

doi:10.11733/j.issn.1007-0435.2026.07.019

引用格式:马婧娟,李希来,尹通江,等.高寒草甸退化斑块植物群落演替特征及土壤限制因子研究[J].草地学报,2026,34(7):2553-2567

MA Jing-juan, LI Xi-lai, YING Tong-jiang, et al. Study on the Succession Characteristics of Plant Communities and Soil Limiting Factors in Degraded Patches of Alpine Meadow[J]. Acta Agrestia Sinica, 2026, 34(7):2553-2567

高寒草甸退化斑块植物群落演替特征及土壤限制因子研究

马婧娟^{1,2}, 李希来^{1,2*}, 尹通江¹, 柴瑜^{1,2}, 高佩^{1,2}, 李成一¹, 吴勇^{1,2}, 周怡志^{1,2}

(1. 青海大学林草学院, 青海 西宁 810016; 2. 青海大学省部共建三江源生态与高原农牧业国家重点实验室, 青海 西宁 810016)

摘要:本研究在滩地和坡地2种立地条件下,选取裸露斑块、短期恢复斑块、长期恢复斑块及健康高寒草甸4类典型斑块,通过植物样方调查,分析不同类型斑块在自然恢复演替过程中群落特征的变化,探讨其与土壤因子的相关性,揭示不同类型斑块植物群落特征的差异及关键土壤限制因子。结果表明,随着恢复演替的进行,滩地和坡地植物多样性显著增加,两地间在植物功能群盖度和地上生物量上存在显著差异;滩地植物群落数量特征、多样性及功能群(豆科除外)盖度和地上生物量高于坡地;植物群落指标与土壤含水量、温度、电导率、有机碳、全氮、全磷、硝态氮、铵态氮正相关,与pH值负相关;土壤有机碳、全磷、全氮、铵态氮是滩地植物群落特征的关键限制因子,pH、铵态氮、有机碳是坡地植物群落特征的关键限制因子。总之,斑块化退化高寒草甸的土壤条件得到改善与恢复,进而促进了植物群落的正向演替。

关键词:立地条件;斑块化退化;高寒草甸;恢复演替;植物群落特征;土壤因子

中图分类号:S812.6

文献标识码:A

文章编号:1007-0435(2026)07-2553-15

Study on the Succession Characteristics of Plant Communities and Soil Limiting Factors in Degraded Patches of Alpine Meadow

MA Jing-juan^{1,2}, LI Xi-lai^{1,2*}, YING Tong-jiang¹, CHA Yu^{1,2}, GAO Pei^{1,2},
LI Cheng-yi¹, WU Yong^{1,2}, ZHOU Yi-zhi^{1,2}

(1. College of Forestry and Grassland, Qinghai University, Xining, Qinghai Province 810016, China; 2. State Key Laboratory of Plateau Ecology and Agriculture, Qinghai University, Xining, Qinghai Province 810016, China)

Abstract: In this study, four typical patches under the conditions of shoaly land and sloping land, including bare patches, short-term restoration patches, long-term restoration patches and healthy alpine meadow, were selected. Through plant quadrat survey, the changes of community characteristics in different types of patches during natural restoration and succession were analyzed, and their correlation with soil factors was discussed. The differences of plant community characteristics and key soil limiting factors in different types of patches were revealed. The results showed that with the restoration succession, the plant diversity of shoaly land and sloping land increased significantly, and the functional group coverage and aboveground biomass were significantly different. The quantitative characteristics, diversity, coverage of functional groups (except Fabaceae) and aboveground biomass of plant communities in shoaly land were higher than those in sloping land. Plant community indexes were positively correlated with soil water content, temperature, conductivity, organic carbon, total nitrogen, total phosphorus, nitrate nitro-

收稿日期:2025-07-04;修回日期:2025-08-30

基金项目:国家自然科学基金联合基金重点支持项目(U23A20159, U21A20191);青海省科学技术厅项目(2023-QY-210);高等学校学科创新引智计划项目(D18013)资助

作者简介:马婧娟(1997-),女,汉族,甘肃天水人,硕士研究生,主要从事草地生态修复研究,E-mail: mjingjuan@163.com; *通信作者 Author for correspondence, E-mail: xilai-li@163.com

gen and ammonium nitrogen, and negatively correlated with pH value. Organic carbon, total phosphorus, total nitrogen and ammonium nitrogen were the key limiting factors of plant community characteristics in shoaly land, and pH, ammonium nitrogen and organic carbon were the key limiting factors of plant community characteristics in sloping land. In short, the soil conditions of the patchily degraded alpine meadow had been improved and restored, which in turn promoted the positive succession of plant communities.

Key words: Site condition; Patchy degradation; Alpine meadows; Restoration succession; Plant community characteristics; Soil factors

高寒草甸是黄河源区最重要的生态系统类型,约占源区面积的80%,在保障高原水源涵养、保持生物多样性、维持生态平衡等方面发挥着至关重要的作用^[1-2]。近几十年来,由于该区域独特的地理位置以及在全球气候变化、人类过度放牧、草畜产品不断输出、啮齿类动物活动等综合因素的影响下,高寒草甸草皮脱落呈现斑块化,表层土壤逐渐裸露,土壤养分不断流失、土壤肥力下降、植物生长受阻,导致部分高寒草甸出现了不同程度的斑块化退化,并产生大面积的退化斑块^[3]。斑块化退化高寒草甸的植被恢复是生态修复中十分棘手的问题。自然恢复是指在不受干扰的情况下依靠天然土壤种子库使原生植物自然更新,植物群落结构和种类成分趋于自然群落,生产力不断提高,植物群落稳定性逐渐提升的过程^[4-5]。有研究表明,在不受高原鼠兔(*Plateau pika*)等啮齿动物干扰的情况下,退化斑块会发生自然恢复演替,最终形成以矮生嵩草(*Carex alatauensis*)和高山嵩草(*Carex parvula*)为优势种的健康高寒草甸^[6]。此外,退化斑块的恢复演替是植物群落进化的自然过程,在此过程中植物群落结构和组成发生变化,进而造成草地植物群落分布格局的改变^[7-8]。因此,植物群落特征的变化能够反映高寒草甸生态系统的物种组成及多样性的变化,对植物群落特征的研究有助于遏制高寒草甸的进一步斑块化退化和促进草地资源的可持续利用^[9]。

植物和土壤是生态系统的重要组成部分,两者之间存在一定的关联性,土壤作为植物生长发育的载体,为植物提供必需的水分和养分,因此,土壤理化性质和土壤养分会影响地上植物的生长发育,进而对生态系统的净初级生产力及生态服务功能产生影响^[10]。植物群落是高寒草甸生态系统的核心组成部分,植物群落的演替会改变群落内物种组成和结构,引起植被的生长环境产生差异^[11-12]。在退化高寒草甸恢复过程中,植物群落的演替与土壤养分密切相关,植被恢复对土壤具有改良效应,表现

为土壤有机质含量、土壤种子库以及土壤微生物量和多样性会随植被丰富度和多样性的升高而增加^[13]。植物功能群是研究者根据其研究内容和目的的人为划分的类群,是对外界环境具有相同适应特征并在生态系统中有相似功能的物种的集合^[14]。功能群的引入,有助于探讨植物群落在自然恢复演替过程中的变化规律,也有助于更好地认识植物群落的生物多样性和生态系统结构^[15]。因此,研究植物群落和植物功能群在自然恢复演替过程中的变化规律以及主要限制因素,有利于因地制宜、合理规划利用高寒草甸,对于黄河源高寒草甸物种多样性保护、生态系统功能的维持及可持续发展极其重要。

滩地和坡地是高寒草甸2种典型的地貌类型,也是高寒生态系统中主要的立地条件差异表现形式,这2种立地条件通过对光照、热量和降水等资源的再分配,显著影响土壤理化性质的空间格局,进而影响土壤养分和水分状况^[16]。有研究表明,不同立地条件会调节局地土壤水资源分布、土壤养分含量以及光资源的分配,进而对植物群落物种组成、分布和数量特征产生影响^[17]。也有研究表明,立地条件的变化可以显著影响草地植物的生长发育,并且不同立地条件下的植物群落结构特征表现出明显差异^[18]。目前,关于单一立地条件下退化高寒草甸的研究已有大量报道^[19-21],而针对不同立地条件下高寒草甸退化斑块在自然恢复演替过程中植物群落的变化特征及其关键土壤限制因子的研究仍显不足。因此,本研究以黄河源区斑块化退化高寒草甸为对象,选择滩地和坡地2种典型立地条件,采用空间代替时间的方法,将高寒草甸划分为裸露斑块、短期恢复斑块、长期恢复斑块、健康高寒草甸4个恢复阶段,分析不同立地条件下斑块自然恢复演替过程中植物群落特征的变化规律,探讨其与土壤理化性质间的关系,揭示植物群落演替的关键土壤限制因子,以期斑块化退化高寒草甸可持续修复提供科学依据。

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(34°52'51" N, 101°32'8" E), 全县海拔3600~4200 m, 地势东北高, 西南低, 主要包括滩地、丘陵、低山、高山4种地貌类型; 属大陆性高原气候类型, 5月至10月为暖雨季, 11月至4月为寒冷、干燥、多风季节; 年平均气温-1.3~1.6℃, 年降水量597.1~615.5 mm^[22]。克其合滩是河南县扇形冲击河滩, 地势较低, 广泛分布着中度退化的高寒草甸, 高原鼠兔等啮齿动物活动频繁, 加之牧民过度放牧, 高寒草甸景观破碎化, 出现了大量裸露斑块^[23]。斑块化退化高寒草甸秃斑块面积占比大于20%, 植被群落总盖度在80%以下, 主要由矮生嵩草、高山嵩草、垂穗披碱草(*Elymus nutans*)、草地早熟禾(*Poa pratensis*)、细叶亚菊(*Ajania tenuifolia*)等组成^[24]。

1.2 试验设计

2024年7月植物生长旺盛期, 在青海省河南蒙古族自治县克其合滩中度退化的高寒草甸上, 分别选择3块100 m×100 m的阳坡滩地(坡度相同)和3块100 m×100 m的阳坡坡地(坡度为21°), 各样地之间的距离大于200 m。滩地样地位于北纬34°41'14", 东经101°46'21", 海拔为3581 m; 坡地样地位于北纬34°41'14", 东经101°46'53", 海拔为3608 m。在每块样地内分别进行斑块类型的划分, 依据植被状况将其分为健康高寒草甸(HAM)、长期恢复斑块(LRP)、短期恢复斑块(SRP)和裸露斑块(BP)4类。在滩地和坡地样地4类斑块上各随机设置1个50 cm×50 cm的样方, 重复3次, 共获得72个样方(图1)。所划分的不同类型斑块具有相似的初始环境条件, 且在采样时保持微地形一致。

