

doi:10.11733/j.issn.1007-0435.2026.03.026

引用格式:张煜坤,王洪斌,李辰晖,等.水分梯度下高寒草甸草丘分布引起植被生境的空间变化[J].草地学报,2026,34(3):1029–1040

ZHANG Yu-kun, WANG Hong-bin, LI Chen-hui, et al. Distribution of Alpine Meadow Grassy Hills Under the Moisture Gradient Induced by Vegetation Habitats Spatial Change Pattern[J]. Acta Agrestia Sinica, 2026, 34(3):1029–1040

水分梯度下高寒草甸草丘分布引起植被生境的空间变化

张煜坤^{1,2}, 王洪斌³, 李辰晖³, 张大才^{3*}

(1. 中国科学院西北高原生物研究所, 青海 西宁 810008; 2. 青海三江源草地生态系统国家野外科学观测研究站, 青海 西宁 810008; 3. 国家林业和草原局西南地区生物多样性保育重点实验室, 西南林业大学林学院, 云南 昆明 650224)

摘要:高寒草甸受冻胀作用的影响,表层土壤隆起形成草丘,使原本较同质的生境异质化。本研究在川西高原高寒草甸沿土壤水分梯度设置9个样地,对比分析了不同土壤水分条件下草丘和丘间草地植物群落及物种多样性的差异,这项研究对于指导高寒草甸植被的保护与管理具有重要意义。结果表明:土壤物理性质和土壤化学性质分别对草丘和丘间草地的植物多样性产生影响。沿土壤水分梯度,草丘植物群落由嵩草类植物逐渐向灌丛类植物过渡,而丘间草地植物群落则由苔草类和嵩草类植物逐渐向禾草类植物过渡。草丘中的杂类草植物和偶见种植物数量显著高于丘间草地,生境干旱化导致草丘和丘间草地的物种组成相异性增大且不同土壤水分条件下草丘物种组成相异性更高。综上所述,草丘使微生境趋于干旱化且为偶见种植物的侵入提供了有利条件,但植物多样性增加的同时对高寒草甸植被的稳定性具有负面影响。

关键词:高寒草甸;空间分异;物种多样性;草丘;丘间草地

中图分类号:S812

文献标识码:A

文章编号:1007-0435(2026)03-1029-12

Distribution of Alpine Meadow Grassy Hills Under the Moisture Gradient Induced by Vegetation Habitats Spatial Change Pattern

ZHANG Yu-kun^{1,2,3}, WANG Hong-bin^{1,2}, LI Chen-hui³, ZHANG Da-cai^{3*}

(1. Northwest Institute of Plateau Biology, Chinese Academy of Sciences, Xining, Qinghai Province 810008, China; 2. Qinghai Sanjiangyuan Grassland Ecosystem National Field Scientific Observation and Research Station, Xining, Qinghai Province 810008, China; 3. Key Laboratory of Biodiversity Conservation in Southwest China, National Forestry and Grassland Administration; College of Forestry, Southwest Forestry University, Kunming, Yunnan Province 650224, China)

Abstract: In alpine meadows, the surface soil heaves to form hummocks under the influence of frost heaving, transforming the originally relatively homogeneous habitat into a heterogeneous one. In this study, 9 sampling plots were established along a soil moisture gradient in the alpine meadows of the Western Sichuan Plateau. We compared and analyzed the differences in plant communities and species diversity between hummocks and inter-hummock meadows under different soil moisture conditions. The results showed that: Soil physical properties and soil chemical properties exerted effects on the plant diversity of hummocks and inter-hummock meadows, respectively. The plant community on hummocks gradually transitioned from *Kobresia* (sedge)-dominated vegetation to shrub-dominated vegetation, while the plant community in inter-hummock meadows gradually shifted from *Carex* (sedge) and *Kobresia*-dominated vegetation to grass-dominated vegetation. The abundance of

收稿日期:2025-03-31;修回日期:2025-05-26

基金项目:国家自然科学基金项目(31960340)资助

作者简介:张煜坤(1994-),男,汉族,青海格尔木人,硕士,主要从事生态环境保护,E-mail: 124203919@qq.com;*通信作者 Author for correspondence, E-mail: dczhang24@163.com

weedy plants and occasional species in hummocks was significantly higher than that in inter-hummock meadows. Habitat aridification increased the dissimilarity in species composition between hummocks and inter-hummock meadows, and the dissimilarity in species composition of hummocks was higher under different soil moisture conditions. In conclusion, hummocks tend to aridify the microhabitat and provide favorable conditions for the invasion of occasional species. Although hummocks increase plant diversity, they have a negative impact on the stability of alpine meadow vegetation. This research holds significant implications for guiding the conservation and management of alpine meadow vegetation.

Key words: Alpine meadow; Spatial differentiation; Species diversity; Grass hummocks; Inter-hummock meadows

生境是生物个体、种群或群落能够完成生命过程的空间^[1]。植物群落空间分布格局是物种长期以来与生境相互适应、相互作用的结果,反映了物种与生境中非生物因子间的密切关系^[2]。当生境受到外界干扰后,植物群落及物种组成会随之发生改变^[3],受干扰程度低的高寒草甸形成物种丰富度低的单优势种群落,受干扰程度高的高寒草甸受杂类草植物侵入,物种丰富度增高。植物多样性能够体现出高寒草甸不同生境类型的差异。其中, α 多样性是描述植物群落物种多样性的关键指数,可以通过分析 α 多样性来判断不同生境间植物群落及物种组成的差异的指标。 β 多样性是描述物种组成在时空尺度上的变化程度。当生境条件发生改变时,具有不同生态位需求的物种会做出差异化响应,从而导致群落物种组成的空间分异^[4]。Jaccard相异性指数是描述 β 多样性的指数之一,可以判断不同生境间植物群落物种组成的差异,生境间距离越远,则环境差异越大,因此物种组成相似性也越低^[5]。

草丘和丘间草地是高寒草甸中常见的两种生境类型,在放牧践踏和冻胀等外力作用下表层土不足以抵抗冻结层积水压力而隆起,形成了高寒草甸特有的草丘^[6-7]。原本连续成片的平缓地表被草丘分割,形成了丘间草地和草丘镶嵌的生境分布格局。随着高寒草甸逐渐干旱化,土壤含水率对两种生境植物群落的分布限制作用愈发重要。通常土壤含水率高的区域植被覆盖率较高,而含水率低的区域植被覆盖率较低,生境退化的可能性更高,植物群落的空间分布及物种组成差异显著^[8]。目前,关于草丘微地貌的研究通常集中在沼泽湿地,如刘双双等^[9]的研究表明,丘间枯落物总干重损失和分解速率均高于草丘,丘间不稳定的水分环境是影响苔草泥炭沼泽枯落物分解的关键环境因子。在水淹环境下,泥炭沼泽的微地貌和生态水文过程是优势植物空间分布格局演化的主要驱动力^[10]。但是在高寒草甸,关于草丘微地貌和丘间草地植物群落沿土壤水分梯度的空间分异特征的相关研究还较

少,草丘微地貌的分布对高寒草甸植被生境的空间变化规律有什么影响尚不清楚。

本研究以高寒草甸草丘和丘间草地为研究对象,比较分析两种生境类型的差异和植物群落的差异沿土壤水分梯度的变化,从而探究微地形对植物群落的影响,以期高寒草甸的恢复利用及微地形的研究提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 研究地概况

研究地位于四川省甘孜州新龙县古冰帽高寒草甸(31°32' N, 99°37' E),平均海拔约4000 m(图1)。高寒草甸中草丘呈半球形,高5~35 cm,底部直径20~70 cm,镶嵌于丘间草地之间。该地区气候类型属于高原山地气候,年平均气温约3.8℃,日照充足。研究区未设禁牧季节,全年以牦牛自由放牧为主,过度放牧现象普遍。研究区植被类型包括苔草草甸、嵩草草甸及金露梅灌丛,优势种包括青藏苔草(*Carex moorcroftii*)、线叶嵩草(*Carex capillifolia*)、矮生嵩草(*Carex alatauensis*)、大花嵩草(*Carex nudicarpa*)、金露梅(*Dasiphora fruticosa*)、高山杜鹃(*Rhododendron lapponicum*)。本文中的地图区域范围仅为四川省甘孜藏族自治州,其中高程数据来源于地理空间数据云(<https://www.gscloud.cn/>)。

