

doi:10.11733/j.issn.1007-0435.2026.08.027

引用格式:张宁,魏海娟,李佳,等.短期围封对藏东高寒草地土壤质量与多功能性的影响[J].草地学报,2026,34(8):3049—3059

ZHANG Ning, WEI Hai-juan, LI Jia, et al. Effects of Short-term Enclosure on Soil Quality and Multifunctionality of an Alpine Meadow in the Eastern Qinghai-Xizang Plateau[J]. Acta Agrestia Sinica, 2026, 34(8):3049—3059

短期围封对藏东高寒草地土壤质量 与多功能性的影响

张宁^{1,2#}, 魏海娟^{3#}, 李佳^{1,2}, 孙建⁴, 张林⁴, 罗栋梁⁵, 王金牛^{1,2,3*}

(1. 中国科学院成都生物研究所, 四川 成都 610213; 2. 西藏生态安全屏障生态监测网络芒康生物多样性与生态监测站, 西藏 昌都 854000; 3. 西藏自治区生态环境遥感监测中心, 西藏 拉萨 850030; 4. 中国科学院青藏高原研究所, 北京 100101; 5. 中国科学院西北生态环境资源研究院, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 围栏封育是退化草地恢复的重要措施,但短期围封对土壤质量及多功能性的影响尚不明确。本研究以西藏三江并流区典型高寒草地为对象,比较连续两年围封与自由放牧(对照)对土壤理化性质、植物群落多样性及土壤多功能性的影响。结果表明:(1)围封显著影响土壤温度、电导率和有机碳含量($F_1=6.945$, $F_2=5.216$, $F_3=25.344$, $P<0.05$);(2)与2022年相比,2023年围封提高了植物群落多样性指数(0.966)和禾本科重要值(19.296),自由放牧对照中植物根冠比(17.671)、杂类草(8.215)和莎草科重要值(90.628)增加;(3)Mantel检验表明,2023年植物多样性与土壤理化性质相关性增强,放牧对照下群落对土壤变化更敏感,围封则增加了土壤因子间相关性。(4)多功能性分析表明,围封处理下生态系统功能较稳定,而放牧对照中高阈值多功能性波动较大。综上,短期围封对土壤理化性质的直接影响有限,但可通过调节植物群落结构间接影响土壤多功能性。

关键词: 西藏三江并流区;围栏封育;土壤多功能性;多阈值法;生态恢复

中图分类号:S812.2

文献标识码:A

文章编号:1007-0435(2026)08-3049-11

Effects of Short-term Enclosure on Soil Quality and Multifunctionality of an Alpine Meadow in the Eastern Qinghai-Xizang Plateau

ZHANG Ning^{1,2#}, WEI Hai-juan^{3#}, LI Jia^{1,2}, SUN Jian⁴, ZHANG Lin⁴, LUO Dong-liang⁵, WANG Jin-niu^{1,2,3*}

(1. Chengdu Institute of Biology, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan Province 610213, China; 2. Mangkang Biodiversity and Ecological Monitoring Station, Tibet Ecological Safety Monitor Network, Qamdo, Xizang 854000, China; 3. Tibet Autonomous Region Remote Sensing Monitoring Center for Ecological Environment, Lhasa, Xizang 850030, China; 4. Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 5. Northwest Institute of Eco-environmental Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou, Gansu Province 730000, China)

Abstract: Enclosure is an important measure for restoring degraded grasslands, however, the effects of short-term enclosure on soil quality and multifunctionality of the alpine meadow remain unclear. In this study, we compared the two years effects between enclosure and free grazing (control) on soil physicochemical properties, plant community diversity and soil multifunctionality of a typical alpine meadow in the Xizang Three Parallel Rivers region. The results showed that: (1) short-term fencing significantly affected soil temperature, electrical conductivity and soil organic carbon ($F_1=6.945$, $F_2=5.216$, $F_3=25.344$, $P<0.05$). (2) Compared with 2022, plant community diversity (0.966) and the importance value of *Poaceae* (19.296) were greater than those under fencing in 2023, whereas root-shoot ratio (17.671) and the importance value of *Forbrich* (8.215)

收稿日期:2026-01-04;修回日期:2026-03-09

基金项目:西藏自治区科技计划(XZ202401JD0016);四川省自然科学基金项目(2024NSFSC0352)资助

作者简介:张宁(1997-),女,汉族,山西晋城人,博士研究生,主要从事高寒生态系统植物功能性状研究,E-mail:zhangning@cib.ac.cn;
#魏海娟(1983-),女,汉族,青海西宁人,硕士,主要从事西藏自治区生态环境遥感监测研究,E-mail:308703412@qq.com;*通信作者
Author for correspondence, E-mail: wangjin@cib.ac.cn

were increased accordingly, as well as *Cyperaceae* (90.628). (3) Mantel tests indicated that the correlations between plant diversity and soil physicochemical properties were strengthened in 2023. For grazing control treatment, plant communities were more sensitive to soil changes, while enclosure enhanced correlations between different soil factors. (4) Multifunctionality analysis presented results that ecosystem functions for this alpine meadow were relatively stable under short-term enclosure, whereas greater fluctuations at high-threshold occurred under a control grazing. Overall, the short-term enclosure had limited direct effects on soil physicochemical properties but may indirectly influence soil multifunctionality by regulating plant community structure.

Key words: Xizang Three Parallel Rivers region; Grazing exclusion; Soil multifunctionality; Multi-threshold approach; Ecological restoration

青藏高原被誉为“世界屋脊”和“亚洲水塔”,约85%的区域被草地所覆盖^[1],草地作为全球生态系统的主要类型之一,在碳汇形成、水源涵养、水土保持、畜牧业持续发展和生物多样性维持方面具有不可替代的物质基础与生态功能价值^[2]。全球气候变化背景下,高寒地区温度与降水发生更为深刻的改变,加剧土壤冻融频繁交替^[3]、植被生长季改变、生物地化循环速率降低^[4]等。高寒草地生态系统的碳、氮、磷等养分循环、生产力以及植被—土壤互馈,对于增温、放牧等干扰措施下响应敏感^[5],对生态系统功能变化具有“指示器”意义^[6],是探究高原生态系统响应气候变化和人类活动叠加效应的重要途径。因此,理解全球变化背景下高寒草地结构与功能的变化过程,对青藏高原的局地与区域的生态系统管理具有重要科学意义。

放牧是人类利用高寒草地最为常见、影响深远的管理方式^[7]。长期以来,牧民在草原资源利用过程中,形成了以草地为生产与生活基础的传统生计方式,适当放牧有利于促进生境异质性的增加,维持物种多样性、增强草地系统的物质循环^[8]。然而,当草地恢复力与利用强度之间的平衡被打破后^[9],过度放牧通过各路径对植被结构^[10]、土壤理化性质^[9]、微生物群落^[11]及生物地球化学循环造成深刻影响^[7-8, 12]。高寒草地退化风险日益加剧,围栏封育作为恢复草地生态系统结构与功能的重要生态工程措施被广泛应用^[13]。围栏可以通过减少采食和践踏来调节干扰强度^[14],改变粪尿返还与动物活动路径,从而干预植被和土壤的恢复过程^[15]。

