

doi:10.11733/j.issn.1007-0435.2026.09.024

引用格式:赫黎明,刘欣蕊,王忠武,等.放牧强度对锡林郭勒典型草原土壤有机碳及其活性组分的影响[J].草地学报,2026,34(9):3403–3411

HE Li-ming, LIU Xin-rui, WANG Zhong-wu, et al. Effect of Grazing Intensity on the Soil Organic Carbon And its Active Components on Xilingol League Typical Steppe[J]. Acta Agrestia Sinica, 2026, 34(9):3403–3411

放牧强度对锡林郭勒典型草原土壤有机碳及其活性组分的影响

赫黎明¹, 刘欣蕊¹, 王忠武^{1*}, 闫佳¹, 张挺祎¹, 屈志强¹, 李治国¹, 张恒²

(1. 内蒙古农业大学草业学院, 内蒙古呼和浩特 010018; 2. 内蒙古自治区锡林郭勒盟正镶白旗林草局, 内蒙古锡林郭勒 013800)

摘要:本研究旨在揭示不同放牧强度对锡林郭勒盟典型草原土壤活性有机碳组分的影响及其环境驱动机制,为草地生态系统碳管理策略提供实证支撑。在实验区设置不放牧(CK)、中度放牧(MG)和重度放牧(HG)3个处理,采用完全随机区组设计(各5个重复),对土壤理化性质、有机碳及其各活性组分进行测定与分析。与CK相比,MG显著降低了颗粒有机碳和微生物量碳含量,但显著提高了易氧化有机碳含量;HG显著降低了颗粒有机碳和可溶性有机碳含量。MG下的颗粒有机碳和微生物量碳含量显著高于HG。有机碳与其各活性组分均呈极显著正相关($P<0.05$);土壤含水量和总氮是影响有机碳及其组分的关键因子。放牧总体上会降低典型草原有机碳及其活性组分含量。因此,建议避免重度放牧,在利用过程中结合水分调控与适度补氮以增强土壤碳固存,维持土壤质量与碳库功能。

关键词:典型草原;放牧;土壤有机碳活性组分;生物量

中图分类号:S812.2

文献标识码:A

文章编号:1007-0435(2026)09-3403-09

Effect of Grazing Intensity on the Soil Organic Carbon And its Active Components on Xilingol League Typical Steppe

HE Li-ming¹, LIU Xin-rui¹, WANG Zhong-wu^{1*}, YAN Jia¹, ZHANG Ting-yi¹,

QU Zhi-qiang¹, LI Zhi-guo¹, ZHANG Heng²

(1. College of Grassland Science, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot, Inner Mongolia 010018, China; 2. Forestry and Grassland Bureau of Zhengxiangbai Banner, Xilingol League, Inner Mongolia Autonomous Region, Zhengxiangbai Banner, Xilingol League, Inner Mongolia 013800, China)

Abstract: This study aimed to elucidate the effects of varying grazing intensities on soil active organic carbon fractions and their environmental driving mechanisms in the typical steppe of Xilingol League, which could provide empirical support for carbon management strategies in grassland ecosystems. Three grazing treatments—no grazing (CK), moderate grazing (MG), and heavy grazing (HG)—were established in the experimental area using a completely randomized block design with five replicates per treatment. Soil physicochemical properties, soil organic carbon (SOC), and its active fractions were quantified and analyzed. Compared to CK, MG significantly decreased the contents of particulate organic carbon (POC) and microbial biomass carbon (MBC), but significantly increased the easily oxidizable organic carbon (EOC) content. The HG treatment significantly reduced the contents of POC and dissolved organic carbon (DOC). Furthermore, POC and MBC contents

收稿日期:2025-12-29;修回日期:2026-03-06

基金项目:内蒙古农业大学一流学科科研专项(YLXKZX-NND-002);内蒙古科技重大专项(2024JBGS0011);内蒙古农业大学草地资源教育部重点实验室资助

作者简介:赫黎明(2000-),男,汉族,内蒙古通辽人,硕士研究生,主要从事草地资源生态与管理研究,E-mail:imauhlml@163.com,*通信作者 Author for correspondence, E-mail:wangzhongwu@imau.edu.cn

under MG were significantly higher than those under HG. SOC exhibited a highly significant positive correlation with all its active fractions ($P < 0.05$). Soil water content (SWC) and total nitrogen (TN) were identified as the key factors influencing SOC and its fractions. Overall, grazing reduced the contents of SOC and its active fractions in the typical steppe. Therefore, avoiding heavy grazing is recommended. Incorporating soil moisture regulation and moderate nitrogen supplementation during pasture utilization can enhance soil carbon sequestration, thereby maintaining soil quality and carbon pool functionality.

Key words: Typical steppe; Grazing intensity; Active components of soil organic carbon; Biomass

草地是地球上面积最大的陆地生态系统之一,据统计,全球的草地覆盖面积达到52.2亿ha,占陆地总面积的40.5%^[1]。草地是支撑陆地生态系统结构与功能的核心要素,其提供的多重生态服务与资源供给功能具有基础性与不可替代性。放牧是全球范围内最主要的天然草地利用方式,全球放牧地面积占陆地总面积的一半以上^[2]。适宜的放牧强度,可以有效刺激草地生产力,增强群落抗干扰能力,进而优化整个生态系统的物质循环与能量流动效率^[2]。家畜的排泄和踩踏等活动会直接通过物理作用改变土壤的物理结构,影响其容重、孔隙度及团聚体稳定性等指标^[3]。此外,放牧对土壤养分循环及碳储量的影响呈现复杂的作用机制^[4],已有研究证实,适宜的放牧方式对草原生态系统的碳吸收和释放有显著影响^[5]。在放牧持续时间较短时,放牧活动可能导致土壤碳储量的变化无法精确跟踪,因此对土壤有机碳组分的研究就变得至关重要^[6]。这主要是因为与土壤总碳和总有机碳相比,土壤有机碳组分更能反映出环境因子的人工与自然的变动情况^[7]。