1.2 样地设置与植物群落调查

植物群落调查和样品采集于2020年8月的盛草期进行,研究区域位于两山之间的平缓地段,在低凹处有面积较大的湖泊。从研究区域最湿润的湖边开始设置样地,沿生境土壤水分梯度设置9个样地,各样地间隔100 m,初始样地土壤含水率最高(70%~75%)且生境异质化程度低,草丘发育不明显。在每个样地设置一个面积为8 m×8 m的大样方,将大样方分成16个2 m×2 m的小样方,共设置144个样方。由于不同土壤水分梯度下样地中的草丘大小和

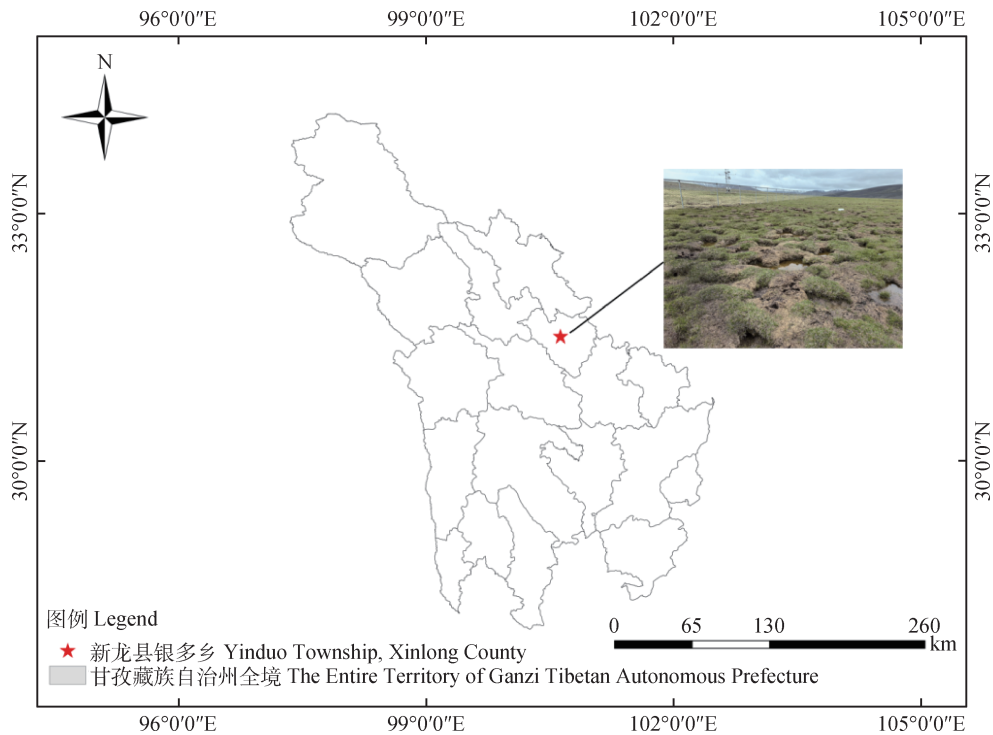


图1 采样点示意图

Fig. 1 Schematic diagram of sampling points

所占面积存在差异,为消除面积因素对物种多样性的影响,在丘间草地设置与草丘基部形状一致的对照样方,因此使用细铁丝紧贴草丘基部围绕一周,固定其形状和大小,再将固定好的铁丝设置在丘间草地中,得出与草丘形状大小相同的生境为对照样方。在每个样地随机设置5个对照样方,共设置45个样方,对照样方面积变化较大,利用钢尺测半径或长宽,对照样方面积在 $0.03\sim 0.45\text{ m}^2$ 之间。在 $2\text{ m}\times 2\text{ m}$ 的样方中用 $1\text{ m}\times 1\text{ m}$ 的样方框调查,记录物种名录并统计物种数量,目测各物种分盖度和群落总盖度,用卷尺多次测量植株自然高度取平均值(表1)。

1.3 土壤采集

齐地面刈割植物地上组织后,用直径为5 cm,容积为 100 cm^3 的环刀取样,每个样方尺度为 $2\text{ m}\times 2\text{ m}$,在该尺度内再随机分2层(0~10 cm和10~20 cm),按照随机取样法在样方内随机选取3组采样点,一个草丘和紧挨的丘间草地为一组,分别按土壤上下层取样,每样地取12个土样,各样地采集方法相同。由于初始样地草丘发育不明显且土壤含水率较高,故采集其余8个样地的土壤样品,共取96个土样,将相同生境类型的同层土样进行混合得到该采样点的混合土样,土样用精度为0.01 g的电子秤称重,混合均匀后过0.2 cm的筛,分离植物根

系和土壤,将样品装入信封并做好标记,同时记录采样点周围环境,将土壤鲜样保存在 $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 便携式冰箱中,所有土壤样本用自封袋保存后立即带回实验室,用于测定土壤其他理化指标。

1.4 土壤物理性质的测定

通过土壤温湿度传感器(兆泰盛ZTS-3000-TR-WS)测定每个样地的土壤上下层含水率和温度,在样方的四个角及中间各测2个点,共测10个点,用平均值表示该样方土壤含水率和温度,土壤含水率为体积含水率。土壤容重采用烘干法测定:将采集回的环刀土壤样品置于鼓风干燥箱中,在 $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下烘干8~10 h至恒重,冷却后称重。土壤容重计算公式为: $\rho_b=m/v$, ρ_b 为土壤容重, m 为环刀内自然状态下土壤样品质量, v 是环刀容积(cm^3)。采用浸泡法测定土壤孔隙度,土壤总孔隙度计算公式为: $P_t=93.947-32.995\times b$, P_t 为总孔隙度, b 为容重^[11]。

1.5 土壤化学性质的测定

pH值用电位计法测定,采用2.5:1的水土比;有机碳采用硫酸重铬酸钾氧化-容量法测定;全氮采用半微量开氏法,定氮仪自动分析法测定;全钾采用 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}_2$ 消煮,火焰光度计法测定;全磷采用

