

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2025.02.027; CSTR:32311.14.rswc.2025.02.027.

梁晓娜, 刘昌义, 胡夏嵩, 等黄河源区 4 种不同禁牧条件对草地根-土复合体力学特征的影响[J]. 水土保持研究, 2025, 32(2): 224-233.

Liang Xiaona, Liu Changyi, Hu Xiasong, et al. Effects of four different grazing exclusion conditions on the mechanical characteristics of grassland root-soil composite system in the source region of the Yellow River[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2025, 32(2): 224-233.

黄河源区 4 种不同禁牧条件对草地 根-土复合体力学特征的影响

梁晓娜¹, 刘昌义¹, 胡夏嵩¹, 付江涛², 邢光延¹, 何伟鹏¹, 岳磊¹, 吕伟涛¹

(1. 青海大学 地质工程学院, 西宁 810016; 2. 青海大学 农林科学院, 西宁 810016)

摘 要: [目的] 探讨黄河源区高寒环境禁牧条件对原生草地和退化草地根-土复合体力学强度影响, 阐明禁牧对植被恢复的作用, 为黄河源区草地恢复以及地质灾害防治提供理论参考。 [方法] 选取黄河源河南县地区未禁牧、禁牧期 1 a、禁牧期 4 a、禁牧期 10 a 这 4 种工况下的草地作为研究对象, 通过直剪试验得到复合体黏聚力和内摩擦角, 环刀称重法得到密度, 烘干法得到含水率, 采用 SPSS 软件分析了不同禁牧期草地植物根径、土体密度、土体含水率、含根量与根-土复合体黏聚力之间的相关关系。 [结果] (1) 根-土复合体黏聚力与含水率之间呈显著负相关关系 ($p < 0.05$), 未禁牧草地植物根径与根-土复合体黏聚力之间呈极显著正相关关系 ($R = 0.68, p < 0.01$), 根数与根-土复合体黏聚力之间呈极显著正相关关系 ($R = 0.85, p < 0.01$); 1 a 禁牧期土体密度与根-土复合体黏聚力 c 值之间呈显著正相关关系 ($R = 0.56, p < 0.05$)。 (2) 随着禁牧年限增加, 原生与退化草地土体平均黏聚力 c 值呈增大的变化趋势, 其中 10 a 禁牧期原生草地黏聚力 c 值较未禁牧原生草地平均黏聚力增加幅度为 6.39%; 10 a 禁牧期退化草地黏聚力 c 值较未禁牧平均黏聚力增加幅度为 8.16%。 [结论] 实施禁牧提高黄河源区草地根-土复合体黏聚力, 有利于防治黄河源区草地退化及水土流失。

关键词: 黄河源区; 根-土复合体; 禁牧期; 原生草地; 退化草地; 抗剪强度指标

中图分类号: S812; S152.9; TU432

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2025)02-0224-10

Effects of four different grazing exclusion conditions on the mechanical characteristics of grassland root-soil composite system in the source region of the Yellow River

Liang Xiaona¹, Liu Changyi¹, Hu Xiasong¹, Fu Jiangtao²,

Xing Guangyan¹, He Weipeng¹, Yue Lei¹, Lü Weitao¹

(1. School of Geological Engineering, Qinghai University, Xining 810016, China;

2. Academy of Agricultural and Forestry Sciences, Qinghai University, Xining 810016, China)

Abstract: [Objective] The aims of this study are to explore the impact of the ban on grazing in the high-altitude and cold environment of the Yellow River source region on the mechanical strength of the root-soil composite system in native grasslands and degraded grasslands, to clarify the role of the ban on vegetation restoration, and to provide theoretical reference for the restoration of grasslands in the Yellow River source region and geological disaster prevention and control. [Methods] The grassland in Henan County of the Yellow River source region was selected as the research object under four conditions of no grazing, 1-year, 4-year and 10-year of grazing prohibition period. The correlation between root diameter, soil density, soil moisture

收稿日期: 2024-05-03

修回日期: 2024-06-14

接受日期: 2024-06-27

资助项目: 国家自然科学基金(42041006); 青海省自然科学基金(2020-ZJ-906)

第一作者: 梁晓娜(2000—), 女, 河南濮阳人, 在读硕士, 研究方向为地质工程。E-mail: 2283430614@qq.com

通信作者: 刘昌义(1991—), 男, 四川宜宾人, 硕士, 实验师, 主要从事地质工程研究。E-mail: 1358128151@qq.com

<http://stbcyj.paperonce.org>

content, root content and root-soil composite system cohesion of grassland plants in different grazing prohibition periods was discussed. [Results] (1) There was a significant negative correlation between cohesion and water content of root-soil composite system ($p < 0.05$). There was a significant positive correlation between root diameter and cohesion of root-soil composite system ($R = 0.68$, $p < 0.01$). There was a significant positive correlation between root number and cohesion of root-soil composite system ($R = 0.85$, $p < 0.01$). There was a positive correlation between soil density and cohesion c value of root-soil composite system during 1-year grazing exclusion period ($R = 0.56$, $p < 0.05$). (2) With the increase of grazing prohibition years, the average cohesion c value of native and degraded grassland soil increased, and the cohesion c value of native grassland in 10-year grazing prohibition period increased by 6.39% compared with the average cohesion of native grassland without grazing prohibition. The cohesion c value of degraded grassland during the 10-year grazing exclusion period increased by 8.16% compared with the average cohesion of non-grazing. [Conclusion] The implementation of grazing prohibition to improve the cohesion of grassland root-soil composite system in the source region of the Yellow River is conducive to the prevention and control of grassland degradation and soil erosion in the source region of the Yellow River.