裸露斑块是由于高原鼠兔暴发活动, 形成土壤裸露疏松并塌陷的斑块; 短期恢复斑块是在控制高原鼠兔干扰活动后3~5年形成的斑块, 有少量的杂类草植物定植, 优势物种主要是密花香薷(*Elsholtzia densa*)、西藏微孔草(*Microula tibetica*)和细叶亚菊; 长期恢复斑块是在控制高原鼠兔干扰活动下由短期恢复斑块通过自然生态恢复演替形成的斑块, 恢复年限为5~30年, 主要以莎草科植物黑褐苔草

(*Carex atrofusca*)为优势物种; 没有退化斑块的高寒草甸称作健康高寒草甸, 是以矮生嵩草和高山嵩草为优势种的草甸^[25]。

本研究区植物种类较为丰富, 按照不同植物的生活型特征和功能特点, 将研究区内的草本植物群落人为划分为4个主要功能群, 依次是禾本科、莎草科、豆科和杂类草。禾本科主要包括垂穗披碱草、草地早熟禾等禾本科植物, 莎草科主要包括矮生嵩草、高山嵩草等莎草科植物, 它们的特点是对土壤养分循环和土壤水分的保持起关键作用, 是维持高寒草甸生产生态稳定性的基础; 豆科主要包括黄花棘豆(*Oxytropis ochrocephala*)、高山豆(*Tibetia himalaica*)、苜蓿(*Medicago ruthenica*)等植物, 其特点是固氮能力较强; 杂类草主要包括密花香薷、细叶亚菊、乳白香青(*Anaphalis lactea*)等植物。

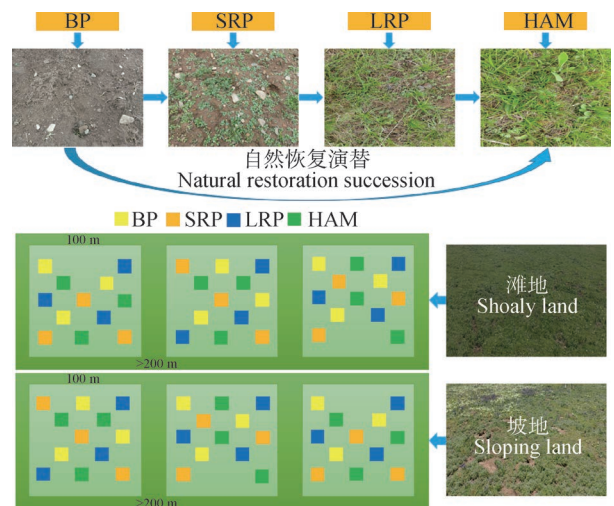


图1 不同类型斑块和样地分布特征以及试验设计

Fig. 1 Distribution characteristics of different types of patches and plots and experimental design

注: BP表示裸露斑块; SRP表示短期恢复斑块; LRP表示长期恢复斑块; HAM表示健康高寒草甸。下同

Note: BP represents bare patches; SRP represents short-term recovery plaque; LRP represents long-term recovery of plaque; HAM indicates healthy alpine meadow. The same as below

1.3 野外样方调查和土壤样品采集

在植物生长旺盛期, 进行植物物种多样性调查和植被地上生物量测定。植被调查时在每个样方中记录各种植物的名称以及每个样方中出现的物种数, 并使用卷尺测量样方内植物的自然高度(每种植物随机记录6株, 取其平均值), 采用目测法估测每个样方中各物种的分盖度以及植物功能群的盖度, 并以计数法得到样方中每种植物的密度。植

物样方调查完成后,齐地面剪去植物地上部分,按禾本科、莎草科、豆科和杂类草功能群分别装入标记好的信封袋中,然后带回实验室于 105℃烘箱中杀青 30 min 后,在 65℃下烘至恒重后利用称重法称量并记录地上生物量。最后用直径为 3.6 cm 的土钻在样方内采用 5 点混合取样法钻取 0~20 cm 的土样,剔除动植物残体和小石块,在实验室过 5 mm 筛后将土样分成 2 部分装入标记好的自封袋中,用于测定土壤理化性质。

1.4 植物群落基本特征和多样性指数

植物群落物种重要值、多样性指数、均匀度指数、优势度指数和丰富度指数的计算公式如下:

植物群落重要值(IV): $IV=(RD+RH+RC)/3$

Patrick 指数(R): $R=S$

Pielou 指数(E): $E=H/\ln S$

Simpson 指数(D): $D=1-\sum P_i^2$

Shannon-Wiener 指数(H): $H=-\sum P_i \ln P_i$

式中, RH 表示相对高度(某个物种的高度与样方内所有物种高度均值的比值,%), RD 表示相对密度(某个物种的个体数与样方内所有物种个体数的比值,%), RC 表示相对盖度(某个物种的盖度与样方内所有物种盖度的比值,%), S 代表样方中物种总数; P_i 表示物种 i 的相对重要值^[26]。

1.5 土壤理化指标测定

土壤理化性质测定主要参照鲍士旦(2000)的《土壤农化分析》^[27],具体测定方法见表 1。

表 1 斑块化退化高寒草甸土壤理化指标的测定方法

Table 1 Determination methods of soil physical and chemical indexes in patchy degraded alpine meadow

测定指标 Determination standard	水分状况 Moisture condition	筛孔大小 Mesh size	测定方法 Determination method
土壤含水量(SWC) Soil water content	鲜土 Fresh soil	2.00 mm	采用烘干称重法测定 Determination by drying weighing method
土壤 pH(pH) Soil pH	干土 Dried soil	0.25 mm	采用 pHs-25 酸度计测定 Determination by pHs-25 acidity meter
土壤温度和土壤电导率(ST/SEC) Soil temperature and soil electrical conductivity	—	—	采用土壤三参数测定仪(TDR350)测定 Three-parameter soil analyzer (TDR350) was used to determine
土壤有机碳(SOC) Soil organic carbon	干土 Dried soil	0.25 mm	采用高锰酸钾-浓硫酸外加热法测定 The potassium permanganate concentrated sulfuric acid external heating method was used for determination
土壤全氮和土壤全磷(STN/STP) Soil total nitrogen and soil total phosphorus	干土 Dried soil	0.25 mm	采用浓硫酸消煮法进行样品消解处理,用连续流动注射分析仪测定 The sample was digested by concentrated sulfuric acid digestion method, and determined by continuous flow injection analyzer
土壤硝态氮和土壤铵态氮(SNN/SAN) Soil nitrate nitrogen and soil ammonium nitrogen	鲜土 Fresh soil	2.00 mm	采用 KCl 浸提法进行样品处理,用连续流动注射分析仪测定 The samples were treated with KCl extraction method and determined by continuous flow injection analyzer

1.6 数据处理与统计分析

使用 Excel 2016 软件对 2024 年的植物数据进行整理和计算,利用 IBM SPSS Statistics 27.0.1 软件对植物群落高度、盖度、密度、地上生物量、物种多样性指数以及功能群盖度和地上生物量进行方差分析;并使用 Duncan 检验进行数据均值间的多重比较,探讨不同类型斑块植物群落特征的差异显著性,显著性水平为 0.05;滩地和坡地之间进行两个独立样本 T 检验,显著性水平为 0.05;最后运用 Origin 2024 软件进行绘图。利用 Canoco 5 对滩地和坡地不同类型斑块土壤理化因子与植物群落数量特征、多样性以及功能群盖度和地上生物量之间的关系进行冗余分析(Redundancy analysis, RDA),并采用蒙特卡罗置换检验对土壤理化性质和植物群落特征的显著性进行检验。利用 Origin 2024 软件进行皮尔逊相关性分析,分析土壤理化因子与植

物群落特征的相关性。冗余分析和皮尔逊相关性分析所用数据未进行中心化或标准化处理。

2 结果与分析

2.1 滩地和坡地不同类型斑块植物群落组成及重要值的变化

斑块化退化高寒草甸植物群落调查结果显示,滩地和坡地不同类型斑块植物群落物种组成均有所差异(图 2)。随着斑块化退化高寒草甸的自然恢复演替,滩地和坡地 BP 阶段由于土壤裸露疏松,鲜有植物生长;从 SRP 阶段开始有少量杂类草定植,其中以较高的密花香薷为主,滩地和坡地样地密花香薷重要值分别为 0.32 和 0.28,表现为坡地>滩地;在 LRP 阶段有禾本科、豆科、莎草科植物定植,其中以莎草科中的苔草为主,苔草重要值分别达到了

0.30, 0.12, 表现为滩地>坡地;在HAM阶段植物种类较多,以矮生嵩草和高山嵩草为主,矮生嵩草重要

值分别为0.21, 0.17, 表现为坡地>滩地;而高山嵩草重要值分别为0.20, 0.14, 表现为滩地>坡地。

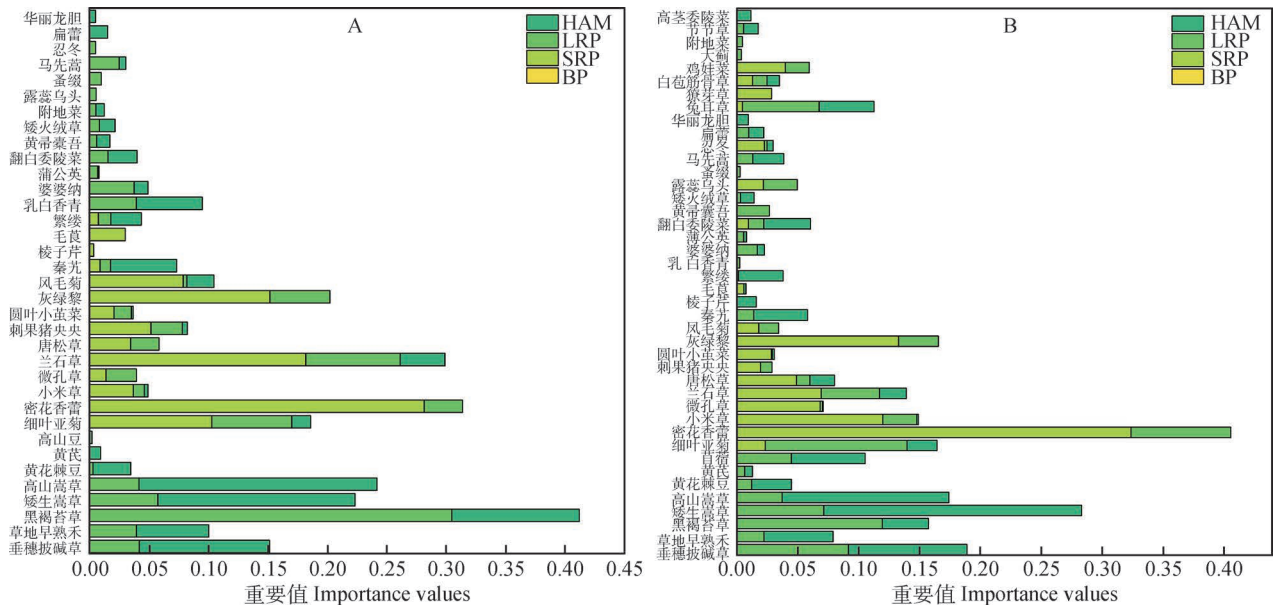


图2 滩地(A)和坡地(B)不同类型斑块植物群落组成及重要值

Fig. 2 Plant community composition and important values of different types of patches in shoaly (A) and sloping land (B)

