

# 人为干扰方式对希拉穆仁草原土壤- 草地系统健康的影响

尚佳佳<sup>1</sup>, 杨光<sup>1</sup>, 郑路<sup>1</sup>, 张泽忠<sup>1</sup>, 邢恩德<sup>2,3</sup>

(1. 内蒙古农业大学 沙漠治理学院, 内蒙古 呼和浩特 010018;

2. 中国水利水电科学研究院 内蒙古阴山北麓草原生态水文国家野外科学

观测研究站, 北京 100038; 3. 水利部 牧区水利科学研究所, 内蒙古 呼和浩特 010020)

**摘要:** [目的] 定量评估不同人为干扰方式对土壤-草地系统健康的影响, 为草原生态恢复、管理措施的制定及可持续利用提供科学依据。[方法] 以内蒙古希拉穆仁草原为研究对象, 对比分析围封、放牧、垦殖和旅游 4 种干扰方式下草地土壤理化性质与植被特征, 采用灰色关联分析与模糊综合评价法评估系统健康状况。[结果] ①砾石及沙粒百分比含量均为旅游区最大, 分别为 14.98% 和 67.79%, 围封区最小, 分别为 9.02%, 55.38%; 围封区黏粒(15.45%)和粉粒(20.13%)含量最高, 旅游区最低(分别为 7.21% 和 10.02%)且容重最大(1.61 g/cm<sup>3</sup>), 但土壤含水量与饱和持水量在不同土层均无显著差异。②土壤有机质及全氮含量围封区最高(12.98 g/kg, 0.73 g/kg), 旅游区最低(8.23 g/kg, 0.46 g/kg); 全磷、全钾平均含量均表现为: 垦殖>围封>放牧>旅游, 垦殖区速效磷含量较旅游区高出 9.08 mg/kg, 围封区速效钾含量 268 mg/kg 显著高于其他样地。③草地总生物量表现为: 围封 342.67 g/m<sup>2</sup>>垦殖 155.29 g/m<sup>2</sup>>放牧 112.93 g/m<sup>2</sup>>旅游 43.51 g/m<sup>2</sup>。④不同人为干扰下的土壤质量及草地综合健康大小顺序均为: 围封区>垦殖区>放牧区>旅游区。[结论] 不同人为干扰下的土壤理化性质及生物量均具有显著性差异。围封区的土壤质量以及草地健康状况最好, 旅游区最差, 垦殖及其放牧也均降低了土壤质量以及草地综合健康。

**关键词:** 土壤理化性质; 生物量; 草地健康评价; 土壤质量; 希拉穆仁草原

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2025)05-0053-10

中图分类号: S812.2

**文献参数:** 尚佳佳, 杨光, 郑路, 等. 人为干扰方式对希拉穆仁草原土壤-草地系统健康的影响[J]. 水土保持通报, 2025, 45(5): 53-62. Shang Jijia, Yang Guang, Zheng Lu, et al. Impact of various human disturbances on healthiness of soil and grassland system in Xilamuren grassland [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025, 45(5): 53-62. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2025.05.015; CSTR: 32312.14.stbctb.2025.05.015.

## Impact of various human disturbances on healthiness of soil and grassland system in Xilamuren grassland

Shang Jijia<sup>1</sup>, Yang Guang<sup>1</sup>, Zheng Lu<sup>1</sup>, Zhang Zezhong<sup>1</sup>, Xing Ende<sup>2,3</sup>

(1. College of Desert Control Science and Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot,

Inner Mongolia, 010018, China; 2. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, National

Field Scientific Observation and Research Station for Grassland Ecological Hydrology at the Northern Slope of Yinshan, Beijing 100038, China; 3. Ministry of Water Resources, Institute of Pastoral Area Water Science, Hohhot, Inner Mongolia 010020, China)

**Abstract:** [Objective] The impact of different human disturbances on the health of a soil-grassland system was evaluated quantitatively to provide a scientific basis for grassland ecological restoration, formulation of management measures, and sustainable utilization. [Methods] Using the grassland of Xilamuren in Inner Mongolia as the research object, we compared and analyzed the physicochemical properties and vegetation characteristics of the grassland soil under the four types of disturbance methods, namely enclosure, grazing, reclamation and tourism, and used grey correlation analysis and the fuzzy comprehensive evaluation method to

收稿日期: 2025-04-07

修回日期: 2025-06-10

采用日期: 2025-06-12

资助项目: 中国水利水电科学研究院内蒙古阴山北麓草原生态水文国家野外科学观测研究站 2023 年度开放基金项目“基于 3S 技术的阴山北麓草原水土流失过程及驱动机制研究”(YSS202305)

第一作者: 尚佳佳(2000—), 女(汉族), 内蒙古自治区包头市人, 硕士研究生, 研究方向为水土保持。Email: 1276394064@qq.com。

通信作者: 杨光(1974—), 男(汉族), 内蒙古自治区鄂尔多斯市人, 博士, 教授, 主要从事水土保持等方面的研究。Email: yg331@126.com。

assess the system health status. [Results] ① The percentage contents of gravel and sand were highest in the tourist area (14.98% and 67.79%, respectively) and lowest in the enclosure area (9.02% and 55.38%, respectively). The highest percentages of clay (15.45%) and silt (20.13%) were found in the enclosure zones, whereas the lowest values (7.21% and 10.02%, respectively) were found in the tourism zones. The highest soil bulk density (1.61 g/cm<sup>3</sup>) was also found in tourism zones. No significant differences were detected in the soil moisture and saturated water-holding capacity within the soil layers of the sampling sites. ② The highest soil organic matter (12.98 g/kg) and total nitrogen (0.73 g/kg) were observed in enclosure zones, whereas the lowest (8.23 g/kg and 0.46 g/kg) values were found in tourism zones. The total phosphorus and potassium levels among the different human disturbances were ranked as follows: reclamation > enclosure > grazing > tourism. Furthermore, 9.08 mg/kg more available phosphorus in reclaimed areas was higher than in tourism zones, whereas the content of available potassium (268 mg/kg) in the enclosure zones was significantly higher than that in other sites. ③ Total plant biomass of sampling site was ranked as enclosure (342.67 g/m<sup>2</sup>) > reclamation (155.29 g/m<sup>2</sup>) > grazing (112.93 g/m<sup>2</sup>) > tourism (43.51 g/m<sup>2</sup>). ④ Soil quality and grassland health were ranked as follows: enclosure > reclamation > grazing > tourism. [Conclusion] Significant differences in the soil physicochemical properties and plant biomass were observed under different human disturbance. Enclosure zones demonstrated the best soil quality and grassland health, whereas tourism zones showed the worst conditions. Both reclamation and grazing negatively affected soil quality and grassland health.

