

DOI: 10.13870/j.cnki.stbxb.2024.03.040

王艺颖, 陈新闻, 董智, 等. 希拉穆仁草原不同放牧强度对植被群落特征和土壤团聚体的影响[J]. 水土保持学报, 2024, 38(3):

WANG Yiyong, CHEN Xinchuang, DONG Zhi, et al. Effects of different grazing intensities on vegetation community characteristics and soil aggregates in Xilamuren grassland[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(3):

希拉穆仁草原不同放牧强度对植被群落特征和土壤团聚体的影响

王艺颖¹, 陈新闻^{1,2}, 董智^{1,2}, 郭建英³, 陈阳¹,
安淳淳^{1,2}, 李欣¹, 李质城¹

(1. 山东农业大学林学院/泰山森林生态系统定位研究站, 山东 泰安 271018; 2. 山东省高等学校黄河流域水土保持与林草生态保育协同创新中心, 山东 泰安 271018; 3. 水利部牧区水利科学研究所, 呼和浩特 010020)

摘要: [目的] 为探究草原不同放牧强度下植被群落的改变, 解析群落特征变化对土壤团聚体的影响。[方法] 以希拉穆仁荒漠草原控制放牧试验区为研究对象, 采用野外调查、室内分析相结合的方法, 分析轻度放牧(LG)、中度放牧(MG)、重度放牧(HG)和禁牧(CK)下植被群落特征和土壤团聚体特征及二者的关系, 揭示植物群落变化对土壤团聚体的影响。[结果] (1) 植物群落物种数随放牧强度的增加而增加, LG 的群落 Shannon-Wiener 多样性指数(H')和 Simpson 优势度指数(D)显著低于其他放牧强度($p < 0.05$)。地上生物量随放牧强度的增加而降低, HG 的地上生物量显著低于其他放牧强度($p < 0.05$)。不同放牧强度下地下生物量差异显著, 且不同土层的地下生物量均以 LG 最高。(2) 平均重量直径(MWD)和几何平均直径(GMD)的变化趋势与大团聚体含量一致, 在 0—5, 5—10 cm 土层表现为随放牧强度的增加先增加后降低再增加(LG 最高、MG 最低)。(3) 群落 Shannon-Wiener 多样性指数(H')、Pielous 均匀度指数(J')、地上生物量、容重是影响大团聚体含量、MWD 和 GMD 的显著性因子($p < 0.05$)。[结论] 放牧强度对土壤团聚体稳定性具有负反馈调节作用, 主要通过影响植被群落多样性指数(H' 和 J')、地上生物量、土壤容重的变化而引起土壤团聚体稳定性的变化。该结果为希拉穆仁草原放牧强度选择以及生态恢复工作提供理论支撑和科学依据。

关键词: 荒漠草原; 放牧强度; 植被群落; 多样性指数; 土壤团聚体

中图分类号: S157.1 文献标识码: A

Effects of Different Grazing Intensities on Vegetation Community Characteristics and Soil Aggregates in Xilamuren Grassland

WANG Yiyong¹, CHEN Xinchuang^{1,2}, DONG Zhi^{1,2}, GUO Jianying³, CHEN Yang¹,
AN Chuanchuan^{1,2}, LI Xin¹, LI Zhijian¹

(1. College of Forestry, Shandong Agricultural University, Taishan Forest Ecosystem Research Station, Tai'an, Shandong 271018, China; 2. Co-Innovation Center for Soil-Water and Forest-Grass Ecological Conservation in Yellow River Basin of Shandong Higher Education Institutions, Tai'an, Shandong 271018, China; 3. Grassland hydraulic research institute of the ministry of water resources, Hohhot 010020, China)

Abstract: [Objective] In order to explore the changes of vegetation communities under different grazing intensities in grassland, the effects of community characteristics on soil aggregates were analyzed. [Methods] Taking the controlled grazing experimental area of Xilamuren desert steppe as the research object, the characteristics of vegetation community and soil aggregates under light grazing (LG), moderate grazing (MG), heavy grazing (HG), and no grazing (CK) and their relationship were analyzed by field investigation and indoor analysis, and the effects of plant community changes on soil aggregates were revealed. [Results] (1) The Shannon-Wiener diversity index (H') and Simpson dominance index (D) of LG were significantly

收稿日期: 2023-12-28 修回日期: 2024-01-30 录用日期: 2024-02-15

资助项目: 国家自然科学基金面上项目(42177347, 51879155); 内蒙古阴山北麓草原生态水文国家野外科学观测研究站开放研究基金项目(YSS202104)

第一作者: 王艺颖(1999—), 女, 山东临沂人, 硕士研究生, 主要从事水土保持研究。E-mail: wyiyong1016@163.com

通信作者: 董智(1971—), 男, 内蒙古乌兰察布人, 教授, 博士, 博士生导师, 主要从事水土保持和生态恢复研究。E-mail: nmgdz@163.com

http://stbxb.alljournal.com.cn

lower than those of other grazing intensities ($p < 0.05$). The aboveground biomass decreased with the increase of grazing intensity, and the aboveground biomass of HG was significantly lower than that of other grazing intensities ($p < 0.05$). The underground biomass under different grazing intensities was significantly different, and the underground biomass of different soil layers was the highest in LG. (2) The change trend of mean weight diameter (MWD) and geometric mean diameter (GMD) was consistent with the content of macroaggregates. In 0–5 cm and 5–10 cm soil layers, it increased first, then decreased and then increased with the increase of grazing intensity (LG was the highest and MG was the lowest). (3) Shannon-Wiener diversity index (H'), Pielous evenness index (J'), aboveground biomass, and bulk density were significant factors affecting macroaggregate content, MWD, and GMD ($p < 0.05$). [Conclusion] Grazing intensity had a negative feedback regulation effect on soil aggregate stability, which mainly caused the change of soil aggregate stability by affecting the changes of vegetation community diversity index (H' and J'), aboveground biomass, and soil bulk density. The results provide theoretical support and a scientific basis for the selection of grazing intensity and ecological restoration in Xilamuren grassland.