注:垂穗披碱草(*Elymus nutans*)、草地早熟禾(*Poa pratensis*)、黑褐苔草(*Carex atrofusca*)、矮生嵩草(*Carex alatauensis*)、高山嵩草(*Carex parvula*)、黄花棘豆(*Oxytropis ochrocephala*)、黄芪(*Astragalus membranaceus*)、苜蓿(*Medicago ruthenica*)、细叶亚菊(*Ajania tenuifolia*)、密花香薷(*Elsholtzia densa*)、小米草(*Euphrasia pectinata*)、微孔草(*Microula sikkimensis*)、兰石草(*Lancea tibetica*)、唐松草(*Thalictrum aquilegifolium*)、刺果猪殃殃(*Galium echinocarpum*)、圆叶小堇菜(*Viola biflora*)、灰绿黎(*Oxybasis glauca*)、风毛菊(*Saussurea japonica*)、秦艽(*Gentiana macrophylla*)、梭子芹(*Pleurospermum uralense*)、毛茛(*Ranunculus japonicus*)、繁缕(*Stellaria media*)、乳白香青(*Anaphalis lactea*)、婆婆纳(*Veronica polita*)、蒲公英(*Taraxacum mongolicum*)、翻白委陵菜(*Potentilla discolor*)、黄帚橐吾(*Ligularia virgaurea*)、矮火绒草(*Leontopodium nanum*)、露蕊乌头(*Aconitum gymnanthum*)、蚤缀(*Arenaria serpyllifolia*)、马先蒿(*Pedicularis chinensis*)、忍冬(*Lonicera japonica*)、扁蕾(*Gentianopsis barbata*)、华丽龙胆(*Gentiana sino-ornata*)、兔耳草(*Lagotis glauca*)、獐芽菜(*Swertia bimaculata*)、白苞筋骨草(*Ajuga lupulina*)、鸡娃菜(*Cyrtomium fortunei*)、大蓟(*Cirsium japonicum*)、节节草(*Equisetum ramosissimum*)、高茎委陵菜(*Potentilla chinensis*)、高山豆(*Tibetia himalaica*)、附地菜(*Trigonotis peduncularis*)

2.2 滩地和坡地不同类型斑块植物群落数量特征的变化

随着斑块化退化高寒草甸的自然恢复演替,滩地和坡地不同类型斑块植物群落的高度、盖度、密度、地上生物量均有所差异(图3)。对不同类型斑块植物群落数量特征而言,滩地和坡地植物群落地上生物量、植物群落密度和植物群落盖度均表现为BP<SRP<LRP<HAM,且不同类型斑块之间具有显著性差异($P<0.05$);而植物群落高度滩地表现为LRP>SRP>HAM>BP,坡地表现为SRP>LRP>HAM>BP。植物群落密度和地上生物量均表现为滩地显著高于坡地($P<0.05$);植物群落

盖度和高度均为滩地高于坡地,但差异不显著。

2.3 滩地和坡地不同类型斑块植物群落物种多样性的变化

随着斑块化退化高寒草甸的自然恢复演替,滩地和坡地不同类型斑块植物群落多样性指数逐渐增加,且差异显著(图4)($P<0.05$)。滩地和坡地Shannon-Wiener指数、Pielou指数、Patrick指数、Simpson指数均表现为BP<SRP<LRP<HAM,且不同斑块之间具有显著差异($P<0.05$)。植物群落物种多样性指数表现为滩地高于坡地,但差异不显著。

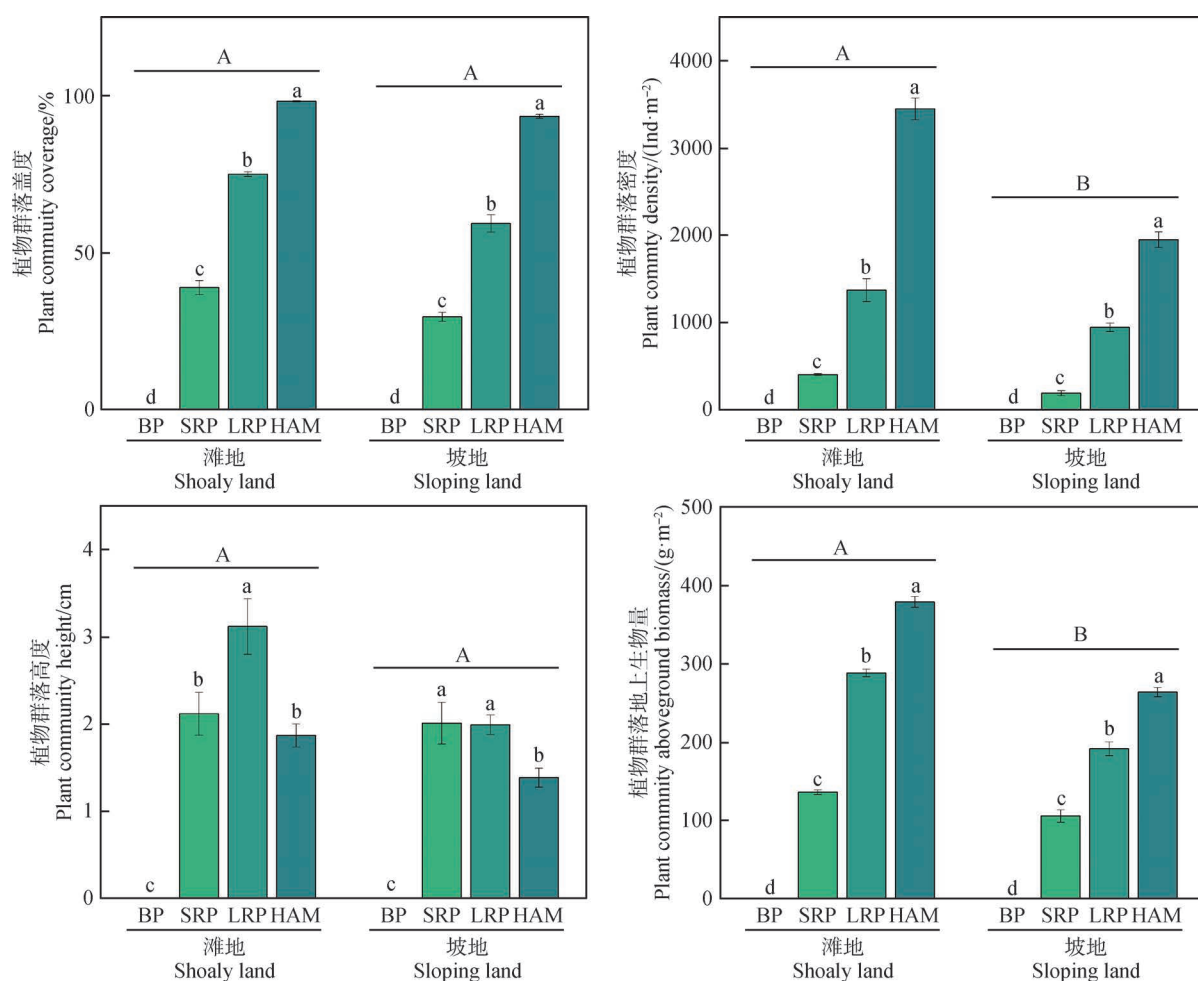
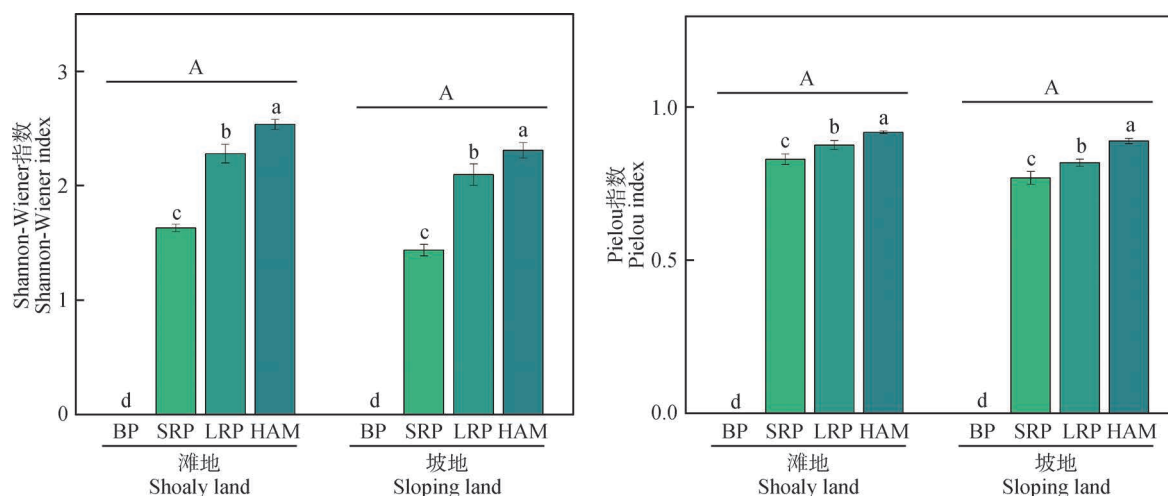


图 3 滩地和坡地不同类型斑块植物群落数量特征

Fig. 3 Quantitative characteristics of plant communities in different types of patches in shoaly land and sloping land

注:不同小写字母表示相同立地条件下不同类型斑块差异显著($P<0.05$),不同大写字母表示不同立地条件间差异显著($P<0.05$)。下同

Note: Different lowercase letters indicate significant differences in different types of patches within the same site condition ($P<0.05$), and different uppercase letters indicate significant differences between different site conditions ($P<0.05$). The same as below