3~5年的短期围栏管理措施可提升地上生物量与植被覆盖,但其对土壤营养储量、微生物结构、土壤理化性质及生态系统多功能性的作用仍缺乏统一认识^[16]。多种生态系统功能与服务的同时维持被定义为生态系统多功能性(Ecosystem multifunctionality, EMF),其驱动机制已成为全球气候变化研究中关注的焦点^[17],植物多样性、微生物多

样性、非生物因素等在提升干旱地区多种生态系统功能中发挥重要作用^[18]。禁牧或围栏措施对生态系统多功能性的影响呈非线性、“滞后”^[16]或“恢复-衰退”^[19]式趋势,生态系统多功能性的改变需要综合考虑围栏持续时间、初始退化程度、降水格局、植物凋落物积累、微生物响应以及它们的交互效应。

土壤多功能性是衡量土壤生态系统健康与稳定的多个维度的重要综合指标^[16],其变化可反映生态系统恢复过程中不同功能组分的权衡与协同关系。然而,现有研究多集中于中长期围栏(5年以上)的生态效应,针对短期围栏(1~3年)则相对有限^[20],尤其是在高寒草地,短期围栏能否通过改善土壤理化性质、促进土壤功能恢复并提高整体多功能性,尚需要实证研究进行综合评判。因此,我们以青藏高原东部典型高寒草地为对象,通过2年的短期围栏与持续放牧对比处理研究,拟探讨:(1)短期围栏对高寒草地土壤理化性质的影响及其与地上多样性的互馈机制;(2)土壤多功能性对围栏年限的动态响应规律。本研究的结果将为高寒草地生态系统恢复机制提供科学基础数据支撑,并为以围栏为主要措施的草地经营管理与政策制定提供理论与实践参考依据。

1 材料与方法

1.1 样地概况与试验设计

研究样地选取位于青藏高原东部昌都市芒康县洛尼乡的洛尼村(图1a, 98°34.0631'E, 29°53.6289'N, 海拔3858 m)。由澜沧江、金沙江、怒江所形成的三江并流区是全球生物多样性热点区域之一(图1b),受西南季风和东南季风影响,属高原温带半湿润季风性气候^[21],冬季寒冷少雨、夏季温暖多雨,8月份降水为563 mm,全年最多。全年气温波动明显,草本层日均温度-7.12~17.04℃,日最高温-3.84~25.53℃,日最低温-20.08~

11.51℃。样地植被类型为高山草甸,优势代表物种为高山嵩草(*Carex parvula*)、冷地早熟禾(*Poa pratensis*)、狭叶委陵菜(*Argentina stenophylla*),除此之外还有圆叶小堇菜(*Viola biflora*)、川西小黃菊(*Tanacetum tatsienense*)、狭叶圆穗蓼(*Bistorta macrophylla*)、高原毛茛(*Ranunculus tanguticus*)、细果角茴香(*Hypocoum leptocarpum*)等(图1c-e)。

2019年8月,在研究区选择地形、坡度、坡向及植被类型基本一致的高寒草地作为实验样地。研究区为当地牧民传统放牧草地,主要放牧牲畜为犏牛、牦牛,实行全年自由放牧,放牧强度约为中度放牧水平(3~5羊单位·ha⁻¹,根据入户调查及红外相机数据获得)。所有样地在围栏建立前均处于长期自由放牧状态,建立围栏的区域实施围封管理措施,而周围区域保持原有自由放牧方式。

在研究区内根据地形和植被状况随机设置3个4 m×20 m的围栏作为围封处理,每个围栏内设置3个长期监测小区(2 m×4 m),小区距离围栏边缘至少1 m,以避免边缘效应,共设置9个监测小区。同时,在围栏外约100 m相邻自由放牧区域选择地形地貌、土壤类型及植被状况相似的区域设置9个监测小区作为对照,以保证实验处理之间具有可比性。

分别于2022年和2023年7月,在每个监测小区内结合微地形条件,选择被覆盖均匀、生境相对稳定的区域布设1个1 m×1 m的样方,用于植物群落调查和土壤样品采集。

1.2 样品采集与指标测定

选取样方进行物种组成、群落结构及多样性监测,记录样方内所有物种及其数量,用于计算植物多样性指数。采用全株挖掘法采集样方内草本植物个体,挖掘深度达到植物生长最大深度,将植株连同地下部分整体挖出,尽量避免破坏根茎系统。编号后装入密封袋保存,用于后续生物量测定。

土壤样品采用“三点取样法”进行采集。每个围栏内设置三个样方,在每个样方内选择3个取样点。土壤按深度分为0~10 cm,10~20 cm和20~30 cm三个土层。在每个取样点,使用环刀分别从三个土层各采集1个土壤样品。同一样方内3个取样点相同土层的土样混合为1个混合样,从而每个样方获得3个不同土层的土壤样品。每个围栏内设置3个小区,共获得9个土壤样品,围栏内共获得27个土壤样品。围栏外样地采用与围栏内相同

的方法进行采样,按照相同的分层和混合方式获取土壤样品,最终围栏内外共获得54个土壤样品。新鲜样品用自封袋保存,及时带回实验室测量相关指标。另外,不同处理土壤下方10 cm处放置纽扣式温度计(HOBO MX2201)以获得土壤温度,测量间隔时间为15 min。

样品带回后,先将洗净的植物全株置于105℃烘箱中杀青30 min,后65℃烘干至恒重,烘干后将根系分离,称重为地下生物量(Below-ground biomass),剩余部分为地上生物量(Above-ground biomass)。将新鲜土样中的植物残体和石块挑选出来,风干后过100目土筛用于化学指标测定。采用重铬酸钾外加热氧化法测定土壤有机碳(Soil organic carbon, SOC),采用紫外分光光度计测定硝态氮(Nitrate nitrogen, NO₃⁻-N)和铵态氮(Ammonium nitrogen, NH₄⁺-N),采用碳酸氢钠浸提-钼锑抗分光光度法测定土壤有效磷(Soil available phosphorus, SAP),用电位法和电导率仪分别测定土壤悬液的pH值和电导率(Soil electrical conductivity, EC)(水土比为2.5:1),使用手持式数字土壤紧实度仪测定土壤紧实度(Soil compactness, SC)。

1.3 群落水平相关指标计算

1.3.1 物种重要值计算 采用重要值(Important value, IV)表征特定物种在群落内的相对重要性,计算公式如下:

重要值=(相对盖度+相对高度+相对密度+相对地上生物量)/4×100;

相对盖度=(某种植物的盖度/全部植物盖度总和)×100%;

相对高度=(某种植物的高度/全部植物高度总和)×100%;

相对密度=(某种植物的密度/全部植物密度总和)×100%;

相对地上生物量=(某种植物地上生物量/全部植物地上生物量总和)×100%。

1.3.2 群落多样性指标计算 采用Shannon-Wiener多样性指数、Simpson优势度指数、Pielou均匀度指数和Margalef丰富度指数反映群落的物种组成、均匀程度与丰富程度,群落多样性是衡量该区域物种多样性的重要指标,计算公式如下:

Shannon-Wiener多样性指数:

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

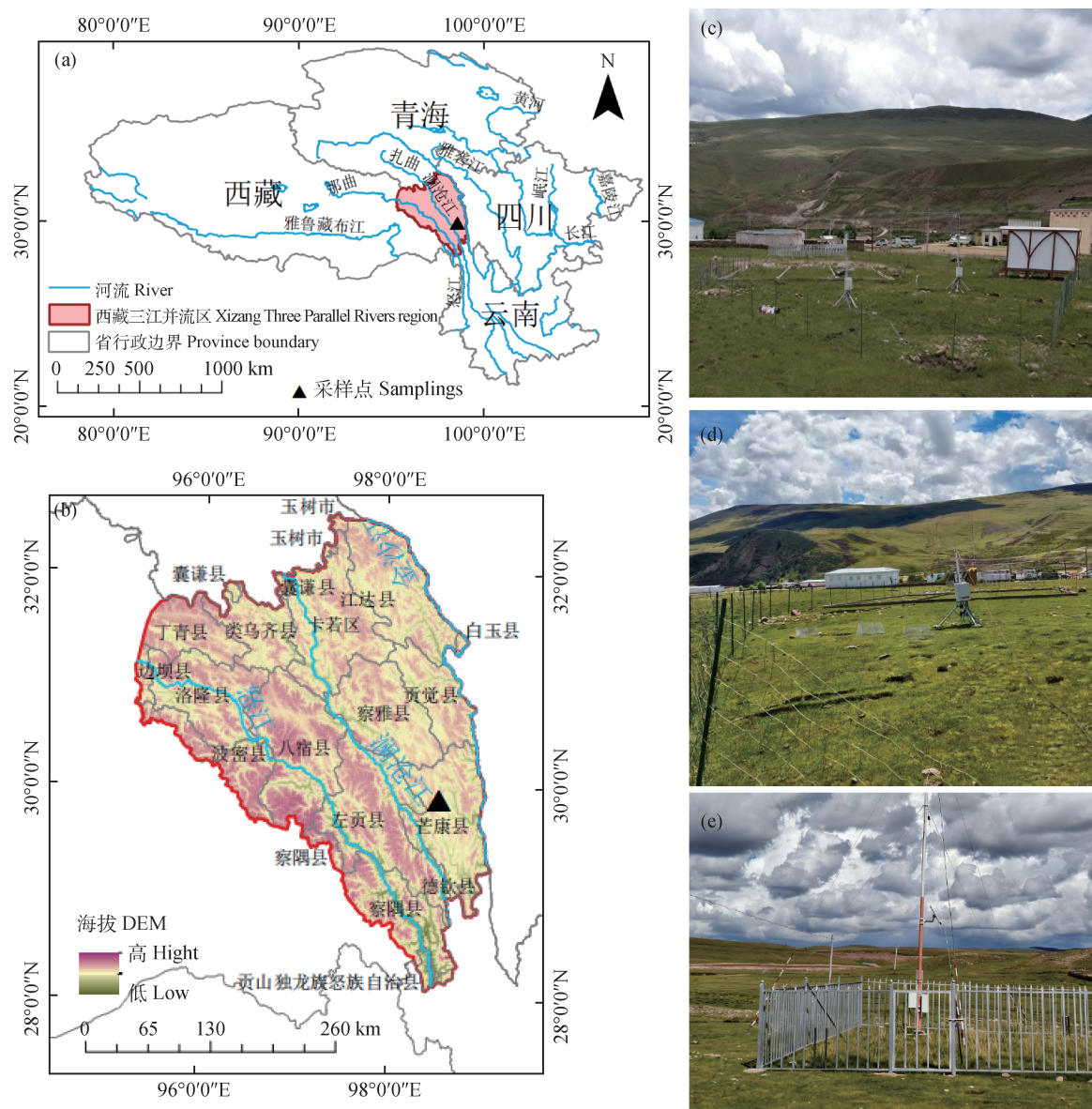


图 1 研究区概况图

Fig. 1 Overview map of the study area

注: 审图号 GS(2022) 4308 号。(a), 研究区概况图; (b), 采样点位置; (c~e), 采样点环境

Note: Based on No. GS(2022) 4308. (a) Map of the study area; (b) Locations of sampling sites; (c-e) Environment of the sampling site

Simpson 优势度指数: $\chi = 1 - \sum_{i=1}^S P_i^2$

Pielou 均匀度指数: $E = H / \ln S$

Margalef 丰富度指数: $DMG = (S - 1) / \ln N$

在上述式子中, P_i 为样方内的物种 i 的相对重要值, $P_i = N_i / N$ (N_i 为物种 i 的绝对重要值, N 为物种 i 所在样方的所有物种的绝对重要值总和), S 为样方内的物种数量, N 为样方内的全部植株数量。

1.3.3 土壤功能多样性计算 选取植物多样性指数、土壤 pH 值、土壤容重、硝态氮、铵态氮、土壤紧实度、土壤电导率等 7 种指标通过多阈值法 (Multi-threshold method) 来评价短期围栏放牧对土壤多功

能性的影响。多阈值法^[22]是指通过设置阈值, 计算超过阈值的功能数来求得多功能性指数, 避免了平均值中将所有功能赋予相同权重的弊端而被广泛应用, 其计算公式如下:

$$MF_i = \sum_{i=1}^F (r_i(f_i) > t_i)$$

其中, F 是功能总数, f_i 是土壤多功能 i 的测定值, t_i 表示阈值, r_i 为将 f_i 转化为正值的数字函数。

1.4 数据分析

对所有数据进行正态性和方差齐性检验。使

用配对样方 T 检验 (Paired-samples t-test) 分析围封处理对草甸植物和土壤理化性质的影响,以及年份间 (2022 年与 2023 年) 草甸植物群落和土壤的差异,使用单因素方差分析土壤理化性质的土层差异,使用一般线性模型 (General linear model, GLM) 双因素方差分析围封与年份及其交互作用对草甸群落多样性的影响,利用三因素方差分析围封、年份与土层因素对土壤理化性质的影响,对群落特征与土壤理化性质分别进行围封与年份间的 mantel test 相关性检验 ($\alpha=0.05$),相关性分析使用 0~10 cm 土层的土壤理化性质进行计算,由于 2022 年未测定土壤有机碳和有效磷,因此相关分析仅基于具有完整数据的变量进行,探索植物-土壤互馈是否存在围封处理下的年份差异。利用 R 软件中

“dplyr” “tidyr” “stats” “multcomp” “vegan” “multi-func” “ggplot” 完成方差分析、Mantel 分析与土壤多功能性分析,方差分析绘图使用 Origin 2021 完成。

2 结果与分析

2.1 围封对土壤理化性质的影响

相较于自由放牧,围封显著影响了土壤温度、电导率和有机碳含量 (图 2d, e, h, $P<0.05$),而对其他土壤理化性质的影响不显著。在两个研究年份中 0~10 cm 土壤温度显著高于 20~30 cm (图 2d),土壤紧实度仅在 2022 年且围封处理下随土层深度的增加而显著增加;与 2022 年相比,2023 年放牧对照下土壤紧实度随土层 (0~10 cm, 10~20 cm 和