Keywords: desert steppe; grazing intensity; vegetation communities; diversity index; soil aggregates

Received: 2023-12-28

Revised: 2024-01-30

Accepted: 2024-02-15

草原生态系统是陆地生态系统重要的组成部分,其稳定性受气候条件、地形特征及放牧强度的共同影响^[1]。放牧作为草原的主要利用方式,显著改变草原植被群落和土壤特征,进而影响草原综合生态系统服务功能^[2-3]。植被群落是维系草原生态稳定的关键要素,植被群落特征的变化不仅导致土壤物理结构和化学养分改变^[2],也影响土壤团聚体的组成和稳定性。土壤团聚体作为土壤基本的结构单元,主要包括大团聚体(>0.25 mm)和小团聚体(<0.25 mm)^[4],其组成与稳定性在土壤固碳、水土保持、风蚀防治、生物多样性维持等方面发挥着重要作用,是评价土壤质量的关键指标之一^[4-5]。然而,土壤团聚体易受外界环境影响,气候变化、放牧、植被群落特征、微生物、植物根系、土壤有机质等都影响土壤团聚体造成影响^[6-7]。已有研究^[8-9]表明,放牧过程中的践踏、采食和粪尿返还等对土壤团聚体造成正向或负向的反馈调节作用,但其影响效应和程度具有较大的差异性。造成此差异的原因可能是植被群落特征的差异,放牧改变植被群落组成及其种间联结性^[10],影响地表植被生长和地下根系分布情况^[1],进而影响土壤有机质的输入和微生物活性,直接或间接地改变土壤团聚体的形成^[7]。目前,关于放牧条件下植被群落特征变化对土壤团聚体的影响仍不明晰。希拉穆仁荒漠草原是内蒙古典型放牧草原,长期受到干旱和不合理放牧的影响,生态系统稳定性较差,目前,较多研究^[7-10]关注于放牧强度对土壤理化性质、水土流失特征的影响,但该草原植物群落对放牧强度的响应如何?植物群落的改变对土壤团聚体特征造成哪些影响?为进一步解析放牧强度下植被群落变化对土壤团聚体的影响,以希

拉穆仁荒漠草原控制放牧强度试验区为研究对象,分析不同放牧强度下植物种类、植被多样性和地上、地下生物量等植被群落特征和土壤团聚体组成及稳定性特征的变化,探究不同放牧强度对植被群落特征和土壤团聚体组成及稳定性的影响,以期为指导合理放牧与草原生态修复提供科学依据。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

研究区位于包头市达茂旗东南部的希拉穆仁中温带典型荒漠草原,地处内蒙古高原南缘的低山丘陵草原区($41^{\circ}21'36''N, 111^{\circ}13'48''E$),研究区地势平坦,土壤为典型栗钙土,土壤质地以砂壤土为主,有效土层厚度约为 40 cm,其下为钙积层。研究区植被覆盖度为 20%~50%,主要建群种有克氏针茅(*Stipa krylovii*)、糙隐子草(*Cleistogenes squarrosa*)、羊草(*Leymus chinensis*)、银灰旋花(*Convolvulus ammannii*)、冷蒿(*Artemisia frigida*)、阿尔泰狗娃花(*Heteropappus altaicus*)、细叶韭(*Allium tenuissimum*)、木地肤(*Kochia prostrata*)、扁蓿豆(*Medicago ruthenica*)和冰草(*Agropyron cristatum*)。

1.2 取样方法

2022 年 8 月,在内蒙古阴山北麓草原生态水文国家野外科学观测研究站的放牧控制试验小区(2017 年 7 月下旬设置)^[11]进行试验(图 1)。试验小区的放牧强度分别为封禁不放牧[CK, 0 羊/($hm^2 \cdot 月$)],轻度放牧[LG, 1.5 羊/($hm^2 \cdot 月$)],中度放牧[MG, 3.0 羊/($hm^2 \cdot 月$)],重度放牧[HG, 4.5 羊/($hm^2 \cdot 月$)],5 月 1 日—11 月 30 日连续放牧。在每个放牧

强度小区选取9个采样点,布设1 m×1 m的样方进行植被调查,记录其植物种类、盖度、高度、密度;记录样方内的羊粪球数量,调查结束后将样方内所有植被齐根剪下,装于信封袋中带回室内烘干,获取其地上生物量。同步用直径5.1 cm的土钻采用五点取样法分层钻取0—5,5—10,10—20 cm土层土样,将土样置于2 mm筛中用清水冲洗,分离土壤和根系,将冲洗好的根系分别装入信封袋,在烘箱中65℃烘干至恒重,称重并计算地下生物量。

在调查样方内挖取土壤剖面,用铝盒、环刀取样测定土壤含水量、孔隙度和容重,并采集0—5,5—10,10—20 cm土层的原状土,装于硬质塑料盒中,避免运输过程的干扰。在室内将原状土的一部分按其自然肌理轻轻破碎成10~12 mm的小块,以防止破坏团聚体结构,然后置于室内自然风干后用于土壤团聚体的测定;另一部分,土样风干后过筛用于化学性质测定。其中,土壤含水量用烘干法测定,土壤孔隙度和容重用环刀浸泡法^[12]测定;采用pH计测土壤pH,采用重铬酸钾—外加热法测土壤有机碳含量,采用凯氏定氮法测土壤全氮含量^[13]。

土壤水稳性团聚体采用湿筛法^[14]测定。将套筛按照孔径大小(2 000,1 000,500,250,106 μm)自上而下组合好,放置于筛分桶内,称取50 g风干土样,均匀平铺到最上层的套筛中,调整桶内水面高度刚好淹没土样,以3 cm的振荡幅度,30次/min的筛动频率振荡2 min后,将筛分好的各层团聚体转移至铝盒中,50℃下烘干称重。

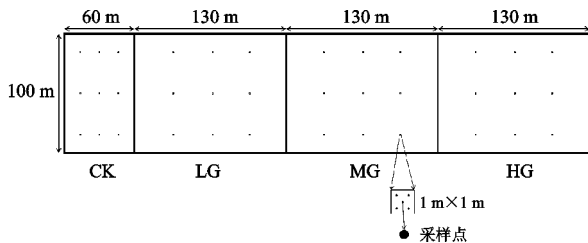


图1 采样点位置

Fig. 1 Sampling point position

1.3 数据处理与分析

(1) 植被群落数量特征计算

根据植被调查数据,计算植物物种相对重要值(P_i)和群落 Shannon—Wiener 多样性指数(H')、Simpson 优势度指数(D)、Pielous 均匀度指数(J')、Margalef 丰富度指数(M)^[10,15-16],计算公式为:

$$P_i = \frac{ni/N + ci/C + hi/H}{3} \times 100\% \quad (1)$$

$$H' = - \sum_{i=1}^S P_i \ln P_i \quad (2)$$

$$D = 1 - \sum_{i=1}^S P_i^2 \quad (3)$$

$$J' = H'/S \quad (4)$$

$$M = (S - 1)/\ln N \quad (5)$$

式中: P_i 为第*i*种植物的重要值; n_i 为第*i*种植物个体数; c_i 为第*i*种植物盖度(%); h_i 为第*i*种植物高度(m); N 为样方内植物总个体数; C 为样方总盖度(%); H 为样方内植物平均高度(m); S 为样地物种数; H' 为 Shannon—Wiener 多样性指数; D 为 Simpson 优势度指数; J' 为 Pielous 均匀度指数; M 为 Margalef 丰富度指数。