土壤活性有机碳作为土壤有机碳库中生物有效性最高、周转最快的组分,其含量与动态对环境变化响应极为灵敏,可作为反映土壤碳库稳定性与周转速率变化的早期敏感指标^[8]。土壤活性有机碳主要由颗粒有机碳(Particulate organic carbon, POC)、可溶性有机碳(Dissolved organic carbon, DOC)、微生物生物量碳(Microbial biomass carbon, MBC)和易氧化有机碳(Easily oxidizable organic carbon, EOC)等组分构成^[9],这些组分具有转化周期短、对放牧等人类干扰响应极为敏感的特点。有研究表明,土壤颗粒有机碳会随放牧强度的改变而快速丧失^[10]。李生军的研究表明,在过度放牧的条件下,土壤颗粒有机碳含量显著降低^[11]。舒健虹等的研究表明,随放牧强度增加,MBC和EOC呈显著降低趋势^[12]。马秀枝的研究结果表明,与禁牧相比,放牧降低了土壤易氧化有机碳的含量,且这种变化能够有效地反映土壤碳库的变化^[13]。高雪峰等的研究表明,禁牧与轻度放牧为微生物群落

提供了适宜的生存条件,进而显著提升了微生物生物量的积累^[14]。

现有的研究已经表明不同放牧强度会导致土壤有机碳的变化,但其大多聚焦于不同放牧干扰对土壤有机碳的分布特征及其影响因素^[15-16],在典型草原生态系统中,针对不同放牧强度下土壤有机碳活性组分的变化规律及其各因子关系研究还有待深入探索。基于此,本文以锡林郭勒盟典型草原0~50 cm土层为研究对象,探究群落地上生物量、土壤理化性质对放牧的响应,旨在揭示不同放牧强度下土壤活性碳组分的响应机制及其与关键环境因子的耦合关系,为深入理解典型草原碳库动态提供理论依据,同时为草地生态系统碳管理策略的制定提供实证支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

试验样地位于内蒙古高原中部的额里图牧场实验区,该区域地处锡林郭勒盟西南部正镶白旗行政辖区(地理坐标:115°14'E,42°15'N),位于浑善达克沙地南缘与典型草原区的生态过渡带。该区域呈现典型的中温带半干旱大陆性气候特征,表现为冬季漫长寒冷(年均气温4.42℃),夏季短暂酷热(7月均温达24.38℃,图1),降水集中(2024年降水量519.3 mm,图1),其中9月降水峰值达135.8 mm。特殊的气候条件导致昼夜温差较大(昼夜温差常超15℃),日照充足。该研究区处于高原向沙地过渡的侵蚀地带,海拔梯度介于1200~1400 m之间。该地土壤类型为典型栗钙土,表层土壤质地以砂壤土为主。该区域盛行西南风,年均风速达4.2 m·s⁻¹,风蚀作用强烈。在这种风动力条件下,原生植被发生了适应性演替,形成以克氏针茅(*Stipa krylovii*)为建群种的典型草原植被,优势种包括羊草(*Leymus chinensis*)和冷蒿(*Artemisia frigida*),伴生种包含瓣蕊唐草(*Thalictrum petaloideum*)、木地肤(*Bassia prostrata*)等耐旱物种。

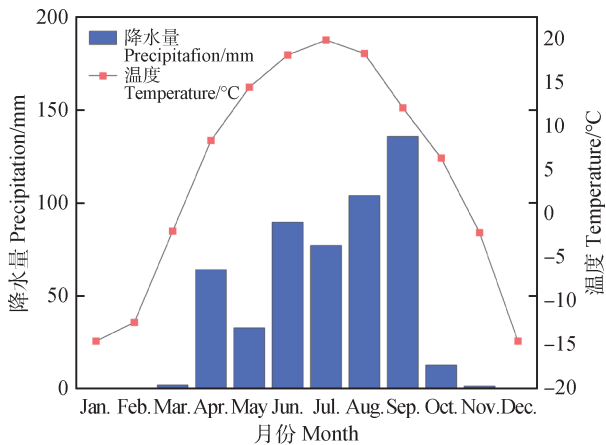


图1 2024年试验区域气温及降水图

Fig. 1 Shows the temperature and precipitation map of the test area in 2024

1.2 试验设计

该研究区域,在试验开始前长期实行开放式放牧管理。自2021年起本研究实施系统性的放牧试验,结合样地的特征及植被分布情况,设置三个放牧强度,试验采用完全随机区组设计,放牧处理分别为无牧(CK)、中度放牧(MG)及重度放牧(HG),各放牧处理均设置五个重复样区。根据当地产草量得出当地适宜载畜率,为 $1.65 \text{ 羊单位} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ 。放牧家畜选用2岁羯羊。每一处理放羊数依次为0只、6只、9只,根据当地适宜载畜率,确定设置为3个载畜率水平:CK($0 \text{ 羊单位} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$),MG($1.63 \text{ 羊单位} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$)和HG($2.45 \text{ 羊单位} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$)。放牧周期为植物生长季(6月1日至10月31日),实施全天连续放牧管理,为保障家畜正常生理需求,设置饮水点提供充足饮水(图2)。



图2 试验样地概况

Fig. 2 Overview of the test plot

1.3 样品采集

1.3.1 植物样品的采集 2024年8月中旬,在研究区各放牧试验样地内,采用空间均匀布点的原则设置了三个采样点。每个采样点进一步设置三个 $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ 的植被调查样方。对样方内植被进行地表齐平刈割。样本转移至实验室后,置于恒温烘箱中并设置 65°C 进行烘干处理。当设备达到目标温

度后开始计时,持续烘干48小时直至质量恒定。最终采用精密电子天平测定植物群落地上生物量。

1.3.2 土壤样品的采集 2024年8月中旬,在与植物地上生物量取样相同的样方内,同步进行土壤样品的采集。使用直径为7 cm的土钻,分5层(0~10 cm, 10~20 cm, 20~30 cm, 30~40 cm, 40~50 cm)用五点取样法进行取样,同层土壤经充分混匀后构成一个供试样品。将土壤样品分为三份:第一份实施现场预处理,通过10目的土壤筛去除砾石、杂质及根系残留物,自然风干后用于基础理化指标检测,包括土壤pH值、土壤容重、全氮、有机碳、颗粒有机碳;其中特定组分需经60目的细筛用于土壤易氧化有机碳的测定;第二份保存于超低温环境(-80°C),用于测定土壤微生物生物量碳、土壤可溶性有机碳;第三份土样约20 g装入密封铝盒,烘干后用于获取土壤含水量数据。