表 1 不同生境类型下植物物种调查表

Table 1 Questionnaire on plant species under different habitat types

生境类型 Habitat type	植物中文名及拉丁名 Chinese and latin names of plants		
草丘和丘间草地共有 Both grass hummocks and inter-hummock meadows are found	黑褐薹草 <i>Carex atrofusca</i> subsp. <i>minor</i>	青藏苔草 <i>Carex moorcroftii</i>	暗褐薹草 <i>Carex atrofusca</i>
	矮生嵩草 <i>Carex alatauensis</i>	大花嵩草 <i>Carex nudicarpa</i>	线叶嵩草 <i>Carex capillifolia</i>
	高山嵩草 <i>Carex parvula</i>	阿洼早熟禾 <i>Poa araratica</i>	早熟禾 <i>Poa annua</i>
	变色早熟禾 <i>Poa versicolor</i>	草地早熟禾 <i>Poa pratensis</i>	川西小黄菊 <i>Tanacetum tatsienense</i>
	野决明 <i>Thermopsis lupinoides</i>	毛莓草 <i>Sibbaldianthe adpressa</i>	毛果婆婆纳 <i>Veronica eriogyne</i>
	圆穗蓼 <i>Bistorta macrophylla</i>	矮泽芹 <i>Chamaesium paradoxum</i>	西伯利亚蓼 <i>Knorringia sibirica</i>
	毛茛 <i>Ranunculus japonicus</i>	矮地榆 <i>Sanguisorba filiformis</i>	珠芽蓼 <i>Bistorta vivipara</i>
	点地梅 <i>Androsace umbellata</i>	火绒草 <i>Leontopodium leontopodioides</i>	星舌紫菀 <i>Aster asteroides</i>
	黄芪 <i>Astragalus membranaceus</i>	高山豆 <i>Tibetia himalaica</i>	山莓草 <i>Sibbaldia procumbens</i>
	川西棱子芹 <i>Pleurospermum souliei</i>	重冠紫菀 <i>Aster diplostephioides</i>	甘肃棘豆 <i>Oxytropis kansuensis</i>
	蒲公英 <i>Taraxacum mongolicum</i>	高山大戟 <i>Euphorbia stracheyi</i>	香青 <i>Anaphalis sinica</i>
	垂头菊 <i>Cremanthodium reniforme</i>	条叶垂头菊 <i>Cremanthodium lineare</i>	东俄洛马先蒿 <i>Pedicularis tongolensis</i>
	多花马先蒿 <i>Pedicularis floribunda</i>	管花马先蒿 <i>Pedicularis siphonantha</i>	蓝白龙胆 <i>Gentiana leucomelaena</i>
	喉毛花 <i>Comastoma pulmonarium</i>	大花龙胆 <i>Gentiana szechenyi</i>	匙叶龙胆 <i>Gentiana spathulifolia</i>
	獐牙菜 <i>Swertia bimaculata</i>	川西龙胆 <i>Gentiana wilsonii</i>	肋柱花 <i>Lomatogonium carinthiacum</i>
	刺芒龙胆 <i>Gentiana aristata</i>	鸡冠茶 <i>Sibbaldianthe bifurca</i>	多裂委陵菜 <i>Potentilla multifida</i>
	橙黄虎耳草 <i>Saxifraga aurantiaca</i>	星状雪兔子 <i>Saussurea stella</i>	金露梅 <i>Dasiphora fruticosa</i>
	岩须 <i>Cassiope selaginoides</i>	驴蹄草 <i>Caltha palustris</i>	草玉梅 <i>Anemone rivularis</i>
	蝇子草 <i>Silene gallica</i>	瓣蕊唐松草 <i>Thalictrum petaloideum</i>	肉果草 <i>Lancea tibetica</i>
草丘 Grass hummocks	繁缕 <i>Stellaria media</i>	鸭跖草 <i>Commelina communis</i>	小大黄 <i>Rheum pumilum</i>
	矮灯芯草 <i>Juncus minimus</i>	灯芯草 <i>Juncus effusus</i>	甘川灯芯草 <i>Juncus leucanthus</i>
	无心菜 <i>Arenaria serpyllifolia</i>	高山杜鹃 <i>Rhododendron lapponicum</i>	四川报春 <i>Primula szechuanica</i>
	垂穗披碱草 <i>Elymus nutans</i>	长芒草 <i>Stipa bungeana</i>	——
丘间草地 Inter-hummock meadows			

H₂SO₄-H₂O₂ 消煮, 用钼锑抗比色法测定; 有效磷用碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法测定; 有效钾用乙酸铵浸提-火焰光度计法测定^[12]。

1.6 植被指数的测定与计算

(1) 重要值计算: 根据物种重要值, 确定植物群落的优势种, 划分植物群落类型^[13]。重要值=(相对盖度+相对频度+相对高度)/3。其中: 相对盖度=每个种的盖度/所有种盖度之和×100%; 相对频度=每个种频度/所有种频度之和×100%; 相对高度=每个物种个体平均高度/所有种平均高度之和×100%。

(2) 物种丰富度: 在 2 m×2 m 的样方中, 既有草丘, 也有丘间草地, 样方中两种生境的面积不同。因此为了消除面积对物种丰富度的影响, 以物种密度衡量物种丰富度, 即用种-面积关系计算两种生境的物种密度, 公式: $D = S/A$, 其中 D 为物种密度, S 为样方内的物种数, A 为样方面积, 分别计算草丘与丘间草地的物种密度。为了能更准确地反映出两种生境物种丰富度的差异, 对照样方分析了两种生境面积相等时的物种丰富度, 根据“差值和平均值之比”比较物种丰富度, 公式为: $r = |a - b| / (a +$

$b) / 2$ 。其中 r 为差值和平均值之比, a 为草丘物种数量, b 为丘间草地物种数量。

(3) Beta 多样性指数: 采用 Jaccard 相异性指数 (J_d) 来测量两种生境间群落物种组成的 β 多样性, 其值越大群落间物种组成 Beta 多样性越高, 公式为: $J_d = 1 - C' / (A' + B' + C')$, 式中 A' 和 B' 为两生境各自的物种数, C' 为两生境间共有的物种数。构建物种组成相似性与土壤水分梯度之间的线性回归关系, 以物种组成相似性递减斜率度量 β 多样性, 其斜率越大, β 多样性越高^[14]。

(4) 群落中常见种和偶见种的划分: 本研究根据物种在样方中出现的频度确定常见种和偶见种。频度低于一定标准的物种确定为偶见种, 反之为常见种。在所调查的 72 个样方中, 草丘和丘间草地中物种在样方中出现的平均频度分别为 7.2 和 6.8, 物种的平均频度为 7, 因此本研究中将频度 ≤ 7 的物种作为偶见种, 将频度 > 7 的物种作为常见种^[15]。

1.7 统计分析

利用 Excel 对数据进行统计, 计算 α 和 β 多样性指数; 利用 SPSS 22.0 进行回归关系分析, 使用多元线性回归和线性回归分别分析了水分梯度下草丘

和丘间草地的物种密度差异和相异性差异,显著性水平为 <0.05 。运用 Origin 2021 绘制柱状图及回归关系图。用 ANOVA 单因素方差分析比较草丘和丘间草地两种生境类型的植物多样性差异。通过主成分分析得到了第一、第二、第三主成分的累计贡献率 $>90\%$,说明能较全面地反映各土壤因子的信息,进一步由 PCA 得分图分析两种生境类型的差异。在 $1\text{ m}\times 1\text{ m}$ 样方中,用数码相机以镜头垂直于地面拍照,获取图像。用 Adobe Photoshop CC 软件对 $1\text{ m}\times 1\text{ m}$ 样方图像进行分析,记录“直方图”的像素为整个图像的像素值 B_1 ,未被植被覆盖的裸露土壤全部选中的像素值记为 B_2 ,最后计算样方植被总盖度: $S=(1-B_2/B_1)\times 100\%$,每个样方 3 次重复。

2 结果与分析

2.1 草丘和丘间草地土壤性质差异

高寒草甸草丘和丘间草地两种生境存在显著差异($P<0.05$),主要表现在 $0\sim 10\text{ cm}$ 土层(图 2)。

其中,草丘第一主成分容重、孔隙度、含水率的载荷量较大,贡献率为 55.21% ,第二主成分有机质、速效磷、pH 值的载荷量较大,贡献率为 23.89% ,第三主成分中速效磷的载荷量较大,贡献率为 12.54% 。丘间草地第一主成分有机质、全磷、速效磷的载荷量较大,贡献率为 48.31% ;第二主成分孔隙度、含水率的载荷量较大,贡献率为 30.23% ;第三主成分中 pH 值的载荷量较大,贡献率为 13.93% (表 2)。

土壤理化性质显著差异主要表现在 $0\sim 10\text{ cm}$ 土层。其中,草丘的温度(12.28°C)、容重($1.13\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$)、全氮($1.32\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$)、全磷($0.46\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$)显著高于丘间草地的温度(10.76°C)、容重($0.82\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$)、全氮($0.7\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$)、全磷($0.32\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$)($P<0.05$);草丘的土壤含水率(41%)、土壤孔隙度(57%)、土壤有机碳($10.12\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$)、土壤有效磷($7.96\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$)、土壤有效钾($115\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$)、土壤全钾($33\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$)显著低于丘间草地的土壤含水率(53%)、土壤孔隙度(65%)、土壤有机碳($13.85\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$)、土壤有效磷($11.56\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$)、土壤有效钾($167\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$)、土壤全钾($44\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$)($P<0.05$)(图 3,4)。