**Keywords: soil physical and chemical properties; plant biomass; grassland healthiness assessment; soil quality; Xilamuren grassland**

随着社会生产水平的提升和人口规模的持续扩张,人类对草原生态系统的开发强度日益加剧。在长期粗放型开发模式下,我国草原生态环境质量呈现出显著下降趋势<sup>[1-2]</sup>,严重威胁着区域生态安全,为应对草地退化所造成的生态环境问题,中国政府提出了一系列如“绿水青山就是金山银山”的生态文明理念,在这一理念的指导下,草原如何利用及科学保护和修复使可再生资源得到可持续发展备受关注<sup>[3-4]</sup>,如何平衡短期的经济效益以及长期的生态效益也成为当前研究的热点。

相关研究表明,不同干扰方式对草地影响程度是不同的,放牧、围封、旅游、开垦等活动都会影响草原的生态结构和功能,过度干扰会提高当地经济收入<sup>[5]</sup>,但会致使草原植被指标出现显著性差异<sup>[6-8]</sup>,同时也会改变土壤理化性质从而对土壤养分含量的积累造成一定的影响<sup>[9-10]</sup>。耕作和旅游作为典型的人工扰动行为,在为当地带来巨大经济收入的同时也对土壤结构以及植被多样性造成不同程度的破坏<sup>[11-12]</sup>。目前关于不同人为干扰下的土壤质量以及草地健康状况的研究尚不明确。基于此,本研究以典型的荒漠草原希拉穆仁草原为研究区,对围封、放牧、垦殖、旅游4种人工扰动行为对土壤理化性质和植被生物量的影响展开研究,通过定量、定性分析不同人为扰动方式对土壤特性和植被生物量的影响差异,对不同人为干扰下的土壤质量以及草地健康进行综合评价,为退化草地的生态恢复、管理措施的制

定以及草原的合理利用及可持续发展提供科学依据,贯彻落实“两山”理念,筑牢北方生态安全屏障。

## 1 研究区概况

希拉穆仁草原位于内蒙古自治区包头市达茂旗东南部的希拉穆仁镇境内(111°11'15"—111°12'14"E, 41°02'48"—41°24'43"N),希拉穆仁草原总面积约为720~1 000 km<sup>2</sup>,平均海拔1 602~1 700 m,属于典型的高原草场,气候特点为中温带半干旱大陆性季风气候,年均气温约2℃,降雨集中在夏季,冬季寒冷干燥。土壤为典型的栗钙土,多以砂壤土为主。草原上主要植物包括克氏针茅(*Stipa krylovii*)、糙隐子草(*Cleistogenes squarrosa*)、狭叶锦鸡儿(*Caragana stenophylla*)和羊草(*Leymus chinensis*)等。

## 2 材料与方法

### 2.1 样地设置及调查

于2024年7—8月在包头市达茂旗东南部的希拉穆仁镇境内进行取样调查,以阴山北麓草原生态水文国家野外科学观测研究站在2002年设置的封育及自由放牧试验地作为研究区,以围栏为界,向内扩散1 km内打点取样;以种植玉米作物21 a的耕地为垦殖研究区,以耕作边缘为界,向外扩散1 km内进行取样;旅游区以2005年开发建设的蒙古包为中心点,向四周扩散1 km内取样调查。通过样方法对样地的植被进行调查,各样地设置1 m×1 m草本样方各5个,

目估法测定样方内优势种、盖度、密度;用卷尺测定样方内植被高度。研究区样地基本信息详见表 1。

### 2.2 样品采集与测定

采用收割法将样方内植被的地上部分全部齐地刈割,地下部分用铁锹将根系和周围的土壤整体挖起取样<sup>[13]</sup>,放在筛子上用清水反复冲洗直至干净,全部带回实验室,65℃烘干至恒重,测重获得生物量<sup>[14]</sup>。在群落特征及生物量调查结束后,在每个样方内设置土壤剖面,垂直向下挖深度为 50 cm 的土坑,用 100 cm<sup>3</sup>环刀对每个样点 0—10 cm,10—20 cm,20—30 cm 土层进行取样,重复 3 次,带回实验室采用

环刀法进行土壤容重测定。环刀泡水 12 h 后烘干称重计算土壤饱和持水量。土壤含水量采用 105℃烘干法烘干至恒重,冷却至室温后进行测定。土壤颗粒组成采用 S3500 型激光粒度分析仪测定土壤粒径,按美国制分级标准划分为黏粒(<0.002 mm)、粉粒(0.002>0.02 mm)、砂粒(0.02~2 mm)、砾石(>2 mm)。将风干土过 2 和 0.149 mm 筛后进行土壤养分含量测定,半微量凯氏法测定土壤全氮;土壤有效磷采用 NaHCO<sub>3</sub> 浸提-紫外分光光度计法测定;土壤速效钾采用 NH<sub>4</sub>OAc 浸提、火焰光度计法测定;有机质含量采用重铬酸钾外加热法测定<sup>[15]</sup>。

表 1 希拉穆仁草原样地基本信息  
Table 1 Basic information of plot in Xilamuren grassland

干扰方式	干扰年限/a	优势种	平均高度/cm	平均密度/(株·m <sup>-2</sup> )	平均盖度/%	管理措施	说明
围封	22	克氏针茅+冰草+糙隐子草	43.70±2.31 <sup>a</sup>	1 039±90.87 <sup>a</sup>	86±11.45 <sup>a</sup>	完全围封	全年无人和畜牧干扰
垦殖	21	克氏针茅+羊草+地肤	24.63±0.89 <sup>b</sup>	678±66.73 <sup>b</sup>	59±7.16 <sup>b</sup>	种植玉米	春季种植,3—6月进行灌溉及施肥
放牧	22	狼毒+羊草+克氏针茅	5.22±3.56 <sup>c</sup>	257±78.30 <sup>c</sup>	26±11.56 <sup>c</sup>	自由放牧	放牧强度 11—5 月为 1.0~1.5 只/(hm <sup>2</sup> ·a), 6—10 月为 1.5~2.0 只/(hm <sup>2</sup> ·a)
旅游	19	冰草+克氏针茅+羊草	4.02±1.89 <sup>d</sup>	178±59.31 <sup>c</sup>	19±11.47 <sup>d</sup>	餐饮+骑马	旅游旺季为 6—9 月,日最大接待游客数 4 860 人

注:①表中数值为平均值±标准差;②不同小写字母表示人为扰动下差异显著( $p<0.05$ )。

### 2.3 灰色关联度分析

采用灰色关联度分析法对不同人为干扰下的土壤理化性质进行分析,选取容重、含水量、饱和持水量、有机质、全氮、全磷、全钾、速效磷、速效钾 9 种理化指标对不同人为干扰下的草地进行灰色关联度分析,利用 SPSS 进行标准化处理,将实际值转化为评价值,正向指标为  $y_i = x_i/x_0$ ,逆向指标为  $y_i = 1 - x_i/x_0$ ,故将不同样地不同土层间的土壤含水量、土壤养分含量最大值和土壤容重最小值统称为最优值,将最优值设为“参考序列”。参考序列值为  $x_0 = \{x_0(1), x_0(2) \dots x_0(n)\}$ ,  $x_i = \{x_i(1), x_i(2), \dots, x_i(n)\}$ ,  $i = 1, 2 \dots m$ 。计算  $x_0$  和  $x_i$  在  $k$  点的关联系数,计算公式为

$$\xi_i(k) = \frac{\min_k \min_i |x_0(k) - x_i(k)| + \rho \max_i \max_k |x_0(k) - x_i(k)|}{|x_0(k) - x_i(k)| + \rho \max_i \max_k |x_0(k) - x_i(k)|} \quad (1)$$

$$\gamma_i = \frac{\sum_{k=1}^n \xi_i(k)}{n} \quad (2)$$

式中: $x_i$ 为评价指标实际值; $x_0$ 为参考序列值; $|x_0(k) - x_i(k)|$ 为  $x_0$  数列与  $x_i$  数列  $k$  点的绝对差值; $\min_k |x_0(k) - x_i(k)|$ 为  $x_i$  与  $x_0$  在点  $k=1, 2 \dots n$  上的最小绝对差; $\min_i \min_k |x_0(k) - x_i(k)|$ 表示为  $i$  在点  $k$  点上的最小绝对差; $\max_i \max_k |x_0(k) - x_i(k)|$ 为二级最大差; $\rho$  为分辨系数, $\rho$  取值在 0~1 之间。