1.4 土壤样品测定

采用重铬酸钾外加热法测定土壤有机碳含量;使用有机碳分析仪测定土壤可溶性有机碳含量;通过六偏磷酸钠分离法测定土壤颗粒有机碳含量(悬浮液过 $53 \mu\text{m}$ 筛),氯仿熏蒸提取法测定微生物生物量碳含量,高锰酸钾氧化法测定土壤易氧化有机碳含量(分光光度计 565 nm 波长测定吸光度)。使用TOC元素分析仪测定土壤全氮含量。土壤容重使用环刀法测量,土壤pH值使用PHS-3G数字pH计测量,土壤含水量采用重量差值法测量。

1.5 数据处理

本研究使用Excel 2019软件对原始数据进行初步整理。在此基础上,使用SPSS 26软件进行单因素方差分析(One-Way ANOVA),统计过程中,通过Duncan多重比较检验组间差异的显著性。使用Origin 2022软件绘制单因素方差分析图。其次,使用Origin 2022软件对植物群落地上生物量、土壤理化性质和土壤有机碳各组分进行Pearson相关分析,并对其相关关系进行探讨,使用Caoco5进行冗余分析。

2 结果与分析

2.1 不同放牧强度对土壤理化性质和植物群落地上生物量的影响

不同放牧强度对土壤理化性质和地上生物量

有不同程度的影响, TN, SWC, AGB 随放牧强度的增大而减小, 土壤 pH 值和 SBD 随放牧强度的增大而增加。相较于 CK, MG 处理下 TN, SWC, AGB 显著降低 ($P < 0.05$), 降幅分别为 23%, 20%, 30%, 土壤 pH 值显著升高 ($P < 0.05$), 增幅为 3.76%; HG

处理下, TN, SWC, AGB 显著降低 ($P < 0.05$), 降幅分别为 31%, 21%, 33%, 土壤 pH 值显著升高 ($P < 0.05$), 增幅为 8.72%。相较于 MG 处理, HG 处理下土壤 pH 值显著升高 ($P < 0.05$), 增幅为 4.79% (表 1)。

表 1 不同放牧强度对土壤理化性质和群落地上生物量的影响

Table 1 Effects of different grazing intensities on soil physical and chemical properties and aboveground biomass of communities

放牧强度	TN/(g·kg ⁻¹)	SWC/%	pH 值	SBD/(g·cm ⁻³)	AGB/g
CK	12.85±0.84 ^A	8.75±0.33 ^A	7.45±0.06 ^A	1.31±0.02 ^A	131.7±0.97 ^A
MG	9.85±0.46 ^B	7.04±0.29 ^B	7.73±0.03 ^B	1.41±0.05 ^A	92.1±4.45 ^B
HG	8.85±0.07 ^B	6.9±0.18 ^B	8.1±0.01 ^C	1.50±0.08 ^A	88.72±3.57 ^B

注: 表中数据为平均值±标准差, 同一指标标注不同大写字母的两个处理间存在显著差异 ($P < 0.05$); 表中 TN 代表土壤全氮; SWC 代表土壤含水量; pH 代表土壤 pH 值; SBD 代表土壤容重; AGB 代表群落地上生物量

Note: Data are presented as mean ± standard deviation (SD). Different uppercase letters indicate significant differences between treatments ($P < 0.05$). TN, soil total nitrogen; SWC, soil water content; pH: soil pH; SBD, soil bulk density; AGB, community aboveground biomass

2.2 不同放牧强度对土壤有机碳及其活性组分的影响

2.2.1 不同放牧强度对土壤有机碳的影响

土壤有机碳含量在各放牧强度和不同土层间的变化范围介于 11.71~28.12 g·kg⁻¹ 之间。在相同土层中, CK 处理下有机碳含量最高, MG 处理和 HG 处理下依次降低, 但差异不显著。在相同放牧强度下, 随着土层深度的增加, 表层土 (0~10 cm) SOC 含量最高, 其他土层依次降低, 40~50 cm 土层中最低, 显著低于 0~10 cm, 10~20 cm, 20~30 cm 土层 ($P < 0.05$) (图 3)。

2.2.2 不同放牧强度对土壤有机碳活性组分的影响

POC 含量在不同放牧强度和土层间的变化范围介于 1.22~1.70 g·kg⁻¹ 之间。在相同土层中, 随着放牧强度的增加, CK 处理下 POC 含量最高, MG 处理和 HG 处理下 POC 含量依次降低。在 0~10 cm 土层, HG 处理显著低于 CK 处理和 MG 处理 ($P < 0.05$), MG 处理显著低于 CK 处理 ($P < 0.05$); 在 10~20 cm 土层中, HG 处理显著低于 CK 处理 ($P < 0.05$)。在相同放牧强度下, 随着土层深度的增加, 0~10 cm 土层 POC 含量最高, 其他土层依次降低, 40~50 cm 土层最低 (图 4a)。

MBC 含量在不同放牧强度和土层间的变化范围介于 0.05~0.41 g·kg⁻¹ 之间。在 0~10 cm 土层, HG 处理下土 MBC 含量显著低于 MG 处理和 CK 处理 ($P < 0.05$), MG 处理下 MBC 含量显著低于 CK 处理 ($P < 0.05$); 在 20~30 cm 土层, CK 处理下 MBC 含量最高, MG 处理下最低, 差异不显著; 其他土层中, 随着放牧强度的增加, MBC 含量降低。在

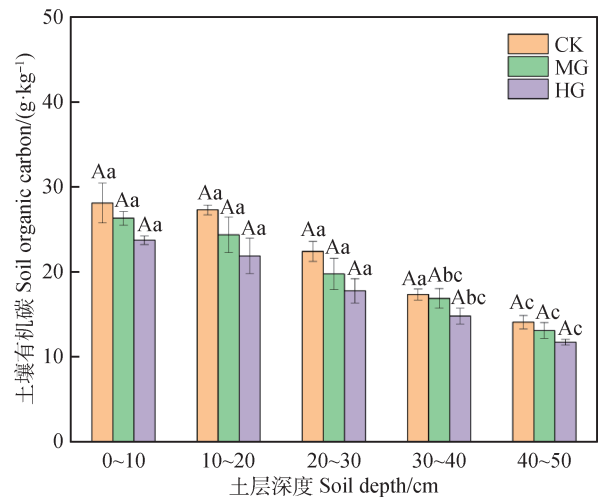


图 3 土壤有机碳含量的变化特征

Fig. 3 Response patterns of soil organic carbon content.