表 2 两种生境土壤因子的主成分分析

Table 2 Principal component analysis of soil factors in two habitats

草丘 Grass hummocks				丘间草地 Inter-hummock meadows			
土壤因子 Soil factor	主成分 Principal component			土壤因子 Soil factor	主成分 Principal component		
	PC1	PC2	PC3		PC1	PC2	PC3
容重 Bulk density	-0.824	0.205	-0.319	容重 Bulk density	0.235	0.237	0.684
孔隙度 Porosity	0.918	-0.136	-0.083	孔隙度 Porosity	0.417	0.629	-0.475
含水率 Moisture content	0.831	-0.195	0.072	含水率 Moisture content	0.476	0.821	-0.182
温度 Temperature	-0.613	0.244	0.109	温度 Temperature	-0.256	-0.047	-0.109
有机碳 Organic carbon	0.243	0.873	0.356	有机碳 Organic carbon	0.808	0.155	0.237
全氮 Total nitrogen	-0.347	0.158	0.107	全氮 Total nitrogen	0.116	-0.562	0.195
全磷 Total phosphorus	-0.635	-0.175	0.392	全磷 Total phosphorus	0.918	-0.114	-0.217
全钾 Total potassium	0.208	-0.224	0.264	全钾 Total potassium	-0.368	0.372	0.273
速效磷 Available phosphorus	0.321	0.287	0.766	速效磷 Available phosphorus	0.793	0.082	0.211
速效钾 Available potassium	-0.548	0.249	0.175	速效钾 Available potassium	0.596	-0.47	-0.344
pH	0.356	0.831	-0.232	pH	-0.388	0.237	-0.713
特征根 Eigenvalue	6.07	2.62	2.37	特征根 Eigenvalue	5.31	3.32	1.53
贡献率 Contribution rate/%	55.21	23.89	12.54	贡献率 Contribution rate/%	48.32	30.23	13.93
累计贡献率 Cumulative contribution rate/%	55.21	79.10	91.64	累计贡献率 Cumulative contribution rate/%	48.32	78.55	92.48

2.2 草丘和丘间草地植物群落差异

样方中共记录维管植物 19 科 49 属 69 种,其中,草丘分布植物 67 种,丘间草地分布植物 50 种,两种生境共有植物 48 种。沿土壤水分梯度,草丘和丘间草地植物群落类型和植被盖度存在明显差异(图 5a-c),两种生境植物群落中苔草和嵩草的重要值均

逐渐降低,草丘植物群落中杂类草、禾草类及灌丛类植物的重要值逐渐增加,灌丛类植物成为了群落的优势种;丘间草地植物群落中禾草类植物的重要值逐渐增加,逐渐成为群落的优势种,植物群落由单优势种或寡优势种向多优势种变化。草丘中的杂类草植物和偶见种植物显著高于丘间草地($P<$

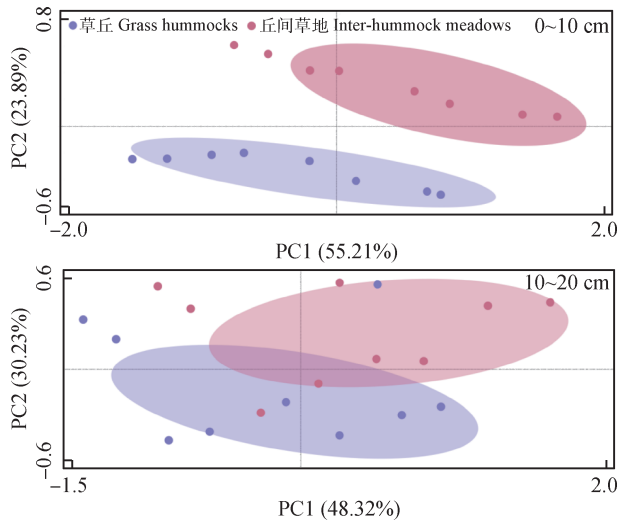


图2 两种生境的主成分分析

Fig. 2 Principal component analysis of two habitats

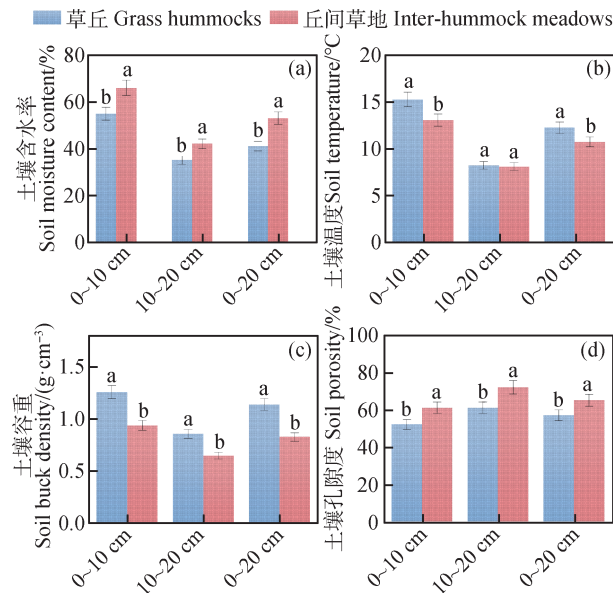


图3 两种生境土壤物理性质差异

Fig. 3 Differences in soil physical properties between two habitats

注:小写字母不同表示同种指标在相同土层不同生境下差异显著($P < 0.05$)Note: Different lowercase letters indicate significant differences in different habitats within the same soil layer ($P < 0.05$)

0.05), 草丘是偶见种植物侵入高寒草甸的生境,增加了高寒草甸植物的多样性(图5d,e)。

2.3 植物多样性与土壤因子的相关性

Pearson相关性分析表明,草丘的物种多样性指数与含水率(41%)、pH值(6.02)呈显著负相关,与孔隙度(57%)、有机碳($10.12 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)、全磷($0.46 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)、有效磷($7.96 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)呈显著正相关。丘间草地物种多样性指数与土壤含水率(53%)和pH值(6.05)

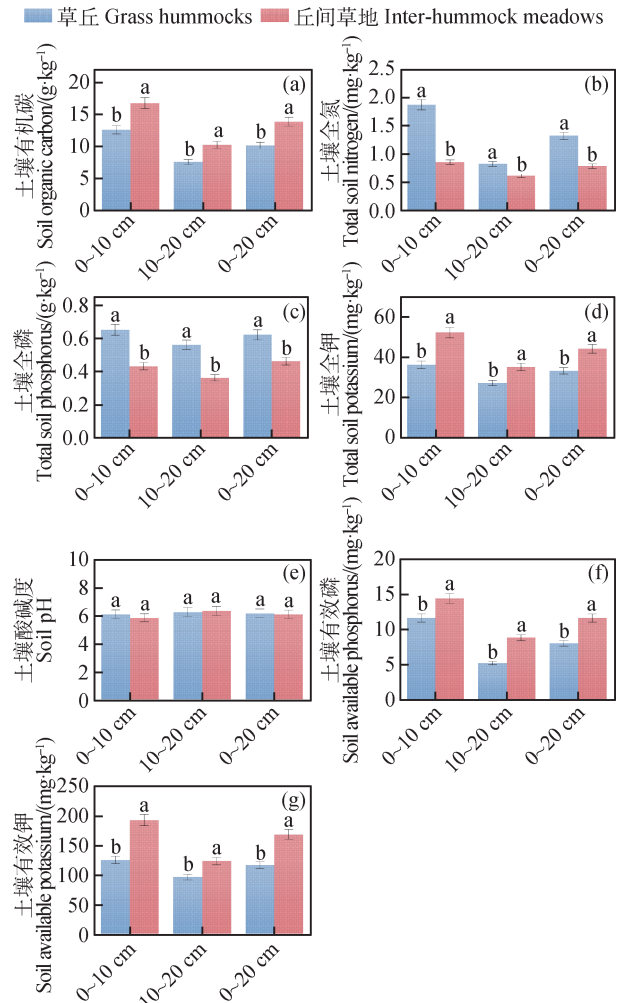


图4 两种生境土壤化学性质差异

Fig. 4 Differences in soil chemical properties between two habitats

注:小写字母不同表示同种指标在相同土层不同生境下差异显著($P < 0.05$)Note: Different lowercase letters indicate significant differences in different habitats within the same soil layer ($P < 0.05$)