Keywords: the source region of the Yellow River; root-soil composite system; grazing ban period; native grassland; degraded grassland; shear strength index

黄河流域自古以来就面临着严峻的生态问题,是世界上面积最大、治理难度最大的流域之一^[1]。受全球气候变暖和人类活动等因素影响,黄河源区高寒草地发生不同程度退化现象,给当地生态环境带来潜在危害^[2]。据相关研究结果表明,1994—2009年黄河源区退化草地面积逐渐增加,2005—2011年黄河源区土壤侵蚀加剧,植被覆盖度减小,对水土保持起主要作用的根土层恢复缓慢^[3-4]。黄河源青海片区草地总面积 96 489.84 km²,其中青海片区黑土型“黑土滩”面积 14 239.47 km²,占草地总面积的 14.76%;沙化草地面积 5 739.75 km²,占草地总面积的 5.95%。黄河源流域人类活动、家畜放牧、啮齿动物暴发活动与自然因素共同作用影响退化高寒草地的分布格局^[5];与此同时,草地退化会加剧土地荒漠化、水土流失严重、自然灾害频繁以及制约经济持续发展^[6]。近年来,由草地退化诱发的黄河源区的水土流失、浅层滑坡地质灾害频发,因此,有效遏制黄河源区草地退化、加强退化草地治理与生态治理恢复刻不容缓^[7]。

有关黄河源区草地退化方面,国内外学者已开展较为系统性研究,并取得诸多研究成果。自 1970 年以来,黄河源区草甸植被退化逐年加剧^[8]。Akiyama 等^[9]通过对分布在我国北方草地开展能量平衡、土壤成分、土地利用变化、沙尘暴演变等方面研究,得到过度放牧导致草地荒漠化。刘继明^[10]通过对黄河上游贵德地区草地退化研究认为,由于温度、降水、风沙、草地鼠害以及人为等因素破坏植被现象较为严重,该区域近 71%的天然草地出现不同程度退化和沙化,

干旱、沙尘暴等灾害频发。Tong 等^[11]通过对青海河南县地区高寒草甸区,开展对不同退化秃斑块土壤的侵蚀效应研究,认为退化秃斑是黄河源区草甸退化和水土流失的影响因素。Li 等^[12]通过对黄河源河南县地区的高山草甸分布区,设置高原鼠兔种群和模拟放牧两种不同条件,指出高原鼠兔对景观破碎化的影响大于模拟放牧,景观破碎化的程度高,会导致高寒草甸在外界干扰后退化表现滞后。

有关黄河源区高寒草地根-土复合体抗剪强度研究方面,国内外学者已开展不同程度研究并取得较为丰富研究成果^[13]。刘昌义等^[14]通过对黄河源区河南县地区未退化区、轻度退化区、中度退化区、重度退化区 4 种高寒草地植物根-土复合体抗剪强度研究结果表明,随着退化程度增加,土壤黏聚力 c 值下降,抗剪强度减小,进而降低草地抵抗土壤侵蚀的能力。刘亚斌^[15]以西宁盆地作为研究区,通过开展草本与灌木根-土复合体直剪试验与重塑试样三轴压缩试验,得到含水率增加导致不含根系素土和根-土复合体黏聚力减小,而含根量增加使得根-土复合体黏聚力增大。申紫雁等^[16]对黄河源区河南县地区高寒草地不同深度土壤物理特性及抗剪强度特性研究结果表明,草地土体根系数量随深度增加而降低,根-土复合体抗剪强度亦随之降低。杨馥铖等^[17]对黄河源区河南县地区高寒草地不同退化程度草地进行取样,并通过直剪试验得到区内根-土复合体抗剪强度随草地退化加剧、根系数量减少而呈降低的趋势。

综合以上,有关黄河源区已开展研究主要表现在

高寒草甸退化原因与其物理性质影响等方面;相比较而言,黄河源区不同禁牧条件下分析禁牧年限对原生草地与退化草地恢复作用,以及对于根-土复合体力学效应等方面的研究相对较少。基于此,本研究从力学强度角度出发,定量分析黄河源区河南县 4 种不同禁牧年限条件下草地根-土复合体抗剪强度及其特征,并结合 4 种条件下植物生长特性和土体物理性质的影响,探讨原生草地和退化草地的含水率、含根量、根径、根数与黏聚力 c 值之间的关系。本研究结果可为黄河源区合理保护草地资源,有效防治土壤侵蚀、草地退化和水土流失、浅层滑坡等灾害的发生,提供理论支撑和实际指导。

1 研究区概况

研究区位于黄河源区青海河南县境内特根塘和南旗村试验区,其中特根塘试验区的地理坐标为东经 $101^{\circ}46'$,北纬 $34^{\circ}41'$,海拔高度为 3 568 m;南旗村试验区地理坐标为东经 $101^{\circ}32'$,北纬 $34^{\circ}53'$,海拔高度为 3 574 m^[18],南旗村和特根塘试验区分别位于河南县县城北部和东南方向。区内地形较为平坦,总体为东北高、西南低,以山地、丘陵、滩地为主。研究区属高原大陆性气候,年平均气温 1°C ,年降雨量为 610.5 mm,年蒸发量为 1 349.7 mm,年蒸发量远大于年降雨量,年日照时长 $2\,558.3\text{ h}$ ^[19]。区内土壤类型为高寒草甸土,草地类型为高寒草甸。区内草地植物种类丰富,其中优势种主要为冷地早熟禾(*Poa crymophila*)、垂穗披碱草(*Elymus nutans*)、小嵩草(*Kobresia pygmaea*)、紫花针茅(*Stipa purpurea*),伴生种为苔草(*Carex giraldiana*)、线叶嵩草(*Kobresia capillifolia*)、黄帚橐吾(*Ligularia virgaurea*)、密花香薷(*Elsholtzia densa*)、细叶亚菊(*Ajania tenuifolia*)、西伯利亚蓼(*Polygonum sibiricum*)等^[20]。

2 材料与方法

2.1 野外调查与根-土复合体取样

作为研究区之一的特根塘试验区设未禁牧区,围栏面积为 $150\text{ m}\times 300\text{ m}$ (长 \times 宽),1 a 禁牧区,围栏面积为 $150\text{ m}\times 300\text{ m}$ (长 \times 宽),4 a 禁牧区,围栏面积为 $150\text{ m}\times 300\text{ m}$ (长 \times 宽);南旗村试验区为 10 a 禁牧区,围栏面积为 $250\text{ m}\times 250\text{ m}$ (长 \times 宽)。本研究开展野外研究区调查时,分别选取区内 4 种不同禁牧年限区域,即未禁牧、1 a 禁牧、4 a 禁牧、10 a 禁牧,在每个区域分别选取原生植物草地和退化草地作为取样点,开展植物生长量原位调查与取样,在每个区域随机布置 3 个取样点,在地表以下 0—20 cm

制取试样。在制取试样过程中,在不同取样位置处制取原状试样时先将试样柱地表植物剪掉,将表面修剪平整;然后,将内径为 6.18 cm,高为 2.00 cm(体积为 60 cm^3)的环刀垂直向下压入取得根-土复合体原状试样。相类似地,每个根-土复合体原状试样按以上方法,依次制取 4 个环刀试样作为 1 组带回室内进行根-土复合体原状试样直接剪切试验^[14]。