采用  $k$  个关联系数均值作为比较因素来分析整个关联度的量度。将各指标与参考序列关联度进行比较,与参考序列越接近,代表土壤质量越优,反之则表示综合表现力越差,最后根据对比结果对土壤质量优劣进行综合排序,确定不同干扰下土壤综合表现力<sup>[16]</sup>。

### 2.4 草地综合健康评价

草地健康评价采用模糊综合评价法,以围封、垦殖、放牧、旅游等干扰方式为处理集: $X = X_1, X_2, X_3, X_4$ ;以容重、含水量、饱和持水量、有机质、全氮、全磷、全钾、速效磷、速效钾为土壤指标,地上生物量以及地下生物量为植被指标,将以上土壤指标以及植被指标定为因素集  $U = U_1, U_2 \dots U_j \dots U_m$  特征矩阵为  $U_{n \times m} = (U_{ij})_{n \times m}$ ,构建草地健康评价体系,通过模糊综合评价法对希拉穆仁草原在不同人为干扰方式下的草地健康进行评价。

取评价的隶属函数为

$$r_{ij} = \begin{cases} \frac{U_{ij}}{\max(U_{1j}, U_{2j}, \dots, U_{nj})} & \text{当 } U_{ij} = \max(U_{1j}, U_{2j}, \dots, U_{nj}) \\ \max(U_{1j}, U_{2j}, \dots, U_{nj}) & \text{当 } U_{ij} < \max(U_{1j}, U_{2j}, \dots, U_{nj}) \end{cases} \quad (3)$$

模糊综合评价特征矩阵为

$$\begin{pmatrix} 1.45 & 16.73 & 30.93 & 12.68 & 268.33 & 15.53 & 0.54 & 12.98 & 0.73 & 221.43 & 72.77 \\ 1.51 & 14.72 & 27.90 & 14.07 & 191.33 & 18.72 & 0.56 & 8.72 & 0.49 & 57.33 & 56.28 \\ 1.49 & 10.11 & 24.80 & 6.02 & 112 & 12.83 & 0.42 & 11.48 & 0.64 & 88.08 & 57.72 \\ 1.61 & 7.56 & 23.46 & 4.99 & 64.67 & 11.83 & 0.37 & 8.23 & 0.46 & 20.08 & 21.43 \end{pmatrix} \quad (4)$$

式中： $U$ 为草地生态系统健康的因素集； $i$ 为不同评价  $R$ 可能做出的评判结果； $j$ 为若干个影响因素。

评价矩阵  $R = (r_{ij})_{n \times m}$

模糊综合评价矩阵为：

$$\begin{pmatrix} 0.904 & 1 & 1 & 0.901 & 1 & 0.830 & 0.958 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0.938 & 0.880 & 0.902 & 1 & 0.713 & 1 & 1 & 0.672 & 0.672 & 0.259 & 0.773 \\ 0.924 & 0.604 & 0.802 & 0.428 & 0.471 & 0.658 & 0.753 & 0.884 & 0.884 & 0.401 & 0.793 \\ 1 & 0.452 & 0.759 & 0.335 & 0.241 & 0.632 & 0.660 & 0.634 & 0.634 & 0.091 & 0.293 \end{pmatrix} \quad (5)$$

式中： $r_{ij}$ 为草地评价对象在若干个因素集做出的评价结果( $x_i$ )的程度。

评价函数为  $D_1 = 1/m \times (r_{i1} + r_{i2} + \dots + r_{im})$ ,  $D_2 = \max(r_{i1}, r_{i2}, \dots, r_{im})$ ,  $D_3 = \min(r_{i1}, r_{i2}, \dots, r_{im})$  分别计算得  $d_{i1}$ ,  $d_{i2}$ ,  $d_{i3}$  令  $U_1 = (D_1, D_2, D_3)$ ,  $R_1 = F(X \cdot U_1)$  (表 2)。

表 2 各样地健康评价函数数值  
Table 2 Numerical values of health performance functions of each sample

$R_1$	$D_1$	$D_2$	$D_3$
$X_1$	0.963	1.000	0.830
$X_2$	0.801	1.000	0.259
$X_3$	0.689	0.884	0.401
$X_4$	0.523	1.000	0.241

注： $R_1$ 为评价函数； $X_{1-4}$ 是以围封、垦殖、放牧、旅游为干扰方式的处理集； $D_1$ 为评价结果程度均值； $D_2$ 为评价结果程度最大值； $D_3$ 为评价结果程度最小值。

再令  $D = 1/3 \times (d_{i1} + d_{i2} + d_{i3})$  计算评判指标  $d_i$ 。各个样地草地健康评价的系数在 0~1, 系数越接近 1, 草地越接近健康状态<sup>[17]</sup>。其中,  $D$  为草地生态系统健康的评价函数； $d$  为评判指标。

### 2.5 数据处理与计算

运用 Excel 进行基础数据处理及灰色关联度计算, Origin pro 2024 进行绘图, 利用 SPSS 27.0 进行数据标准化处理及主成分分析。

## 3 结果与分析

### 3.1 土壤物理性质

#### 3.1.1 土壤颗粒组成

比较不同样地间的颗粒组成(图 1), 旅游区沙粒百分比含量最大为 67.79%, 围封区百分比含量最小为 55.38%; 粉粒含量顺序为: 围封(20.13%) > 放牧(15.32%) > 垦殖(13.80%) > 旅游(10.02%); 黏粒含量为: 围封(15.45%) > 垦殖(9.44%) > 放牧(8.91%) > 旅游(7.21%); 砾石含量顺序为: 旅游区(14.98%) > 垦殖(14.22%) 和 放牧区(13.00%) > 围封区(9.02%)。

#### 3.1.2 土壤容重

不同人为干扰方式下的土壤容重垂直分布特征

如图 2 所示, 旅游区在各土层间的土壤容重都显著高于其他区 ( $p < 0.05$ )。在土壤垂直方向上, 围封区的土壤容重随土层深度增加而增大, 垦殖区、放牧区、旅游区均随土层的增大而呈现减小趋势。旅游区在不同土层间的土壤容重具有显著差异, 土层平均容重为  $1.61 \text{ g/cm}^3$ , 相较于围封区、垦殖区、放牧区分别高出  $0.15, 0.10, 0.12 \text{ g/cm}^3$ 。