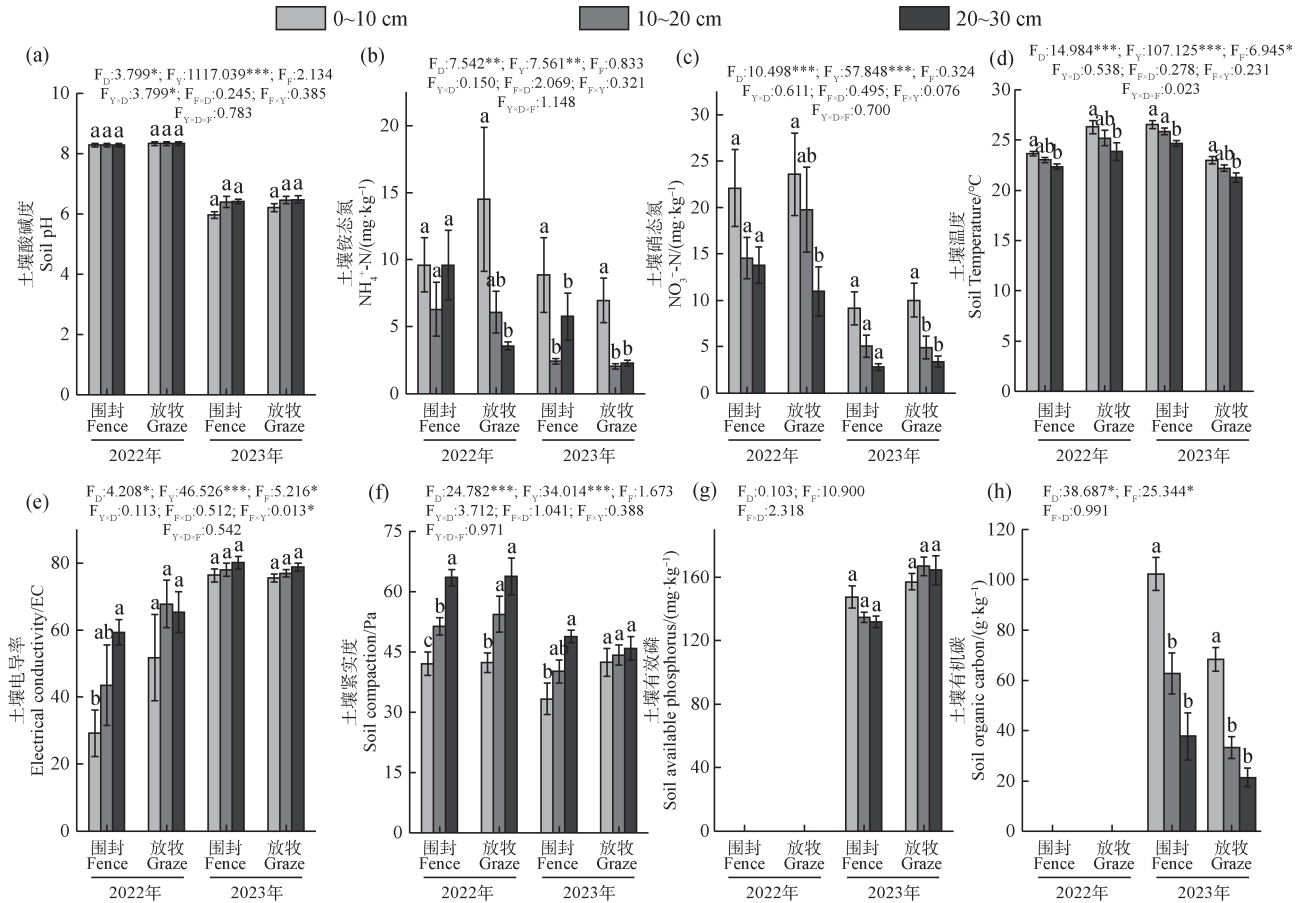


图2 围封处理与自由放牧对照下土壤理化性质的差异比较

Fig. 2 Comparison of differences in soil physical and chemical properties under enclosure and free grazing conditions

注:不同字母表示同一年份同一处理下土层间存在显著差异; F_D ,土层主效应; F_Y ,年份主效应; F_F ,围封主效应; $F_{Y \times D}$,年份与土层的交互作用; $F_{F \times D}$,围封与土层的交互作用; $F_{F \times Y}$,围封与年份的交互作用; $F_{Y \times D \times F}$,年份、土层与围封的交互作用;基于所有样本数据进行的三因素方差分析结果;*, $P<0.05$,**, $P<0.01$,***, $P<0.001$

Note: Different letters indicate significant differences among soil layers in the same year and under the same treatment. F_D , Depth effect; F_Y , Year effect; F_F : Fence effect; $F_{Y \times D}$, Year $\times$ Depth interaction; $F_{F \times D}$, Fence $\times$ Depth interaction; $F_{F \times Y}$, Fence $\times$ Year interaction; $F_{Y \times D \times F}$, Year $\times$ Depth $\times$ Fence interaction. Represent the results of the three-way ANOVA based on all data. *, $P<0.05$; **, $P<0.01$; ***, $P<0.001$

20~30 cm)增加差异有所减弱(图 2f),土壤铵态氮和硝态氮在放牧对照下 0~10 cm 显著高于 20~30 cm(图 2b, c, $P<0.05$),而在围封处理下不同土层间差异不显著。总体而言,除土壤有效磷外(图 2g),土层深度和年份对大多数土壤理化性质均具有显著主效应($P<0.05$)。此外,土层与年份对土壤 pH 值存在显著交互作用(图 2a),而围封处理与年份对土壤电导率存在显著交互作用(图 2e);土层、年份与围封处理三因素交互作用均未达到显著水平(图 2)。

2.2 围封对不同植物群落特征的影响

双因素方差分析表明,围封处理对 Shannon - Wiener 指数具有显著影响(表 1, $P=0.037$),而年份及其与围封处理的交互作用不显著。进一步的简单效应分析显示,2022 年围封处理与放牧对照间 Shannon-Wiener 指数差异不显著,而 2023 年围封处理显

著高于放牧对照。年份对 Margalef 丰富度指数表现出极显著的主效应($P<0.001$),围封与年份对莎草科(Cyperaceae)和禾本科(Poaceae)的重要值存在显著的交互作用($P<0.05$)。Pielou 均匀度指数、Simpson 多样性指数、杂类草(Forb)重要值和根冠比未受到围封、年份及其交互作用的显著影响。

由表 1 可知,禾本科 2022 年放牧样地的重要值(53.06)远高于围栏内(12.43),但至 2023 年,放牧对照样地调查样方中未记录到禾本科植物,因此其重要值为 0,围封处理仍保持一定水平(19.30)。根冠比仅表现出受年份影响的边缘显著性($P=0.071$),2023 年的根冠比(围封:6.07;放牧:17.67)整体上远高于 2022 年(围封:0.017;放牧:0.014),但围封处理及其与年份的交互效应均不显著。围封能有效提升群落多样性,但其对关键植物功能群(如莎草科和禾本科)的影响强烈依赖于年份,体现了环境因子与管理措施之间复杂的交互作用。

表 1 围封处理和年份对植物群落特征的影响

Table 1 Effects of fence closure and year on plant community characteristics

性状 Traits	2022 年		2023 年		围封处理 P_F	年份差异 P_Y	交互效应 $P_{F \times Y}$
	围封 Fence	放牧 Graze	围封 Fence	放牧 Graze			
多样性指数 Shannon Wiener	0.591±0.108 ^a	0.526±0.072 ^a	0.966±0.137 ^a	0.558±0.096 ^b	0.037	0.068	0.121
均匀度指数 Pielou	0.635±0.093 ^a	0.582±0.047 ^a	0.605±0.069 ^a	0.409±0.068 ^a	0.096	0.168	0.328
优势度指数 Simpson	0.630±0.075 ^a	0.680±0.046 ^a	0.484±0.066 ^a	0.677±0.067 ^a	0.073	0.259	0.278
丰富度指数 Margalef	0.285±0.053 ^a	0.261±0.036 ^a	0.792±0.089 ^a	0.572±0.066 ^a	0.070	<0.001	0.140
莎草科 Cyperaceae	82.191±10.791 ^a	45.127±18.539 ^a	67.843±12.165 ^a	90.628±5.793 ^a	0.579	0.233	0.028
禾本科 Poaceae	12.429±7.922 ^a	53.057±18.379 ^a	19.296±9.777 ^a	0.000±0.000 ^b	0.350	0.051	0.014
杂类草 Forb	5.377±3.761 ^a	1.815±1.151 ^a	4.060±2.122 ^a	8.215±5.967 ^a	0.937	0.503	0.313
根冠比 Root-shoot ratio	0.017±0.003 ^a	0.014±0.003 ^a	6.074±1.631 ^a	17.671±12.344 ^a	0.363	0.071	0.363