2.2 生物量统计

本研究采用样方调查法,统计区内 4 种不同禁牧条件下原生草地和退化草地植物生长特征。图 1 为研究区 4 种不同禁牧年限条件原生草地与退化草地样方测量过程。具体方法为:分别在 4 种不同禁牧条件下两种草地依次设置 3 组样方,布置样方框规格为 $50\text{ cm}\times 50\text{ cm}$ (长 \times 宽),然后分别统计样方框内植物覆盖度、植物种类类型、株高等指标。通过样方统计法得到区内原生草地优势物种为紫花针茅、小嵩草和垂穗披碱草,退化草地优势物种为细叶亚菊、密花香薷、西伯利亚蓼。

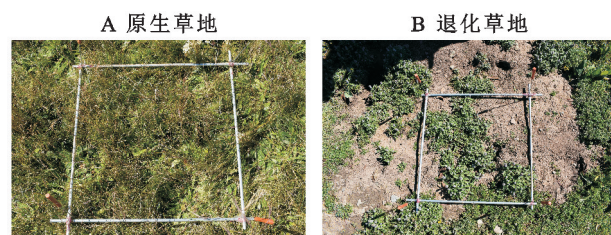


图 1 研究区 4 种不同禁牧年限条件原生草地与退化草地样方测量过程

Fig. 1 Quadrat measurement process of primary and degraded grassland under four different grazing prohibition years in the study area

2.3 土体物理性质测定

区内土体密度测定采用环刀称重法;土体含水率测定采用烘干法^[21]。

2.4 根-土复合体直剪试验

试验采用 ZJ 型应变控制式直剪仪,每组试验取 4 个试样,分别在 50, 100, 200, 300 kPa 4 级垂直压力(P)下进行直接剪切试验,得到根-土复合体抗剪强度指标黏聚力(c)和内摩擦角(φ)。试验步骤如下:将制备完成的原状试样放置于剪切盒内上、下两块透水石之间,电动机控制下的驱动手轮以 $2.4\text{ mm}/\text{cm}^3$ 的转速对下剪切盒施加水平方向推力,使试样在上、下剪切盒的接触面上产生剪切变形,直至试样剪破为止;试验过程中由计算机自动控制土工试验数据采集系统自动采集试验中的位移和剪应力大小,并自动绘制剪应力-位移关系曲线,每个试样剪切结束时求得该级垂直压力下的最大剪应力(τ);当每组 4 个试样分别在 4 级垂直压力下完成剪切试验时,计算机

自动绘制出抗剪强度-垂直压力关系曲线,并计算出该组根-土复合体试样的抗剪强度指标黏聚力(c)和内摩擦角(φ)。

2.5 含根量测试

待直剪试验结束后,采用水洗法得到每组的根-土复合体根系,将根系烘干称重,统计根数并计算含根量^[22],其具体计算公式为:

$$m_r = \frac{m_s}{V} \quad (1)$$

式中: m_r 为根-土复合体试样含根量(mg/cm^3); m_s 为根-土复合体试样所含干根质量(mg); V 为根-土复合体试样体积,计算所用为4个环刀总体积为 240 cm^3 。

2.6 相关性分析

本研究采用SPSS 22.0软件分析区内根-土复合体含水率、密度、根径、根数指标与根-土复合体黏聚力 c 值、内摩擦角 φ 值之间的相关性。

3 结果与分析

3.1 植物生长量特征

表1为研究区4种不同禁牧条件下原生草地与

表1 研究区4种不同禁牧条件下原生草地与退化草地植物生长量统计结果

Table 1 Statistical results of plant growth of native grassland and degraded grassland under four different grazing prohibition conditions in the study area

禁牧年限	草地类型	覆盖度/%	植物种类/种	平均株高/cm	代表性优势植物类型
未禁牧	原生草地	80	14	8.1 ± 2.4	小嵩草、苔草、早熟禾
	退化草地	40	6	6.2 ± 1.7	密花香薷、细叶亚菊、西伯利亚蓼
1 a 禁牧期	原生草地	93	10	14.8 ± 4.9	小嵩草、冷地早熟禾、苔草
	退化草地	63	5	6.7 ± 2.4	密花香薷、细叶亚菊
4 a 禁牧期	原生草地	100	11	21.1 ± 8.3	小嵩草、苔草
	退化草地	70	6	7.0 ± 4.9	细叶亚菊
10 a 禁牧期	原生草地	100	13	12.4 ± 3.9	小嵩草、冷地早熟禾、苔草
	退化草地	80	5	9.4 ± 1.5	密花香薷、细叶亚菊、西伯利亚蓼

表2为区内4种不同禁牧条件下,原生草地与退化草地根-土复合体试样根数统计结果。由该表可知,区内原生草地地表以下20 cm内根数随禁牧年限增加呈增大的变化趋势,表现为由未禁牧条件的 $1\ 630\text{ mg}/\text{cm}^3$ 增加至10 a禁牧时的 $1\ 860\text{ mg}/\text{cm}^3$,其增加幅度为14.11%。进一步分析还可知,区内退化草地根数随着禁牧期增加表现为增大的变化趋势,即由未禁牧条件的 $366\text{ mg}/\text{cm}^3$ 增加至10 a禁牧时的 $613\text{ mg}/\text{cm}^3$,增加幅度为67.49%。总体而言,区内原生草地平均根数较退化草地增加幅度为67.04%~88.66%。此外,有研究表明变异系数是测度数据变异程度的相对统计量,主要是用于比较不同样本数据的变异程度,即变异系数大说明数据的变异程度也大;变异系数小则说明数据的变异程度亦小^[24]。由

退化草地植物生长量统计结果。由该表可知,区内原生草地植被覆盖度随禁牧年限的增加呈现出增大的变化趋势,表现出10 a禁牧期植被覆盖度相较于未禁牧期增加幅度为25%,退化草地植被覆盖度随禁牧年限的增加呈现出增加的变化趋势,10 a禁牧期植被覆盖度相较于1 a禁牧期植被覆盖度增加幅度为26.98%。