(2) 团聚体指标计算

土壤团聚体以>0.25 mm 水稳性团聚体百分含量为大团聚体含量($R_{>0.25}$)^[17]。大团聚体含量($R_{>0.25}$)、平均重量直径(MWD)、几何平均直径(GMD)计算公式为^[17-18]:

$$R_{>0.25} = M_{i>0.25} / M_T \times 100\% \quad (6)$$

$$MWD = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i W_i)}{\sum_{i=1}^n W_i} \quad (7)$$

$$GMD = \exp \left[\frac{\sum_{i=1}^n (W_i \ln X_i)}{\sum_{i=1}^n W_i} \right] \quad (8)$$

式中: $M_{i>0.25}$ 为直径>0.25 mm 水稳性团聚体质量(g); M_T 为团聚体总质量(g); X_i 为第*i*级团聚体的平均直径(mm); W_i 为第*i*级团聚体的质量分数(%); n 为5个团聚体级。

采用 SPSS 27.0、Origin 2023 和 Canoco 5.0 软件进行数据处理分析与绘图。

2 结果与分析

2.1 不同放牧强度下植被群落数量特征

由图2和图3可知,研究区共调查到12科20种植物。禾本科、豆科、菊科、蔷薇科所占百分比比较高,禾本科植物在4个放牧强度中均占比最大,表现为CK>MG>LG>HG。克氏针茅、糙隐子草、阿尔泰狗娃花在4个放牧梯度的样地均为优势种;其次,羊草和冰草在各个放牧梯度下也比较占优势。放牧增加植物的科数和种数,CK样地的科数和种数最少,为8科14种;而HG样地最多,为11科17种。LG和MG科、种数量差异不大,但物种组成存在一定的差异性。放牧不仅改变植被群落的物种数量,同时改变其物种组成。克氏针茅和糙隐子草在禾本科中所占比例均较大,且随着放牧强度增加,克氏针茅的相对重要值降低,糙隐子草的相对重要值上升。阿尔泰狗娃花(菊科)、木地肤(藜科)的相对重要值随放牧强度的增加而减少,细叶韭(石蒜科)的相对重要值表现相反。随着放牧强度的增加,豆科植物狭叶锦鸡儿的相对重要值是导致豆科植物在不同放牧强度下重要值变化的主要植物种。

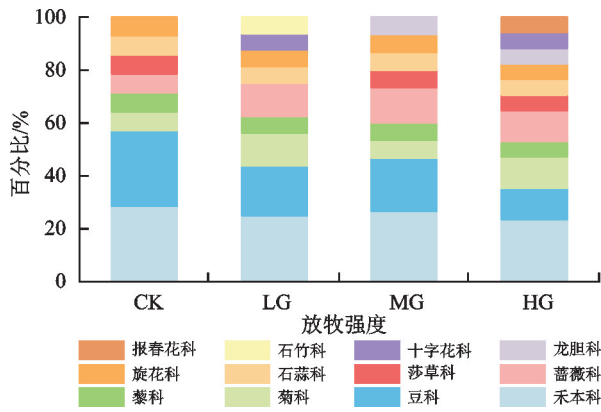


图 2 不同放牧强度下各科植物所占百分比

Fig. 2 Percentage of each family plant under different grazing intensities

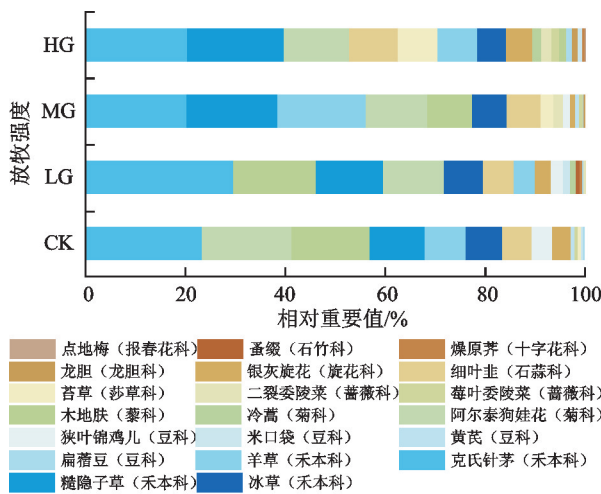


图 3 不同放牧强度下植物种相对重要值

Fig. 3 Relative importance value of plant species under different grazing intensities

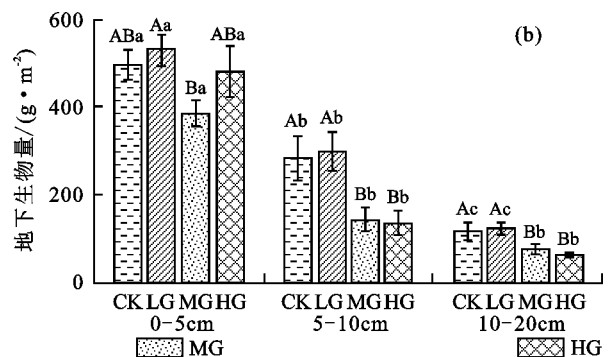
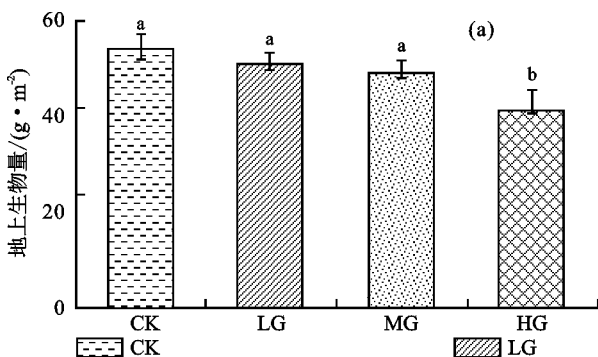
注:图柱上不同大写字母表示同一土层不同放牧强度间差异显著($p < 0.05$);不同小写字母表示同一放牧强度不同土层间差异显著($p < 0.05$)。下同。

图 4 不同放牧强度下地上和地下生物量

Fig. 4 aboveground biomass and underground biomass under different grazing intensities

2.2 土壤团聚体理化性质及其组成和稳定性特征

由表 2 可知,0—5 cm 土层 CK 和 HG 的容重分别为 1.38, 1.41 g/cm^3 , 显著低于同等放牧强度下的

放牧造成植物种类和数量的变化改变植被群落特征,使得多样性指数也发生相应的变化。LG 强度下的 Shannon—Wiener、Simpson 优势度指数分别为 1.66 ± 0.07 , 0.76 ± 0.02 , 显著低于其他放牧强度 ($p < 0.05$)。HG 的 Pielous 均匀度指数显著低于 CK; Margalef 丰富度指数显著高于 LG ($p < 0.05$), 而其他放牧强度之间差异不显著(表 1)。

表 1 不同放牧强度下草原植被群落特征

Table 1 Characteristics of grassland vegetation community under different grazing intensities