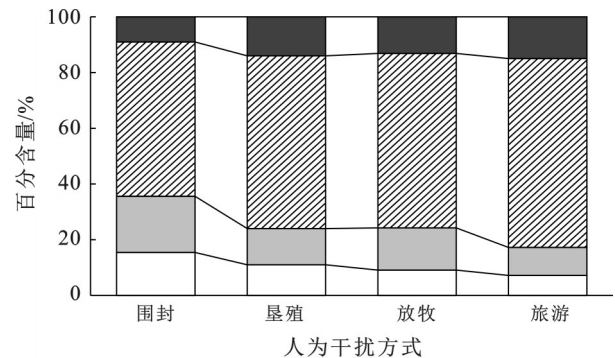
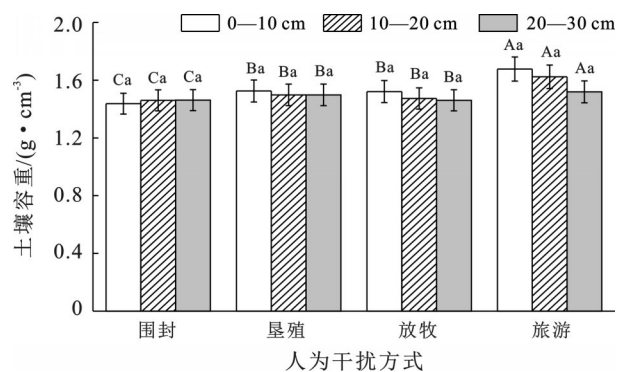


图 1 希拉穆仁草原不同人为干扰方式下的土壤颗粒组成  
Fig.1 Soil particle composition under different human interference methods in Xilamuren grassland



注: 不同大写字母表示样地间差异显著; 不同小写字母表示同一样地土层间差异显著 ( $p < 0.05$ )。下同。

图 2 希拉穆仁草原不同干扰方式下的土壤容重垂直分布特征

Fig.2 Vertical distribution characteristics of soil bulk density under different interference modes in Xilamuren grassland

#### 3.1.3 土壤含水量与饱和持水量

由图 3 可知, 垦殖、放牧、旅游区呈现随土层深度

增加土壤含水率增大的趋势,围封区土壤含水率随深度增大而减小。围封区平均含水率为 16.39%,垦殖、放牧次之,分别为 14.72% 和 10.11%,旅游区平均含水量最低为 7.56%。垂直方向上,各样地的饱和持水量在不同土层间均无显著性差异( $p < 0.05$ )。

在 20—30 cm 土层,围封、垦殖区的含水率和饱和持水量均与放牧、垦殖区具有显著差异( $p > 0.05$ ),平均饱和持水量由大到小顺序为:围封区(30.92%) > 垦殖区(27.90%) > 放牧区(24.80%) > 旅游区(23.46%)。

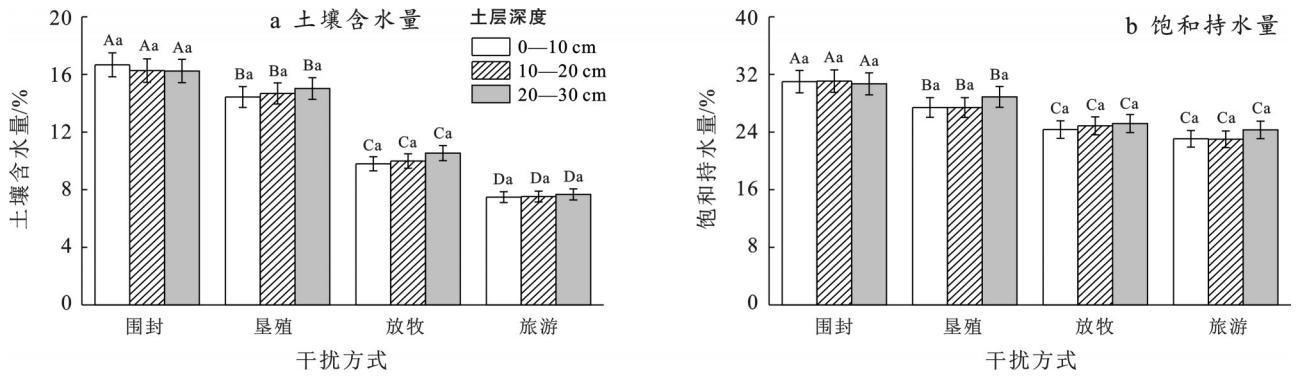


图 3 希拉穆仁草原不同干扰方式下土壤水分含量垂直分布特征

Fig.3 Vertical distribution characteristics of soil water content under different interference modes in Xilamuren grassland

### 3.2 土壤化学性质

如图 4 所示,不同干扰方式下的养分含量均呈现出随土层深度增加而减少的趋势。在 0—30 cm 土层,有机质及全氮含量均以围封区最高,分别为 12.98 和 0.73 g/kg,旅游和垦殖区有机质及全氮含量显著低于围封、放牧区( $p < 0.05$ );垦殖及放牧区的全磷含量在各土层间均具有显著性差异( $p < 0.05$ ),垦殖区在 0—10 cm 土层全磷及全钾含量分别为 0.675 和 19.54 g/kg,显著高于其他样地( $p < 0.05$ ),平均含量均表现为:垦殖 > 围封 > 放牧 > 旅游;围封区及垦殖区在垂直方向上的速效磷含量差异性显著( $p < 0.05$ ),旅游区在各土层间无显著差异,0—30 cm 土层速效磷平均含量为垦殖区最高 14.07 mg/kg,围封区次之 12.68 mg/kg,放牧及旅游区含量较低,分别为 6.01, 4.99 mg/kg;不同干扰方式下的速效钾含量具有显著差异( $p < 0.05$ ),围封区的平均含量为 268.00 mg/kg,较垦殖、放牧、旅游区分别高出 102.00, 176.00 和 236.00 mg/kg,垂直方向上,样地各土层间均具有显著差异,垦殖区在 0—10 cm 的速效钾含量较 10—20 cm 土层高出 68 mg/kg。

### 3.3 草地生物量

研究不同干扰方式下的生物量及根冠比,结果如图 5 所示,地上地下生物量由于不同干扰方式呈现出显著差异,围封区的地上地下生物量均显著高于其他区,分别为 248.50 和 143.56 g/m<sup>2</sup>,放牧区和旅游区的地下生物量高于地上生物量。总生物量由大到小分别为:围封(392.06 g/m<sup>2</sup>) > 垦殖(163.29 g/m<sup>2</sup>) > 放牧(107.93 g/m<sup>2</sup>) > 旅游(44.11 g/m<sup>2</sup>)。放牧区的根冠比显著最大,为 1.45,围封、放牧、旅游分别为 0.58, 0.80, 1.12。

### 3.4 各土层间土壤指标灰色关联度分析

各样地间的土壤质量随土层深度呈现不同的变化趋势(表 4),在 0—10 cm 土层,围封区各土壤指标之间关联度最大(0.97),旅游区关联度最小(0.63),综合表现力最差。在 10—20 cm 土层,关联度大小表现为:围封区(0.90) > 垦殖区(0.79) > 旅游区(0.74) > 放牧区(0.65)。20—30 cm 土层不同干扰方式下的关联度变化与 0—10 cm 土层相同。土壤质量优劣的综合排序为:围封区 > 垦殖区 > 放牧区 > 旅游区。