注: 图中不同大写字母表示相同土层不同放牧处理间差异显著 ($P < 0.05$); 不同小写字母表示相同放牧处理下不同土层间差异显著 ($P < 0.05$)

Note: Different uppercase letters indicate significant differences among different grazing treatments within the same soil layer ($P < 0.05$); different lowercase letters indicate significant differences among different soil layers under the same grazing treatment ($P < 0.05$)

相同放牧强度下, 随着土层深度的增加, MBC 含量依次降低 (图 4b)。

DOC 含量在不同放牧强度和土层间的变化范围介于 0.097~0.17 g·kg⁻¹ 之间。在相同土层中, 随着放牧强度的增加, DOC 含量降低。在 20~30 cm 土层, CK 处理下 DOC 含量最高, HG 处理下最低, DOC 含量在 HG 处理 (0.10 g·kg⁻¹) 下显著低于 CK 处理 (0.15 g·kg⁻¹) ($P < 0.05$); 其他土层中, DOC 含量在 CK 处理下最高, MG 处理和 HG 处理下依次降低, 差异不显著 (图 4c)。

EOC 含量在各放牧强度和不同土层间的变化范围介于 $0.52 \sim 0.92 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间。在相同土层中,随放牧强度的增大,EOC 含量在 MG 处理下最高,CK 处理次之,HG 处理最低,呈现出先增加后降低的趋势。在 0~10 cm 土层、10~20 cm 土层、30~40 cm 土层、40~50 cm 土层,HG 处理

下 EOC 含量显著低于中牧处理 ($P < 0.05$); 在 20~30 cm 土层,HG 处理下 EOC 含量显著低于 CK 处理和 MG 处理 ($P < 0.05$),MG 处理显著高于 CK 处理 ($P < 0.05$)。在相同放牧强度下,随着土层深度的增加,EOC 含量依次降低,差异不显著(图 4d)。

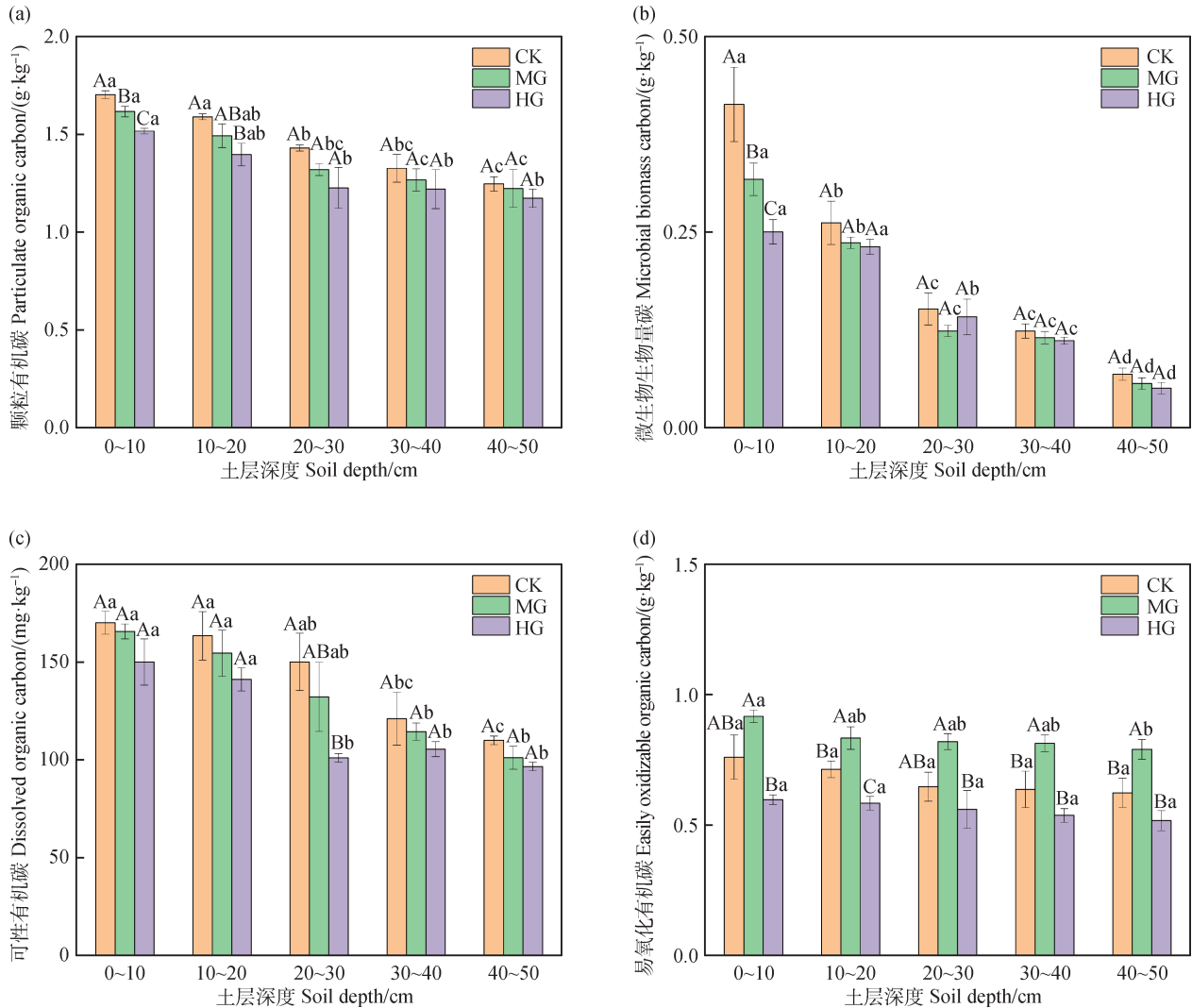


图4 有机碳活性组分含量的变化特征

Fig. 4 Response patterns of active organic carbon fractions

注:图中不同大写字母表示相同土层不同放牧处理间差异显著;不同小写字母表示相同放牧处理下不同土层间差异显著

Note: Different uppercase letters indicate significant differences among different grazing treatments within the same soil layer; different lowercase letters indicate significant differences among different soil layers under the same grazing treatment