均呈显著负相关,与有机碳($13.85 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)、全磷($0.32 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)、有效磷($11.56 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)均呈显著正相关。辛普森指数仅与土壤含水率呈显著负相关($P < 0.05$),与有机碳($13.85 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)、全磷($0.32 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)呈显著正相关($P < 0.05$),即土壤含水率、容重、孔隙度对草丘生境的植物多样性影响较大,有机碳等化学性质对丘间草的植物多样性影响较大(表3)。

2.4 植物丰富度和密度沿土壤水分梯度的变化

在生境干旱化过程中,草丘和丘间草地植物物种密度随土壤水分梯度呈单峰曲线变化格局,土壤含水率在45%~50%时,两种生境类型物种多样性最高(图6a)。草丘和丘间草地之间的 β 多样性指数随着生境干旱化程度的增加而增加。湿

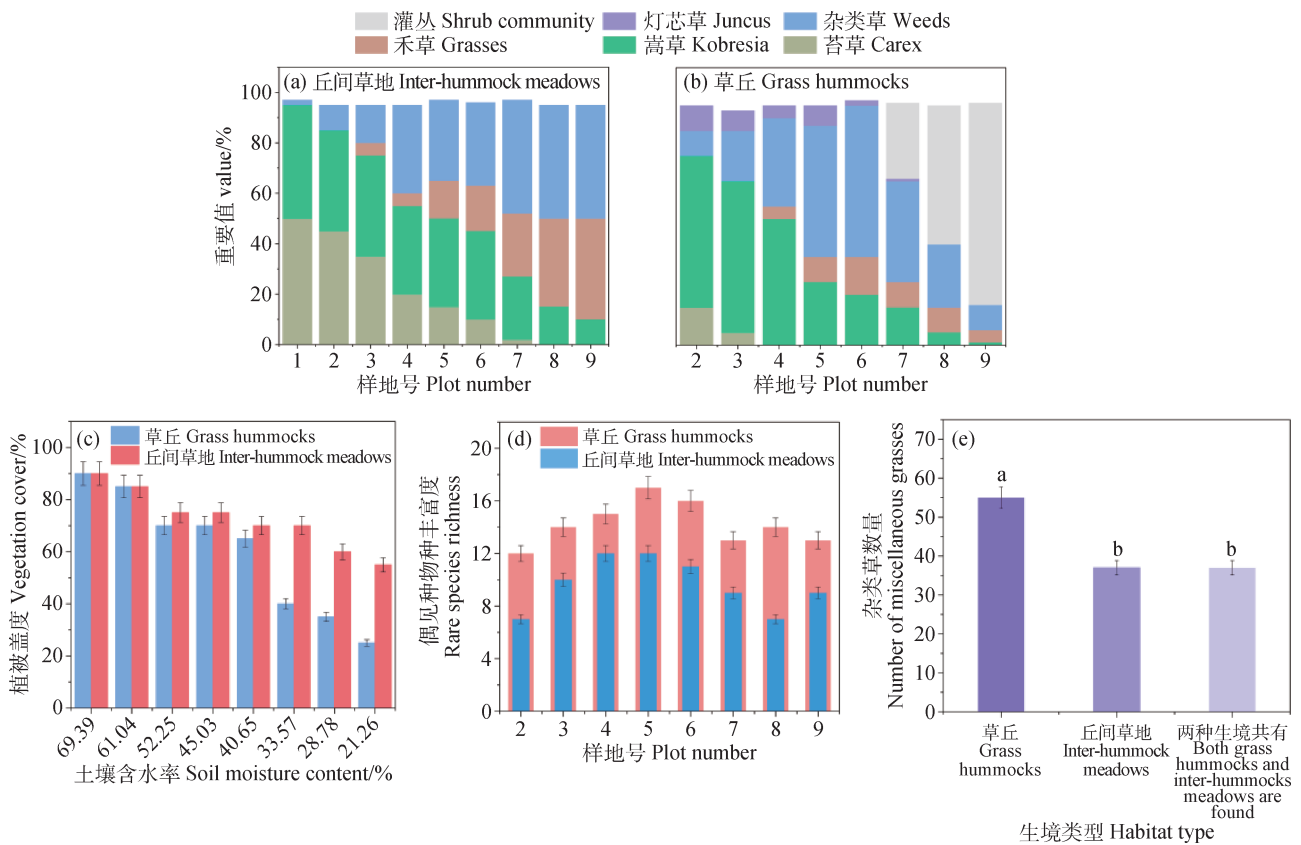


图5 草丘和丘间草地沿土壤水分梯度植物群落及物种组成的变化趋势

Fig. 5 Trends in plant communities and species composition along a gradient of habitat aridity in raised grassy hills and gently sloping grasslands

表3 各多样性指数与土壤环境因子的相关系数

Table 3 The correlation analysis of species diversity and soil factors

生境类型 Habitat type	多样性指数 Diversity index	土壤理化性质 Soil physicochemical properties										
		容重 Bulk density	孔隙度 Porosity	含水率 Moisture content	温度 Temperature	有机碳 Organic carbon	全氮 Total nitrogen	全磷 Total phosphorus	全钾 Total potassium	有效磷 Available phosphorus	有效钾 Available potassium	土壤酸碱度 Soil pH
草丘 Grass hummocks	R	-0.558*	0.560*	-0.593*	-0.221	0.587*	-0.391	0.634*	0.300	0.617*	-0.406	-0.518*
	H	-0.499*	0.509*	-0.610*	0.282	0.661*	0.426	0.696*	0.224	0.503*	0.379	-0.534*
	S	-0.602**	0.782**	0.419	0.002	0.820**	-0.354	0.403	0.475	-0.404	-0.448	0.550*
	E	0.441	0.306	-0.357	-0.141	-0.435	0.206	-0.003	-0.021	0.329	-0.199	0.292
丘间草地 Inter hummock meadows	R	-0.391	0.133	-0.682*	0.574	0.649*	0.549	0.562*	-0.507	0.767*	-0.456	-0.504*
	H	0.308	0.279	-0.704*	0.380	0.592*	0.590	0.541*	-0.447	0.803*	-0.422	-0.512*
	S	-0.279	0.335	-0.766*	0.567	0.772*	0.485	0.561*	0.281	-0.171	0.315	0.491
	E	-0.154	0.377	-0.604*	-0.464	0.591*	0.331	0.441	0.157	-0.432	0.326	-0.328

注:R,H,S,E分别代表物种丰富度指数、香农威纳指数、优势度指数、均匀度指数,*和**分别表示 $P<0.05$ 和 $P<0.01$

Note: R, H, S, and E represent the species richness index, Shannon-Wiener index, Simpson index, and pieliou index, respectively,

* indicates $P<0.05$, ** indicates $P<0.01$

润条件下,两生境间物种组成分异程度低;干旱条件下,两生境间物种组成分异程度高。草丘物种组成相异性沿土壤水分梯度的变化速度高于丘间草地,即草丘物种组成相似性递减速度更快(图6b,c)。两种生境类型的物种丰富度在干旱条件下差异最大,生境干旱化加速了物种丰富度的分异(图6d)。