注: P_F , 围封效应; P_Y , 年份效应; $P_{F \times Y}$, 围封与年份交互效应; 表中数值为平均值±标准误; 不同小写字母表示同一年份内围封与放牧情景之间差异显著($P<0.05$); P_F , P_Y 和 $P_{F \times Y}$ 为基于所有样本数据进行的双因素方差分析结果

Note: P_F , Fence effect; P_Y , Year effect; $P_{F \times Y}$, Fence $\times$ Year effect. Values in the table are presented as mean $\pm$ SE. Different lowercase letters represent the differences under the fencing grazing treatment in the same year. P_F , P_Y , and $P_{F \times Y}$ represent the results of the two-way ANOVA based on all data

2.3 土壤理化性质对植物多样性的影响

2022 年放牧对照下,土壤理化性质间不存在显著的相关关系,仅在 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 与 Pielou 多样性指数间呈现显著相关性,说明干扰下植物群落多样性对土壤变化的敏感性较低。围封处理下,土壤理化性质之间相关性增强,土壤温度与 pH 值、土壤紧实度与土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 间存在显著的正相关关系。各指数与土壤理化性质间不存在显著相关关系,这表明短期围封对植物多样性与土壤性质的联动效应尚未形成,且土壤过程可能处于恢复早期的相对独立阶段(图 3a)。

对比 2022 年与 2023 年的 Mantel 检验结果,土

壤因子与多样性指数的相关性路径及系数发生了明显变化,Shannon-Wiener, Pielou, Simpson 指数与土壤 pH 值存在极显著的相关性(图 3b, $P<0.01$), Simpson 指数还受到土壤电导率和土壤有效磷的显著影响($P<0.01$)。土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 与 Margalef 指数相关,在持续放牧作用下,植物群落结构对土壤理化性质的响应增强。2023 年围封处理下,土壤电导率与土壤温度显著正相关,与土壤 pH 值显著负相关(图 3, $P<0.01$), Margalef 多样性指数与土壤 pH 值, Pielou 与土壤 SOC 的 Mantel 相关达到显著水平($P<0.05$)。

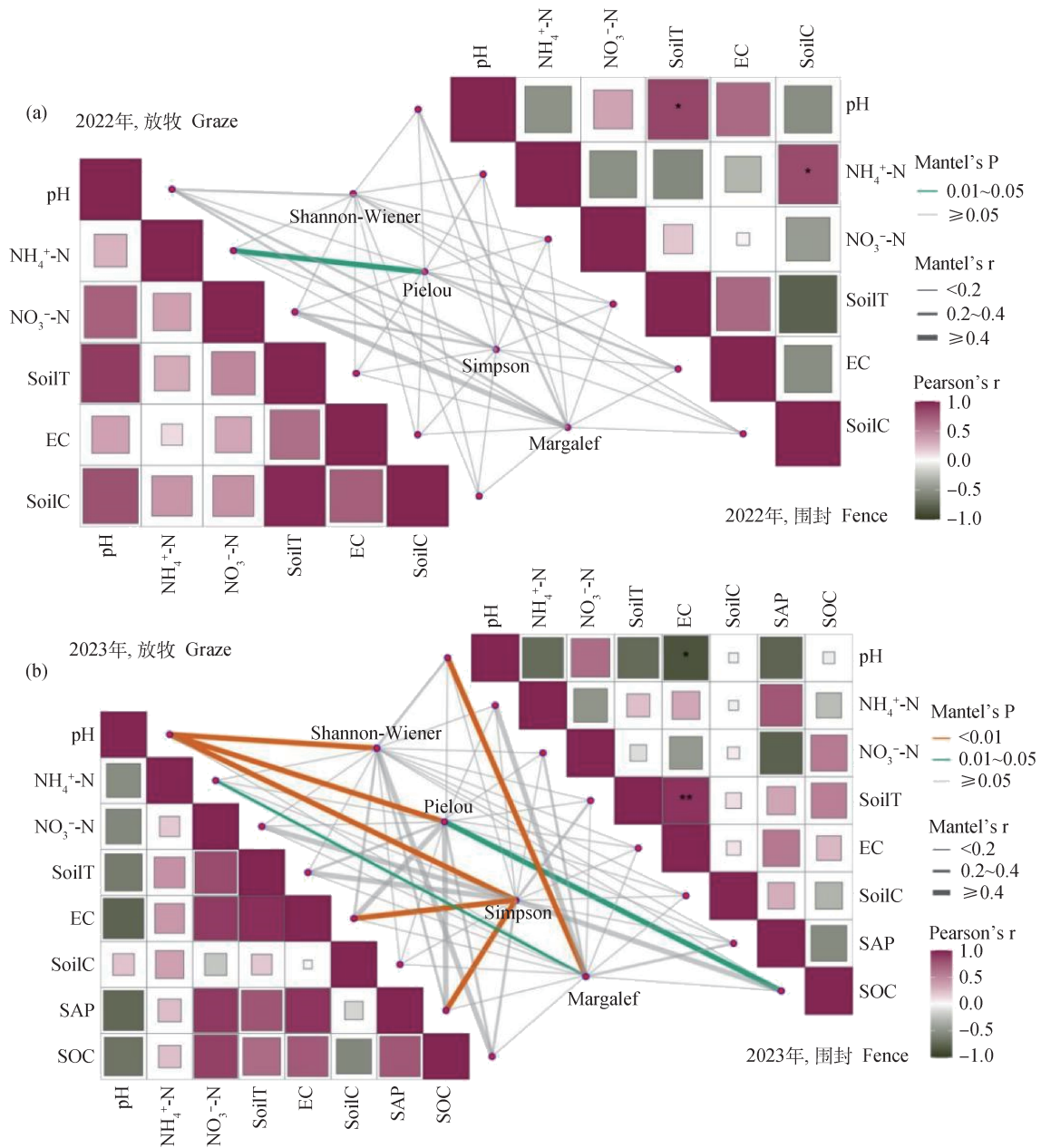


图 3 不同年份和围封处理下的 Mantel test 相关性分析

Fig. 3 Mantel test for correlation analysis over different years and fence closure

注: Fence, 围封处理; Graze, 放牧对照; pH, 土壤酸碱度; $\text{NH}_4^+\text{-N}$, 铵态氮; $\text{NO}_3^-\text{-N}$, 硝态氮; SoilT, 土壤温度; EC, 土壤电导率; SoilC, 土壤紧实度; SAP, 土壤有效磷; SOC, 土壤有机碳