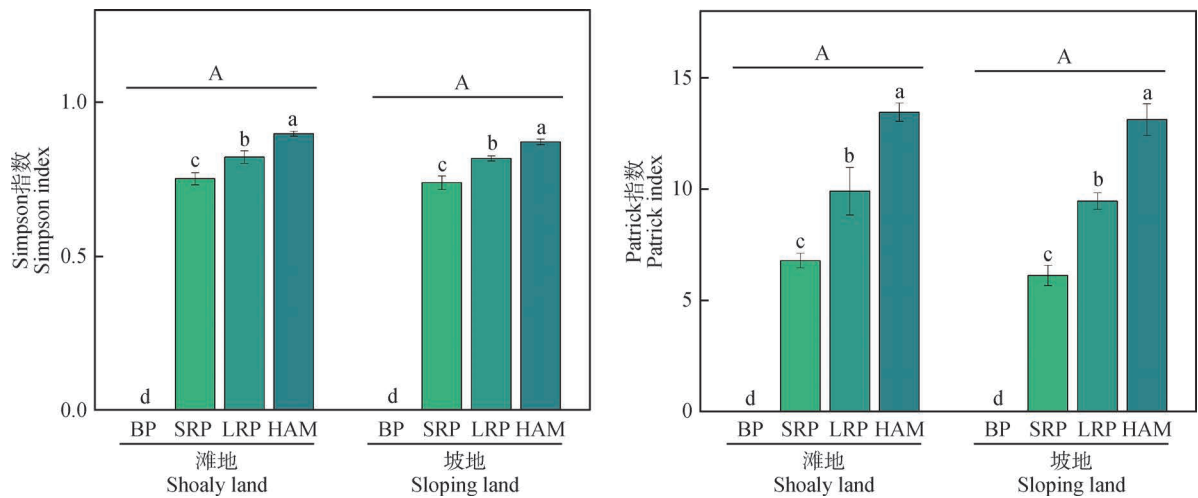


图 4 滩地和坡地不同类型斑块植物群落物种多样性

Fig. 4 Species diversity of plant communities in different types of patches of shoaly land and sloping land

2.4 滩地和坡地不同类型斑块植物功能群盖度的变化

随着斑块化退化高寒草甸的自然恢复演替,不同类型斑块植物功能群盖度也发生变化(图5)。滩地和坡地不同类型斑块禾本科盖度、莎草科盖度、豆科盖

度均表现为BP=SRP<LRP<HAM,而杂类草盖度表现为SRP>LRP>HAM>BP。禾本科盖度、莎草科盖度、杂类草盖度均表现为滩地高于坡地,但差异不显著;而豆科盖度坡地显著高于滩地($P<0.05$)。

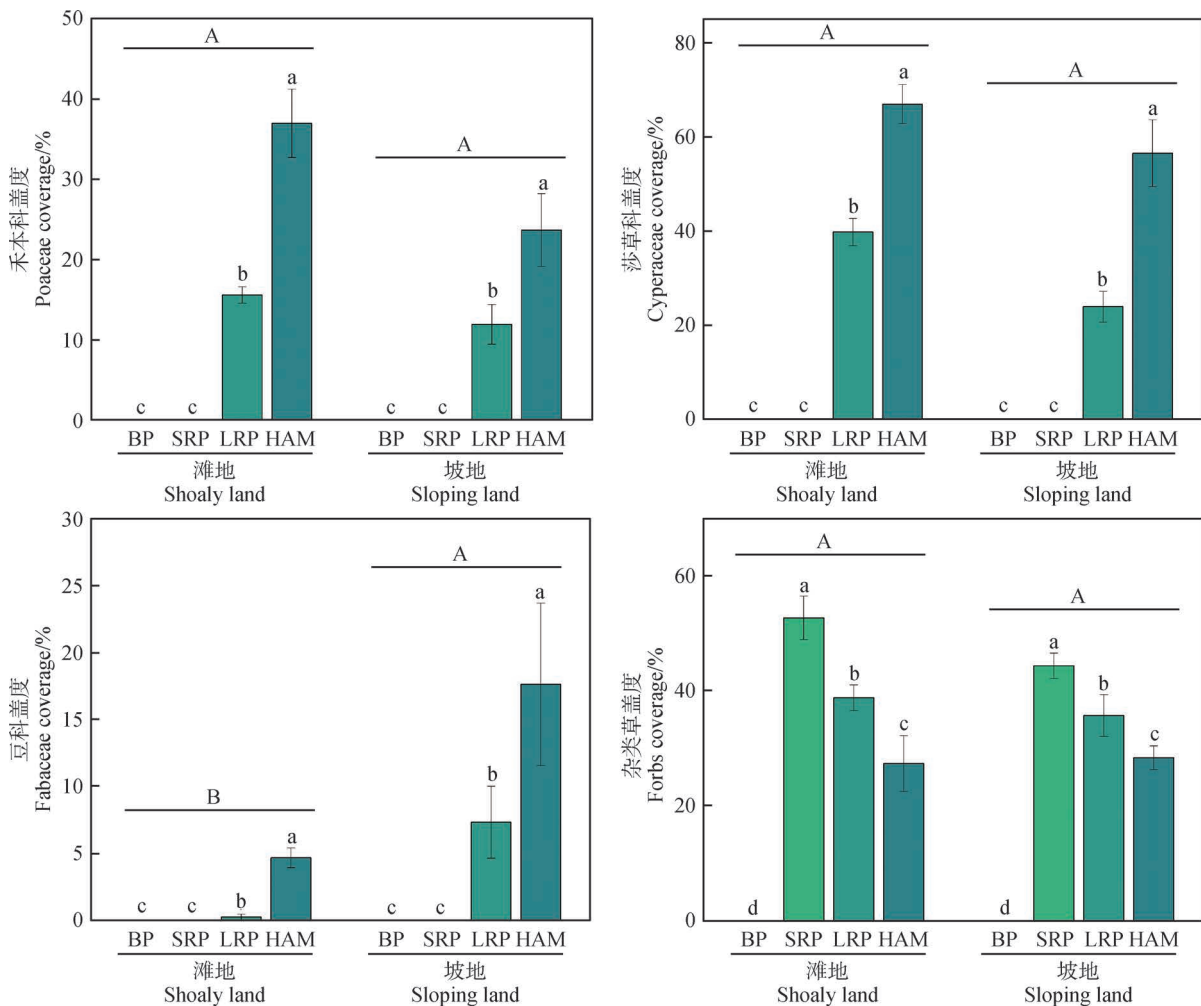


图 5 滩地和坡地不同类型斑块植物功能群盖度

Fig. 5 Coverage of plant functional groups in different types of patches of shoaly land and sloping land

2.5 滩地和坡地不同类型斑块植物功能群地上生物量的变化

随着斑块化退化高寒草甸的自然恢复演替,不同类型斑块各植物功能群地上生物量均有所差异(图6)。滩地和坡地不同类型斑块禾本科、莎草科和豆科地上生物量均表现为 $BP=SRP<LRP<HAM$,而杂类草地上生物量表现为 $SRP>LRP>HAM>BP$ 。禾本科和莎草科地上生物量均表现为滩地显著高于坡地($P<0.05$),杂类草地上生物量滩地高于坡地,差异不显著;而豆科地上生物量表现为坡地显著高于滩地($P<0.05$)。

2.6 滩地和坡地不同类型斑块植物群落和功能群与土壤理化性质的关系

相关性分析结果表明,滩地和坡地植物群落特

征均与土壤含水量(SWC)、温度(ST)、电导率(SEC)、有机质(SOM)、全氮(STN)、全磷(STP)、硝态氮(SNN)、铵态氮(SAN)呈正相关关系,而与pH呈负相关关系(图7)。对滩地和坡地不同类型斑块土壤理化性质与植物群落特征进行冗余分析,在滩地RDA中,第一和第二轴的解釋率分别为92.49%和0.06%,累计达到92.55%;在坡地RDA中,第一和第二轴的解釋率分别为83.90%和0.15%,累计达到84.05%,能够反映各指标之间的相互关系(图8)。滩地SOC,STP,STN,SAN分别解释总理化指标的77.3%,10.0%,2.6%,1.3%,是影响滩地植物群落特征的主要土壤因子;而坡地pH,SAN,SOC分别解释总理化指标的71.2%,7.9%,2.7%,是影响坡地植物群落特征的主要土壤因子(表2)。