2.3 土壤有机碳及其活性组分与土壤理化性质、植物群落地上生物量的相关关系

SOC 和其活性组分(POC, DOC, MBC, EOC)均呈极显著正相关关系($P < 0.01$)。有机碳各活性组分中,POC 和 DOC、MBC 呈极显著正相关关系($P < 0.01$),DOC 和 MBC、EOC 呈极显著正相关关系($P < 0.01$),MBC 和 EOC 呈显著正相关关系

($P < 0.05$)。土壤理化性质中 TN、SWC 和 SOC, POC, DOC, MBC 呈极显著正相关关系($P < 0.01$); SBD 和 SOC, POC, DOC, MBC 呈极显著负相关关系($P < 0.01$)。植物群落地上生物量和 SOC, POC, DOC 呈显著正相关关系(图 5, $P < 0.05$)。

冗余分析的结果表明,不同放牧强度下土壤有机碳及其活性组分的变异,主要由第一排序轴

RDA1 (57.66%) 驱动, 前两轴累计解释率为 (57.67%) (图6)。蒙特卡洛置换检验结果表明, 土壤有机碳及其活性组分指标解释率较高的因子为土壤含水量 (41.6%)、全氮 (10.1%) (表2)。

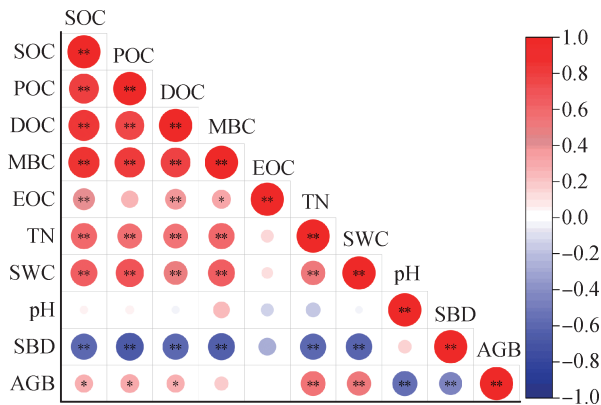


图5 土壤有机碳及其活性组分与土壤理化性质、植物群落地上生物量的相关关系

Fig. 5 The correlation between soil organic carbon and its active components and soil physical and chemical properties as well as aboveground biomass of plant communities

注: 图中*表示 $P < 0.05$, **表示 $P < 0.01$; SOC 代表土壤有机碳; POC 代表土壤颗粒有机碳; DOC 代表土壤可溶性有机碳; MBC 代表土壤微生物生物量碳; EOC 代表易氧化有机碳; TN 代表土壤全氮; SWC 代表土壤含水量; pH 代表土壤 pH 值; SBD 代表土壤容重; AGB 代表植物群落地上生物量

Note: * indicates $P < 0.05$, ** indicates $P < 0.01$; SOC, soil organic carbon; POC, soil particulate organic carbon; DOC, soil dissolved organic carbon; MBC, soil microbial biomass carbon; EOC, soil readily oxidizable organic carbon; TN, soil total nitrogen; SWC, soil water content; pH, soil pH; SBD, soil bulk density; AGB, aboveground biomass of plant community

3 讨论

3.1 放牧对土壤理化性质和群落地上生物量的影响

土壤理化性质是衡量土壤质地、质量的重要指标。在典型草原, 放牧导致土壤含水量显著下降, 这与孙彩彩等的研究结果一致^[17]。随着放牧强度的增加, 植被覆盖度降低, 从而导致水分流失; 同时, 重度放牧干扰加剧了地表板结化, 导致土壤孔隙连通性下降, 土壤含水量也随之减少。而无牧处理下土壤含水量达到最高值, 这是因为禁牧排除了家畜对土层的践踏, 为植被生长创造有利条件, 进而减小土壤紧实度, 增强孔隙度与渗透能力, 最终促进土壤水分累积^[18]。而土壤 pH 值随放牧强度的增加而增加, 这与萨仁高娃等的研究结果一致^[19],

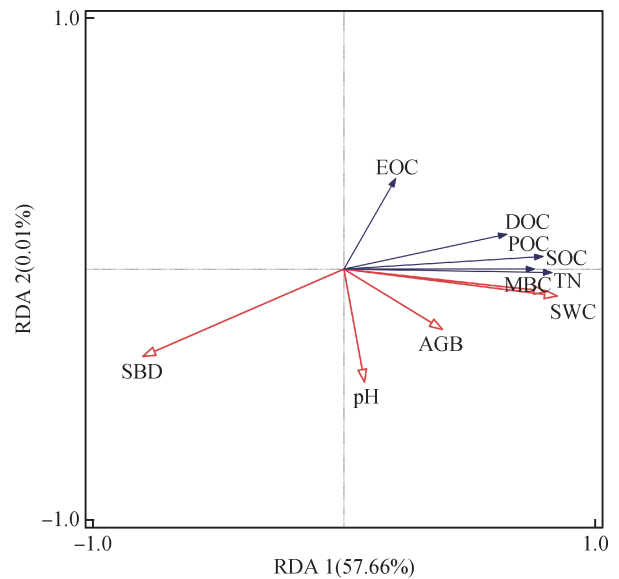


图6 有机碳及其活性组分和环境因子的冗余分析

Fig. 6 Redundant analysis of organic carbon, its active components and environmental factors

注: 图中 SOC 代表土壤有机碳; POC 代表土壤颗粒有机碳; DOC 代表土壤可溶性有机碳; MBC 代表土壤微生物生物量碳; EOC 代表土壤易氧化有机碳; TN 代表土壤全氮; SWC 代表土壤含水量; pH 代表土壤 pH 值; SBD 代表土壤容重; AGB 代表植物群落地上生物量