Note: $\text{NH}_4^+\text{-N}$, Ammonium nitrogen; $\text{NO}_3^-\text{-N}$, Nitrate nitrogen; SoilT, Soil Temperature; EC, Soil electrical conductivity; SoilC, Soil compactness; SAP, Soil available phosphorus; SOC, Soil organic carbon

2.4 围封对土壤多功能性的影响

2022 年围封处理下, 在功能阈值为 13%~97%, 功能多样性指数随植物多样性呈现“负-正-负”的相关性, 在阈值为 39% 时, 这种正相关关系达到最大, 斜率为 90% 时, 负关系最大(图 4a); 放牧对照下, 功能多样性指数与植物多样性在 10%~14% 与 32%~35% 存在正相关关系, 而在其他阈值范围内则均为负相关关系(图 4b)。整体而言, 2022 年土壤多功能性与植物多样性呈现负相关关系(图 4e,f)。

2023 年围封处理下, 随着功能阈值从 13% 增至 97%, 功能多样性指数与植物多样性呈现正相关关系, 在阈值为 75% 时, 这种正相关关系达到顶峰, 斜率为 3.8, 这意味着每增加一个单位的物种多样性, 功能数增加 3.8(图 4c,g)。在中高阈值区(>60%)出现明显的功能增加波动, 说明围封对高阈值功能的维持具有更强的作用(图 4c,g)。放牧对照多功能性波动较大, 在 55%~58% 和 78%~81% 与植物多样性呈现负相关关系(图 4d,h)。

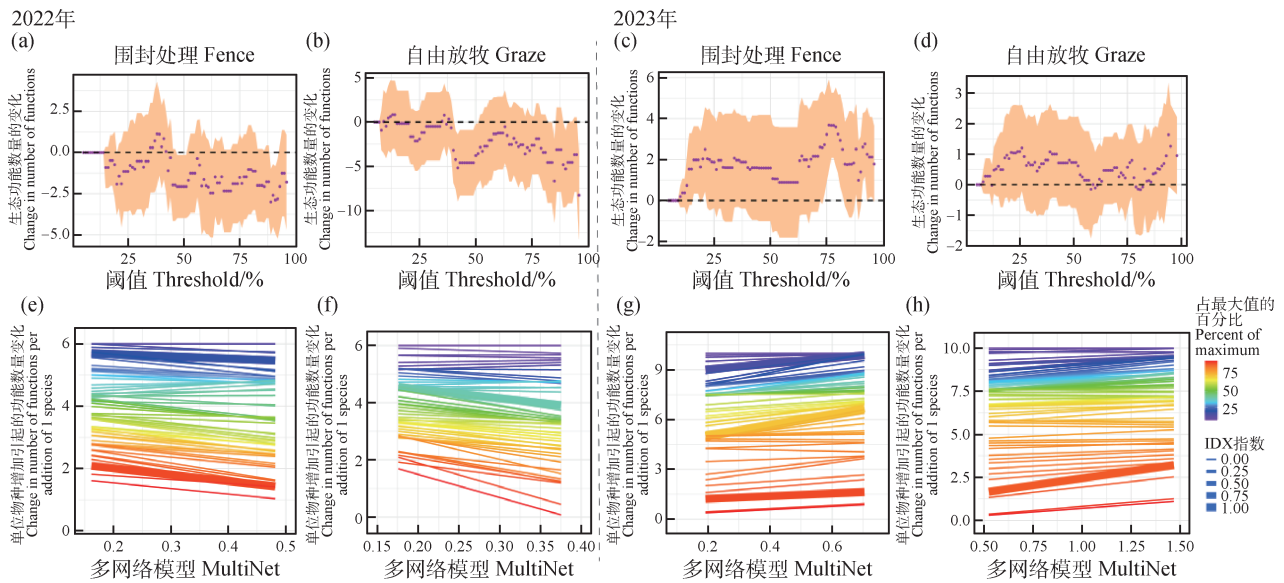


图 4 多阈值法比较围封处理与自由放牧对高寒草地生态系统土壤多功能性的影响

Fig. 4 Comparison of the effects of fence closure and free grazing on soil multifunctionality in an alpine meadow ecosystem by multi-threshold approach

3 讨论

3.1 土壤理化性质短期围封恢复的滞后性与干扰累积效应

土壤理化性质受到土层和年份的显著影响,对围封处理具有显著的土层差异。土壤电导率和土壤温度对不同管理措施响应明显^[23]。土壤水分条件会影响盐分的溶解、迁移及淋溶,而pH值的变化通常与土壤中盐基离子的动态平衡有关,这些过程共同影响土壤导电率,三者在一定程度上反映了土壤盐分的迁移与积累过程,而对植被生长造成影响^[24]。放牧会压实土壤,造成孔隙度及渗透率降低,加之食草动物产生大量排泄物(如粪便和尿液),从而影响土壤水盐平衡^[25]。前人在不同草地类型的研究中发现,围封通过提高植被覆盖度、减少土壤水分蒸发、促进盐基离子在土壤表层富集,从而导致土壤pH值升高^[22]。然而,本研究未观察到围封对土壤pH值的显著影响,有研究表明,围封对土壤pH值的影响具有明显的区域差异,受到放牧强度、围封年限、气候条件以及土壤类型等多种因素的共同调控。青藏高原高寒草甸在短期或中期围封处理后,并不会显著改变土壤pH,而是更多体现在土壤水分、养分或地上生物量上^[26]。此外,在降水较高或淋溶作用较强的地区,植被恢复所带来的有机质输入和根系分泌物可能导致土壤酸化,从而抵消盐基离子积累对pH值的升高作用^[27]。本研究表层土壤pH值则较其他

两层较低,这可能是因为凋落物的积累导致土壤腐殖质增加,促进表层土壤pH值的降低^[28]。综合说明土壤pH值的空间分异受到结构性因素(土壤母质、地形、气候、土壤利用方式等)和随机性因素的共同作用^[29]。

表层土壤养分来源包括植物凋落物与动物排泄物,故0~10 cm土层拥有最高的土壤氮含量与有机碳^[30]。同时放牧造成植物根系分布表层化,土壤质地遭到破坏,蓄积养分能力变差,土壤有机碳含量随土层深度增加而下降^[23];2023年围封处理下土壤养分含量低于2022年,这可能是由于围封减少了牲畜粪尿等外源养分输入,缺少干扰导致生物地球化学循环减缓,从而降低了土壤养分的补给^[31]。2023年围封处理下的土壤有效磷含量低于放牧对照则是由于围封为植物生长提供了一个稳定的环境,促进了植物对磷的吸收^[31]。2022年与2023年相比,部分土壤理化性质在围封、放牧情景下在土层间变化较弱,说明短期围封对土壤改善的直接效应有限,土壤过程通常需要多个生长季才能积累恢复效应^[5]。但是,2023年放牧对照下土壤表现出更明显的酸化与养分波动特征,围封处理下pH值,土壤温度及EC之间相关性增强,且与多个植物多样性指数相关联,表明随着围封时间的增加,土壤状态不断改善,符合土壤恢复滞后于植被恢复的理论^[32]。