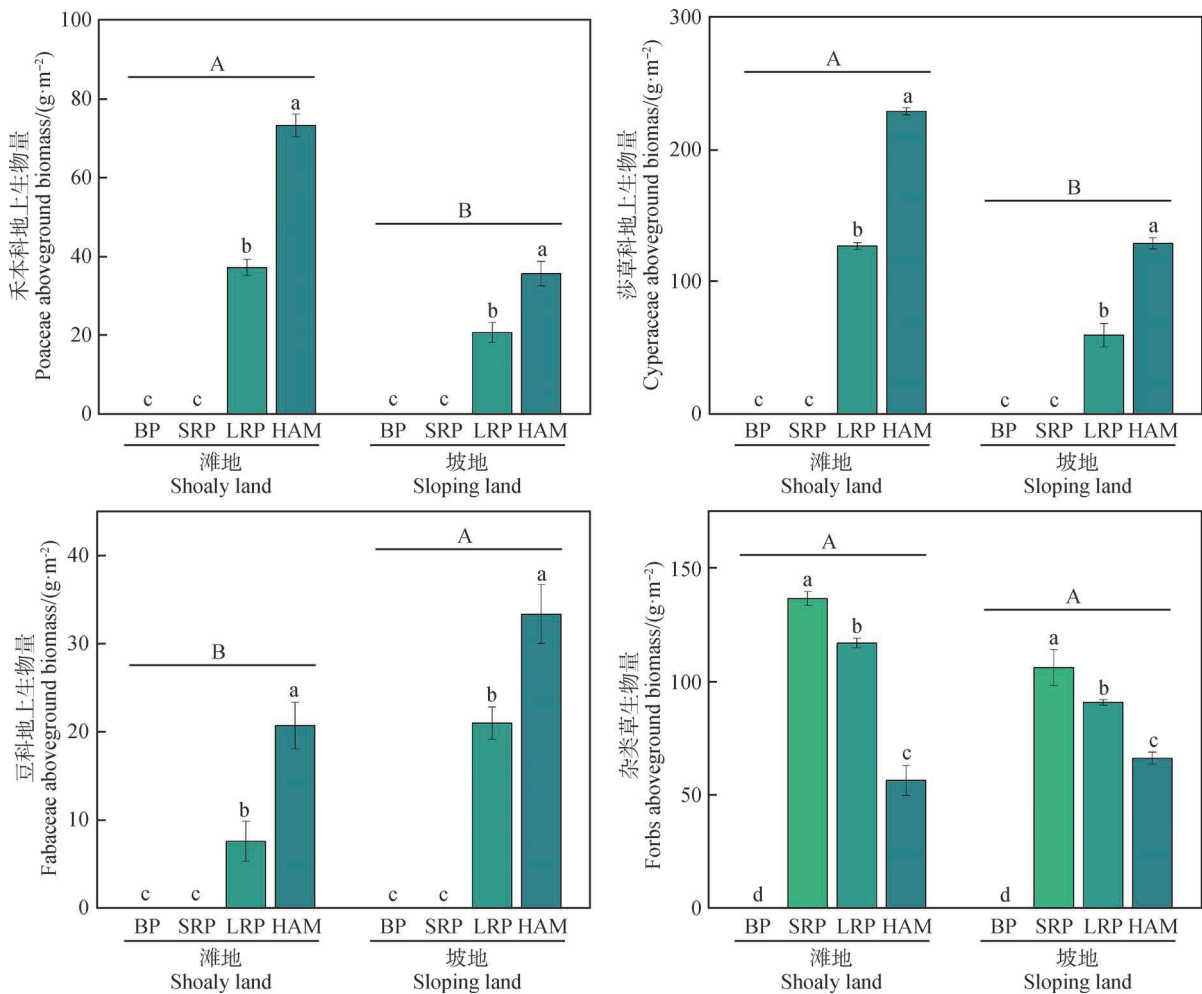


图6 滩地和坡地不同类型斑块植物功能群地上生物量

Fig. 6 Aboveground biomass of plant functional groups in different types of patches on shoaly land and sloping land

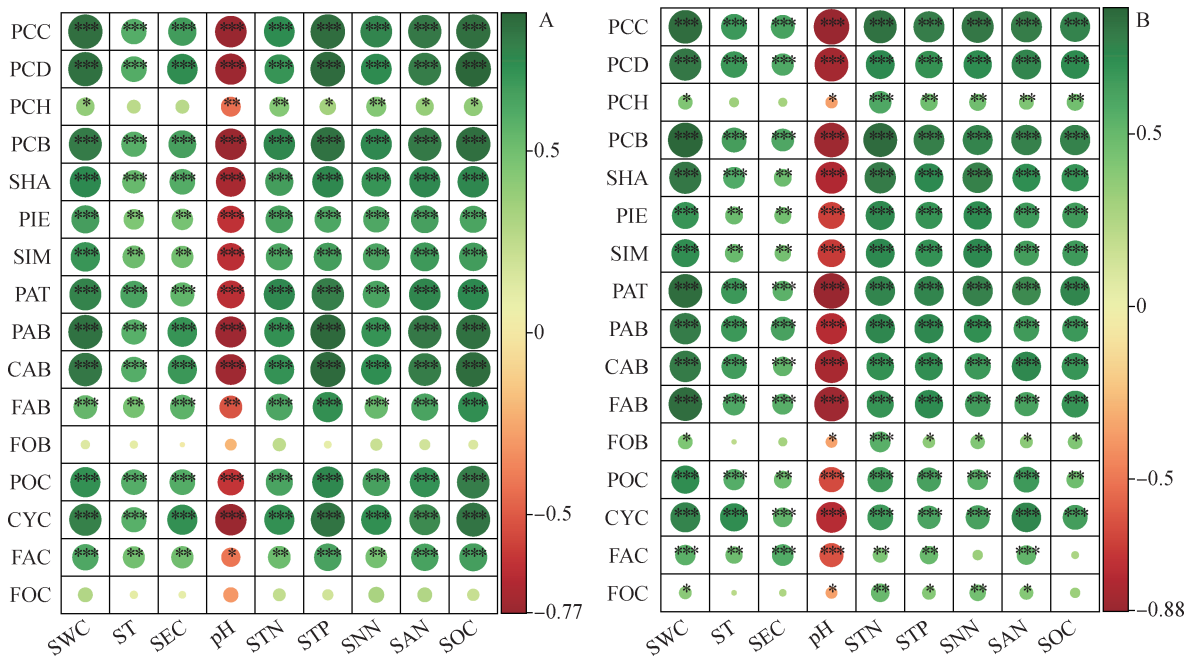


图 7 滩地(A)和坡地(B)土壤理化性质与植物群落特征的相关关系

Fig. 7 Correlation between soil physical and chemical properties and plant community characteristics of shoaly land (A) and sloping land (B)

注: PCB,植物群落地上生物量;PCH,植物群落高度;PCD,植物群落密度;PCC,植物群落盖度;SHA,Shannon-Wiener指数;PIE,Pielou指数;PAT,Patrick指数;SIM,Simpson指数;PAB,禾本科地上生物量;CAB,莎草科地上生物量;FAB,豆科地上生物量;FOB,杂类草地上生物;POC,禾本科盖度;CYC,莎草科盖度;FAC,豆科盖度;FOC,杂类草盖度。下同

Note: PCB, plant community aboveground biomass; PCH, plant community height; PCD, plant community density; PCC, plant community coverage; SHA, Shannon-Wiener index; PIE, Pielou index; PAT, Patrick index; SIM, Simpson index; PAB, Poaceae aboveground biomass; CAB, Cyperaceae aboveground biomass; FAB, Fabaceae aboveground biomass; FOB, Forbs aboveground biomass; POC, Poaceae coverage; CYC, Cyperaceae coverage; FAC, Fabaceae coverage; FOC, Forbs coverage. The same as below

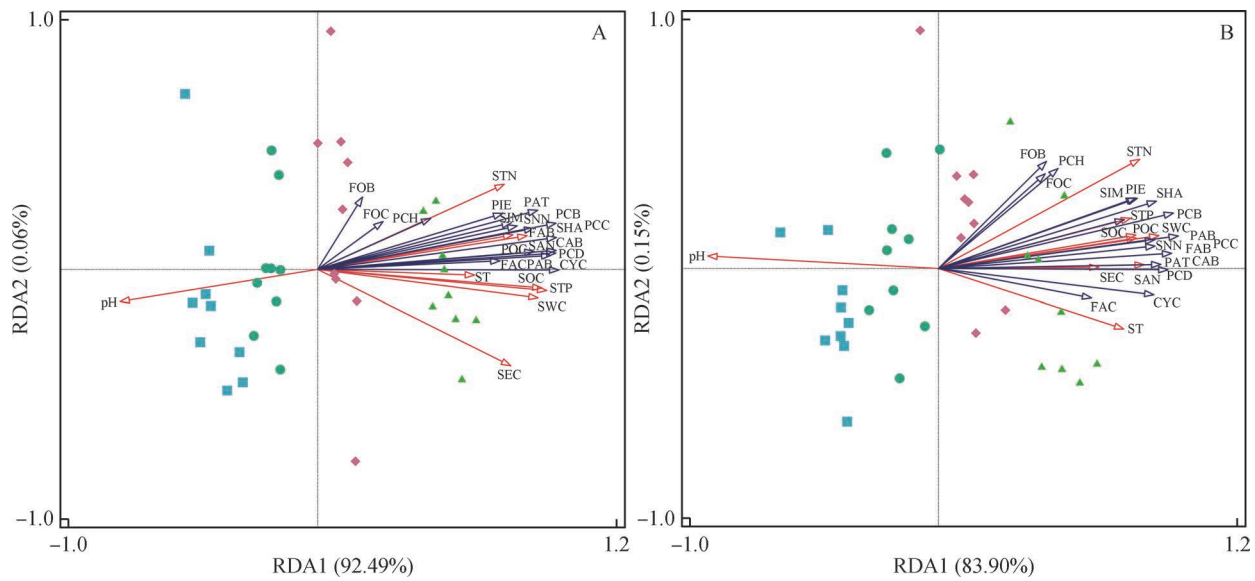


图 8 滩地(A)和坡地(B)土壤理化性质与植物群落特征的冗余分析

Fig. 8 Redundancy analysis of soil physical and chemical properties and plant community characteristics of shoaly land (A) and sloping land (B)

注:方形代表BP,圆形代表SRP,菱形代表LRP,三角形代表HAM。红色箭头表示土壤因子,蓝色箭头表示植物群落特征

Note: The square represents BP, the circle represents SRP, the diamond represents LRP, and the triangle represents HAM. Red arrows represent soil physical and chemical factors, and blue arrows represent plant community characteristics

表 2 滩地和坡地土壤理化性质对植物群落特征的显著性检验结果

Table 2 The significance test results of soil physical and chemical properties on plant community characteristics of shoaly land and sloping land

名称 Name	滩地 Shoaly land			坡地 Sloping land		
	解释率 Explains/%	F 检验 Pseudo-F	P 值 P value	解释率 Explains/%	F 检验 Pseudo-F	P 值 P value
SOC	77.3	116.0	0.002	2.7	4.8	0.038
STP	10.0	26.0	0.002	0.2	0.4	0.548
STN	2.6	8.4	0.006	0.3	0.6	0.452
SAN	1.3	4.7	0.042	7.9	12.5	0.002
SEC	0.7	2.6	0.114	0.3	0.5	0.520
SNN	0.2	0.9	0.388	0.5	0.9	0.316
ST	0.3	1.1	0.318	0.2	0.4	0.532
pH	<0.1	0.2	0.736	71.2	83.9	0.002
SWC	<0.1	<0.1	0.854	0.7	1.3	0.278

3 讨论

3.1 滩地和坡地不同类型斑块植物群落和功能群的变化特征

重要值可反映不同植物在群落中的地位和作用,也可反映物种间相互关系,其大小是确定群落优势种和建群种的重要依据^[28]。本研究发现,滩地和坡地不同类型斑块植物群落物种组成均有所差异,BP 阶段由于土壤裸露疏松,鲜有植物生长;在 SRP 阶段有少量杂类草生长,其中以密花香薷为主,在滩地和坡地样地重要值分别为 0.28 和 0.32;在 LRP 阶段禾本科、豆科、莎草科植物出现,其中以莎草科中的苔草属植物为主,在滩地和坡地样地重要值分别为 0.30 和 0.12;在 HAM 阶段,主要以莎草科中的矮生嵩草和高山嵩草为主,在滩地和坡地样地重要值分别为 0.17,0.20 和 0.21,0.14。出现这种结果的主要原因可能是植被恢复重建过程中滩地和坡地不同类型斑块适应性强的植物占据相对丰富的生长资源,逐渐在生态位中占据优势地位。朱牛等^[29]研究表明,莎草科植物在高寒草甸中占据优势地位,牦牛和藏羊等家畜极喜食,且在高寒草甸中竞争能力强,具有较强的生态适应性。此外,苏晓雪等^[24]研究发现,莎草科植物耐牧性较强,植株自身相对低矮,且具有较强的克隆分蘖能力,莎草科植物重要值的进一步提高会形成更为紧密的草毡层,在一定程度上增加了自身对环境干扰的抵抗能力。