由表1可知,区内原生草地植物平均株高随禁牧年限增加整体呈增加的变化趋势,表现为未禁牧条件下平均株高为8.1 cm,4 a禁牧期时平均株高为21.1 cm,10 a禁牧期时平均株高为12.4 cm;其中,4 a禁牧期时平均株高相对最大,其平均株高相对未禁牧条件平均株高增长幅度为42.57%,10 a禁牧较4 a禁牧的株高减小,即长期禁牧使得植被生长量减小,原因在于长期禁牧隔离会降低高寒草甸植被物种多样性和养分利用率^[23]。此外,区内退化草地植物其平均株高随禁牧年限的增加整体呈增加,表现为未禁牧条件下退化草地植物平均株高为6.2 cm,10 a禁牧退化草地植物平均株高为9.4 cm,且10 a禁牧期相较于未禁牧条件下植物株高增长幅度为51.61%。

表2可知,区内原生草地与退化草地平均根数变异系数随着禁牧年限的增加整体呈减小趋势,退化草地的变异系数较原生草地大,说明退化草地的平均根数的变异程度较原生草地大。进一步反映出区内随着禁牧年限增加退化草地其平均根数变化程度较原生草地显著,并在一定程度说明禁牧对退化草地植被根系生长的促进作用相对更显著。

表3为区内4种不同禁牧条件下,原生草地与退化草地根-土复合体试样中平均根径统计结果。由该表可知,区内原生草地植物其平均根径随着禁牧年限增加呈减小的趋势,表现为由未禁牧条件的0.32 mm减小至10 a禁牧时的0.27 mm,减小幅度为15.63%。此外,通过进一步分析得到,区内退化草地植物平均根径随着禁牧年限增加表现出增大的趋势,即由未禁牧

条件的 0.19 mm 增加至 10 a 禁牧时的 0.25 mm,增加幅度为 31.58%。此外,由表 3 还可知,随着禁牧年限的增加原生草地与退化草地平均根径的变异系数均表现出处于较小的变化范围,该结果则一定程度反映了随着禁牧年限的增加平均根径变化相对不明显。

表 2 研究区 4 种不同禁牧条件下原生草地与退化草地根-土复合体试样含根量统计结果

Table 2 Statistical results of root content of root-soil composite system in primary and degraded grassland under four different grazing prohibition conditions in the study area

禁牧年限	平均根数/(mg·cm ⁻³)		变异系数/%	
	原生草地	退化草地	原生草地	退化草地
未禁牧	1630±293b	366±153b	18	42
1 a 禁牧期	1173±140d	133±50d	12	38
4 a 禁牧期	1431±233c	252±73c	16	29
10 a 禁牧期	1860±179a	613±151a	10	25

表 3 研究区 4 种不同禁牧条件下原生草地与退化草地根-土复合体试样根径统计结果

Table 3 Statistical results of root diameter of root-soil composite system in primary and degraded grassland under four different grazing prohibition conditions in the study area

禁牧年限	平均根径/mm		变异系数/%	
	原生草地	退化草地	原生草地	退化草地
未禁牧	0.32±0.01bc	0.19±0.02d	3	11
1 a 禁牧期	0.30±0.01c	0.28±0.04a	3	14
4 a 禁牧期	0.33±0.01ab	0.24±0.01c	3	4
10 a 禁牧期	0.27±0.02d	0.25±0.02b	7	8

3.2 土体物理性质特征

3.2.1 土体密度及特征 表 4 为研究区 4 种不同禁牧年限条件下,原生草地与退化草地植物平均土体密度试验结果。由该表可知,区内原生草地土体平均密度呈先减小后增大的趋势,退化草地土体平均密度则表现出呈先增大后减小的趋势。产生该现象的主要原因在于,根-土复合体密度变化与含根量之间关系密切,植物根系的存在降低了土体密度,即密度与含根量之间呈负相关关系。此外,由表 4 可知,区内原生草地土体其平均密度较退化草地减小幅度为 3.26%。此外,由表 4 还可知,随着禁牧年限的增加原生草地与退化草地土体密度的变异系数变化幅度不显著,即原生草地与退化草地数据变异程度相对较小,该结果一定程度反映了禁牧对于根-土复合体试样密度影响较小。

3.2.2 土体含水率 表 5 为研究区 4 种不同禁牧年限条件下,原生草地与退化草地土体平均含水率试验结果。由该表可知,随着区内禁牧年限增加,原生草地与退化草地土体含水率呈现先增大后减小的变化趋

势。此外,进一步分析得到区内原生草地 1 a 禁牧期土体平均含水率相对最大为 40.31%,10 a 禁牧期原生草地土体平均含水率最小为 24.16%。相应地,区内退化草地 1 a 禁牧期土体平均含水率最大为 23.21%,未禁牧退化草地土体平均含水率最小为 19.01%。由以上结果表明,区内原生草地土体平均含水率显著大于退化草地,增加幅度为 32.19%。此外,通过进一步分析表 5 可知,随着禁牧年限的增加原生草地及退化草地土体含水率的变异系数整体表现出呈减小趋势,原生草地土体含水率变异系数较退化草地大,该结果表明原生草地土体含水率较退化草地变异程度较大,在一定程度反映了禁牧对原生草地土体含水率的影响程度明显。

表 4 研究区 4 种不同禁牧年限原生草地与退化草地土体密度试验结果

Table 4 Test results of soil density of primary grassland and degraded grassland in four different grazing prohibition years in the study area

禁牧年限	土体密度/(g·cm ⁻³)		变异系数/%	
	原生草地	退化草地	原生草地	退化草地
未禁牧	1.25±0.03	1.23±0.06	2	5
1 a 禁牧期	1.40±0.08	1.32±0.05	6	4
4 a 禁牧期	1.24±0.05	1.23±0.02	4	2
10 a 禁牧期	1.02±0.06	1.29±0.05	6	4

表 5 研究区 4 种不同禁牧年限条件下原生草地与退化草地土体含水率试验结果

Table 5 Test results of soil moisture content of primary and degraded grassland under four different grazing prohibition years in the study area %

禁牧年限	土体含水		变异系数	
	原生草地	退化草地	原生草地	退化草地
未禁牧	28.89±8.00	17.96±3.01	28	17
1 a 禁牧期	40.31±14.03	23.21±3.49	35	15
4 a 禁牧期	28.33±7.92	19.90±2.10	28	11
10 a 禁牧期	24.16±4.44	21.45±2.16	18	10