Note: SOC, soil organic carbon; POC, soil particulate organic carbon; DOC, soil dissolved organic carbon; MBC, soil microbial biomass carbon; EOC, soil easily oxidizable organic carbon; TN, soil total nitrogen; SWC, soil water content; pH, soil pH; SBD, soil bulk density; AGB, aboveground biomass of plant community

表2 土壤理化性质和有机碳及其活性组分的蒙特洛卡置换检验

Table 2 Montlocca displacement test for Soil physical and chemical properties and organic carbon and its active components

因子 Factors	解释率 Explanation/%	自由度 df	显著性 P
SWC	41.6	30.6	0.002
TN	10.1	8.8	0.010
AGB	3.4	3.1	0.098
SBD	2.1	2.0	0.184
pH	0.5	0.4	0.560

注: 表中 SWC 代表土壤含水量; TN 代表土壤全氮; AGB 代表群落地上生物量; SBD 代表土壤容重; pH 代表土壤 pH 值

Note: In the table, SWC represents soil water content; TN represents soil total nitrogen; AGB represents community aboveground biomass; SBD represents soil bulk density; pH represents soil pH

随着放牧强度的增加, 植物盖度减少, 地表裸露的面积增大使土壤水分的蒸发量增大, 促进了盐分的积累。从另一方面来看, 随放牧强度的增加, 家畜的尿量输入相应增加, 尿液中所含的氮等物质在土壤中快速转化, 进而加速了土壤离子循环过程, 最

终导致土壤氢离子的浓度升高^[20]。同土壤pH值的变化趋势一致,土壤容重随放牧强度的增大而增大,这与安慧等的研究结果一致^[21],家畜的行走和卧息行为使土壤变得更加紧实,导致容重的增加。土壤中的全氮含量对植物的生长发育有很大影响,也是提高和保持土壤肥力的关键因子^[22]。放牧对土壤氮含量具有显著影响,表现为随放牧强度增加土壤全氮含量减少,本研究发现,随着放牧强度的增大,全氮含量显著降低,这与高成芬等的研究结果一致^[23]。随着放牧强度的增加,家畜的行走和采食行为加剧,其直接影响表现为植被盖度降低,地上生物量减少,土壤养分循环和积累作用减弱,微生物活动减少,固氮作用减弱,土壤全氮含量显著降低^[24]。

植物群落地上生物量作为评估草地生产功能的核心参数,直接反映生态系统的物质积累能力。本研究发现,群落地上生物量随放牧强度的增加而显著降低,这与侯伟峰等人的研究结果一致^[25]。围封禁牧避免了家畜对植物的干扰,有效地保障了植物形态结构的完整,进而保障了植物的光合作用高效进行^[26],而放牧则会导致光合产物的合成和积累效率变低。

3.2 放牧对有机碳及其活性组分的影响

土壤有机碳是草原生态系统的最大有机碳库,其含量的变化会影响土壤的理化性质,在土壤肥力中发挥着重要的作用。本研究结果表明,土壤有机碳含量随放牧强度增加而降低,但变化未出现显著差异,这与杨合龙等的研究结果一致^[27]。出现这一变化趋势的原因可能是试验区放牧时间较短,在短期放牧的情况下,土壤有机碳含量的变化通常较为有限^[28]。这是因为短期放牧的情况下,家畜通过采食减少了地上植物生物量,直接减少枯落物向土壤的碳归还,但短期采食会刺激植物发生补偿性生长,促使植物将更多的光合产物向下分配,从而增加了地下根系生物量和根系分泌物,这两个过程在短期内往往相互抵消,使得碳总量无显著变化。POC作为有机碳的活性组分,主要来源于植物,是由部分分解的动植物残体及其产物组成,易受到干扰,周转速率较快。同时,放牧强度显著降低了POC含量,其原因是随放牧强度的增加,微生物活性受到抑制,导致凋落物分解速率下降,减少了POC的生物合成底物,进而降低了POC的含量。

DOC是溶解于土壤中的各类含碳化合物,其来源广泛。重度放牧下,DOC含量显著降低的原因与植被变化有关,随着放牧强度的增加,植被盖度与地上生物量降低,进而减少了向土壤输送有机物质的数量,导致了DOC的降低^[23];此外,干旱草原区由于降水稀少,DOC含量的减少主要是由于表层土壤的风蚀作用,而典型草原降水充沛,土壤受淋溶作用增强,这也会导致DOC向深层土壤的迁移,导致DOC含量的降低^[24]。MBC是衡量土壤活性碳库质量的关键指标,在本研究中,相较于中牧处理和重牧处理表层土壤(0~10 cm)MBC含量显著下降,这是因为随着放牧家畜数量的增加,家畜的践踏破坏了土壤结构,具体表现为容重增加和孔隙度降低,从而恶化了土壤微生物的栖息环境,抑制其代谢活动,导致MBC含量的下降,这与王启兰等的研究结果一致^[29]。EOC是有机碳组分中易被微生物分解,对环境变化敏感的活性组分。中度放牧处理显著提高了EOC的含量,这与付强在典型草原的研究结果一致^[30]。放牧家畜排泄的粪便与尿液是EOC的重要来源,家畜的粪便中含有大量易分解的有机物质,如纤维素、半纤维素、可溶性糖类和氨基酸,这些物质在进入土壤后可直接被微生物分解为EOC,家畜的尿液中又富含速效养分,这些养分可以提升土壤中微生物的活性。

3.3 土壤有机碳及其活性组分的影响因素

土壤养分供给能力直接受土壤碳含量影响,土壤理化因子通过影响植被生长和土壤结构,间接调控土壤有机碳储量^[31],同时,土壤理化性质与土壤活性有机碳组分间存在不同的关系。本研究中,有机碳及其组分与TN,SWC呈极显著正相关,这是因为TN的增加促进了地上生物量的增加,进而促进了新鲜凋落物的积累,这些富含易分解碳的凋落物为活性有机碳提供了物质基础^[32]。此外,冗余分析也表明SWC和TN对土壤有机碳及其活性组分有显著贡献,SWC和TN是典型草原土壤有机碳形成和积累的重要限制因子。土壤容重是土壤紧实度的指标,影响土壤的生物多样性,随着土壤容重的增加,土壤结构变得紧实,土壤孔隙度会变小,透气性变差,改变了微生物的环境,使微生物生物量减少,抑制了酶活性,改变了土壤的化学性质,进而使土壤有机碳的含量减少^[33]。放牧条件下,放牧家畜的采食、行走等行为会导致地上生物量的减少,