放牧强度	Shannon-Wiener 多样性指数	Simpson 优势度指数	Pielous 均匀度指数	Margalef 丰富度指数
CK	$1.88 \pm 0.07a$	$0.81 \pm 0.01a$	$0.92 \pm 0.03a$	$1.55 \pm 0.10ab$
LG	$1.66 \pm 0.07b$	$0.76 \pm 0.02b$	$0.87 \pm 0.02ab$	$1.33 \pm 0.10b$
MG	$1.87 \pm 0.06a$	$0.82 \pm 0.01a$	$0.89 \pm 0.01ab$	$1.49 \pm 0.08ab$
HG	$1.84 \pm 0.09a$	$0.81 \pm 0.01a$	$0.83 \pm 0.04b$	$1.76 \pm 0.11a$

注:同列不同小写字母表示不同放牧强度间差异显著性 ($p < 0.05$)。

由图 4a 可知,地上生物量排序为 CK ($54.00 \text{ g}/\text{m}^2$) > LG ($50.66 \text{ g}/\text{m}^2$) > MG ($48.86 \text{ g}/\text{m}^2$) > HG ($41.39 \text{ g}/\text{m}^2$)。其中, HG 的地上生物量显著低于其他放牧强度 ($p < 0.05$)。4 个放牧强度下的地下生物量主要分布在 0—5 cm 土层,且随着土壤深度的增加而显著降低 ($p < 0.05$, 图 4b)。0—5 cm 土层的地下生物量以 MG 最低,为 $384.27 \text{ g}/\text{m}^2$, 显著低于其他放牧强度 ($p < 0.05$), LG 最高,为 $526.63 \text{ g}/\text{m}^2$ 。5—10 和 10—20 cm 土层地下生物量随放牧强度增加呈先增加后降低趋势,均表现为 LG 最大, MG 和 HG 的地下生物量显著低于 CK 和 LG ($p < 0.05$), 而 CK 和 LG、MG 和 HG 间则没有显著差异。

其他土层土壤容重;0—5 cm 土层 CK 的土壤容重显著低于 MG ($p < 0.05$)。不同放牧强度的土壤含水量随土壤深度的增加显著增加,但放牧强度间仅 0—5

cm 土层 LG(1.16%) 与 HG(0.95%)、10—20cm 土层 HG(3.03%) 与 CK(2.60%) 间有差异 ($p < 0.05$), 其他土层间的含水量均无显著差异。0—5 cm 土层 CK 的总孔隙度显著高于 5—10 和 10—20 cm 土层的总孔隙度 ($p < 0.05$), 其他放牧强度间不同土层的总孔隙度差异不显著。除 0—5 cm 土层 CK 的总孔隙度显著高于 MG 和 HG 外, 其余土层放牧强度间总孔隙度无差异, 且各土层的总孔隙度随放牧强度的增加而减小。0—5 cm 土层 CK 的 pH 显著低于 5—10 cm 土层; 而 5—10 cm 土层 HG 的 pH 显著低于 0—5 cm 土层 ($p < 0.05$)。各土层不同放牧强度间的 pH 差异不显著。相同放牧强度下, 土壤容重和含水量随土壤深度的增加而增加; 总孔隙度随土壤深度的增加先降低

后升高(在 5—10 cm 土层处最低), 总体呈降低趋势。

土壤有机碳含量受放牧强度和土层的影响并不显著(表 2)。除 MG 的 5—10 cm 土层的有机碳含量(15.08 g/kg) 显著低于同深度下的 HG 外 ($p < 0.05$), 其他放牧强度和土层间的有机碳含量并无显著差异。与有机碳含量表现相同的是, 在相同放牧强度下, 不同土层间全氮含量的差异并不显著。但总体上 5—10 cm 土层全氮含量最高。HG 强度 0—5 cm 土层的全氮含量(2.40 g/kg) 显著高于同土层其他放牧强度的全氮含量 ($p < 0.05$)。5—10 cm 土层 HG 的全氮含量(2.44 g/kg) 显著高于 LG 和 MG 强度的全氮含量 ($p < 0.05$), 而与同深度下 CK 强度的全氮含量(2.34 g/kg) 差异不显著。

表 2 不同放牧强度和土层下土壤理化性质

Table 2 Physical and chemical properties of soil aggregates under different grazing intensities and soil layers

土壤深度/cm	放牧强度	容重/(g·cm ⁻³)	含水量/%	总孔隙度/%	pH	有机碳/(g·kg ⁻¹)	全氮/(g·kg ⁻¹)
0—5	CK	1.38±0.01Bb	1.04±0.07ABc	40.86±0.89Aa	7.35±0.04Ab	15.43±0.46Aa	2.12±0.03Ba
	LG	1.39±0.02ABa	1.16±0.05Ab	39.22±0.61ABa	7.39±0.18Aa	17.80±0.68Aa	2.12±0.06Ba
	MG	1.45±0.02Aa	1.04±0.05ABc	36.26±0.55Ca	7.49±0.10Aa	17.25±0.41Aa	2.06±0.08Ba
	HG	1.41±0.02ABb	0.95±0.04Bc	37.20±0.93BCa	7.57±0.01Aa	18.19±2.28Aa	2.40±0.09Aa
5—10	CK	1.44±0.01Aa	2.07±0.08Ab	38.36±0.27Ab	7.45±0.02Aa	16.86±1.01ABa	2.34±0.06ABa
	LG	1.45±0.01Aa	2.30±0.33Aa	37.05±1.22Aa	7.37±0.17Aa	17.82±0.44ABa	2.16±0.08Ba
	MG	1.46±0.01Aa	2.15±0.13Ab	35.66±1.04Aa	7.51±0.11Aa	15.08±1.46Ba	2.15±0.07Ba
	HG	1.46±0.01Aa	1.75±0.13Ab	36.94±0.30Aa	7.50±0.01Ab	19.30±1.16Aa	2.44±0.05Aa
10—20	CK	1.48±0.02Aa	2.60±0.07Ba	38.45±0.27Ab	7.42±0.01Aab	14.99±1.11Aa	2.18±0.08Aa
	LG	1.45±0.02Aa	2.83±0.14ABa	38.06±1.11Aa	7.46±0.15Aa	16.35±0.45Aa	2.03±0.03Aa
	MG	1.46±0.03Aa	2.75±0.05ABa	37.45±0.71Aa	7.46±0.01Aa	15.88±2.23Aa	2.00±0.09Aa
	HG	1.48±0.01Aa	3.03±0.18Aa	38.89±0.48Aa	7.53±0.03Aab	16.97±1.39Aa	2.13±0.12Aa