3 讨论

3.1 水分梯度下草丘对土壤理化性质的影响

草丘是高寒草甸广泛分布的微地貌特征,草丘在向地表凸起生长的过程中,增加了高寒草甸的表面积和地形的异质性,使得光照和水分在草

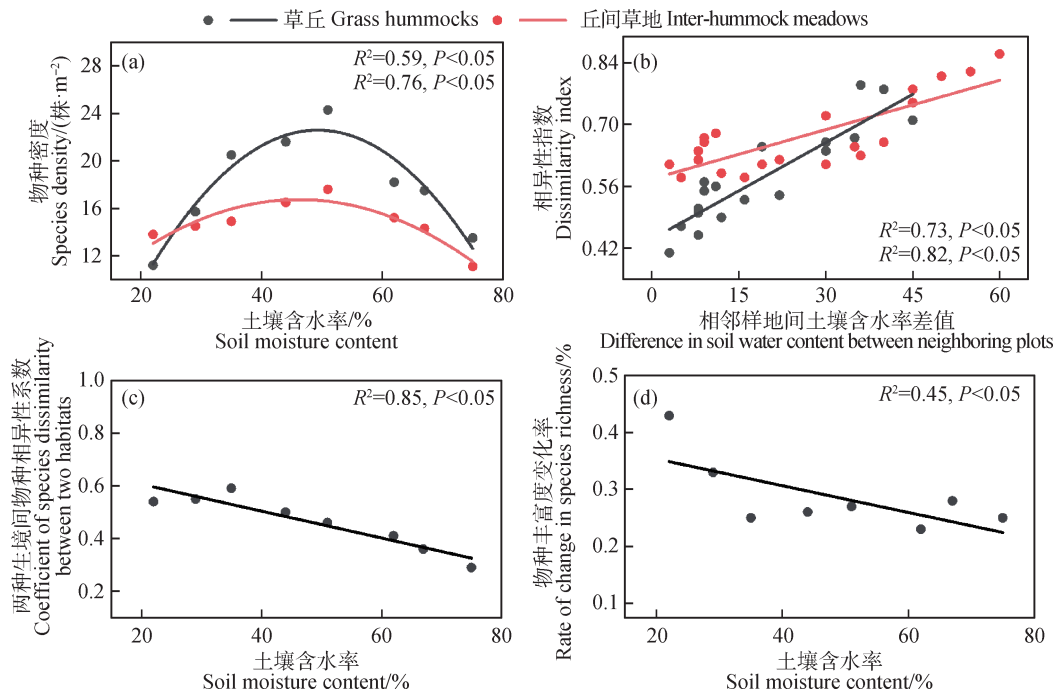


图 6 草丘和丘间草地植物多样性沿土壤水分梯度的变化

Fig. 6 Changes in plant diversity along a gradient of habitat aridity in grass hummocks and inter-hummock meadows

丘顶部、基部及丘间草地均存在显著差异,多样的生境类型为植物多样性的维持提供了更多的生存空间^[16-17]。有研究表明,草丘微地貌对土壤养分含量的变化具有重要影响,草丘面积不断增加会导致土壤水分的流失,从而加速土壤养分的损失^[18],这与本研究的结果一致。草丘的土壤含水率低可能是因为草丘表面的水分不容易向下渗透,也难以集中在生境表层,导致草丘的土壤含水率变低^[19]。此外,草丘和丘间草地的土壤温度差也可能和草丘较低的土壤含水率有关,由于草丘凸起的高度较高且占据一定面积,因此,有利于草丘吸收更多的光照,从而加速了土壤水分的蒸发,导致两种生境间的土壤含水率和土壤温度存在明显差异^[20]。

草丘和丘间草地土壤有机碳的差异可能与两种生境不同的植被盖度及土壤容重有关,土壤容重较低的丘间草地有助于增加土壤呼吸和水分的渗透,还会进一步加速凋落物的分解,导致有机碳含量的增加^[21]。相反,草丘的土壤压实程度较高,较差的通气性和较低的土壤含水率不利于凋落物的分解和有机碳的储存^[22]。此外,丘间草地位于多个草丘生境之间,因此,凋落物容易聚集在丘间草地,从而增加了土壤有机碳的积累。

已有研究表明,微地形的变化对土壤养分的转化、维持具有明显的影响^[23-24]。Liu 等研究表明,在

微生境影响下,土壤含水率与有效磷含量呈显著正相关,较高的土壤含水率会加速一些土壤养分元素的矿化并释放更多可利用的养分^[25]。因此,丘间草地较高的土壤含水率可能是两种生境有效磷存在显著差异的原因。

土壤钾含量主要受凋落物的返还能力和土壤侵蚀、水分淋溶作用的影响,草丘的有效钾含量较低,可能是因为草丘植被覆盖度降低而导致风蚀加速,使得土壤粗化和容重增加,进而导致土壤中的钾含量明显降低^[26]。植被覆盖度与全氮、全磷和全钾含量之间的关系密切,全氮、全磷、全钾含量和生境的退化有关。已有研究证明,全钾的含量随着高寒草甸的退化而降低^[27],这与本研究的结果相似,可能是因为生境在逐渐退化过程中全钾对退化干扰的反应比其他营养元素更敏感,从而更容易流失^[28]。

两种生境类型的全氮含量有显著差异的原因可能和微生物功能及土壤水分存在差异有关。草丘通常地势较高,排水条件和土壤水解酶活性优于丘间草地,利于有机氮分解;而丘间草地容易积水形成厌氧环境,反硝化酶活性增强,导致氮损失。例如,塔头苔草沼泽的丘上土壤氧化酶活性比丘间低 40%,减少了氮的气态损失^[29]。此外,嵩草属植物具有较好的氮获取能力,有研究表明,矮生嵩草等物种能直接吸收氨基酸等有机氮,且有机氮占其

总氮吸收量的30%^[30]。草丘植物的根系分泌物可能促进微生物释放氮素,形成正反馈循环。相比之下,丘间草地植物可能更多依赖无机氮,而高寒草甸低温环境限制了氮矿化,导致无机氮供应不足^[31]。

两种生境之间因土壤温度和湿度存在显著差异,间接导致两生境中全氮的含量存在差异。草丘的全磷含量更高可能是因为丘间草地比草丘的植物生长发育更好,消耗的有效养分更多,因此需要分解更多的全效养分来维持较高水平的有效养分^[32-33]。

3.2 水分梯度下草丘对植物群落的影响

草丘的形成发育及空间分布与水文格局密切相关,水位较低有利于形成高大紧实的草丘^[34],本研究中的草丘和丘间草地植物群落沿土壤水分梯度的空间分异格局主要表现出两个特征。

第一,植物群落变化差异明显,丘间草地植物群落由苔草+嵩草群落向杂类草+禾草群落过渡;草丘植物群落由嵩草+杂草群落向金露梅+高山杜鹃灌丛群落过渡(图1)。本研究结果与沼泽植被类型逐渐向干燥植被类型演替的结果相似^[35]。植物物种组成的空间分异与植物群落的更替联系密切,植物群落的更替直接受制于土壤水分的动态变化^[36],草丘较低的土壤含水率导致部分不耐旱植物消失,莎草科植物逐渐被通气组织不发达的旱生植物和具有高光合作用效率及低水分利用效率的双子叶杂草取代^[37],耐旱的禾草和小灌木植物逐渐占据优势,植物群落逐渐退化为灌丛群落,而丘间草地容易汇聚更多水分,湿润的环境为部分湿生植物提供了适宜的生存条件。Niu等研究表明,草丘的干扰促进了高寒草甸植物群落的快速变化,高寒草甸物种共存和植物群落多样性的维持取决于植物物种在裸露的斑块的定植能力^[38],这与本研究的结果相似。随着干旱化的情况加剧,草丘的结构变得松散^[9],高寒草甸的植被盖度降低,表层土壤的弹性降低,使得土壤容易被外力侵蚀,从而导致草丘表面出现裸露的斑块^[39],植物群落加速向旱生类型过渡,这也为杂类草植物的入侵提供了空间。例如,植株较高的大花嵩草逐渐变少,降低了草丘地上部分的遮光效应,为光照竞争力较弱的低矮植物创造了适宜的生存条件^[40],增加了草丘的物种多样性,但是,