进而使土壤中植物源的碳含量减少,土壤有机碳含量也随之下降^[34],这表明地上生物量是土壤有机碳及其组分的重要来源。

4 结论

在典型草原,随着放牧强度的增加,POC,DOC,MBC含量降低,导致碳库衰减;中度放牧下,EOC含量升高,增强了碳活性。同时,本研究还发现影响土壤有机碳活性组分的关键因子是土壤含水量和土壤全氮含量。因此在典型草原的放牧利用过程中,建议避免重度放牧利用,通过调控土壤水分和氮肥施用增强碳固存,以有效地维持土壤质量和碳库功能。

参考文献

- [1] DLAMINI P, CHIVENGE P, CHAPLOT V. Overgrazing decreases soil organic carbon stocks the most under dry climates and low soil pH: A meta-analysis shows[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2016, 221: 258-269
- [2] 张扬建, 朱军涛, 沈若楠, 等. 放牧对草地生态系统影响的研究进展[J]. *植物生态学报*, 2020, 44(5): 553-564
ZHANG Y J, ZHU J T, SHEN R N, et al. Research progress on the effects of grazing on grassland ecosystem[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2020, 44(5): 553-564
- [3] 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
- [4] GONG J R, WANG Y H, LIU M, et al. Effects of land use on soil respiration in the temperate steppe of Inner Mongolia, China[J]. *Soil and Tillage Research*, 2014, 144: 20-31
- [5] ZHANG Z C, HUA T, ZHAO Y H, et al. Divergent effects of moderate grazing duration on carbon sequestration between temperate and Alpine grasslands in China[J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 858: 159621
- [6] SCHMIDT M W I, TORN M S, ABIVEN S, et al. Persistence of soil organic matter as an ecosystem property[J]. *Nature*, 2011, 478(7367): 49-56
- [7] BAI X J, GUO Z H, HUANG Y M, et al. Root cellulose drives soil fulvic acid carbon sequestration in the grassland restoration process[J]. *Catena*, 2020, 191: 104575
- [8] 颜辰亦, 龚吉蕊, 张斯琦, 等. 氮添加对内蒙古温带草原土壤活性有机碳的影响[J]. *植物生态学报*, 2024, 48(2): 229-241
YAN C Y, GONG J R, ZHANG S Q, et al. Effects of nitrogen addition on soil active organic carbon in a temperate grassland of Nei Mongol, China[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2024, 48(2): 229-241
- [9] 刘学东, 陈林, 杨新国, 等. 荒漠草原典型植物群落土壤活性有机碳组分特征及其与酶活性的关系[J]. *西北植物学报*, 2016, 36(9): 1882-1890
LIU X D, CHEN L, YANG X G, et al. Characteristics of soil labile organic carbon fractions and their relationship with soil enzyme activities in four typical communities in desert steppe[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2016, 36(9): 1882-1890
- [10] 梁爱珍, 张晓平, 杨学明, 等. 黑土颗粒态有机碳与矿物结合态有机碳的变化研究[J]. *土壤学报*, 2010, 47(1): 153-158
LIANG A Z, ZHANG X P, YANG X M, et al. Dynamics of soil particulate organic carbon and mineral-incorporated organic carbon in black soils in Northeast China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2010, 47(1): 153-158
- [11] 李生军. 高寒草甸不同植物群落不同放牧梯度下土壤颗粒有机碳分异趋势分析[J]. *黑龙江畜牧兽医*, 2018(23): 149-151
LI S J. Analysis on the differentiation trend of soil particulate organic carbon in different plant communities under different grazing gradients in Alpine meadow[J]. *Heilongjiang Animal Science and Veterinary Medicine*, 2018(23): 149-151
- [12] 舒健虹, 蔡一鸣, 丁磊磊, 等. 不同放牧强度对贵州人工草地土壤养分及活性有机碳的影响[J]. *生态科学*, 2018, 37(1): 42-48
SHU J H, CAI Y M, DING L L, et al. Effect of different grazing intensities on soil nutrient and active organic carbon in Guizhou artificial grassland[J]. *Ecological Science*, 2018, 37(1): 42-48
- [13] 马秀枝. 开垦和放牧对内蒙古草原土壤碳库和温室气体通量的影响[D]. 北京: 中国科学院研究生院(植物研究所), 2006: 46-50
MA X Z. Effects of cultivation and grazing on soil carbon pool and greenhouse gases fluxes in the Inner Mongolia steppes[D]. Beijing: Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, 2006: 46-50
- [14] 高雪峰, 武春燕, 韩国栋. 放牧对典型草原土壤中几种生态因子影响的研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2010, 24(4): 130-133
GAO X F, WU C Y, HAN G D. Effect of grazing on several ecological factors of the soil in typical Steppe[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2010, 24(4): 130-133
- [15] 贺笑寒, 唐玥, 刘欣蕊, 等. 不同放牧强度对典型草原土壤有机碳的影响[J]. *草地学报*, 2026, 34(2): 624-631
HE X H, TANG Y, LIU X R, et al. Effects of different grazing intensities on soil organic carbon in typical grasslands[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2026, 34(2): 624-631
- [16] 刘欣蕊. 不同放牧强度下典型草原植物多样性及其与土壤养分关系的研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2024: 23-25
LIU X R. The study on plant diversity and its relationship with soil nutrients in typical steppe under different grazing intensities[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2024: 23-25
- [17] 孙彩彩, 安海涛, 董全民, 等. 放牧强度对环青海湖地区高寒草地土壤理化性质及土壤粒径分形特征的影响[J]. *中国草地学报*, 2024, 46(8): 88-96
SUN C C, AN H T, DONG Q M, et al. Effects of grazing