3.3 抗剪强度特征

表 6 为研究区 4 种不同禁牧条件下原生草地与退化草地根-土复合体黏聚力试验结果。由该表可知,随着禁牧年限增加区内地表以下原生草地土体平均黏聚力 c 值整体上呈增大的趋势,其中根-土复合体黏聚力最大为 4 a 禁牧时的 27.86 kPa,最小为 1 a 禁牧时 17.32 kPa;相应地,随着禁牧年限增加区内退化草地根-土复合体平均黏聚力 c 值呈增加趋势,表现在最大为 10 a 禁牧时 11.27 kPa,最小则为 1 a 禁牧时 4.65 kPa。通过以上分析可知,区内退化草地土体平均黏聚力总体表现出显著低于原生草地。此外,

由表 6 还可知,随着禁牧年限的增加原生草地黏聚力 c 值的变异系数变化规律不明显,退化草地黏聚力 c 值的变异系数呈增大趋势,原生草地黏聚力 c 值的变异系数较退化草地略大,一定程度说明长期禁牧对黏聚力 c 值表现出有促进作用。

表 6 研究区 4 种不同禁牧条件下原生草地与退化草地根-土复合体黏聚力试验结果

Table 6 Cohesion test results of root-soil composite system of primary and degraded grassland under four different grazing prohibition conditions in the study area

禁牧年限	黏聚力 c 值/kPa		变异系数/%	
	原生草地	退化草地	原生草地	退化草地
未禁牧	20.49±8.27c	10.42±3.02ab	40	29
1 a 禁牧期	17.32±7.34d	4.65±2.45d	42	53
4 a 禁牧期	27.86±9.84a	6.77±2.35bc	35	35
10 a 禁牧期	21.80±8.72b	11.27±4.32a	40	38

表 7 为区内 4 种不同禁牧条件下,原生草地与退化草地土体内摩擦角试验结果。由该表可知,区内原生草地内摩擦角随禁牧期限增加未表现出规律性变化特征;退化草地内摩擦角随禁牧年限增加呈现增大的趋势,由未禁牧的 20.61°增加至 10 a 禁牧期的 24.83°,增加幅度为 20.48%。随禁牧年限的增加原生草地与退化草地的变异系数变化不大且数据较小,反映出原生草地与退化草地的黏聚力数据变异程度均较小。

表 7 研究区 4 种不同禁牧条件下原生草地与退化草地根-土复合体内摩擦角试验结果

Table 7 Results of internal friction angle test of root-soil composite system between native grassland and degraded grassland under 4 different grazing conditions in the study area

禁牧年限	内摩擦角 φ 值/(°)		变异系数/%	
	原生草地	退化草地	原生草地	退化草地
未禁牧	19.49±2.72c	20.61±0.51d	14	2
1 a 禁牧期	21.55±2.12a	23.42±1.72b	10	7
4 a 禁牧期	17.63±3.08d	23.43±4.05bc	17	17
10 a 禁牧期	20.51±2.92b	24.83±2.03ab	14	8

此外,图 2 为区内不同禁牧类型原生草地与退化草地根-土复合体剪应力与剪切位移关系曲线。由该图可知,在相同垂直压力下剪应力相同时,相同禁牧期的原生草地剪切位移相对小于退化草地,其中,1 a 禁牧期原生草地根-土复合体试样剪切位移相对未禁牧原生草地为 0.54 mm,1 a 禁牧期退化草地根-土复合体试样剪切位移相对未禁牧退化草地为 0.95 mm。该结果表明区内原生草地抵抗剪切破坏能力显著强于退化草地。

3.4 根-土复合体黏聚力影响因素分析

由表 8 可知,研究区 4 种不同禁牧条件下原生草地根-土复合体黏聚力影响因素分析可知,根-土复合体的

黏聚力与含水率之间呈现显著负相关关系($p<0.05$),密度与根-土复合体之间呈现显著正相关关系($p<0.05$);未禁牧条件下根径与根-土复合体之间呈现极显著正相关关系($R=0.68^{**}$, $p<0.01$),含根量与根-土复合体之间呈现极显著正相关关系($R=0.85^{**}$, $p<0.01$)。

表 9 为区内 4 种不同禁牧条件下退化草地根-土复合体黏聚力影响因素分析结果可知,根径与根-土复合体的黏聚力之间呈现显著正相关关系($p<0.05$),含根量与根-土复合体的黏聚力之间呈现显著正相关关系($p<0.05$);10 a 禁牧期的含水率与根-土复合体的黏聚力之间呈现极显著负相关关系($R=-0.53^{**}$, $p<0.01$),1 a 禁牧期时的密度与根-土复合体之间呈现极显著正相关关系($R=0.69^{**}$, $p<0.01$)。

表 10—11 为区内 4 种不同禁牧条件下原生草地、退化草地根-土复合体黏聚力影响因素分析结果可知,内摩擦角与含水率、密度、根径、根数 4 种影响因素之间无显著相关性。

4 讨论

4.1 禁牧条件与生物量、土体物理性质之间的关系

由相关研究结果表明,采用合理放牧与禁牧两者相结合方式,可有效促进草地生态系统的可持续发展^[25]。由本研究表明,区内原生草地与退化草地植物株高、覆盖度随禁牧年限的增加呈现出增大的变化趋势。该结果反映出区内禁牧条件对原生草地和退化草地植物生长具有一定促进作用,这与张铭洋等^[26]的研究结果相一致。即开展禁牧条件下可有效避免牛羊对草地植被的啃食和践踏,植被生长恢复,有利于扩大植物生长空间,植被高度和盖度均得到有效恢复。

本研究所得到的原生草地的土体平均密度随禁牧年限呈先减小后增加的变化趋势,退化草地土体平均密度则随禁牧年限呈先增大后减小的变化趋势,且原生草地土体平均密度总体显著大于退化草地。产生以上变化其主要原因在于,根-土复合体密度变化与根数之间关系密切,密度与根数两者之间呈负相关关系^[27],且根数越多则密度愈小。

区内原生草地土体平均含水率随禁牧年限增加呈现减小的变化趋势,退化草地土体平均含水率随禁牧年限的增加表现出增大的变化趋势,产生该现象的主要原因在于,原生草地由于禁牧使得植物蒸腾土壤水分造成土壤含水率逐渐降低^[23];退化草地的植被未完全恢复,而禁牧使得退化草地土壤养分得到改善,土壤有机质含量增加及根-土复合体持水性能提高,从而土壤平均含水率增加^[28]。这种减小后的原生草地含水率大于增加后的退化草地含水率,与本研究结论相一