植物群落数量特征不仅是植物群落适应外界环境和抵御外部干扰的表现,也是植物群落与环境

因子相互协调作用的结果。在本研究中,随着斑块化退化高寒草甸的恢复演替,滩地和坡地植物群落盖度、密度、地上生物量显著增加,而植物群落高度滩地表现为 LRP>SRP>HAM>BP,坡地表现为 SRP>LRP>HAM>BP。出现这种结果的主要原因可能是在退化斑块的恢复演替过程中土壤水分和土壤肥力得到一定程度的补充,从而促进了植物的生长和发育;植物群落高度在 SRP 和 LRP 阶段高于 HAM 阶段,可能是因为前两个阶段有较多的杂类草定植,杂类草占据了相对充足的空间与资源,从而有利于群落的生长发育。植物群落多样性包括 Shannon-Wiener 指数、Pielou 指数、Patrick 指数、Simpson 指数,其不仅可以反映植物群落的结构组成,还可以体现植物群落的结构类型、组织水平、发展阶段、稳定程度和生境差异,多样性的增加会提高植物群落或生态系统的稳定性,增强生态系统功能^[30-32]。本研究结果表明,滩地和坡地不同类型斑块在恢复演替过程中 Shannon-Wiener 指数、Pielou 指数、Patrick 指数、Simpson 指数均显著增加,这表明裸露斑块的恢复演替促进了植物群落物种多样性的增加,这与前人的研究结果类似^[25]。可能的原因是不同类型斑块地表凋落物增加,经微生物分解后进入土壤,土壤有机质和养分显著增加,为植物的生长和发育提供良好的物质基础,从而促使植物群落丰富度指数、多样性指数及物种数显著增加^[26]。

植物功能群通常被界定为在生态功能上具有直接联系的一类物种集合,同一功能群内的物种在生态系统中的作用表现出较强的一致性,而其组成则是影响草地生产力与稳定性的关键因素^[33]。在斑块化退化高寒草甸的自然恢复与演替过程中,从植物功能群角度开展研究更具解释力,这主要是因为不同功能群的植物在外界干扰下的响应程度不同,同时它们在生理特征、形态结构和生活史策略等方面也各具独特性。研究结果表明,在裸露斑块自然恢复进程中杂类草盖度逐渐减少,禾本科、莎草科、豆科盖度逐渐增加,并且莎草科植物在群落中的优势地位越来越显著,这与已有的研究结果一致^[34]。这可能是因为植物在长期的自然选择下形成适应当地生态环境且具有特定结构的群落类型,适应能力和耐受性较高的物种将逐渐成为植物群落优势种^[5]。此外,地上生物量是生态系统最基本的数量特征,也是衡量草地生态系统功能和稳定性

的重要指标^[35-36],本研究发现,随着裸露斑块自然恢复演替的进行,滩地和坡地不同类型斑块禾本科地上生物量、莎草科地上生物量、豆科地上生物量均显著增加,而杂类草地上生物量显著减少,这与已有的研究结果趋同^[37]。这主要是因为,在自然恢复过程中,退化斑块的生境水热条件发生改变,微生态环境状况变好,禾本科、莎草科、豆科植物在资源竞争中逐渐占据优势,能够获取更多的水分和养分,促进其生长与发育,地上生物量随之增加,而杂类草的生态位则被逐渐取代,其可获取的资源减少,生长发育受到抑制,导致地上生物量下降。

另外,有研究表明不同立地条件下的植物群落因组成群落各物种的生物、生态学特性不同,使植物群落的结构组成表现出一定的差异^[38]。研究结果表明,植物群落高度、盖度、密度、地上生物量、Shannon-Wiener 指数、Pielou 指数、Patrick 指数、Simpson 指数、禾本科盖度、莎草科盖度、杂类草盖度、禾本科地上生物量、莎草科地上生物量、杂类草地上生物量表现为滩地高于坡地,而豆科盖度和地上生物量表现为坡地高于滩地。造成这种差异的主要原因可能与滩地和坡地2种立地条件土壤表层水分的恢复和保持能力的大小有重要的关系,滩地可能积累了更多的有机物质,表层土壤水分容易恢复,保水能力较好,而坡地由于重力作用可能有更多的侵蚀,导致表层土壤水分不易恢复,保水能力较弱。沙晓玮等^[39]研究发现,坡地植被覆盖少,地表径流及水分重力的淋洗作用更强,更容易产生冲刷侵蚀,导致土壤可蚀性增加,与此同时,土壤磷、氮元素和有机碳则随水流向下流失,导致土壤养分降低。李威等^[40]研究表明,滩地和坡地间水分与养分的纵向流动直接影响土壤水肥供给数量和持久性,从而使植物生长及成苗拓展与繁殖等过程获取生境资源难易程度不同,最终导致植物群落特征存在差异。

3.2 滩地和坡地不同类型斑块土壤理化性质对植物群落特征的影响

土壤作为草地生态系统的重要组成部分,是物质和能量交换的关键场所,不仅直接影响植物生理特征,而且决定生态系统的结构、功能和生产力水平。草地植物群落结构及物种多样性也与土壤养分供给水平密切相关,在土壤-植物系统中,土壤制约着植物群落,影响着植物群落的类型、分布和动

态,与此同时,植物群落也会反作用于土壤,改善其生境条件,使植物群落得以发展,二者相互制约、相互依存,共同发展^[41]。在本研究中,相关性分析和冗余分析结果均表明,随着斑块化退化高寒草甸的自然恢复演替,植物群落数量特征、物种多样性、功能群地上生物量 and 功能群盖度均与土壤理化因子存在相关关系。一方面,土壤是植物生长必不可少的重要环境因子,土壤养分更是植物养分的重要来源,植物在养分丰富的局部环境中能选择性地改变其根系的生长,从而增加其对养分的吸收,土壤中养分含量的高低直接影响着植物群落特征^[42-43];另一方面,植物根系的不断积累有助于促进土壤团聚和孔隙结构改善,从而增强土壤稳定性与持水能力,最终为植物的生长和发育创造更有利的土壤条件^[44]。此外,随着斑块化退化高寒草甸的恢复,土壤微生物和土壤动物不断增加,促进了土壤中有机质的分解、转化与供应,土壤的养分利用率提高,从而促进了植物群落的正向演替^[13]。

另外,本研究滩地和坡地土壤理化性质对植物群落特征的显著性检验结果表明,土壤有机碳、全磷、全氮、铵态氮是影响滩地植物群落特征的关键因子,土壤pH、铵态氮、有机碳是影响坡地植物群落特征的关键因子。由此可见,影响滩地和坡地植物群落特征的主要因子存在差异。出现这种情况的原因一方面可能是坡地太阳辐射强度较高、风力较强,加之地表径流、雨水冲刷以及淋溶的作用,导致坡地水热及营养条件不同于滩地^[45];另一方面可能是因为滩地和坡地放牧和高原鼠兔等的干扰程度不同,土壤结构状况与土壤的松紧程度存在差异,从而导致植物根系分布状况和生长发育存在差异。因此,滩地和坡地植物群落特征的关键限制因子不同。此外,本研究发现土壤有机碳和土壤铵态氮是滩地和坡地植物群落特征共同的关键限制因子。土壤有机碳驱动养分循环,保持土壤结构的稳定性,促进水和空气的渗透,有助于土壤大团聚体的形成,从而提高了土壤的保水能力^[46]。土壤氮的可利用性会直接影响植物的光合作用,进而影响植物地上部分和根系的生长状况,植物从土壤中吸收的主要无机态氮素为铵态氮,铵态氮对植物氮素供应、根系发育、生长形态和生理代谢等方面都有着显著影响^[47]。

综上所述,随着斑块化退化高寒草甸的恢复演替,滩地和坡地植物群落数量特征、物种多样性、功

能群地上生物量及功能群盖度均发生改变,裸露斑块和短期恢复斑块与长期恢复斑块和健康高寒草甸之间的植物群落存在显著差异,说明斑块化退化高寒草甸植物群落还未达到完全的自然生态恢复状态(图9)。严双等^[48]报道,在退化草地生态恢复过程中,采用乡土物种进行修复可使物种组成、生物多样性和群落结构更接近本地地带性植被所表征的生态系统,故采取近自然恢复方法更有利于促进高寒草甸的可持续发展。许祯安等^[49]和李振威等^[50]研究表明,植物生长情况与土壤理化性状密切相关,影响着植物群落的结构和生态系统的多样性和稳定性,土壤理化性质的改善是退化高寒草甸恢

复的关键指标。另外,随着退化高寒草甸植物群落的恢复,植物在恢复初期阶段由于根系还未大量形成并深深扎根于土壤,并且植株生长发育还未达到健康草甸状态,对外界干扰的抵抗力较弱,故容易出现二次退化。人工恢复措施能改善退化草地生态状况,在极大程度上促进退化草地的正向演替^[51]。因此,为了加快斑块化退化高寒草甸植物群落的恢复,可根据滩地和坡地土壤理化因子状况采取不同的恢复措施,比如围栏封育、配施有机肥、免耕补播、覆盖无纺布、划破草皮等措施,与此同时,要对高原鼠兔防控和牦牛、藏羊过度放牧等采取合理的管控措施,从而避免退化高寒草甸二次退化的发生。