注: 同列大写字母表示同一土层不同放牧强度间差异显著 ($p < 0.05$); 小写字母表示同一放牧强度下不同土层间差异显著 ($p < 0.05$)。

由图 5 可知, 不同放牧强度下土壤团聚体组成基本一致, 均以大团聚体 (>0.25 mm) 含量(54.17%~70.23%) 较高, 小团聚体 (<0.25 mm) 含量(29.77%~45.83%) 较少。MWD、GMD 的变化趋势与大团聚体含量一致, 均表现为在 0—5 和 5—10 cm 土层各指标在 LG 最大, MG 最小, 随放牧强度的增加先增加后降低再增加。其中, 0—5 cm 土层 MG 的大团聚体含量、MWD 和 GMD 值都显著低于 LG ($p < 0.05$); 而在 5—10 cm 土层各放牧强度间的土壤团聚体组成和稳定性特征值差异不显著。10—20 cm 土层 MWD、GMD 的变化趋势与大团聚体含量一致, 表现为随放牧强度的增加先增大后减小, 在 LG 处有最大值, 在 HG 有最小值, 但各个放牧强度间的大团聚体含量、MWD 和 GMD 值差异不显著。相同放牧强度下, 大团聚体含量随土层的增加而增加。LG 和 MG 的 MWD 和 GMD 值随土层的增加而增加, CK 和 HG 的 MWD 和 GMD 值随土层的增加先升高后降低, 总体呈上升趋势。其中, MG 强度下 0—5 cm 土

层的大团聚体含量、MWD 和 GMD 值显著低于 5—10、10—20 cm 土层的大团聚体含量、MWD 和 GMD 值 ($p < 0.05$), 而其他放牧强度下, 不同土层间的变化不显著。

2.3 植被群落特征和土壤理化性质与团聚体组成及稳定性的关系

冗余分析(RDA)可进一步深入探究放牧后希拉穆仁草原团聚体组成、特征的变化规律及其影响因素。为此, 以土壤团聚体组成和稳定性指标为响应变量, 植被群落特征和土壤理化性质为解释变量, 对不同土层的各指标进行 RDA 分析。由图 6 和表 3 可知, 0—5 cm 土层, 轴 1 和轴 2 分别解释总变异的 90.54%, 5.53%。其中, 容重、有机碳和均匀度指数 J' 的解释率较高, 分别为 32.1%, 14.8%, 13.2%。5—10 cm 土层, 轴 1 和轴 2 分别解释总变异的 93.20%, 3.28%。其中, J' 、全氮和 H' 的解释率较高, 分别为 26.8%, 18.7%, 14.8%。10—20 cm 土层, 轴 1 和轴 2 分别解释总变异的 95.50%, 3.58%。其

中, J' 、地上生物量和容重的解释率较高, 分别为 59.4%, 11.6%, 8.3%。 H' 、 J' 与大团聚体含量、MWD 和 GMD 在不同土壤深度下均呈正相关。有机碳含量与大团聚体含量、MWD 和 GMD 在 0—5 和 5—10 cm 土层呈正相关, 在 10—20 cm 土层下呈

负相关关系。而容重与大团聚体含量、MWD 和 GMD 在不同土壤深度下的相关性与有机碳含量的相反。总体而言, H' 、 J' 、地上生物量、容重是影响各土壤深度下土壤团聚体组成和稳定性的显著因子 ($p < 0.05$)。

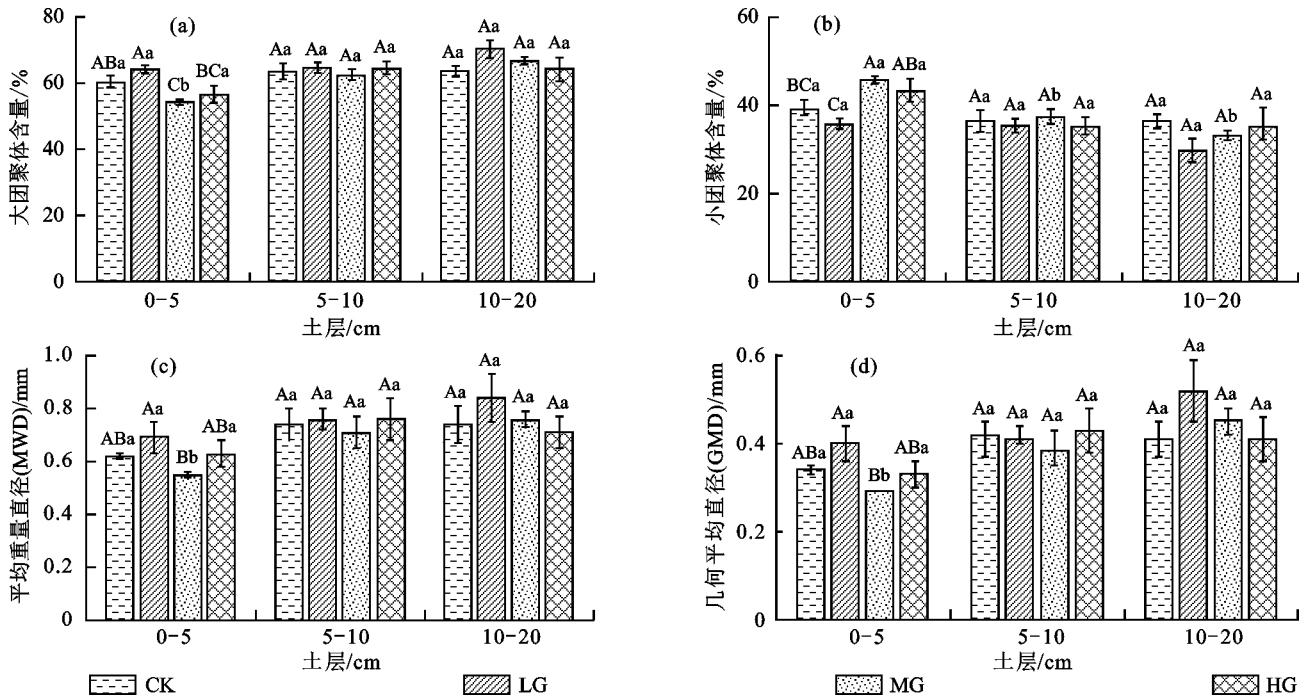
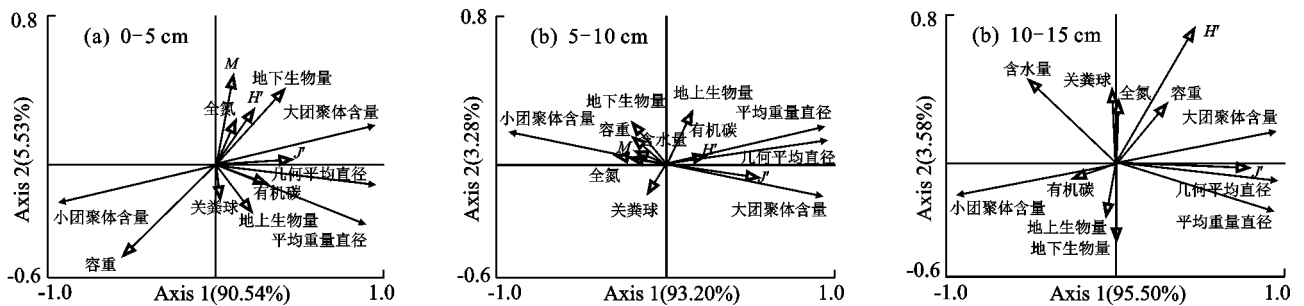