致的还表现在,乔荣等^[29]通过对内蒙古希拉穆仁草原的孔隙度、容重、含水率和碱解氮、速效磷、速效钾

6 种物理、化学性质指标开展回归预测研究后,得到的结论亦是认为原生草地含水率大于退化草地。

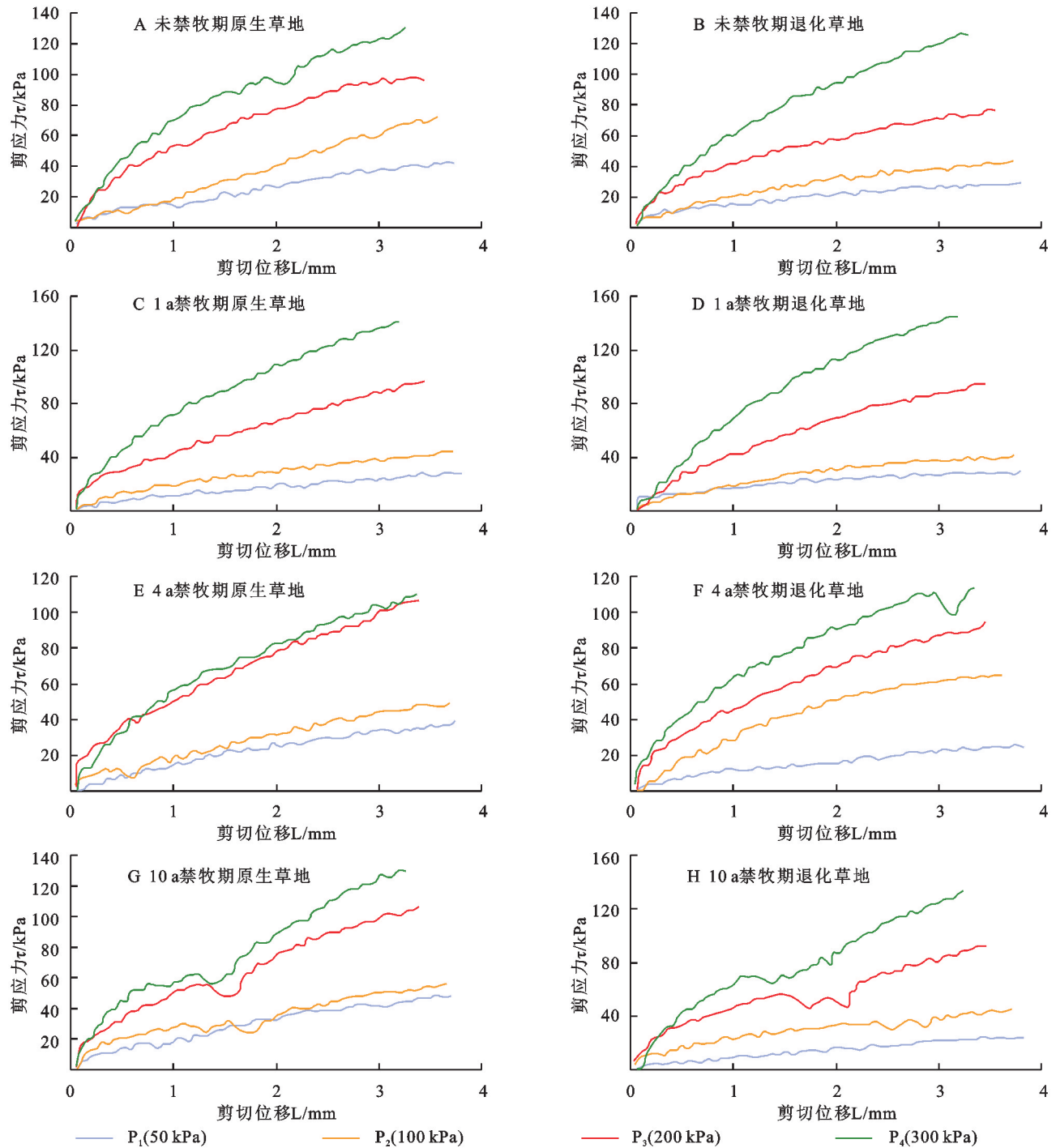


图 2 研究区 4 种不同禁牧条件下原生草地与退化草地根-土复合体剪应力与剪切位移之间的关系曲线

Fig. 2 Relationship curves between shear stress and shear displacement of root-soil composite system in native and degraded grassland under four different grazing prohibition conditions in the study area

4.2 禁牧条件下与根-土复合体黏聚力 c 值之间的关系及其对草地恢复的影响

本研究结果表明随着禁牧年限的增加,区内原生草地与退化草地根-土复合体黏聚力 c 值呈增加趋势,且原生草地根-土复合体黏聚力 c 值总体上大于退化草地,增加幅度为 62.15%。进一步研究得到,未

禁牧条件下原生草地根-土复合体黏聚力 c 值与根径和根数之间呈极显著正相关关系,1 a 禁牧期退化草地根-土复合体黏聚力 c 值与密度之间呈极显著相关关系,10 a 禁牧期根-土复合体黏聚力 c 值与含水率之间呈极显著负相关关系。以上研究结果与何伟鹏等^[18]的研究结果基本一致。

表 8 研究区 4 种不同禁牧条件下原生草地根-土复合体黏聚力影响因素分析

Table 8 Analysis of influencing factors of root-soil composite system cohesion of native grassland under four different grazing prohibition conditions in the study area

禁牧年限	含水率	密度	根径	根数
未禁牧	−0.40 *	0.42 *	0.68 **	0.85 **
1 a 禁牧期	−0.59 *	0.56 *	0.47 *	0.48 *
4 a 禁牧期	−0.39 *	0.39 *	0.56 *	0.56 *
10 a 禁牧期	−0.36 *	0.49 *	0.34 *	0.48 *

注: * 表示在 $p < 0.05$ 水平显著相关, ** 表示在 $p < 0.01$ 水平极显著相关。

表 9 研究区 4 种不同禁牧条件下退化草地根-土复合体黏聚力影响因素分析

Table 9 Analysis of influencing factors of root-soil composite system cohesion of degraded grassland under four different grazing prohibition conditions in the study area

禁牧年限	含水率	密度	根径	根数
未禁牧	−0.49 *	0.39 *	0.50 *	0.39 *
1 a 禁牧期	−0.58 *	0.69 **	0.47 *	0.50 *
4 a 禁牧期	−0.50 *	0.50 *	0.40 *	0.48 *
10 a 禁牧期	−0.53 **	0.40 *	0.46 *	0.36 *