过于干旱的生存环境超过了大部分植物的耐旱极限,导致物种丰富度变低。

第二,植物物种的空间分异是受地貌、地形、水分、光照等因子影响下长期演化的结果^[41-42],生境干旱化导致草丘与丘间草地物种组成分异加剧,造成这种分异的原因可能与偶见种的变化有关。偶见种大多是植物群落中分布频率较低且容易侵入异质生境的杂类草植物^[16,43],杂类草以菊科、蓼科、龙胆科、玄参科等植物为主,由于这些植物对水分的要求不高,利用天然降水就能在草丘上完成生活史^[44],草丘表现出的高温、高全效养分、低水分的特点为更多偶见种提供了适宜的生存环境,从而导致草丘的物种多样性更高。其次,草丘的产生增加了地表粗糙程度,阻留了沼泽水中的矿物质给植物提供营养,从而为草丘中不同植物提供了更多可以竞争的资源,这是偶见种传播或生存的重要前提。

沿土壤水分梯度,草丘和丘间草地间的 β 多样性增加,物种组成趋异性明显(图4)。湿润条件下的植物大多为湿生植物,两种生境的物种组成相对一致,植物群落为寡优势种,随着生境干旱化程度的加剧,植物群落变为多优势种,物种组成差异增大。在最干旱的环境下,草丘生境表面裸露斑块较多,灌丛类植物占据优势,土壤结构和速效N,P,K,有机碳等养分的改变,使草丘的物种多样性显著降低,导致两种生境的物种组成分异更加明显。干旱的生存环境影响植物定居和扩展的分布空间^[45-46],随着高寒草甸植物由湿生转为旱生,植物群落的物种替代率发生了改变,草丘和丘间草地的植物群落在湿润条件下和干旱条件下均处于植被更替的两端,具有较高的相异性^[47-48]。

本研究仅在生长季进行了一次调查,未能反映季节动态变化,样地设置沿单一水分梯度,未考虑放牧强度、坡向、坡度等因素的影响,这可能导致非生长季草丘与丘间草地土壤养分含量与本研究的结果存在差异。此外,坡向、坡度通过改变光照、温度和水分再分配,可能影响两种生境类型的土壤养分含量及养分循环过程。因此,关于高寒草甸草丘的分布引起植被生境空间变化规律的研究还存在部分局限性,有待进一步研究。

4 结论

高寒草甸草丘和丘间草地的土壤理化性质、植

物群落及物种组成空间分异明显,土壤物理性质对草丘植物多样性的影响更大,土壤化学性质对丘间草地植物多样性的影响更大。草丘微地貌使生境趋于干旱化,干旱化过程中草丘的物种丰富度先增高后降低,物种以侵入植物群落的偶见种为主。草丘微地貌是高寒草甸生态系统退化的重要指示器,其面积比例的增加预示着生态系统功能的衰退。建议在高寒草甸管理中,将草丘发育程度作为草地健康评价的重要指标,并采取适度放牧、水分调控等措施抑制草丘的过度发育。

参考文献

- [1] LIU X Y, XIONG Z Q, OUYANG L, et al. Macrohabitat and microhabitat mediate the relationships between wetland multifaceted biodiversity and multifunctionality [J]. *Catena*, 2024, 241:108023
- [2] LI W, CUI L J, SUN B D, et al. Distribution patterns of plant communities and their associations with environmental soil factors on the eastern shore of Lake Taihu, China [J]. *Ecosystem Health and Sustainability*, 2017, 3(9):1385004
- [3] 胡冰冰, 李后魂, 梁之聘, 等. 八仙山自然保护区蝴蝶群落多样性及区系组成 [J]. *生态学报*, 2010, 30(12):3226-3238
- HU B B, LI H H, LIANG Z P, et al. Diversity and fauna of butterflies in baxian mountain state nature reserves [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(12):3226-3238
- [4] 陈圣宾, 欧阳志云, 徐卫华, 等. Beta多样性研究进展 [J]. *生物多样性*, 2010, 18(4):323-335
- CHEN S B, OUYANG Z Y, XU W H, et al. A review of beta diversity studies [J]. *Biodiversity Science*, 2010, 18(4):323-335
- [5] CHAO A, RICOTTA C. Quantifying evenness and linking it to diversity, beta diversity, and similarity [J]. *Ecology*, 2019, 100(12):e02852
- [6] MACKAY J R. The origin of hummocks, western Arctic coast, Canada [J]. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 1980, 17(8):996-1006
- [7] NUNGESSER M K. Modelling microtopography in boreal peatlands: hummocks and hollows [J]. *Ecological Modelling*, 2003, 165(2/3):175-207
- [8] 周华坤, 赵新全, 周立, 等. 青藏高原高寒草甸的植被退化与土壤退化特征研究 [J]. *草业学报*, 2005, 14(3):31-40
- ZHOU H K, ZHAO X Q, ZHOU L, et al. A study on correlations between vegetation degradation and soil degradation in the Alpine Meadow of the Qinghai-Tibetan Plateau [J]. *Acta Pratacultural Science*, 2005, 14(3):31-40
- [9] 刘双双, 王铭, 董彦民, 等. 草丘微地貌对苔草泥炭沼泽枯落物分解的影响 [J]. *生态学杂志*, 2018, 37(1):95-102
- LIU S S, WANG M, DONG Y M, et al. The influence of hummock microtopography on plant litter decomposition in *Carex* peat mire [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2018, 37(1):95-102
- [10] 吴娴诗, 赵成章, 马昕宇, 等. 高寒泥炭沼泽茵草与藏嵩草种群空间分布格局及其关联性 [J]. *生态学杂志*, 2024, 43(6):1621-1628
- WU X S, ZHAO C Z, MA X Y, et al. Spatial pattern and interspecific association of *Beckmannia syzigachne* and *Kobresia tibetica* in an alpine peatland [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2024, 43(6):1621-1628
- [11] XU Y B, LI Q, XIE S Y, et al. Composition and sources of heavy metals in aerosol at a remote site of Southeast Tibetan Plateau, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 845:157308
- [12] ZHU G Q, YUAN C X, GONG H D, et al. Effects of short-term grazing prohibition on soil physical and chemical properties of meadows in Southwest China [J]. *PeerJ*, 2021, 9:e11598
- [13] 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
- [14] QIAN H, RICKLEFS R E, WHITE P S. Beta diversity of angiosperms in temperate floras of eastern Asia and eastern North America [J]. *Ecology Letters*, 2005, 8(1):15-22
- [15] 周景钢, 李林, 魏识广. 南亚热带森林常见种和偶见种的功能多样性特征 [J]. *生态学报*, 2024, 44(2):699-711
- ZHOU J G, LI L, WEI S G. Influencing factors of functional redundancy and functional vulnerability of common and occasional species in south Asian tropical forests [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44(2):699-711
- [16] JOHNSTON C A, ZEDLER J B. Identifying preferential associates to initiate restoration plantings [J]. *Restoration Ecology*, 2012, 20(6):764-772
- [17] WANG M, WANG G D, WANG S Z, et al. Structure and richness of *Carex meyeriana* tussocks in peatlands of northeastern China [J]. *Wetlands*, 2018, 38(1):15-23
- [18] HE M R, XIN C M, MA M J. Change in grass hill size can signal species diversity changes and ecosystem state transitions during alpine wetland degradation [J]. *Ecological Indicators*, 2021, 132:108302
- [19] 牟晓明. 青藏高原东北缘高寒草甸植物群落空间格局研究 [D]. 兰州: 兰州大学, 2015:50
- MU X M. Study on the spatial pattern of plant community in alpine meadow on northeast [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2015:50