3.2 植物性状对环境筛选的差异响应促进群落结构恢复

2023年植物 Shannon-Wiener 指数对围封显著响应, Margalef 多样性指数在 2023 年显著高于 2022 年, 说明围封缓解了放牧等人为因素对草地的干扰, 群落结构得以恢复^[33]。青藏高原高寒草地的物种多样性指数经过六年禁牧后开始出现下降^[34], 这可能源于物种间对有限资源的激烈竞争, 而资源竞争能力弱的物种将会消失, 同时增加外来物种入侵的几率^[35]。围栏内外优势物种与群落结构并无显著差异, 是围封持续时间、土壤质量、植被类型等综合作用的结果^[36]。莎草科与禾本科植物的重要性受到年份和围封处理的交互作用, 且显著高于杂类草。与放牧对照相比, 围封样地群落莎草科的重要值相对较低, 放牧对照群落中以耐攀折、耐践踏的为优势物种, 分蘖能力强的植物可以抑制其他植物物种发育^[2]。而围封处理提供的稳定环境使得莎草科坚固的茎秆优势降低, 禾本科脆弱的分蘖芽和生长点不再被啃食, 依赖“资源获取型”策略而快速生长。植物生物量积累直接反映植物获取利用资源的能力, 地上-地下生物量分配以生长策略的途径理解植物群落结构与生态系统服务动态^[4]。放牧通过改变植物本身及其生境从而影响植物分配模式^[20], 促使更多地上生物量向地下转移^[37], 围封减少了牲畜的啃食促进生物量积累, 短期内有助于加速地上植被的恢复生长^[15]。

短期围封对土壤理化性质的改善与植物的生长有着良性互馈, 2023 年围封处理下, 植物多样性指数显著提高, 土壤理化性质间存在关联, Margalef 等指数与土壤变量的 Mantel 相关增强, 说明植物群落多样性受环境变化的影响, 围封促进了群落内功能性状的重建, 如高株型、深根型和竞争型物种逐渐替代耐踏型、矮生型物种, 这一过程反映了典型的“群落性状筛选效应”^[38]。在青藏高原草地生态系统中, 降水、土壤含水量以及 pH 值等因素是影响植被生长和土壤养分循环的重要驱动因子^[39], 因此, 植物群落与土壤环境的变化不仅受到围封的影响, 还可能受到年际气候差异的调节。

3.3 围封与放牧的不同恢复路径中的多功能性动态

物种多样性对生态系统多功能性具有显著的促进作用^[22]。2022 年, 围封处理下多功能性在阈值范围内沿零轴负值窄幅波动, 系统稳定性较高。放牧对照则在中高阈值区间出现功能大幅下降, 表明

放牧不利于高阈值功能的维持, 这与干旱生态系统中“干扰越强, 高阈值功能越脆弱”的规律一致^[40]。2023 年, 围封处理下生态多功能性整体呈正相关, 且高阈值范围内正效应增强^[41], 说明短期围封促进了功能恢复进入加速阶段; 但阈值超过 75% 后效应下降, 表明高物种多样性并不能保证所有功能均达到最优。放牧系统整体虽呈正效应, 但功能波动大、系统不稳定, 高阈值出现负效应可能与放牧对物种多样性的影响有关。无论围封还是放牧, 仅靠增加物种多样性无法使所有功能同时达到最优^[42]。

2022—2023 年围封处理下正斜率持续加强, 说明围封显著提高了物种数对土壤多功能性的正效应, 意味着群落功能冗余与补偿机制逐渐形成, 符合“多样性促进多功能性”理论^[43]。放牧对照中斜率整体偏低甚至接近零, 表明放牧削弱了物种间的功能补偿能力, 系统缺乏对功能丧失的缓冲, 结合 Mantel 结果, 这可能源于采食导致的植被受损与土壤酸化。放牧对照下土壤多功能性对植物物种多样性的响应呈非单调变化^[44]。轻度放牧可通过促进功能性状互补的物种共存来提升多功能性。随着放牧强度增加, 环境过滤导致物种抗性性状趋同, 引发功能权衡与生态位重叠, 致使多功能性下降。在重度放牧的极端筛选中, 存活的少数物种可能形成高度特化的功能互补组合, 从而驱动多功能性再次上升。这说明功能多样性(而非物种丰富度本身)是调控生态系统多功能性的关键。综上, 短期围封可通过改善植物群落结构来提升土壤多功能性、促进土壤-植物耦合, 但对某些特定功能的改善仍较为有限。

4 结论

本研究表明, 短期围栏封育显著促进高寒草地植被恢复, 而土壤结构与功能的改善过程相对滞后, 仅对土壤温度、电导率和有机碳影响显著。围封条件下禾本科优势度和群落多样性提高, 有利于地上植被的恢复, 生态系统多功能性稳定性及高阈值功能维持能力逐年增强; 相较之下, 放牧干扰加剧群落结构波动, 削弱多功能性并降低系统功能冗余。总体而言, 土壤理化性质对土层和年份差异响应, 围封对其直接影响有限, 但植被变化与土壤环境之间表现出一定关联。