注: * 表示在 $p < 0.05$ 水平显著相关, ** 表示在 $p < 0.01$ 水平极显著相关。

表 10 研究区 4 种不同禁牧条件下原生草地根-土复合体内摩擦角影响因素分析

Table 10 Analysis of factors influencing internal friction angle of root-soil composite system of native grassland under four different grazing conditions in the study area

禁牧年限	含水率	密度	根径	根数
未禁牧	−0.144	0.347	−0.044	0.22
1 a 禁牧	0.034	0.082	−0.526	0.321
4 a 禁牧	0.231	0.479	−0.354	0.247
10 a 禁牧	0.092	−0.471	0.027	0.851

表 11 研究区 4 种不同禁牧条件下退化草地根-土复合体内摩擦角影响因素分析

Table 11 Analysis of influencing factors of internal friction angle of root-soil composite system of degraded grassland under four different grazing conditions in the study area

禁牧年限	含水率	密度	根径	根数
未禁牧	0.382	0.754	0.012	0.451
1 a 禁牧	−0.45	−0.02	0.167	0.291
4 a 禁牧	−0.268	0.706	0.125	0.237
10 a 禁牧	0.025	−0.09	0.048	0.860

通过对区内不同禁牧年限下,原生草地与退化草地生物量指标、土体密度、含水率与根-土复合体黏聚力 c 值之间的相关性分析得到,区内禁牧条件下可有

效提高原生与退化草地根-土复合体黏聚力,表现为随着禁牧期增加根-土复合体黏聚力较未禁牧条件表现出增加的趋势,即区内原生草地、退化草地根-土复合体增加幅度分别为 35.97%,8.16%。综合密度、含水率、根径、根数等其他相关因素影响以及原生草地和退化草地其各自在黏聚力和抗剪强度的变化,采用合理的禁牧条件则有助于黄河源区原生草地植被恢复,以及起到有效防治水土流失等水土灾害现象的发生。

5 结 论

(1) 区内原生草地和退化草地植被覆盖度、株高等生长量指标,表现出随着禁牧年限增加呈逐渐增加的趋势,即分别由 80%增加至 100%,由 40%增加至 80%;且原生草地其植被覆盖度、株高均表现出显著高于退化草地,表现在原生草地平均株高由 8.1 cm 增加至 21.1 cm,退化草地平均株高由 6.2 cm 增加至 9.4 cm。

(2) 区内随着禁牧年限增加,原生草地密度表现出呈逐渐增加趋势,表现在由未禁牧条件下的 1.25 g/cm³增加至 10 a 禁牧条件下的 1.40 g/cm³;相应地,土体含水率则表现出逐渐减小的变化趋势,表现最为由未禁牧条件下的 28.89%减小至 10 a 禁牧条件下的 24.16%。

(3) 区内未禁牧条件下原生草地根-土复合体黏聚力 c 值与根径、根数之间为极显著相关关系,1 a 禁牧期退化草地黏聚力 c 值与密度之间为极显著相关,10 a 禁牧期时黏聚力 c 值与含水率之间为极显著相关关系。

(4) 随着区内禁牧年限增加,原生草地和退化草地均表现出显著性提高根-土复合体的黏聚力 c 值,即原生草地的黏聚力 c 值由 20.49 kPa 增加至 27.86 kPa,退化草地黏聚力 c 值则由 10.42 kPa 增加至 11.27 kPa。

(5) 区内禁牧条件对草地根-土复合体其抗剪强度起到增强作用,对黄河源区保护草地资源以及防治草地退化、水土流失等灾害,提供理论支撑和实际指导作用。

参考文献 (References):

[1] Du L D, Dong C, Kang X C, et al. Spatiotemporal evolution of land cover changes and landscape ecological risk assessment in the Yellow River Basin, 2015—2020 [J]. Journal of Environmental Management, 2023, 33 (2):117-149.

[2] 王莺,李耀辉,孙旭映.气候变化对黄河源区生态环境的影响[J].草业科学,2015,32(4):539-551.

Wang Y, Li Y H, Sun X Y. Impact of climate change on the eco-environment in the Yellow River Source[J].