表 3 希拉穆仁草原土壤各指标权重百分比

Table 3 Percentage weights of soil indicators in Xilamuren grassland

单位: %

土壤指标	容重	含水量	饱和持水量	有机质	全氮	全钾	全磷	速效钾	速效磷	总计
权重	2	9	7	8	8	16	17	18	17	100

### 3.5 草地健康综合评价

采用模糊综合评价法对希拉穆仁草原在不同人为干扰方式下的草地健康进行评价,评价结果如图 6 所示。由图 6 可知,围封区的草地健康指数最高

(0.96),旅游区最低(0.59),垦殖和放牧下的草地健康相差不大。不同人为干扰方式下的草地健康由大到小顺序为:围封(0.96) > 垦殖(0.69) > 放牧(0.66) > 旅游(0.59)。

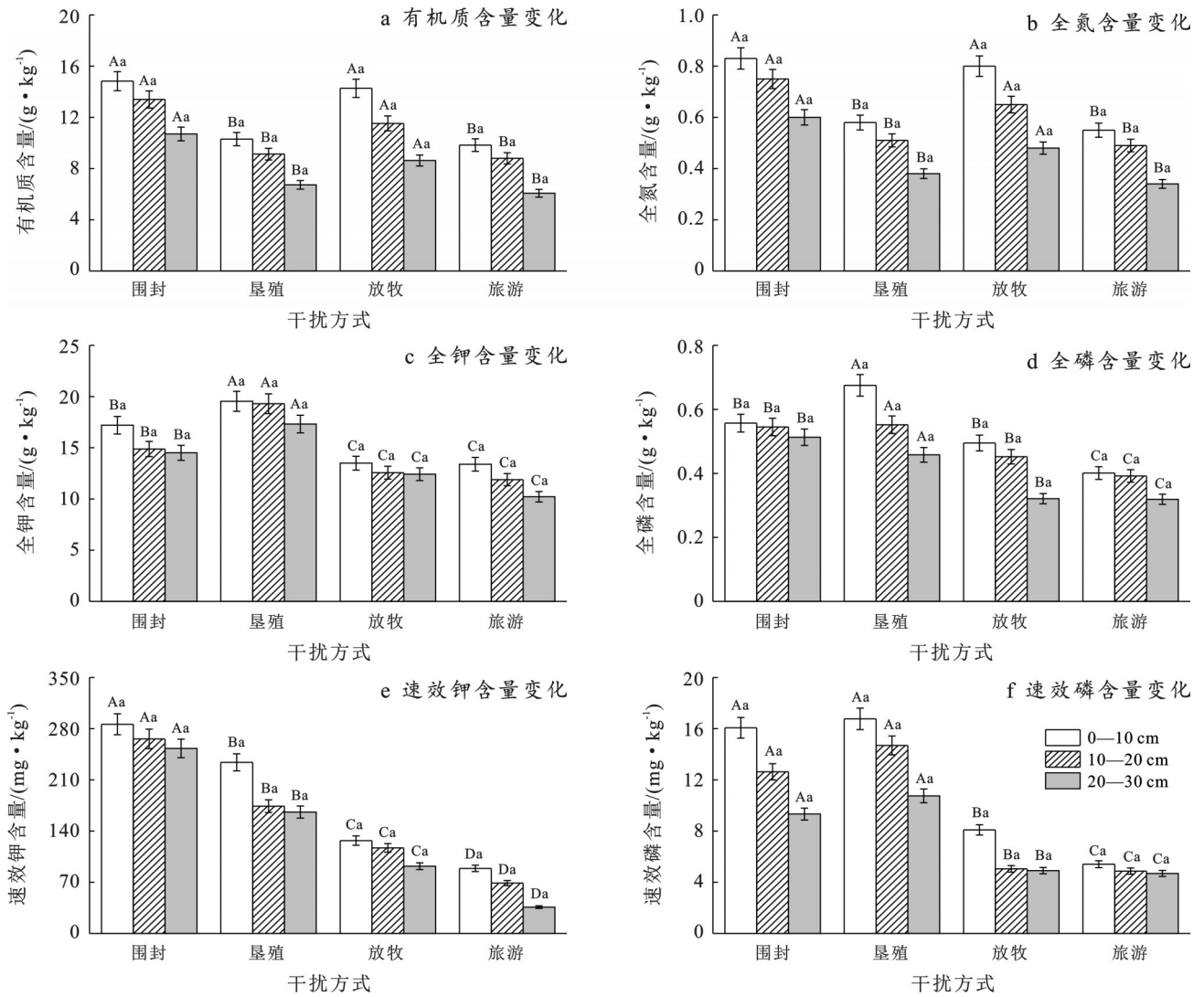
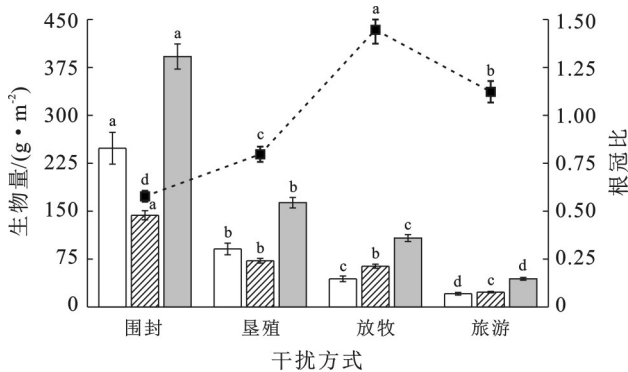


图 4 希拉穆仁草原不同干扰方式下的土壤化学性质垂直特征

Fig.4 Vertical characteristics of soil chemical properties under different interference methods in Xilamuren grassland



注:不同小写字母表示不同干扰下生物量差异显著( $p < 0.05$ )。

图 5 希拉穆仁草原不同干扰方式下草地生物量及根冠比  
Fig.5 Grassland biomass and root-crown ratio under different interference methods in Xilamuren grassland

式会对草原的土壤理化性质造成影响,直接影响土壤的肥力、水分保持能力、养分循环以及植物生长<sup>[18-19]</sup>。通过灰色关联度分析法以及模糊综合评价法对土壤质量和草地的健康状况进行定量评价是我国学者常用方法之一<sup>[16-17]</sup>。

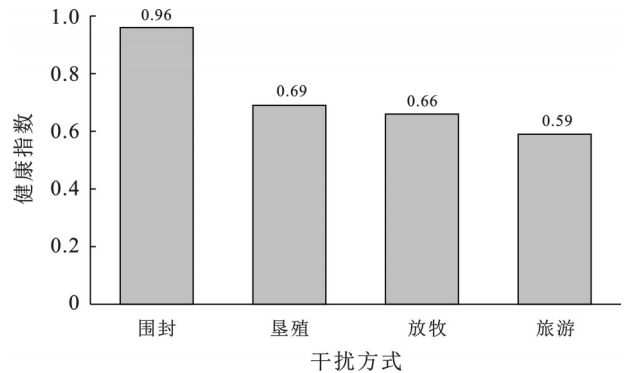


图 6 希拉穆仁草原不同干扰方式下的草地健康指数  
Fig.6 Grassland health index under different interference methods in Xilamuren grassland

## 4 讨论

在草地的利用和保护过程中,不同人为干扰方

表4 希拉穆仁草原不同人为干扰方式下各土层土壤因子灰色关联系数及关联度  
Table 4 Grey correlation coefficients and correlation degrees of soil factors in different soil layers under different human interference methods in Xilamuren grassland