参考文献

- [1] ZHAO H L, HE Y H, ZHOU R L, et al. Effects of desertification on soil organic C and N content in sandy farmland and grassland of Inner Mongolia[J]. *Catena*, 2009, 77(3): 187-191
- [2] LI W, CAO W X, WANG J L, et al. Effects of grazing regime on vegetation structure, productivity, soil quality, carbon and nitrogen storage of Alpine meadow on the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Ecological Engineering*, 2017, 98: 123-133
- [3] ZHANG F, HU Y D, FAN X M, et al. Controls on seasonal erosion behavior and potential increase in sediment evacuation in the warming Tibetan Plateau[J]. *Catena*, 2022, 209: 105797
- [4] 张宁, 王金牛, 罗栋梁, 等. 季节性雪被厚度对高山草甸4种优势晚花植物生物量分配的影响[J]. *草业学报*, 2025, 34(2): 67-80
- ZHANG N, WANG J N, LUO D L, et al. Effects of seasonal snow cover thickness on biomass allocation of four dominant late flowering plants in an Alpine meadow[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2025, 34(2): 67-80
- [5] SUN J, FU B J, ZHAO W W, et al. Optimizing grazing exclusion practices to achieve Goal 15 of the sustainable development goals in the Tibetan Plateau[J]. *Science Bulletin*, 2021, 66(15): 1493-1496
- [6] KÖRNER C. Alpine plant life: functional plant ecology of high mountain ecosystems[M]. Cham: Springer International Publishing, 2021: 1-5
- [7] TRAVERS S K, BERDUGO M. Grazing and productivity alter individual grass size dynamics in semi-arid woodlands[J]. *Ecography*, 2020, 43(7): 1003-1013
- [8] WANG Y F, LV W W, XUE K, et al. Grassland changes and adaptive management on the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2022, 3(10): 668-683
- [9] ZHU Q A, CHEN H, PENG C H, et al. An early warning signal for grassland degradation on the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Nature Communications*, 2023, 14: 6406
- [10] DAHLSTRÖM A, IUGA A M, LENNARTSSON T. Managing biodiversity rich hay meadows in the EU: a comparison of Swedish and Romanian grasslands[J]. *Environmental Conservation*, 2013, 40(2): 194-205
- [11] DING L L, TIAN L L, LI J Y, et al. Grazing lowers soil multifunctionality but boosts soil microbial network complexity and stability in a subtropical grassland of China[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2023, 13: 1027097
- [12] HOU L L, XIA F, CHEN Q H, et al. Grassland ecological compensation policy in China improves grassland quality and increases herders' income[J]. *Nature Communications*, 2021, 12: 4683
- [13] ZHAO X Q, ZHAO L, LI Q, et al. Using balance of seasonal herbage supply and demand to inform sustainable grassland management on the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Frontiers of Agricultural Science and Engineering*, 2018, 5(1): 1-8
- [14] GE P, XUE J G, RU Y Q, et al. Intensive rotational grazing has positive effects on productivity of rangeland[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2025, 384: 109558
- [15] AO X M, LIU Z W, HAN C T, et al. Fifteen years of grazing exclusion reshapes vegetation structure and landscape connectivity across Alpine ecosystems in the Qilian Mountain, Northwestern China[J]. *Journal of Environmental Management*, 2025, 393: 127168
- [16] HU W G, RAN J Z, DONG L W, et al. Aridity-driven shift in biodiversity-soil multifunctionality relationships[J]. *Nature Communications*, 2021, 12: 5350
- [17] LI S F, HUANG X B, TANG R, et al. Soil microbial diversity and network complexity sustain ecosystem multifunctionality following afforestation in a dry-hot valley savanna[J]. *Catena*, 2023, 231: 107329
- [18] LUO Y H, CADOTTE M W, LIU J, et al. Multitrophic diversity and biotic associations influence subalpine forest ecosystem multifunctionality[J]. *Ecology*, 2022, 103(9): e3745
- [19] SHU X Y, YE Q X, HUANG H, et al. Effects of grazing exclusion on soil microbial diversity and its functionality in grasslands: a meta-analysis[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2024, 15: 1366821
- [20] SUN J, ZHAN T Y, LIU M, et al. Verification of the biomass transfer hypothesis under moderate grazing across the Tibetan Plateau: a meta-analysis[J]. *Plant and Soil*, 2021, 458(1): 139-150
- [21] 张宁. 高山生态交错带木本植物小枝功能性状及种间关系变化[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2024: 9
- ZHANG N. Changes of functional traits and interspecific relationships of woody plants in Alpine ecotone[D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2024: 9
- [22] 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
- [23] 寇欣, 刘华民, 王奇, 等. 锡林河中游放牧的和被围封的湿草甸土壤理化性质研究[J]. *湿地科学*, 2018, 16(5): 626-634
- KOU X, LIU H M, WANG Q, et al. Physical and chemical properties of soils in grazing and enclosed wet meadows in the middle reaches of Xilin River[J]. *Wetland Science*, 2018, 16(5): 626-634
- [24] HE B, CAI Y L, RAN W R, et al. Spatiotemporal heterogeneity of soil salinity after the establishment of vegetation on a coastal saline field[J]. *Catena*, 2015, 127: 129-134
- [25] DASTGHEYB SHIRAZI S S, AHMADI A, ABDI N, et al. Long-term grazing enclosure: implications on water erosion and soil physicochemical properties (case study: bozdaghin rangelands, North Khorasan, Iran)[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2021, 193(1): 51
- [26] CHEN J Y, YAN Y. Grazing exclusion affects Alpine meadow

- plants' root morphological traits and reduces their cold resistance on the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Sustainability*, 2025, 17(11):1-19
- [27] GUO C R, WESCHE K, MĂRGĂRINT M C, et al. Climate overrides fencing and soil mineral nutrients to affect plant diversity and biomass of Alpine grasslands across North Tibet[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2022, 13:1024954
- [28] 田青, 王建兵, 张德罡, 等. 腾格里沙漠南缘植被恢复过程中土壤理化性状的变化[J]. *中国沙漠*, 2013, 33(3):772-776
- TIAN Q, WANG J B, ZHANG D G, et al. Change of soil properties with the restoration of vegetation in the south fringe of the tengger desert[J]. *Journal of Desert Research*, 2013, 33(3):772-776
- [29] WANG K B, DENG L, REN Z P, et al. Grazing exclusion significantly improves grassland ecosystem C and N pools in a desert steppe of Northwest China[J]. *Catena*, 2016, 137:441-448
- [30] MA W M, DING K Y, LI Z W. Comparison of soil carbon and nitrogen stocks at grazing-excluded and yak grazed Alpine meadow sites in Qinghai-Tibetan Plateau, China[J]. *Ecological Engineering*, 2016, 87:203-211
- [31] 杜陈军. 围封对退化高寒草甸生态系统 CO₂ 交换的影响[D]. 成都: 中国科学院大学, 2019: 40
- DU C J. Effects of fencing on exchange of CO₂ in degraded alpine meadow[D]. Chengdu: University of Chinese Academy of Sciences, 2019:40
- [32] WEI X H, LI Q L, LIU Y Q, et al. Restoring ecosystem carbon sequestration through afforestation: A sub-tropic restoration case study[J]. *Forest Ecology and Management*, 2013, 300:60-67
- [33] 张雅昀. 放牧强度对典型草原生物多样性与生态系统多功能性关系的影响[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2025:54
- ZHANG Y Y. The impact of grazing intensity on the relationship between biodiversity and ecosystem multifunctionality in typical steppe [D]. Hohhot: Inner Mongolia University, 2025:54
- [34] XIONG D P, SHI P L, SUN Y L, et al. Effects of grazing exclusion on plant productivity and soil carbon, nitrogen storage in Alpine meadows in northern Tibet, China[J]. *Chinese Geographical Science*, 2014, 24(4):488-498
- [35] 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
- [36] 周天阳, 高景, 王金牛, 等. 基于群落结构及土壤理化性质对围封7年青藏高原东南缘高山草地的综合评价[J]. *草业学报*, 2018, 27(12):1-11
- ZHOU T Y, GAO J, WANG J N, et al. Effects of 7-year enclosure on an Alpine meadow at the south-eastern margin of Tibetan Plateau based on community structure and soil physico-chemical properties [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2018, 27(12):1-11
- [37] 赵维, 蚌绍豪, 周小龙, 等. 短期施肥和围封对高寒草甸生物量和物种丰富度的影响[J]. *生态学杂志*, 2023, 42(11):2630-2637
- ZHAO W, BENG S H, ZHOU X L, et al. Effects of short-term fertilization and enclosure on plant biomass and species richness in an Alpine meadow[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2023, 42(11):2630-2637
- [38] DÍAZ S, LAVOREL S, CHAPIN F S, et al. Functional diversity—at the crossroads between ecosystem functioning and environmental filters [M]//*Terrestrial ecosystems in a changing world*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2007:81-91
- [39] REN S, WANG T, JI X H, et al. Grazing reverses climate-induced soil carbon gains on the Tibetan Plateau[J]. *Nature Communications*, 2025, 16:6978
- [40] MAESTRE F T, QUERO J L, GOTELLI N J, et al. Plant species richness and ecosystem multifunctionality in global drylands[J]. *Science*, 2012, 335(6065):214-218
- [41] 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
- [42] BYRNES J E K, GAMFELDT L, ISBELL F, et al. Investigating the relationship between biodiversity and ecosystem multifunctionality: challenges and solutions[J]. *Methods in Ecology and Evolution*, 2014, 5(2):111-124
- [43] HECTOR A, BAGCHI R. Biodiversity and ecosystem multifunctionality[J]. *Nature*, 2007, 448(7150):188-190
- [44] XIONG D P, SHI P L, ZHANG X Z, et al. Effects of grazing exclusion on carbon sequestration and plant diversity in grasslands of China—a Meta-analysis[J]. *Ecological Engineering*, 2016, 94:647-655

(责任编辑 刘婷婷)