- Pratacultural Science, 2015, 32(4): 539-551.
- [3] 魏卫东, 李希来. 三江源区高寒草甸退化草地土壤侵蚀模型与模拟研究[J]. 环境科学与管理, 2013, 38(7): 26-30.
- Wei W D, Li X L. Soil erosion model and simulation of degraded grassland of alpine meadow in Sanjiangyuan region[J]. Environmental Science and Management, 2013, 38(7): 26-30.
- [4] 蒋冲, 高艳妮, 李芬, 等. 1956—2010年三江源区水土流失状况演变[J]. 环境科学研究, 2017, 30(1): 20-29.
- Jiang C, Gao Y N, Li F, et al. Soil erosion status variation and attribution in the Three-River Headwaters Region during 1956—2010[J]. Research of Environmental Sciences, 2017, 30(1): 20-29.
- [5] 张宇鹏. 黄河源流域单元退化高寒草地空间分布格局及其驱动力分析[D]. 西宁: 青海大学, 2022.
- Zhang Y P. Analysis on spatial distribution patterns and driving forces of degraded alpine grassland in the river basin of the Yellow River source zone[D]. Xining: Qinghai University, 2022.
- [6] 姚小伟, 祖丽菲亚. 草地退化的危害与生态恢复措施的研究[J]. 草业与畜牧, 2014(2): 38-39.
- Yao X W, Zulfia. Research on the harm of grassland degradation and ecological restoration measures [J]. Prataculture and Animal Husbandry, 2014(2): 38-39.
- [7] 古琛, 贾志清, 杜波波, 等. 中国退化草地生态修复措施综述与展望[J]. 生态环境学报, 2022, 31(7): 1465-1475.
- Gu C, Jia Z Q, Du B B, et al. Reviews and prospects of ecological restoration measures for degraded grasslands of China [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2022, 31(7): 1465-1475.
- [8] Lu Z B, Song Q, Zhao J Y, et al. Prediction and evaluation of ecosystem service value based on land use of the Yellow River source area[J]. Sustainability, 2022, 15(1): 687.
- [9] Akiyama T, Kawamura K. Grassland degradation in China: methods of monitoring, management and restoration[J]. Grassland Science, 2007, 53(1): 1-17.
- [10] 刘继明. 贵德县草地退化原因及其治理对策建议[J]. 青海草业, 2020, 29(3): 37-39.
- Liu J M. The causes of grassland degradation in Guide County and its countermeasures[J]. Qinghai Prataculture, 2020, 29(3): 37-39.
- [11] Tong S C, Li G R, Li X L, et al. Soil water erosion and its hydrodynamic characteristics in degraded bald patches of alpine meadows in the Yellow River source area, Western China[J]. Sustainability, 2023, 15(10): 8165.
- [12] Li J X, Li X L, Gao J, et al. Micro-scale fragmentation of the alpine meadow landscape on the Qinghai-Tibet Plateau under external disturbances[J]. Catena, 2021, 201: 105220.
- [13] Li G R, Li X L, Chen W T, et al. Effects of degradation severity on the physical, chemical and mechanical properties of topsoil in alpine meadow on the Qinghai-Tibet Plateau, West China[J]. Catena, 2020, 187: 104370.
- [14] 刘昌义, 胡夏嵩, 窦增宁, 等. 黄河源区高寒草地植被根-土复合体抗剪强度试验及退化程度阈值确定[J]. 草业学报, 2017, 26(9): 14-26.
- Liu C Y, Hu X S, Dou Z N, et al. Shear strength tests of the root-soil composite system of alpine grassland vegetation at different stages of degradation and the determination of thresholds in the Yellow River source region [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2017, 26(9): 14-26.
- [15] 刘亚斌. 青藏高原东北部黄土区植物降盐效应及其增强边坡稳定性研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2018.
- Liu Y B. Research on evaluation of salt reduction effect of plants and their enhancement of slope stability in loess region of northeastern Qinghai-Tibet Plateau[D]. Beijing: Chinese Academy of Sciences, 2018.
- [16] 申紫雁, 刘昌义, 胡夏嵩, 等. 黄河源区高寒草地不同深度土壤理化性质与抗剪强度关系研究[J]. 干旱区研究, 2021, 38(2): 392-401.
- Shen Z Y, Liu C Y, Hu X S, et al. Relationships between the physical and chemical properties of soil and the shear strength of root-soil composite systems at different soil depths in alpine grassland in the source region of the Yellow River[J]. Arid Zone Research, 2021, 38(2): 392-401.
- [17] 杨馥铖, 刘昌义, 胡夏嵩, 等. 黄河源区不同退化程度高寒草地理化性质及复合体抗剪强度研究[J]. 干旱区研究, 2022, 39(2): 560-571.
- Yang F C, Liu C Y, Hu X S, et al. Study on physical and chemical properties and shear strength characteristics of root-soil composite system with different degradation degrees of alpine grassland in the source region of the Yellow River[J]. Arid Zone Research, 2022, 39(2): 560-571.
- [18] 何伟鹏, 胡夏嵩, 刘昌义, 等. 黄河源区不同禁牧年限对垂穗披碱草单根及其根-土复合体力学强度特征的影响[J]. 草业学报, 2023, 32(5): 106-117.
- He W P, Hu X S, Liu C Y, et al. Impact of the different duration years of grazing prohibition on the mechanical strength characteristics of *Elymus nutans* roots and its composite systems in the Yellow River source region[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2023, 32(5): 106-117.

- [19] 柴瑜,李希来,于金峰,等.有机肥施用量对黄河源不同坡向退化高寒草甸土壤团聚体及有机碳的影响[J].草地学报,2022,30(7):1613-1620.
Chai Y, Li X L, Yu J F, et al. Effects of different applications of organic fertilizer in degraded alpine meadow on soil aggregates and organic carbon in the source zone of Yellow River[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2022,30(7):1613-1620.
- [20] 徐文印,张宇鹏,段成伟,等.黄河源不同区域退化高寒草甸土壤养分空间变异研究[J].生态环境学报,2021,30(10):1968-1975.
Xu W Y, Zhang Y P, Duan C W, et al. Spatial variability of soil nutrients in degraded alpine meadows in different regions of the Yellow River[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2021,30(10):1968-1975.
- [21] 中华人民共和国交通部.公路土工试验规程:JTG E40—2007[S].北京:人民交通出版社,2007.
Ministry of Transport of the People's Republic of China. Test methods of soils for highway engineering: JTG E40—2007[S]. Beijing: China Communications Press, 2007.
- [22] 何伟鹏,刘昌义,周国英,等.退化高寒草原人工恢复植被根系及根-土复合体力学特性研究[J].水文地质工程地质,2022,49(2):207-218.
He W P, Liu C Y, Zhou G Y, et al. A study of the mechanical properties of herbaceous roots and root-soil composite systems in the degraded alpine pasture artificially restored grassland[J]. *Hydrogeol & Engineering Geology*, 2022,49(2):207-218.
- [23] Yang P N, Li X L, Li C Y, et al. Effects of long-term enclosure on main plant functional groups and their biochemical properties in a patchily degraded alpine meadow in the source zone of the Yellow River, West China[J]. *Agronomy*, 2023,13(11):2781.
- [24] Furrer A, Cladis D P, Kurilich A, et al. Changes in phenolic content of commercial potato varieties through industrial processing and fresh preparation[J]. *Food Chemistry*, 2017,218:47-55.
- [25] 张宇,阿斯娅·曼力克,辛晓平,等.禁牧与放牧对新疆温性草原群落结构、生物量及牧草品质的影响[J].草地学报,2020,28(3):815-821.
Zhang Y, Asya M, Xin X P, et al. Effects of fencing and grazing on the community structure, biomass and forage quality of temperate steppe in Xinjiang[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2020,28(3):815-821.
- [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] 刘凤婵,李红丽,董智,等.封育对退化草原植被恢复及土壤理化性质影响的研究进展[J].中国水土保持科学,2012,10(5):116-122.
Liu F C, Li H L, Dong Z, et al. Advances in research on enclosure effects on vegetation restoration and soil physicochemical property of degraded grassland[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2012,10(5):116-122.
- [28] Wu G L, Liu Z H, Zhang L, et al. Long-term fencing improved soil properties and soil organic carbon storage in an alpine swamp meadow of western China[J]. *Plant and Soil*, 2010,332(1):331-337.
- [29] 乔荣,崔向新,吕新丰,等.围封禁牧对退化草原土壤性状的影响[J].水土保持通报,2014,34(5):162-165.
Qiao R, Cui X X, Lü X F, et al. Effect of enclosure and grazing prohibition on soil properties of degraded grassland[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2014,34(5):162-165.