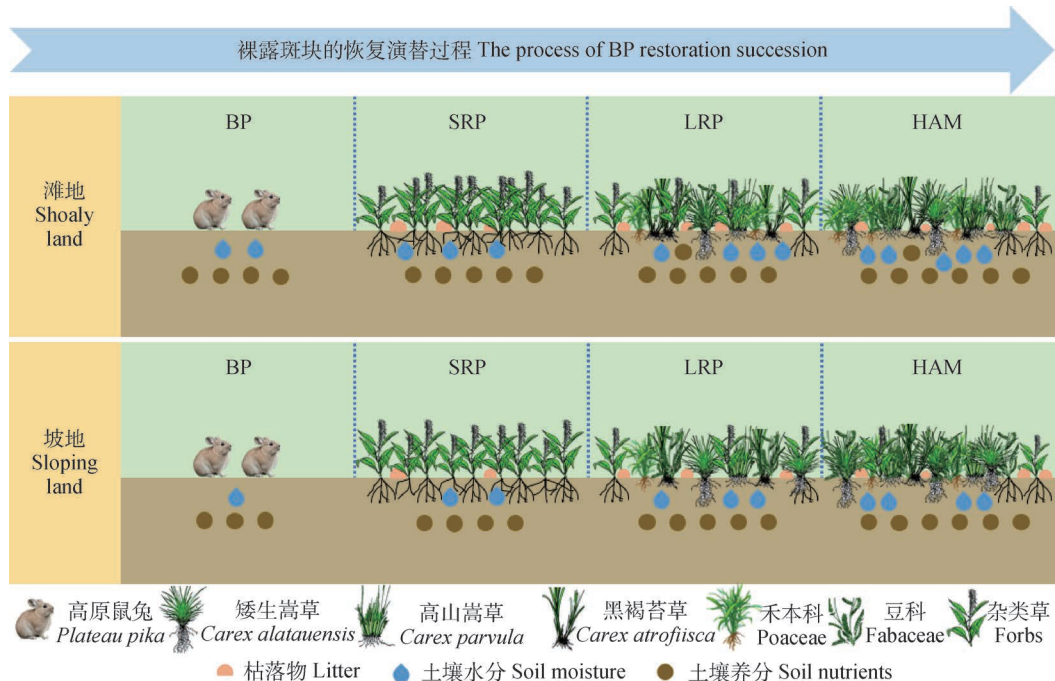


图9 滩地和坡地不同类型斑块植物群落恢复演替示意图

Fig. 9 The schematic diagram of restoration succession of plant communities in different types of patches on shoaly land and sloping land

4 结论

随着恢复演替,滩地和坡地植物群落结构逐渐优化,矮生嵩草和高山嵩草开始成为优势种。裸露斑块和短期恢复斑块与长期恢复斑块及健康高寒草甸差异显著,说明前两者恢复时间较短尚未达到自然恢复水平。滩地植物群落指标高于坡地,更有利于植被恢复。植物群落特征与土壤含水量、温度等正相关,与pH值负相关。滩地受有机碳、全氮和全磷制约,坡地则受pH值、有机碳和铵态氮制约。总之,土壤水分和养分是关键限制因子。在退化高寒草甸的短期恢复时,首先要防控草原鼠害发生并

维持较高的草地水分状况,其次滩地宜采用免耕补播并增施有机肥、氮肥和磷肥,坡地则需结合免耕补播、有机肥氮肥施用和覆盖无纺布措施,以改善土壤条件并促进群落恢复。

参考文献

- [1] 李国荣,李希来,李进芳,等. 黄河源高寒草甸高原鼠兔土丘的土壤风力侵蚀规律[J]. 水土保持学报,2019,33(2):110-114,168
LI G R, LI X L, LI J F, et al. Soil wind erosion law in *Ochotona curzoniae* mound of alpine meadow in the Yellow River [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019, 33 (2):110-114
- [2] 李小娟,张莉,张紫萍,等. 高寒草甸生物结皮发育特征及其对

- 土壤水文过程的影响[J]. 水土保持研究, 2019, 26(6): 139-144
- LI X J, ZHANG L, ZHANG Z P, et al. Characteristic of biological soil crust and its effects on hydrological processes in alpine meadow[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2019, 26(6): 139-144
- [3] 翟辉, 李国荣, 李进芳, 等. 黄河源草地退化区2种鼠丘土壤风蚀规律[J]. 干旱区研究, 2022, 39(4): 1212-1221
- ZHAI H, LI G R, LI J F, et al. Soil wind erosion rule of two types of rodent mounds in a degraded grassland area of the Yellow River source zone[J]. Arid Zone Research, 2022, 39(4): 1212-1221
- [4] 刘莉莉, 王月霖, 李海燕, 等. 东北退化草原恢复演替系列羊草和寸草无性系种群构件营养繁殖特征比较[J]. 草业学报, 2024, 33(7): 15-24
- LIU L L, WANG Y L, LI H Y, et al. Comparison of vegetative propagation characteristics of modules between *Leymus chinensis* and *Carex duriuscula* clonal populations in a restoration succession series in northeast degraded grassland[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2024, 33(7): 15-24
- [5] 李浩, 何静, 王理德, 等. 祁连山东段高寒草地修复过程中植被物种多样性及土壤理化性质[J]. 水土保持研究, 2025, 32(1): 110-120
- LI H, HE J, WANG L D, et al. Vegetation species diversity and soil physicochemical properties during restoration of alpine grassland in eastern Qilian Mountains[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2025, 32(1): 110-120
- [6] CHAI Y, LI X L, LI C Y, et al. Soil moisture regulates soil-microbe-enzyme stoichiometries during recovery succession in patchily degraded alpine meadows on the Qinghai-Tibet Plateau[J]. Ecological Engineering, 2024, 204: 107287
- [7] DUAN C W, LI X L, LI C Y, et al. Positive effects of fungal β diversity on soil multifunctionality mediated by pH in the natural restoration succession stages of alpine meadow patches[J]. Ecological Indicators, 2023, 148: 110122
- [8] LI C Y, LI X L, YANG Y W, et al. Comparative responses of carbon flux components in recovering bare patches of degraded alpine meadow in the Source Zone of the Yellow River[J]. Science of the Total Environment, 2024, 908: 168343
- [9] 林伟山, 德科加, 向雪梅, 等. 青藏高原退化高寒草甸植被群落与土壤养分变化特征[J]. 草原与草坪, 2025, 45(2): 14-23
- LIN W S, DE K J, XIANG X M, et al. Characterization of vegetation communities and soil nutrient changes in degraded alpine meadows on the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. Grassland and Turf, 2025, 45(2): 14-23
- [10] 王海燕, 王红梅, 张振杰, 等. 宁夏东部典型荒漠草原植物群落与土壤耦合特征[J]. 中国草地学报, 2024, 46(11): 35-47
- WANG H Y, WANG H M, ZHANG Z J, et al. Characteristics of plant-soil coupling in a typical desert steppe of eastern Ningxia[J]. Chinese Journal of Grassland, 2024, 46(11): 35-47
- [11] GUO Z G, LI X F, LIU X Y, et al. Response of alpine meadow communities to burrow density changes of plateau pika (*Ochotona curzoniae*) in the Qinghai-Tibet Plateau[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(1): 44-49
- [12] 刘剑剑, 刘涵宇, 李向阳, 等. 黄土丘陵区次生林演替过程土壤酶活性响应特征及影响机制[J]. 环境科学, 2025, 46(5): 3139-3147
- LIU J J, LIU H Y, LI X Y, et al. Response characteristics and influencing mechanism of soil enzyme activity during secondary forest succession in Loess Hilly Region[J]. Environmental Science, 2025, 46(5): 3139-3147
- [13] 赵啸龙, 谢玉鸿, 马旭君, 等. 科尔沁沙质草地不同恢复年限草本层群落结构及其与土壤理化性质的关系[J]. 中国沙漠, 2022, 42(2): 134-141
- ZHAO X L, XIE Y H, MA X J, et al. Vegetation structure and its relationship with soil physicochemical properties in restoring sandy grassland in Horqin Sandy Land[J]. Journal of Desert Research, 2022, 42(2): 134-141
- [14] 江康威, 张青青, 王亚菲, 等. 放牧干扰下天山北坡中段植物功能群特征及其与土壤环境因子的关系[J]. 植物生态学报, 2024, 48(6): 701-718
- JIANG K W, ZHANG Q Q, WANG Y F, et al. Characteristics of plant functional groups and the relationships with soil environmental factors in middle part of northern slope of Tianshan Mountains under different grazing intensities[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2024, 48(6): 701-718
- [15] 刘旻霞, 刘成, 杨春亮. 甘南高寒草甸退化对植物功能群物种多样性与物种多度分布的影响[J]. 西北植物学报, 2024, 44(1): 142-153
- LIU M X, LIU C, YANG C L. Influences of alpine meadow degradation on species diversity and abundance distribution of plant functional groups in Gannan[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2024, 44(1): 142-153
- [16] 刘羽霞, 许嘉巍, 靳英华, 等. 基于地形因子的长白山高山苔原土壤理化性质空间差异[J]. 生态学杂志, 2017, 36(3): 640-648
- LIU Y X, XU J W, JIN Y H, et al. Spatial variability of soil physicochemical properties in the alpine tundra of Changbai Mountain in relation to topographic factors[J]. Chinese Journal of Ecology, 2017, 36(3): 640-648
- [17] 赖仕蓉, 梁宏, 余国杰, 等. 内蒙古草甸草原羊草和尖嘴藁草空间分布格局对坡位的响应[J]. 草地学报, 2024, 32(12): 3897-3904
- LAI S R, LIANG H, YU G J, et al. Spatial distribution patterns of *Leymus chinensis* and *Carex leiorhyncha* in Inner Mongolian meadow grassland in response to slope positions[J]. Acta Agrestia Sinica, 2024, 32(12): 3897-3904
- [18] 宁璐, 要振宇, 高天明, 等. 不同坡位对荒漠草原植物群落特征的影响[J]. 东北林业大学学报, 2025, 53(1): 15-22
- NING L, YAO Z Y, GAO T M, et al. Effects of different slope positions on plant community characteristics in desert grassland[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2025, 53(1): 15-22
- [19] 甄子云, 赵洋, 姜群鸥, 等. 野外模拟降雨条件下高寒草甸区植被退化和人工植被恢复坡面的产流产沙过程[J]. 水土保持学报, 2024, 38(4): 153-161
- ZHEN Z Y, ZHAO Y, JIANG Q O, et al. Field simulation of