- sity, 2015:50
- [20] LI G Y, MU J P, LIU Y Z, et al. Effect of microtopography on soil respiration in an alpine meadow of the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Plant and Soil*, 2017, 421(1):147-155
- [21] WU X W, WANG Y C, SUN S C. Long-term fencing decreases plant diversity and soil organic carbon concentration of the Zoige alpine meadows on the eastern Tibetan Plateau[J]. *Plant and Soil*, 2021, 458(1):191-200
- [22] KOTROCZÓ Z, MAKÁDI M, KOCSIS T, et al. Long-term changes in organic matter content and soil moisture determine the degree of root and soil respiration[J]. *Plants*, 2023, 12(2):251
- [23] BIASI C, WANEK W, RUSALIMOVA O, et al. Microtopography and plant-cover controls on nitrogen dynamics in hummock tundra ecosystems in Siberia[J]. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 2005, 37(4):435-443
- [24] GRAB S. Aspects of the geomorphology, genesis and environmental significance of earth hummocks (thúfur, pounus): miniature cryogenic mounds[J]. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 2005, 29(2):139-155
- [25] LIU Y L, DU J Q, XU X L, et al. Microtopography-induced ecohydrological effects alter plant community structure[J]. *Geoderma*, 2020, 362:114119
- [26] XUE X, YOU Q G, PENG F, et al. Experimental warming aggravates degradation-induced topsoil drought in alpine meadows of the Qinghai - Tibetan Plateau[J]. *Land Degradation & Development*, 2017, 28(8):2343-2353
- [27] WANG Y B, WU Q B, TIAN L M, et al. Correlation of alpine vegetation degradation and soil nutrient status of permafrost in the source regions of the Yangtze River, China[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2012, 67(4):1215-1223
- [28] PEACH M, ZEDLER J B. How tussocks structure sedge meadow vegetation[J]. *Wetlands*, 2006, 26(2):322-335
- [29] HONG J T, MA X X, ZHANG X K, et al. Nitrogen uptake pattern of herbaceous plants: coping strategies in altered neighbor species[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2017, 53(7):729-735
- [30] WANG W Y, MA Y G, XU J, et al. The uptake diversity of soil nitrogen nutrients by main plant species in *Kobresia humilis* alpine meadow on the Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Science China Earth Sciences*, 2012, 55(10):1688-1695
- [31] LIU W J, CHEN S Y, ZHAO Q, et al. Variation and control of soil organic carbon and other nutrients in permafrost regions on central Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Environmental Research Letters*, 2014, 9(11):114013
- [32] WERNER K J, ZEDLER J B. How sedge meadow soils, microtopography, and vegetation respond to Sedimentation[J]. *Wetlands*, 2002, 22(3):451-466
- [33] CARDINALE B J, PALMER M A, SWAN C M, et al. The influence of substrate heterogeneity on biofilm metabolism in a stream ecosystem[J]. *Ecology*, 2002, 83(2):412-422
- [34] 齐清, 刘晓伟, 佟守正, 等. 苔草草丘恢复湿地的景观格局变化——以哈尔滨太阳岛为例[J]. *生态学报*, 2019, 39(14):5261-5267
- QI Q, LIU X W, TONG S Z, et al. Analysis of landscape pattern changes of restored tussock wetland in Sun Island, Harbin, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(14):5261-5267
- [35] 杨时海, 李英年, 蒲继延, 等. 三种高寒草甸植被类型植物群落结构及其土壤环境因子研究[J]. *草地学报*, 2006, 14(1):77-83
- YANG S H, LI Y N, PU J Y, et al. Investigation of the plant community and soil environmental factors of three alpine vegetation types[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2006, 14(1):77-83
- [36] 王誉陶, 毕玉婷, 王倩, 等. 山西亚高山草甸植物群落物种多样性的空间分异[J]. *中国农学通报*, 2018, 34(18):77-83
- WANG Y T, BI Y T, WANG Q, et al. Spatial differentiation of plant species diversity in subalpine meadows in Shanxi Province[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2018, 34(18):77-83
- [37] BISWAS S R, MALLIK A U, BRAITHWAITE N T, et al. Effects of disturbance type and microhabitat on species and functional diversity relationship in stream-bank plant communities[J]. *Forest Ecology and Management*, 2019, 432:812-822
- [38] NIU Y J, YANG S W, ZHU H M, et al. Cyclic formation of zokor mounds promotes plant diversity and renews plant communities in alpine meadows on the Tibetan Plateau[J]. *Plant and Soil*, 2020, 446(1):65-79
- [39] WU G L, LI X L, GAO J. The evolution of hummock-depression micro-topography in an alpine marshy wetland in Sanjiangyuan as inferred from vegetation and soil characteristics[J]. *Ecology and Evolution*, 2021, 11(9):3901-3916
- [40] 吕艳花, 赵明德, 周华坤, 等. 青海乱海子高寒湿地植物群落结构对土壤水分变化的响应[J]. *湿地科学*, 2017, 15(5):697-704
- LÜ Y H, ZHAO M D, ZHOU H K, et al. Response of plant community structure to soil water content in luanhaizi alpine wetlands, Qinghai Province[J]. *Wetland Science*, 2017, 15(5):697-704
- [41] ALADOS C L, ELAICH A, PAPANASTASIS V P, et al. Change in plant spatial patterns and diversity along the successional gradient of Mediterranean grazing ecosystems[J]. *Ecological Modelling*, 2004, 180(4):523-535
- [42] JI W, JESKE C. Spatial modeling of the geographic distribution of wildlife populations: a case study in the lower Mississippi River region[J]. *Ecological Modelling*, 2000, 132(1/2):95-104

- [43] 袁振,魏松坡,贾黎明,等. 河北平山片麻岩山区微地形植物群落异质性[J]. 北京林业大学学报,2017,39(2):49-57
YUAN Z, WEI S P, JIA L M, et al. Differentiation of vegetation characteristics on micro-topography in gneiss mountainous area of Pingshan County, Hebei Province of northern China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2017, 39(2):49-57
- [44] 王文颖,王启基,景增春,等. 江河源区高山嵩草甸覆被变化对植物群落特征及多样性的影响[J]. 资源科学,2006,28(2):118-124
WANG W Y, WANG Q J, JING Z C, et al. Effects of vegetation cover change of alpine kobersia meadow on plant community structure and diversity in source region of the Yangtze and Yellow River[J]. Resources Science, 2006, 28(2):118-124
- [45] 王萌,徐冰,张大勇,等. 内蒙古草原锡林河流域植物群落生物量及多样性沿土壤水分含量梯度的变化[J]. 北京师范大学学报(自然科学版),2016,52(4):445-449
WANG M, XU B, ZHANG D Y, et al. Changes in plant community biomass and biodiversity along soil moisture content gradients in Xilin River basin, Inner Mongolia[J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2016, 52(4):445-449
- [46] 倪红伟,马克明,赵伏臣. 小叶章种群分布格局的分形特征 I 计盒维数[J]. 植物研究,2000,20(2):229-234
NI H W, MA K M, ZHAO F C. The fractal character of the distribution pattern of *Deyeuxia angustifolia* population I. box dimension[J]. Bulletin of Botanical Research, 2000, 20(2):229-234
- [47] 齐清. 苔草草丘湿地景观-结构-碳汇功能变化对水文条件的响应[D]. 哈尔滨:中国科学院大学(中国科学院东北地理与农业生态研究所),2021:3
QI Q. Responses of *Carex* tussock wetland landscape-structure carbon sink function changes to hydrological conditions [D]. Harbin:Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, 2021:3
- [48] 王铭,李兴丽,董彦民,等. 长白山区苔草泥炭沼泽植物物种多样性[J]. 应用生态学报,2021,32(6):2138-2146
WANG M, LI X L, DONG Y M, et al. Plant species diversity of *Carex* peat mire in Changbai Mountains, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021, 32(6):2138-2146

(责任编辑 闵芝智)