土层深度/cm	干扰方式	容重/ (g·cm <sup>-3</sup> )	含水量/ %	饱和持 水量/%	有机质/ (g·kg <sup>-1</sup> )	全N/ (g·kg <sup>-1</sup> )	全K/ (g·kg <sup>-1</sup> )	全P/ (g·kg <sup>-1</sup> )	速K/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	速P/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	关联度	排序
0—10	围封	0.994	0.982	0.983	0.950	0.981	0.894	0.988	1.000	0.981	0.97	1
	垦殖	0.930	0.992	0.928	0.851	0.924	0.842	0.938	0.978	0.870	0.91	2
	放牧	0.703	0.920	0.492	0.607	0.714	0.819	0.697	0.838	0.737	0.72	3
	旅游	0.630	0.836	0.334	0.723	0.611	0.565	0.604	0.704	0.610	0.63	4
10—20	围封	0.999	0.933	0.912	0.937	0.956	0.935	0.958	0.675	0.959	0.90	1
	垦殖	0.988	0.849	0.652	0.500	0.957	0.396	0.992	0.804	1.000	0.79	2
	放牧	0.793	0.589	0.707	0.622	0.781	0.640	0.789	0.335	0.798	0.65	4
	旅游	0.795	0.420	0.680	0.903	0.860	0.605	0.848	0.698	0.851	0.74	3
20—30	围封	1.000	0.880	0.819	0.916	0.974	0.605	0.975	0.811	0.978	0.87	1
	垦殖	0.931	0.738	0.957	0.514	0.996	0.711	0.943	0.781	0.937	0.83	2
	放牧	0.793	0.501	0.587	0.750	0.809	0.908	0.836	0.480	0.813	0.73	3
	旅游	0.675	0.359	0.446	0.816	0.733	0.653	0.723	0.709	0.711	0.66	4

本研究中,围封区土壤有机质及全氮含量显著高于其他区,围封区植被恢复增加植被盖度>75%,地上生物量增加使枯落物分解增大土壤有机质含量<sup>[20]</sup>,高有机质促进养分矿化,黏粒含量高增强速效养分的吸附能力,地下生物量增大,根系发育促进孔隙再生,形成稳定孔隙系统,致使持水能力较强<sup>[21]</sup>。索晓璐在围栏禁牧工程对沙生针茅草原健康状况影响的研究中表明,围封草地的草地健康指数显著高于放牧区<sup>[22]</sup>,与本研究结果相似。但围封年限以及管理措施不同也会对草地的修复造成不同的影响<sup>[23]</sup>,有研究表明,长期的完全围封会一定程度地降低生物多样性,造成保护性退化的发生<sup>[5]</sup>。定期的刈割以及放牧反而会提高群落多样性<sup>[24]</sup>。因此,围封这种干扰方式对于草地的保护及修复是合理且有效的,同时采取适当的围封时间以及管理措施则更有利于实现草原的可持续发展。草地开垦为农田后,沙粒砾石含量较围封区增大,土壤容重也显著增大,这可能是因机械耕作以及碾压导致土壤物理结构被破坏,土壤抗蚀性减弱<sup>[25]</sup>,风蚀带走表层土壤,水蚀加速养分流失,土壤对有机质的保护削弱,保水保肥能力差,植物生长受限<sup>[26]</sup>,有机质及生物量较围封区减少,但短期施肥残留又会导致土壤表层速效养分高于其他样地。垦殖区土壤质量显著低于围封样地,但也有研究<sup>[11]</sup>表明,在退化草原开垦农田,轮换种植不同作物或可提高土壤含氮量以及稳定土壤结构。因此对于已经严重退化的草地,开垦农田后采用草田轮作等管理措施可作为一种有效干扰方式对土壤特性进行改变,从而达到对退化草地的恢复以及重建。

本研究中,放牧区的有机质含量显著高于垦殖以及旅游区,牲畜的排泄物增大了土壤表层的有机质含量<sup>[27]</sup>,但放牧区因牲畜蹄压作用,导致容重增大,沙粒砾石比例高,导致水土流失严重,致使保肥能力差<sup>[28]</sup>。宋向阳<sup>[29]</sup>对退牧还草工程区禁牧和休牧两种干扰方式下植被恢复过程中土壤容重和水分等的变化特征进行了研究,也证实了放牧会导致土壤紧实、容重增加,影响土壤水分含量和植物生长,这与本研究结果一致。同时牲畜啃食导致地上生物量减少<sup>[30]</sup>。

研究区长期过度放牧导致地下生物量也较低,植物无法正常生长,草地急剧退化。但适度放牧可降低冠幅对于牧草光合作用的影响<sup>[31]</sup>,增大物种多样性,改善土壤的理化性质<sup>[32]</sup>,相较于完全围封会更有利于草地的可持续发展及利用。旅游区因人为踩踏导致土壤容重显著增高,土壤孔隙减少导致持水能力下降<sup>[33]</sup>,土壤沙粒所占比例高于其他样地,土壤养分流失严重。不同土层间的有机质、全氮、钾含量均具有显著性差异,这可能是由于游客的活动致使局部区域短期提升表层有机质以及钾含量<sup>[34-35]</sup>,但深层仍贫瘠。旅游使得草地地上生物量显著低于其他样地,旅游区人为踩踏直接损伤植被(盖度<19%),同时土壤水分以及养分的不充足抑制种子萌发以及植被的生长<sup>[36]</sup>;土壤的持水能力较差,因此限制根系扩展<sup>[12]</sup>,导致地下生物量急剧下降。旅游区的土壤表现力以及草地综合健康指数均为最低,因此对于旅游这种人为干扰方式更应该注重,不仅仅要关注发展旅游所带来的经济效益,更要兼顾对于草地的

合理保护以及开发利用,从而达到景区以及生态环境的可持续发展。

## 5 结论

4种不同人为干扰下的土壤理化性质均具有显著性差异。围封区的地上地下生物量均显著高于其他区,而旅游区生物量最低仅为 $43.51\text{ g/m}^2$ 。整体而言,围封区的土壤质量以及草地健康状况最好,旅游作为人为扰动方式之一,严重降低了土壤质量,垦殖及其放牧对草地影响相差不大,但土壤质量以及草地综合健康也显著低于围封区。综上所述,围封相较于其他干扰方式对草地的恢复以及重建更具有长效及合理性,但采用适度放牧以及合理种植也可达到草原生态系统的恢复及可持续发展。旅游严重影响了草原生态健康,因此更应该注重生态旅游管理,严格践行“生态优先、绿色发展”原则,将生态修复以及绿色产业深度融合,实现生态及经济效益的平衡发展,从而达到草原生态系统的可持续利用。