- intensity on soil physicochemical properties and soil particle size fractal characteristics of Alpine grassland in the Qinghai Lake area[J]. Chinese Journal of Grassland, 2024, 46(8): 88-96
- [18] 苏永中, 赵哈林. 持续放牧和围封对科尔沁退化沙地草地碳截存的影响[J]. 环境科学, 2003, 24(4): 23-28
- SU Y Z, ZHAO H L. Influences of grazing and enclosure on carbon sequestration in degraded sandy grassland, Inner Mongolia, North China[J]. Chinese Journal of Environmental Science, 2003, 24(4): 23-28
- [19] 萨仁高娃, 曹芙, 敖特根, 等. 短期放牧强度对典型草原土壤有机碳及pH值的影响[J]. 畜牧与饲料科学, 2014, 35(3): 5-7
- SA R, CAO F, AO T G, et al. Effects of short-term grazing intensities on soil organic carbon and pH value in the typical steppe[J]. Animal Husbandry and Feed Science, 2014, 35(3): 5-7
- [20] HAYNES R J, WILLIAMS P H. Changes in soil solution composition and pH in urine-affected areas of pasture[J]. Journal of Soil Science, 1992, 43(2): 323-334
- [21] 安慧, 徐坤. 放牧干扰对荒漠草原土壤性状的影响[J]. 草业学报, 2013, 22(4): 35-42
- AN H, XU K. The effect of grazing disturbance on soil properties in desert steppe[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2013, 22(4): 35-42
- [22] 殷文, 郭瑶, 陈桂平, 等. 绿洲农田土壤团聚体组成及有机碳和全氮分布对秸秆还田方式的响应[J]. 干旱地区农业研究, 2019, 37(3): 139-148
- YIN W, GUO Y, CHEN G P, et al. Response of composition of soil aggregates and distribution of organic carbon and total nitrogen to straw returning in an oasis area[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2019, 37(3): 139-148
- [23] 高成芬, 张永辉, 李智燕, 等. 不同强度短期放牧对高寒草甸土壤理化性质的影响[J]. 中国草食动物科学, 2024, 44(1): 19-24
- GAO C F, ZHANG Y H, LI Z Y, et al. Effects of short-term grazing with different intensities on soil physicochemical properties in Alpine meadow[J]. China Herbivore Science, 2024, 44(1): 19-24
- [24] 贾丽英, 陈清, 张洛梓, 等. 放牧和围封对内蒙古羊草草原土壤团聚体理化性质的影响[J]. 天津师范大学学报(自然科学版), 2021, 41(6): 40-45
- JIA L Y, CHEN Q, ZHANG L Z, et al. Effects of grazing and enclosure on physicochemical properties of soil aggregates in Leymus chinensis steppe, Inner Mongolia[J]. Journal of Tianjin Normal University (Natural Science Edition), 2021, 41(6): 40-45
- [25] 候伟峰, 乌恩, 敖特根, 等. 放牧强度对克氏针茅典型草原地上生物量的影响[J]. 中国草地学报, 2016, 38(6): 71-77
- HOU W F, WU E, AO T G, et al. Effect of different grazing intensities on aboveground biomass in Stipa krylovii typical steppe[J]. Chinese Journal of Grassland, 2016, 38(6): 71-77
- [26] 方楷, 宋乃平, 魏乐, 等. 不同放牧制度对荒漠草原地上生物量及种间关系的影响[J]. 草业学报, 2012, 21(5): 12-22
- FANG K, SONG N P, WEI L, et al. The effect of different grazing systems on aboveground biomass and interspecific relationships in desert steppe[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2012, 21(5): 12-22
- [27] 杨合龙, 孙宗玖, 范燕敏, 等. 短期放牧对昭苏草甸草原土壤活性有机碳组分的影响[J]. 草业科学, 2013, 30(12): 1926-1932
- YANG H L, SUN Z J, FAN Y M, et al. Effects of short-period grazing on soil active organic carbon fractions in Zhaosu meadow steppe[J]. Pratacultural Science, 2013, 30(12): 1926-1932
- [28] MCSHERRY M E, RITCHIE M E. Effects of grazing on grassland soil carbon: a global review[J]. Global Change Biology, 2013, 19(5): 1347-1357
- [29] 王启兰, 王长庭, 杜岩功, 等. 放牧对高寒嵩草草甸土壤微生物量碳的影响及其与土壤环境的关系[J]. 草业学报, 2008, 17(2): 39-46
- WANG Q L, WANG C T, DU Y G, et al. Grazing impact on soil microbial biomass carbon and relationships with soil environment in Alpine Kobresia meadow[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2008, 17(2): 39-46
- [30] 付强. 放牧强度对典型草原土壤有机碳组分及其稳定性的影响研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2023: 32-38
- FU Q. The effects of grazing intensity on the fractions and stability of soil organic carbon in a typical steppe[D]. Hohhot: Inner Mongolia University, 2023: 32-38
- [31] 贡璐, 罗艳, 解丽娜. 塔里木盆地北缘绿洲不同土地利用方式土壤有机碳、无机碳变化及其土壤影响因子[J]. 中国农业大学学报, 2017, 22(12): 83-94
- GONG L, LUO Y, XIE L N. Changes in SOC and SIC concentration with land uses and their soil influencing factors in northern marginal zones of Tarim Basin[J]. Journal of China Agricultural University, 2017, 22(12): 83-94
- [32] 全紫曼, 漆燕, 周泽弘, 等. 山豆还田与氮肥减施对稻田土壤活性有机碳组分及酶活性的影响[J]. 草业科学, 2024, 41(5): 1057-1067
- QUAN Z M, QI Y, ZHOU Z H, et al. Effects of Lathyrus sativus return to the field and nitrogen rate reduction on paddy soil labile organic carbon and soil enzyme activities[J]. Pratacultural Science, 2024, 41(5): 1057-1067
- [33] ALHASSAN A M, MA W W, LI G, et al. Response of soil organic carbon to vegetation degradation along a moisture gradient in a wet meadow on the Qinghai-Tibet Plateau[J]. Ecology and Evolution, 2018, 8(23): 11999-12010
- [34] 王雪婷, 乌云娜, 王洋, 等. 草原退化过程中土壤碳氮分布与群落生物量的关系[J]. 黑龙江农业科学, 2014(9): 104-110
- WANG X T, WU Y N, WANG Y, et al. The relationship between soil organic carbon and nitrogen distribution and community biomass in the process of grassland degradation[J]. Heilongjiang Agricultural Sciences, 2014(9): 104-110

(责任编辑 刘婷婷)