图 5 不同放牧强度和土层下土壤团聚体组成及其稳定性

Fig. 5 Composition and stability of soil aggregates under different grazing intensities and soil layers



注: 实心箭头代表土壤团聚体组成及稳定性指标, 空心箭头代表植被群落特征和土壤理化因子指标。

图 6 不同土层下植物群落特征、土壤理化性质与土壤团聚体间的冗余分析

Fig. 6 Redundancy analysis of plant community characteristics, soil physical and chemical properties and soil aggregates under different soil layers

表 3 不同土层植物群落特征和土壤理化因子的解释率

Table 3 The explanation rate of plant community characteristics and soil physical and chemical factors in different soil layers

0—5 cm			5—10 cm			10—20 cm		
因子	解释率/%	P	因子	解释率/%	P	因子	解释率/%	P
容重	32.1	0.002	J'	26.8	0.014	J'	59.4	0.002
J'	13.2	0.028	地下生物量	9.5	0.082	地上生物量	11.6	0.004
有机碳	14.8	0.010	有机碳	7.2	0.130	容重	8.3	0.006
羊粪球	3.8	0.144	全氮	18.7	0.006	地下生物量	2.8	0.084
H'	6.5	0.038	容重	7.5	0.050	H'	3.9	0.018
M	9.8	0.002	含水量	6.1	0.042	含水量	1.7	0.110
地下生物量	9.5	0.002	H'	14.8	0.002	有机碳	5.0	0.004
全氮	4.3	0.004	地上生物量	2.2	0.030	羊粪球	4.3	0.002
地上生物量	2.6	0.006	羊粪球	1.9	0.026	全氮	2.3	0.002

3 讨论

3.1 不同放牧强度对草原植物群落组成和特征的影响

植物群落是影响草原生态系统结构稳定和生态系统服务高效的关键因素,而放牧可改变植物群落的物种组成和多样性,影响植物群落的结构和特征,从而导致草地生态系统发生变化^[1]。本研究中,禾本科植物(克氏针茅、糙隐子草、羊草和冰草)在不同放牧强度下均属于优势种,对植物群落的盖度和生物量有显著贡献,但随着放牧强度的增加,其相对重要值有所降低,与羊群对植物的选择性采食和踩踏在一定程度上减少优势植物种的覆盖度和适应性有关。此外,禾本科植物种相对重要值的降低,为冷蒿、木地肤等杂类草提供更多的生长空间,改变植物群落的种间关系。因此,重度放牧试验小区反而出现更多的植物种数,物种丰富度指数增加。

植被群落生物量可用来判断草原载畜能力和草地生产力^[19],不同强度的放牧引起的干扰导致不同生活型的植物种采取不同的资源分配方式。本研究中,地上生物量在 CK、LG 条件下显著高于 HG,表明羊群对适口性植物的采食减少地表植被的生长量,随着放牧强度的增加,地上生物量显著降低,与其他研究^[20-22]结论一致。本研究中,0—5 cm 土层的地下生物量大小排序为 LG>CK>HG>MG,而 5—10 和 10—20 cm 土层的地下生物量表现为 LG>CK>MG>HG。不同土层地下生物量的差异一方面与地上植被组成有关;另一方面,与土壤理化性质密切相关。不同植物随放牧强度的生物量分配不同,导致群落根系生物量分配结构发生改变,使得根茎性禾草的生物量向地下权衡^[21],主要集中于土壤表层,而杂类草的根系更向下层分配;而且 MG、HG 地上部分的过度采食显著影响植物的光合作用及养分向地下部分的运输,二者的共同作用使得 MG、HG 放牧小区的地下生物量明显下降。而 HG 小区大量的羊群排泄物使得表层土壤有机质、全氮含量较其他小区更多,且 1 年生、2 年生等植被增加,植物种最多,因而,在 0—5 cm 土层其地下生物量高于 MG,与李怡等^[23]的研究结果一致。

3.2 不同放牧强度对土壤团聚体组成和稳定性的影响

大团聚体(>0.25 mm 的团聚体)含量越高,土壤结构越稳定,土壤的抗侵蚀能力越强,土壤肥力就越高^[24]。MWD 和 GMD 是表征土壤团聚体稳定性的重要指标,MWD 和 GMD 越大,大团聚体含量越高,说明团聚体的稳定性越强^[5,8,25]。本研究表明,在 4 个放牧强度下的不同土层中,LG 的大团聚体含量、GMD 和 MWD 最大,稳定性最高,与 CK 无显著性差

异;0—5 和 5—10 cm 土层的 MG 的大团聚体含量、GMD 和 MWD 最小,稳定性最差;10—20 cm 土层 HG 的大团聚体含量、GMD 和 MWD 最小,稳定性最差。本研究表明,羊群的采食和排泄物影响植被群落特征和土壤理化性质,对土壤团聚体组成和稳定性具有正向或负向的反馈调节作用。放牧过程中羊群的践踏作用直接导致土壤大团聚体破碎和稳定性降低,增加土壤紧实度和容重,并引起孔隙度、透水和透气能力的改变。然而,本研究中,LG 并未导致团聚体稳定性的下降,反而是各放牧强度下稳定性最强的,可能与该放牧强度下土壤容重较小,有机质含量较大有关,轻度放牧有助于增加土壤的通气透水性,提高团聚体稳定性^[26-28]。而重度放牧条件下,则因羊群产生的大量的排泄物能够改善和增加表层土壤的有机碳和全氮等养分,有助于促进土壤的黏结作用,有利于大团聚体的形成,从而提高土壤团聚体的稳定性^[8,29]。因此,在 0—5 和 5—10 cm 土层,HG 的大团聚体含量、MWD 和 GMD 高于 MG。但随着土层的增加,HG 强度下的地下生物量降低,根系的减少可能阻碍有机碳和全氮等养分的向下层(10—20 cm)土壤运输,导致土壤中有机质含量减少,土壤颗粒间的胶结作用减弱,进而影响大团聚体的形成。在本研究的土壤大团聚体含量、MWD 和 GMD 含量与植物群落特征、土壤理化性质特征的相关性中得以验证。