### 参考文献 (References)

- [1] 刘燕.不同利用方式对荒漠草原景观格局与土壤空间异质性的影响[D].内蒙古呼和浩特:内蒙古农业大学,2023.  
Liu Yan. Effects of different land use patterns on landscape pattern and soil spatial heterogeneity in desert steppe [D]. Hohhot, Inner Mongolia: Inner Mongolia Agricultural University, 2023.
- [2] 尚宾.希拉穆仁典型草原不同放牧强度对土壤理化性质和径流泥沙的影响[D].山东泰安:山东农业大学,2020.  
Shang Bin. Effects of different grazing intensities on soil physical and chemical properties and runoff and sediment in typical grassland of Xilamuren [D]. Taian, Shandong: Shandong Agricultural University, 2020.
- [3] 杨天成,李晓佳.不同草地利用方式对内蒙古典型草原群落特征及草地健康的影响[J].草业科学,2022,39(5):841-849.  
Yang Tiancheng, Li Xiaojia. Effects of land use patterns on community characteristics and grassland health in Inner Mongolia [J]. Pratacultural Science, 2022, 39(5): 841-849.
- [4] 胡向敏,乌仁其其格,刘琼,等.不同利用方式下贝加尔针茅草甸草原群落多样性变化[J].干旱区资源与环境,2021,35(4):189-194.  
Hu Xiangmin, Wu Renqiqige, Liu Qiong, et al. Species diversity changes in *Stipa baicalensis* meadow steppe under different utilizing types [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2021, 35(4):189-194.
- [5] Dong Jiayu, Ren Zimeng, Zhang Xinling, et al. Pastoral differentiations' effects on willingness to accept valuation for grassland eco-subsidy: Empirical study of 410 herder households in grass-livestock balance sub-policy zones in Inner Mongolia, China [J]. Sustainability, 2023, 15(13):10001.
- [6] 孙磊,冯探,陈少华,等.不同围封年限对藏北高寒草原植物群落特征的影响[J].高原农业,2024,8(6):571-579.  
Sun Lei, Feng Tan, Chen Shaohua, et al. Effects of different enclosure years on community characteristics of alpine steppe in northern Xizang [J]. Journal of Plateau Agriculture, 2024, 8(6):571-579.
- [7] 许婷婷,董智,李红丽,等.放牧对希拉穆仁草原植物群落及种间联结的影响[J].干旱区资源与环境,2022,36(11):112-118.  
Xu Tingting, Dong Zhi, Li Hongli, et al. Effects of grazing on plant community characteristics and interspecific association in Xilamuren grassland [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2022, 36(11): 112-118.
- [8] Miao Renhui, Liu Yinshan, Wu Liqi, et al. Effects of long-term grazing exclusion on plant and soil properties vary with position in dune systems in the Horqin sandy land [J]. Catena, 2022, 209:105860.
- [9] 李浩,郭肖,李航宇,等.围封年限对典型草原植物多样性和土壤养分空间异质性的影响[J].内蒙古大学学报(自然科学版),2025,56(2):196-205.  
Li Hao, Guo Xiao, Li Hangyu, et al. Effects of enclosure duration on plant diversity and spatial heterogeneity of soil nutrients in typical steppe [J]. Journal of Inner Mongolia University (Natural Science Edition), 2025, 56(2):196-205.
- [10] Cheng Jimin, Jing Guanghua, Wei Lin, et al. Long-term grazing exclusion effects on vegetation characteristics, soil properties and bacterial communities in the semi-arid grasslands of China [J]. Ecological Engineering, 2016, 97:170-178.
- [11] 白春利,赵和平,师永明,等.荒漠草原区“草田轮作”模式及牧草高效种植技术[J].畜牧与饲料科学,2019,40(8):47-49.  
Bai Chunli, Zhao Heping, Shi Yongming, et al. A rotation mode of crop and grass in desert grassland area and high-efficient cultivation technique of herbage [J]. Animal Husbandry and Feed Science, 2019, 40(8): 47-49.
- [12] 宁璐,崔向新,刘艳萍,等.两种旅游扰动模式对荒漠草原植被及土壤的影响研究[J].干旱区资源与环境,2023,37(2):120-127.  
Ning Lu, Cui Xiangxin, Liu Yanping, et al. Effects of two tourism disturbance models on vegetation and soil in desert steppe [J]. Journal of Arid Land Resources and

- Environment, 2023, 37(2):120-127.
- [13] 周栋昌,张榕,武慧娟,等.黄土高原混播草地地下生物量及土壤理化性质研究[J].中国草食动物科学,2020,40(5):32-36.  
Zhou Dongchang, Zhang Rong, Wu Huijuan, et al. Study on underground biomass and soil physical and chemical properties of mixed sowing grassland in Loess Plateau [J]. China Herbivore Science, 2020, 40(5): 32-36.
- [14] 郭洋洋.敖汉旗低效林固碳效应及其更新改造的研究[D].内蒙古呼和浩特:内蒙古农业大学,2016.  
Guo Yangyang. Carbon sink function and improvement measures of low-function plantation in Aohan [D]. Hohhot, Inner Mongolia: Inner Mongolia Agricultural University, 2016.
- [15] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3版.北京:中国农业出版社,1999:42-50  
Bao Shidan. Soil chemical analysis [M]. 3rd edition. Beijing: China Agricultural Press, 1999:42-50
- [16] 马晓.锡林浩特市露天开采对周边草地土壤理化性质的影响[D].内蒙古呼和浩特:内蒙古农业大学,2021.  
Ma Xiao. Effects of open-pit coal mining on soil physical and chemical properties of surrounding grassland in Xilinhot [D]. Hohhot, Inner Mongolia: Inner Mongolia Agricultural University, 2021.
- [17] 邹蕴.锡林浩特市露天矿区草地生态系统健康评价[D].内蒙古呼和浩特:内蒙古农业大学,2019.  
Zou Yun. The health evaluation of grassland ecosystem in Xilinhot open pit mining area [D]. Hohhot, Inner Mongolia: Inner Mongolia Agricultural University, 2019.
- [18] 王洁,贾文雄,赵珍,等.祁连山北坡草甸草原地上生物量与土壤理化性质的关系[J].水土保持研究,2017,24(1):36-42.  
Wang Jie, Jia Wenxiong, Zhao Zhen, et al. Study on the relations between the above ground biomass and the soil physicochemical properties in the north slope of Qilian Mountains [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2017, 24(1):36-42.
- [19] 杜志勇,丛楠.植被与土壤特征对青藏高原不同程度退化草地的响应[J].生态学报,2024,44(6):2504-2516.  
Du Zhiyong, Cong Nan. Responses of vegetation and soil characteristics to degraded grassland under different degrees on the Qinghai-Tibet Plateau [J]. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(6):2504-2516.
- [20] 郭瑞鑫,蒙仲举,万芳.荒漠草原不同围封措施下羊草枯落物分解及养分释放特征[J].林草资源研究,2024(3):51-59.  
Wu Ruixin, Meng Zhongju, Wan Fang. Characteristics of decomposition and nutrient release of *Leymus chinensis* litter under different enclosure measures in desert steppe [J]. Forest and Grassland Resources Research, 2024(3):51-59.
- [21] Song Shanshan, Zhu Jiangling, Tang Zhiyao. Effects of short-term fencing on plant functional diversity in the meadow steppe of Saihanba, Hebei Province, China [J]. The Journal of Applied Ecology, 2025, 36(1): 104-112.
- [22] 索晓璐.围栏禁牧工程对沙生针茅草原生态系统健康状况的影响[D].内蒙古呼和浩特:内蒙古大学,2019.  
Suo Xiaolu. Effects of fencing grazing prohibition project on the health status of *Stipa arenaria* grassland ecosystem [D]. Hohhot, Inner Mongolia: Inner Mongolia University, 2019.
- [23] 杨彦东.不同封育年限对退化草原土壤理化性质和微生物的影响[J].草原与草业,2021,33(1):41-46.  
Yang Yandong. Effects of different enclosure years on soil physicochemical properties and microorganisms in degraded grassland [J]. Grassland and Prataculture, 2021, 33(1):41-46.
- [24] 杨阳,贾丽欣,乔莽璐,等.短期刈割对大针茅草地群落特征和植物多样性的影响[J].中国草地学报,2019,41(3):38-44.  
Yang Yang, Jia Lixin, Qiao Jirong, et al. Effect of mowing patterns on community characteristics and plant diversity in *Stipa grandis* steppe [J]. Chinese Journal of Grassland, 2019, 41(3):38-44.
- [25] Wang Chu, Li Linghao, Yan Yuchun, et al. Effects of cultivation and agricultural abandonment on soil carbon, nitrogen and phosphorus in a meadow steppe in eastern Inner Mongolia [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2021, 309:107284.
- [26] 罗玉红,黄予姝,珠娜,等.锡林郭勒盟典型草原区草地开垦及退耕造林对土壤粒径分布和养分的影响[J].中国农业科学,2024,57(24):4919-4932.  
Luo Yuhong, Huang Yushu, Zhu Na, et al. Effects of cultivation and cropland afforestation on soil particle size distribution and soil nutrients in the typical steppe of Xilingol League [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2024, 57(24):4919-4932.
- [27] 熊好琴,段金跃,王妍,等.围栏禁牧对毛乌素沙地土壤理化特征的影响[J].干旱区资源与环境,2012,26(3):152-157.  
Xiong Haoqin, Duan Jinyue, Wang Yan, et al. Effects of continuous grazing and livestock exclusion on soil properties in a degraded Mu Us sandy grassland, Inner Mongolia, northern China [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2012, 26(3):152-157.
- [28] Liu Xiang, Ma Zhiwen, Huang Xiaotao, et al. How does grazing exclusion influence plant productivity and community structure in alpine grasslands of the Qinghai-

