 李以康, 徐文华, 孙建, 张中华, 马丽, 秦瑞敏, 苏洪烨, 胡雪, 阿的哈则, 袁访, 李宏林, 周华坤. 混播人工恢复草地恢复初期对黑土滩植被和土壤的恢复效果. 草地学报, 2023, 31(5): 1546-1555.
CHANG T, LI S, LI Y K, XU W H, SUN J, ZHANG Z H, MA L, QIN R M, SU H Y, HU X, Adihaze, YUAN F, LI H L, ZHOU H K. Restoration effects of mixed sowing artificial grassland on vegetation and soil of black soil land at the initial planting stage. Acta Agrestia Sinica, 2023, 31(5): 1546-1555.
- [28] LI W, SHANG X, YAN H, XU J, LIANG T G, ZHOU H K. Impact of restoration measures on plant and soil characteristics in the degraded alpine grasslands of the Qinghai Tibetan Plateau: A Meta-analysis. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2023, 347, 108394.
- [29] 董全民, 刘文亭, 郭瑞英, 窦声云, 刘玉祯, 杨晓霞, 俞旻, 张春平, 曹铨, 土旦加, 周学丽, 董世魁. 青藏高原高寒牧区“人居—草地—畜群”放牧单元理论与实践. 青海科技, 2022, 29(6): 25-30.
DONG Q M, LIU W T, GUO R Y, DOU S Y, LIU Y Z, YANG X X, YU Y, ZHANG C P, CAO Q, Tudanjia, ZHOU X L, DONG S K. Alpine pastoral area of the Qinghai-Tibet Plateau “habitat—grassland—herd” grazing unit theory and practice. Qinghai Science and Technology, 2022, 29(6): 25-30.
- [30] AYMA-ROMAY A I, BOWN H E, PÉREZ-HARGUINDEGUY N, ENRICO L. Trait similarity among dominant highly-competitive species rather than diversity increases productivity in semi-arid Mediterranean forests. Forest Ecology and Management, 2021, 486: 118969.
- [31] 董全民, 马玉寿, 许长军, 施建军, 王苑, 王彦龙, 盛丽, 李世雄. 三江源区黑土滩退化草地分类分级体系及分类恢复研究. 草地学报, 2015, 23(3): 441-447.
DONG Q M, MA Y S, XU C J, SHI J J, WANG Y, WANG Y L, SHENG L, LI S X. Study of classification and gradation restoration of black-soil beach degraded grassland in the headwaters of Three Rivers. Acta Agrestia Sinica, 2015, 23(3): 441-447.

- [32] 张英俊, 周冀琼, 杨高文, 荆晶莹, 刘楠. 退化草原植被免耕补播修复理论与实践. *科学通报*, 2020, 65(16): 1546-1555.
ZHANG Y J, ZHOU J Q, YANG G W, JING J Y, LIU N. Theory and application of no-tillage reseeding in degraded grasslands. *Chinese Science Bulletin*, 2020, 65(16): 1546-1555.
- [33] 阎子盟, 张玉娟, 潘利, 唐士明, 王堃, 黄顶. 天然草地补播豆科牧草的研究进展. *中国农学通报*, 2014, 30(29): 1-7.
YAN Z M, ZHANG Y J, PAN L, TANG S M, WANG K, HUANG D. Research progress of reseeding forage legumes into natural grassland. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2014, 30(29): 1-7.
- [34] 周娟娟, 白玛嘎翁, 魏巍, 德科加. 西藏高寒区禾一豆混播对牧草营养品质及土壤养分的影响. *干旱地区农业研究*, 2021, 39(2): 143-149.
ZHOU J J, Baimagaweng, WEI W, Dekeja. The effects of grass-legume mixing farming on forage nutritional quality and soil nutrient in alpine zone of Tibet. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2021, 39(2): 143-149.
- [35] 张骞, 马丽, 张中华, 徐文华, 周秉荣, 宋明华, 乔安海, 王芳, 余延娣, 杨晓渊, 郭婧, 周华坤. 青藏高寒区退化草地生态恢复: 退化现状、恢复措施、效应与展望. *生态学报*, 2019, 39(20): 7441-7451.
ZHANG Q, MA L, ZHANG Z H, XU W H, ZHOU B R, SONG M H, QIAO A H, WANG F, SHE Y D, YANG X Y, GUO J, ZHOU H K. Ecological restoration of degraded grassland in Qinghai-Tibet alpine region: Degradation status, restoration measures, effects and prospects. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(20): 7441-7451.
- [36] 赵宝玉, 刘忠艳, 万学攀, 霍星华, 郭玺, 王建军, 刘忠艳, 孙莉莎, 史志诚. 中国西部草地毒草危害及治理对策. *中国农业科学*, 2008(10): 3094-3103.
ZHAO B Y, LIU Z Y, WAN X P, HUO X H, GUO X, WANG J J, LIU Z Y, SUN L S, SHI Z C. Damage and control of poisonous-weeds in Chinese western grassland. *Scientia Agricultura Sinica*, 2008(10): 3094-3103.
- [37] SONG M H, YU F H. Reduced compensatory effects explain the nitrogen mediated reduction in stability of an alpine meadow on the Tibetan Plateau. *New Phytologist*, 2015, 207(1): 70-77.
- [38] LIU S, WARD S E, WILBY A, MANNING P, GONG M, DAVIES J, KILLICK R, QUINTON J N, BARDGETT R D. Multiple targeted grassland restoration interventions enhance ecosystem service multifunctionality. *Nature Communications*, 2025, 16(1): 3971.
- [39] BAI Y F, COTRUFO M F. Grassland soil carbon sequestration: Current understanding, challenges, and solutions. *Science*, 2022, 377: 603-608.
- [40] 杨新国, 宋乃平, 李学斌, 刘秉儒. 短期围栏封育对荒漠草原沙化灰钙土有机碳组分及物理稳定性的影响. *应用生态学报*, 2012, 23(12): 3325-3330.
YANG X G, SONG N P, LI X B, LIU B R. Effects of short-term fencing on organic carbon fractions and physical stability of sandy sierozem in desert steppe of Northwest China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, 23(12): 3325-3330.
- [41] 屈兴乐, 方江平. 围栏封育对退化灌丛草地群落土壤特性和植被的影响. *北方园艺*, 2019(3): 109-115.
QU X L, FANG J P. Influences of fencing on soil properties and vegetation in degraded shrub-grass community. *Northern Horticulture*, 2019(3): 109-115.
- [42] BECERRA J X. The impact of herbivore-plant coevolution on plant community structure. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2007, 104(18): 7483-7488.
- [43] WIJESINGHE D K, JOHN E A, HUTCHINGS M J. Does pattern of soil resource heterogeneity determine plant community structure? An experimental investigation. *Journal of Ecology*, 2005, 93(1): 99-112.
- [44] BRAUER V S, STOMP M, HUISMAN J. The nutrient-load hypothesis: Patterns of resource limitation and community structure driven by competition for nutrients and light. *The American Naturalist*, 2012, 179(6): 721-740.
- [45] SEABLOOM E W, BORER E T, TILMAN D. Grassland ecosystem recovery after soil disturbance depends on nutrient supply rate. *Ecology Letters*, 2020, 23: 1756-1765.
- [46] TIBBETT M, GIL-MARTINEZ M, FRASER T, GREEN I D, DUDDIGAN S, DEOLIVEIRA V H, RASMUSSEN K R, SIZMUR T, DIAZ A. Long-term acidification of pH neutral grasslands affects soil biodiversity, fertility and function in a heathland restoration. *Catena*, 2019, 180: 401-415.

(责任编辑 王芳)