3.3 不同放牧强度植被群落特征对土壤团聚体的影响

放牧通过施加在畜—草—土界面的强度影响植物与土壤间的关系,放牧可直接影响植物群落的植物种组成和种间联结,也可通过家畜对土壤的践踏和粪尿回归等形式改变土壤理化性质而间接影响植物的生长发育、改变植物群落的分布和特征^[2,10],进而影响土壤团聚体的组成和稳定性。本研究中,不同土层的大团聚体含量、MWD 和 GMD 与植被群落的 H' 、 J' 呈正相关,0—5 和 5—10 cm 土层的大团聚体含量、MWD 和 GMD 与土壤容重呈负相关,与土壤有机质含量呈正相关,而 10—20 cm 土层的相关性却表现相反。一方面,可能因为放牧采食降低地上、地下生物量,使得进入到土壤中的凋落物、植物残体减少,导致有机碳等土壤养分难以形成和运输到更深层(10—20 cm)的土壤中,减弱土壤结构间的黏结作用,降低土壤团聚体的稳定性,且随着放牧强度的增加影响效应明显;另一方面,放牧的践踏作用使得容重随放牧强度的增加而增大,影响土壤的通透性、保水性与有机质含量,间接影响植物的生长,改变植物群落的组成、多样性与生物量,进而导致随着放牧强度增大,地上、地下生物量降低,大团聚体含量、

MWD 和 GMD 含量降低,土壤团聚体稳定性变差的结果。也反映放牧强度可通过影响植物群落特征而负反馈于土壤团聚体的稳定性作用。

4 结论

(1)植物群落物种数随放牧强度的增加而增加, HG 的 Margalef 丰富度指数(M)最高, Pielous 均匀度指数(J')最低; LG 的群落 Shannon—Wiener 多样性指数(H')和 Simpson 优势度指数(D)显著降低。地上生物量随放牧强度的增加而降低, HG 的地上生物量显著低于其他放牧强度。不同土层放牧强度间地下生物量差异显著,各土层均以 LG 最大。相同放牧强度下,地下生物量随土层增加而显著降低。

(2)MWD、GMD 和大团聚体含量的变化趋势一致,在 0—5 和 5—10 cm 土层均表现为随放牧强度的增加先增加后降低再增加,且轻度放牧下 MWD、GMD 和大团聚体含量最大,团聚体最为稳定,中度放牧下各值最小,稳定性最差;10—20 cm 土层 MWD、GMD 和大团聚体含量的变化表现为 LG > CK > MG > HG。4 个放牧强度的大团聚体含量、MWD 和 GMD 总体上随土层深度增加而增加。MG 强度下 0—5 cm 土层的大团聚体含量、MWD 和 GMD 显著低于 5—10, 10—20 cm 土层($p < 0.05$); 其他放牧强度下不同土壤深度间的变化不显著。

(3)Shannon—Wiener 多样性指数 H' 、Pielous 均匀度指数 J' 、地上生物量、容重是影响土壤团聚体组成和稳定性的显著性因子,放牧强度通过影响希拉穆仁草原群落特征而对土壤团聚体稳定性具有负反馈作用。

参考文献:

- [1] 高露,张圣微,朱仲元,等.放牧对干旱半干旱草原植物群落结构和生态功能的影响[J].水土保持研究,2019,26(6):205-211.
GAO L, ZHANG S W, ZHU Z Y, et al. Effects of grazing on plant communities and ecological functions in typical steppe[J].Research of Soil and Water Conservation, 2019, 26(6):205-211.
- [2] 丁成翔,杨晓霞,董全民.青藏高原高寒草原放牧方式对植被、土壤及微生物群落的影响[J].草地学报,2020,28(1):159-169.
DING C X, YANG X X, DONG Q M. Effects of grazing patterns on vegetation, soil and microbial community in alpine grassland of qinghai-tibetan plateau[J].Acta Agrestia Sinica, 2020, 28(1):159-169.
- [3] 殷锡凯,叶茂,赵凡凡,等.阿勒泰林区放牧前后草地生态系统健康评价[J].水土保持通报,2021,41(6):220-225,236.
YIN X K, YE M, ZHAO F F, et al. Ecosystem health evaluation of grassland ecosystem before and after grazing in Aletai forest region[J].Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41(6):220-225, 236.
- [4] 愚广灵,李凯辉,周建勤,等.长期围封对高寒草地土壤团聚体稳定性和可蚀性的影响[J].干旱区研究,2022,39(6):1842-1851.
YU G L, LI K H, ZHOU J Q, et al. Effects of long-term enclosure on soil aggregate stability and erodibility in Bayinbuluk alpine grassland[J].Arid Zone Research, 2022, 39(6):1842-1851.
- [5] 李岩,王如岩,董智,等.徂徕山植被类型对不同坡位土壤团聚体特征的影响[J].水土保持通报,2022,42(6):82-87.
LI Y, WANG R Y, DONG Z, et al. Effects of vegetation types on soil aggregate characteristics at different slope positions of culai mountain[J].Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(6):82-87.
- [6] GONZÁLEZ-ROSADO M, PARRAS-ALCÁNTARA L, AGUILERA-HUERTAS J, et al. Land conversion impacts on soil macroaggregation, carbon sequestration and preservation in tree orchards located in Mediterranean environment (Spain)[J].Agriculture, Ecosystems and Environment, 2023, 354: e108557.
- [7] 李耸耸.干旱对土壤团聚体稳定性的影响及其调控机制[J].草原与草业,2020,32(3):12-14,33.
LI S S. Review on effect of drought on soil aggregates stability and its biological regulation mechanism [J]. Grassland and Prataculture, 2020, 32(3):12-14, 33.
- [8] 张彬,赵天启,贺启坤,等.放牧对短花针茅荒漠草原土壤团聚体组成及稳定性的影响[J].应用生态学报,2022,33(12):3263-3270.
ZHANG B, ZHAO T Q, HE Q S, et al. Effects of grazing on soil aggregate composition and stability in Stipa breviflora desert steppe[J].Chinese Journal of Applied Ecology, 2022, 33(12):3263-3270.
- [9] 祁正超,常佩静,李永善,等.放牧对荒漠灌丛草地土壤团聚体组成及其稳定性的影响[J].干旱区研究,2021,38(1):87-94.
QI Z C, CHANG P J, LI Y S, et al. Effects of grazing intensity on soil aggregates composition, stability, nutrients and C/N in desert shrubland[J].Arid Zone Research, 2021, 38(1):87-94.
- [10] 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 T T, DONG Z, LI H L, 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.