- Tibetan Plateau? [J]. *Global Ecology and Conservation*, 2020, 23: e01066.
- [29] 杨勇, 宋向阳, 咏梅, 等. 不同干扰方式对内蒙古典型草原土壤有机碳和全氮的影响[J]. *生态环境学报*, 2015, 24(2): 204-210.  
Yang Yong, Song Xiangyang, Yong Mei, et al. Impacts of different disturbances on soil organic carbon and total nitrogen of typical steppe in Inner Mongolia [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2015, 24(2): 204-210.
- [30] 马少薇, 郭建英, 李锦荣, 等. 放牧强度对短花针茅群落特征及冠层截留的影响[J]. *中国草地学报*, 2016, 38(5): 66-70.  
Ma Shaowei, Guo Jianying, Li Jinrong, et al. Effect of grazing intensity on *Stipa breviflora* communities and canopy interception [J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2016, 38(5): 66-70.
- [31] 刘玉祯, 赵新全, 董全民, 等. 放牧对草地生态系统结构与功能影响的研究进展[J]. *草地学报*, 2023, 31(8): 2253-2262.  
Liu Yuzhen, Zhao Xinquan, Dong Quanmin, et al. Research progress on the effects of grazing on grassland ecosystem structure and function [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2023, 31(8): 2253-2262.
- [32] Guo Yanjun, Chen Yuanyuan. A review of the impact of grazing on grassland ecosystems: Research progress and prospects [J]. *Advances in Resources Research*, 2024, 4(3): 455-473.
- [33] 陈婷, 李国华, 王燕铭. 旅游活动对香山公园草地生态环境的影响[J]. *水土保持研究*, 2015, 22(3): 280-285.  
Chen Ting, Li Guohua, Wang Yanming. Effects of tourist activities on grassland ecological environment in Xiangshan Park [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2015, 22(3): 280-285.
- [34] 段桂兰, 朱寅健. 旅游干扰对土壤生态系统的影响研究进展[J]. *生态学报*, 2019, 39(22): 8338-8345.  
Duan Guilan, Zhu Yinjian. Review on the effects of tourism disturbance on soil ecosystem [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(22): 8338-8345.
- [35] 赵彩红. 旅游干扰对草原植被多样性和土壤性质的影响研究[J/OL] (2022-05-05). 分子植物育种, <https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?dbcode=CJFD&dbname=CJFD&filename=FZZW20220504003>.  
Zhao Caihong. Effects of tourism disturbance on grassland vegetation diversity and soil properties [J/OL] (2022-05-05). *Molecular Plant Breeding*, <https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?dbcode=CJFD&dbname=CJFD&filename=FZZW20220504003>.
- [36] 李志美, 海棠, 陈杨, 等. 旅游干扰对呼伦贝尔景区草地植物群落及土壤线虫群落多样性的影响[J]. *畜牧与饲料科学*, 2021, 42(4): 83-88.  
Li Zhimei, Hai Tang, Chen Yang, et al. Effects of tourism disturbance on diversity of plant and soil nematode communities in grassland of a scenic spot in Hulun Buir City [J]. *Animal Husbandry and Feed Science*, 2021, 42(4): 83-88.

(上接第 52 页)

- [25] 石艳香, 迟凤琴, 张久明, 等. 不同施肥处理黑土中添加秸秆对土壤团聚体稳定性及有机碳贡献率的影响[J]. *土壤通报*, 2023, 54(4): 856-863.  
Shi Yanxiang, Chi Fengqin, Zhang Jiuming, et al. Effects of straw addition on stability of soil aggregates and contribution of organic carbon under different fertilization treatments in black soil [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2023, 54(4): 856-863.
- [26] 王飞, 李清华, 何春梅, 等. 长期施肥对黄泥田土壤团聚体中氮素积累和有机氮组成的影响[J]. *中国农业科学*, 2023, 56(9): 1718-1728.  
Wang Fei, Li Qinghua, He Chunmei, et al. Effects of long-term fertilization on nitrogen accumulations and organic nitrogen components in soil aggregates in yellow-mud paddy soil [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2023, 56(9): 1718-1728.
- [27] Wen Yunjie, Tang Yuefeng, Wen Jiong, et al. Variation of intra-aggregate organic carbon affects aggregate formation and stability during organic manure fertilization in a fluvo-aquic soil [J]. *Soil Use and Management*, 2021, 37(1): 151-163.
- [28] 陈泽清, 杨光, 吴际, 等. 黄土丘陵沟壑区植被类型对土壤团聚体及有机碳的影响[J]. *中国水土保持科学(中英文)*, 2025, 23(2): 77-88.  
Chen Zeqing, Yang Guang, Wu Ji, et al. Effects of vegetation types on soil aggregates and organic carbon in loess hills and gullies [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2025, 23(2): 77-88.
- [29] Ren Lidong, Yao Shuihong, Sun Jingwei, et al. Assessment of soil aggregate pore structure after 8 years of cultivation from the parent material of a Mollisol [J]. *Catena*, 2024, 235: 107699.
- [30] Amelung W, Meyer N, Rodionov A, et al. Process sequence of soil aggregate formation disentangled through multi-isotope labelling [J]. *Geoderma*, 2023, 429: 116226.