- runoff and sand production on degraded and revegetated slopes in alpine meadows under rainfall conditions[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2024, 38(4):153-161
- [20] 汪士为, 吴伟. 黄河流域不同修复措施对退化高寒草甸土壤团聚体组成及化学计量特征的影响[J]. *中国草地学报*, 2025, 47(7):96-106
- WANG S W, WU W. Effects of different restoration measures on soil aggregate composition and stoichiometric characteristics of degraded alpine meadow in the Yellow River Basin[J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2025, 47(7):96-106
- [21] 王雯莹, 肖元明, 王小赞, 等. 多功能群物种配置模式下退化高寒草甸植物多样性与生态系统多功能性的关联[J]. *植物生态学报*, 2025, 49(1):103-117
- WANG W Y, XIAO Y M, WANG X Y, et al. Relationship between plant diversity and ecosystem multifunctionality in degraded alpine meadows under multifunctional group species combination models[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2025, 49(1):103-117
- [22] SHE Y D, LI X L, LI C Y, et al. Relationship between species diversity and community stability in degraded alpine meadows during bare patch succession[J]. *Plants*, 2023, 12(20):3582
- [23] 高佩, 李希来, 柴瑜, 等. 羊板粪与枯草芽孢杆菌配施对退化高寒草甸土壤养分及酶活性的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2024(11):29-36
- GAO P, LI X L, CHAI Y, et al. Effects of sheep plate manure and bacterial fertilizer on the soil nutrient and enzyme activity of degenerate alpine meadow[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2024(11):29-36
- [24] 苏晓雪, 李希来, 孙华方, 等. 高原鼠兔和刘割扰动对高寒草甸植物群落和土壤特征的影响[J]. *生态学报*, 2024, 44(22):10189-10199
- SU X X, LI X L, SUN H F, et al. Effects of plateau pika and mowing disturbances on plant community and soil physical and chemical properties in alpine meadow[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44(22):10189-10199
- [25] 段成伟. 黄河源区高寒草甸斑块化退化机理与其恢复研究[D]. 西宁:青海大学, 2023:9-52
- DUAN C W. Study on mechanisms of alpine meadow patchy degradation and its restoration in the Source Zone of the Yellow River[D]. Xining:Qinghai University, 2023:9-52
- [26] 张铭洋, 李小娟, 杨永胜, 等. 禁牧封育对黄河源高寒草甸植被群落结构及土壤水分特征的影响[J]. *西北植物学报*, 2023, 43(7):1185-1197
- ZHANG M Y, LI X J, YANG Y S, et al. Effects of forbidden grazing and enclosure on vegetation community structure and soil moisture characteristics in alpine meadow of the Yellow River source[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2023, 43(7):1185-1197
- [27] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 第3版. 北京:中国农业出版社, 2000:20-56
- BAO S D. Soil agrochemical analysis[M]. The third edition. Beijing:China Agricultural Publishing House, 2000:20-56
- [28] 王益涛, 刘建康, 武志嘉, 等. 围封对荒漠草原典型植物群落特征及多样性的影响[J]. *水土保持研究*, 2025, 32(1):121-130, 140
- WANG Y T, LIU J K, WU Z J, et al. Impact of enclosure on characteristics diversities of typical vegetation communities in desert grasslands[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2025, 32(1):121-130, 140
- [29] 朱牛, 孙建, 石凝, 等. 短期围栏封育对高寒草甸植物群落及土壤理化性质的影响[J]. *草地学报*, 2023, 31(3):834-843
- ZHU N, SUN J, SHI N, et al. Effects of short-term fence enclosing on plant community and the physical and chemical properties of alpine meadow soils[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2023, 31(3):834-843
- [30] 曾国燕, 叶茂, 李苗苗, 等. 阿尔泰山富蕴地区草地群落生物量、物种多样性及其与环境因子的相关性[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2025, 53(4):120-131
- ZENG G Y, YE M, LI M M, et al. Biomass and species diversity of grassland communities and their correlation with environmental factors in Fuyun area, Altai Mountains[J]. *Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition)*, 2025, 53(4):120-131
- [31] 彭东海, 侯晓龙, 何宗明, 等. 金尾矿废弃地不同植被恢复阶段物种多样性与土壤特性的演变[J]. *水土保持学报*, 2016, 30(1):159-164
- PENG D H, HOU X L, HE Z M, et al. Evolution of species diversity and soil characteristics at different stages of vegetation restoration in gold tailings[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2016, 30(1):159-164
- [32] 王晓莉, 刘育红, 马辉, 等. 泽曲湿地高寒沼泽草甸植物群落物种多样性与谱系多样性研究[J]. *草学*, 2024(5):44-53
- WANG X L, LIU Y H, MA H, et al. Species diversity and phylogenetic diversity of plant communities in alpine swamp meadow of Zequ wetland[J]. *Journal of Grassland and Forage Science*, 2024(5):44-53
- [33] 胡楠, 范玉龙, 丁圣彦, 等. 陆地生态系统植物功能群研究进展[J]. *生态学报*, 2008, 28(7):3302-3311
- HU N, FAN Y L, DING S Y, et al. Progress in researches on plant functional groups of terrestrial ecosystems[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(7):3302-3311
- [34] 宋梓涵, 李希来, 李杰霞, 等. 高寒草甸不同扰动斑块植物功能群和根土复合体特征变化研究[J]. *生态科学*, 2022, 41(1):31-38
- SONG Z H, LI X L, LI J X, et al. Characteristics of plant functional groups and root-soil complexes of different disturbed patches in alpine meadow[J]. *Ecological Science*, 2022, 41(1):31-38
- [35] 安琪琪, 乔文英, 李维军, 等. 灌丛化对黄土高原草地植物群落结构和地上生物量的影响[J]. *西北植物学报*, 2021, 41(4):664-671
- AN Q Q, QIAO W Y, LI W J, et al. Effect of shrub encroachment on grassland community structure and above-ground biomass on the Loess Plateau[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2021, 41(4):664-671

- [36] 于秀立, 降瑞娇, 徐满厚. 黄土高原东部山地林下不同植物功能群地上生物量对模拟增温的响应[J]. 干旱区资源与环境, 2024, 38(10): 133-143
YU X L, JIANG R J, XU M H. Responses of aboveground biomass for different plant functional groups to experimental warming in a mountain forest in the eastern Loess Plateau, China[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2024, 38(10): 133-143
- [37] 杨鼎, 齐昊昊, 王倩, 等. 青藏高原高原鼯鼠丘植被恢复过程中植物群落特征的变化[J]. 草业学报, 2020, 29(2): 114-122
YANG D, QI H H, WANG Q, et al. Restoration course of Vegetation community characteristics in the revegetation of plateau zokor mounds in the Qinghai-Tibet Plateau [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2020, 29(2): 114-122
- [38] 郝文芳, 杜峰, 陈小燕, 等. 黄土丘陵区天然群落的植物组成、植物多样性及其与环境因子的关系[J]. 草地学报, 2012, 20(4): 609-615
HAO W F, DU F, CHEN X Y, et al. Composition and diversity analysis of natural-community plants in the Loess Hilly Region[J]. Acta Agrestia Sinica, 2012, 20(4): 609-615
- [39] 沙晓玮, 武昱鑫, 贾国栋, 等. 冀北山地植被恢复对不同坡位土壤可蚀性与养分的影响[J]. 水土保持学报, 2024, 38(4): 11-19, 28
SHA X W, WU Y X, JIA G D, et al. Effects of vegetation restoration on soil erodibility and nutrients at different slope sites in northern Hebei Mountains[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(4): 11-19, 28
- [40] 李威, 刘金平, 陈俊, 等. 坡位对高寒草甸山体断面重建植被及土壤性状的影响[J]. 中国草地学报, 2024, 46(3): 110-117
LI W, LIU J P, CHEN J, et al. Slope position effect on vegetation recovery and soil characteristics in an alpine meadow hill section[J]. Chinese Journal of Grassland, 2024, 46(3): 110-117
- [41] 崔盛超, 图雅, 萨拉, 等. 呼伦贝尔寸草苔草原群落特征及物种多样性与土壤理化性质的关系[J]. 水土保持通报, 2023, 43(5): 27-34, 44
CUI S C, TU Y, SA L, et al. Relationship between community characteristics and species diversity of *Carex duriuscula* and soil physicochemical properties in Hulunbuir steppe[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(5): 27-34, 44
- [42] 王传盈, 王凯月, 王浩然, 等. 黄河下游典型湿地土壤养分及其生态化学计量特征[J]. 环境科学, 2024, 45(3): 1674-1683
WANG C Y, WANG K Y, WANG H R, et al. Nutrients and ecological stoichiometry characteristics of typical wetland soils in the lower Yellow River[J]. Environmental Science, 2024, 45(3): 1674-1683
- [43] 王小燕, 张彩军, 蒲强胜, 等. 人工草地建植对甘南高寒草甸草地生产力及土壤理化特征的影响[J]. 草地学报, 2022, 30(2): 288-296
WANG X Y, ZHANG C J, PU Q S, et al. Effects of artificial grassland construction on grassland productivity and soil physicochemical properties in alpine meadow of Gannan[J]. Acta Agrestia Sinica, 2022, 30(2): 288-296
- [44] DU J J, WEI P J, BAHADUR A, et al. The impacts of revegetation on ecosystem services in the extremely degraded alpine grassland of permafrost regions [J]. Sustainability, 2025, 17(4): 1512
- [45] 张鑫, 刘旻霞, 陈雪娇, 等. 甘南亚高寒草甸不同坡位植物群落物种共存机制[J]. 生态学报, 2025, 45(6): 2582-2594
ZHANG X, LIU M X, CHEN X J, et al. Species coexistence mechanism of plant communities on different slopes of Gannan sub-alpine meadows[J]. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(6): 2582-2594
- [46] 方雪梅, 冉卓雅, 修粤, 等. 不同豆禾混播组合及比例促进川西山地土壤有机碳积累的效果比较[J]. 草业科学, 2025, 42(2): 306-315
FANG X M, RAN Z Y, XIU Y, et al. Effects of different mixed forage species and ratios in legume - grass mixtures on promoting soil organic carbon accumulation in the western mountain of Sichuan[J]. Pratacultural Science, 2025, 42(2): 306-315
- [47] 张晓嘉, 朱毅, 武倩, 等. 载畜率对荒漠草原植物群落系统发育多样性的影响[J]. 草地学报, 2024, 32(10): 3289-3296
ZHANG X J, ZHU Y, WU Q, et al. Effects of stocking rates on phylogenetic diversity of plant communities in desert steppe[J]. Acta Agrestia Sinica, 2024, 32(10): 3289-3296
- [48] 严双, 夏菲, 魏巍, 等. 高寒草甸不同侵蚀样地植物多样性的差异及其关键影响因子[J]. 草业学报, 2025, 34(6): 1-13
YAN S, XIA F, WEI W, et al. Differences along an erosion gradient in alpine meadow plant community diversity and factors influencing diversity[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2025, 34(6): 1-13
- [49] 许祯安, 陈志彪, 邵鹏畅, 等. 不同恢复措施下植被群落和土壤理化性质及酶活性的变化[J]. 亚热带资源与环境学报, 2024, 19(1): 93-101
XU Z A, CHEN Z B, GAO P C, et al. Changes of vegetation community, soil physicochemical properties and enzyme activities under different vegetation restoration measures[J]. Journal of Subtropical Resources and Environment, 2024, 19(1): 93-101
- [50] 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[J]. 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 grasslands in northern Xizang [J]. Acta Agrestia Sinica, 2025, 33(2): 596-608
- [51] 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[J]. 中国草地学报, 2025, 47(2): 39-47
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[J]. Chinese Journal of Grassland, 2025, 47(2): 39-47