- [11] 耿林昇. 放牧强度对希拉穆仁草原土壤入渗与产流产沙的影响[D]. 山东泰安: 山东农业大学, 2022.
GENG L S. Effects of grazing intensity on soil infiltration and runoff sediment production in Xilamuren grassland[D]. Taian, Shandong: Shandong Agricultural University, 2022.
- [12] 房园, 梁中, 张毓涛, 等. 天山云杉森林生态系统的水源涵养能力海拔梯度变化特征[J]. 生态环境学报, 2023, 32(9): 1574-1584.
FANG Y, LIANG Z, ZHANG Y T, et al. Characteristics of altitudinal gradient changes in water retention of Tianshan spruce forest ecosystems[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2023, 32(9): 1574-1584.
- [13] 肖颖, 吉使阿微, 赵文学, 等. 青藏高原东缘不同人工草地土壤养分、酶活性及微生物生物量特征[J]. 中国草地学报, 2022, 44(9): 90-99.
XIAO Y, JISHIA W, ZHAO W X, et al. Soil nutrients, enzyme activities and microbial biomass characteristics of different artificial grasslands in the eastern margin of the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. Chinese Journal of Grassland, 2022, 44(9): 90-99.
- [14] 潘嘉琛, 刘超, 董智, 等. 黄泛沙地不同林龄杨树人工林土壤团聚体及有机碳特征[J]. 水土保持研究, 2022, 29(3): 25-30, 37.
PAN J C, LIU C, DONG Z, et al. Distribution characteristics of soil aggregates and soil organic carbon in populus artificial forest with different forest ages in Yellow River flood plain[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022, 29(3): 25-30, 37.
- [15] 方精云, 王襄平, 沈泽昊, 等. 植物群落清查的主要内容、方法和技术规范[J]. 生物多样性, 2009, 17(6): 533-548.
FANG J Y, WANG X P, SHEN Z H, et al. Methods and protocols for plant community inventory[J]. Biodiversity Science, 2009, 17(6): 533-548.
- [16] 段成伟, 李希来, 柴瑜, 等. 不同修复措施对黄河源退化高寒草甸植物群落与土壤养分的影响[J]. 生态学报, 2022, 42(18): 7652-7662.
DUAN C W, LI X L, CHAI Y, et al. Effects of different rehabilitation measures on plant community and soil nutrient of degraded alpine meadow in the Yellow River Source[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(18): 7652-7662.
- [17] 王道涵, 邢聪慧, 梅傲雪, 等. 生物炭改良风沙土对土壤团聚体稳定性的影响[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2018, 37(5): 816-823.
WANG D H, XING C H, MEI A X, et al. Effect of biochar on the stability of aggregates in aeolian soil[J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 2018, 37(5): 816-823.
- [18] 刘晏君, 吕卫光, 白娜玲, 等. 稻鳢生态种养不同施肥处理对土壤理化及微生物性状的影响[J]. 土壤通报, 2023, 54(6): 1384-1391.
LIU Y J, LV W G, BAI N L, et al. Effects of different fertilization treatments of ecological rice-eel co-culture on soil physicochemical and microbial properties[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2023, 54(6): 1384-1391.
- [19] 费璇, 锁才序, 向双, 等. 青藏东缘高寒草甸植物群落结构及功能群特征对长期季节放牧的响应[J]. 草地学报, 2022, 30(8): 1954-1963.
FEI X, SUO C X, XIANG S, et al. Responses of plant community structure and functional group characteristics to long-term seasonal grazing in an alpine meadow on eastern Qinghai-Tibet Plateau[J]. Acta Agrestia Sinica, 2022, 30(8): 1954-1963.
- [20] 陈思思, 王森, 张楚, 等. 不同放牧强度对呼伦贝尔羊草草甸草原土壤活性有机碳的影响[J/OL]. 中国土壤与肥料, 2023: 1-12. (2023-07-25). <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5498.S.20230724.1940.008.html>.
CHEN S S, WANG M, ZHANG C, et al. Effects of different grazing intensities on soil active organic carbon in Leymus Chinensis meadow steppe in Hulunbuir[J/OL]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2023: 1-12. (2023-07-25). <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5498.S.20230724.1940.008.html>.
- [21] 张彬, 李邵宇, 古琛, 等. 内蒙古荒漠草原4种优势植物生物量分配对不同放牧强度的响应[J]. 草地学报, 2022, 30(12): 3355-3363.
ZHANG B, LI S Y, GU C, et al. Biomass allocation of four dominant plant species in inner Mongolia desert grasslands in response to different grazing intensities[J]. Acta Agrestia Sinica, 2022, 30(12): 3355-3363.
- [22] 李宏, 江康威, 杨永强, 等. 天山北坡山地草甸植被特征和土壤养分对放牧的响应[J]. 草业科学, 2023, 40(4): 874-884.
LI H, JIANG K W, YANG Y Q, et al. Response of vegetation characteristics and soil nutrients to grazing in mountain meadows on the north slope of the Tianshan Mountains[J]. Pratacultural Science, 2023, 40(4): 874-884.
- [23] 李怡, 韩国栋. 放牧强度对内蒙古大针茅典型草原地下生物量及其垂直分布的影响[J]. 内蒙古农业大学学报(自然科学版), 2011, 32(2): 89-92.
LI Y, HAN G D. Effects of different grazing intensities on the underground biomass and its vertical distribution of the typical stipa grandis steppe[J]. Journal of Inner Mongolia Agricultural University (Natural Science Edition), 2011, 32(2): 89-92.
- [24] 张钦弟, 刘剑荣, 杨磊, 等. 半干旱黄土区植被恢复对土壤团聚体稳定性及抗侵蚀能力的影响[J]. 生态学报, 2022, 42(22): 9057-9068.

- ZHANG Q D, LIU J R, YANG L, et al. Effect of vegetation restoration on stability and erosion resistance of soil aggregates in semi-arid loess region[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(22): 9057-9068.
- [25] 孙文泰, 马明, 牛军强, 等. 陇东雨养苹果覆膜对土壤团聚体结构稳定性与细根分布的影响[J]. *生态学报*, 2022, 42(4): 1582-1593.
- SUN W T, MA M, NIU J Q, et al. Effects of film mulching on soil aggregate structure stability and fine root distribution of rain-fed apple in eastern Gansu[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(4): 1582-1593.
- [26] REINHART K O, SANNI WOROGO H S, RINELLA M J, et al. Livestock increase soil organic carbon in the northern great Plains[J]. *Rangeland Ecology and Management*, 2021, 79: 22-27.
- [27] WU H H, WIESMEIER M, YU Q, et al. Labile organic C and N mineralization of soil aggregate size classes in semiarid grasslands as affected by grazing management [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2012, 48(3): 305-313.
- [28] WANG J W, ZHAO C Z, ZHAO L C, et al. Effects of grazing on the allocation of mass of soil aggregates and aggregate-associated organic carbon in an alpine meadow [J]. *PLoS One*, 2020, 15(6): ee0234477.
- [29] 陆琪, 马红彬, 俞鸿千, 等. 轮牧方式对荒漠草原土壤团聚体及有机碳特征的影响[J]. *应用生态学报*, 2019, 30(9): 3028-3038.
- LU Q, MA H B, YU H Q, et al. Effects of rotational grazing methods on soil aggregates and organic carbon characteristics in desert steppe [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, 30(9): 3028-3038.