

doi:10.11733/j.issn.1007-0435.2026.02.024

引用格式: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 Xiao-han, TANG Yue, LIU Xin-rui, et al. Effects of Different Grazing Intensities on Soil Organic Carbon in Typical Grasslands[J]. Acta Agrestia Sinica, 2026, 34(2):624—631

不同放牧强度对典型草原土壤有机碳的影响

贺笑寒, 唐玥, 刘欣蕊, 王忠武*, 赫黎明, 闫佳, 王静, 屈志强,
李治国, 韩国栋

(内蒙古农业大学草业学院, 内蒙古呼和浩特 010010)

摘要:为明晰不同放牧强度下内蒙古典型草原土壤有机碳(Soil organic carbon, SOC)的分布特征及其影响因素, 本试验以内蒙古锡林郭勒正镶白旗典型草原为研究对象, 针对不同放牧强度下的0~50 cm土层的SOC、全碳(Soil total carbon, STC)、全氮(Soil total nitrogen, STN)、全磷(Soil total phosphorus, STP)、土壤含水量(Soil water content, SWC)、土壤pH值(pH)、土壤容重(Soil bulk density, SBD)以及植物地上生物量(Aboveground biomass, AGB)等指标进行了测定和分析。结果表明: SOC含量在不同放牧强度下均随土层深度的增加而逐渐降低, 0~10 cm的SOC含量均最高。在无牧、中度放牧和重度放牧条件下, 自0~50 cm土层, SOC含量分别下降了7%, 17%和8%; 中度放牧显著提高了0~30 cm的SOC含量, 且0~10 cm的SOC含量提升最多, 增幅为11%; 放牧对SOC含量的影响随土层深度的增加而降低, 土层越深放牧的影响越弱; 不同放牧强度改变了SOC与环境因子的关系, 随着放牧强度的增加, SOC的影响因素从AGB和SWC逐步转向土壤养分和土壤物理性质。研究表明: 在放牧持续时间较短时, 中度放牧更有利于典型草原SOC的积累和转化。重度放牧虽未显著降低SOC含量, 但已呈现碳流失风险, 需通过控制放牧强度优先保护表层碳库。

关键词:典型草原; 放牧; 有机碳; 土壤理化性质

中图分类号: S812.2

文献标识码: A

文章编号: 1007-0435(2026)02-0624-08

Effects of Different Grazing Intensities on Soil Organic Carbon in Typical Grasslands

HE Xiao-han, TANG Yue, LIU Xin-rui, WANG Zhong-wu*, HE Li-ming, YAN Jia, WANG Jing,
QU Zhi-qiang, LI Zhi-guo, HAN Guo-dong

(College of grassland science, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot, Inner Mongolia 010010, China)

Abstract: To clarify the distribution characteristics of soil organic carbon (SOC) and its influencing factors under different grazing intensities in a typical Inner Mongolian grassland, this study measured and analyzed SOC, total carbon (STC), total nitrogen (STN), total phosphorus (STP), soil water content (SWC), soil pH, soil bulk density (SBD), and aboveground biomass (AGB) across the 0-50 cm soil layers under no grazing (CK), moderate grazing (MG), and heavy grazing (HG) in Zhengxiangbai Banner, Xilingol League, Inner Mongolia. Key results included: SOC content decreased with soil depth under all grazing intensities, with the highest SOC content observed in the 0-10 cm layer. From 0 to 50 cm deep layers, SOC declined by 7% (CK), 17% (MG), and 8% (HG). Moderate grazing significantly increased SOC content in the 0-30 cm layer, with the greatest increase (11%) in the 0-10 cm layer (from 35.33 to 39.45 g·kg⁻¹). Grazing effects on SOC diminished with soil depth, showing weaker impacts on deeper layers. Grazing intensity altered SOC-environment relationships: SOC was primarily driven by AGB and SWC under CK, shifted to interactions with soil nutrients (STN) and physical properties (SBD, pH) under MG, and strongly correlated with STC, STN,

收稿日期: 2025-01-10; 修回日期: 2025-02-28

基金项目: 一流学科科研专项(YLXKZX-NND-002); 国家自然科学基金项目(U23A2001, 32460353)资助

作者简介: 贺笑寒(1999-), 男, 回族, 内蒙古锡林浩特人, 硕士研究生, 主要从事草地资源生态与管理研究, E-mail: hxxh13947999246@163.com; *通信作者 Author for correspondence, E-mail: wangzhongwu@imau.edu.cn

STP, and SBD under HG. The study concludes that moderate grazing enhances SOC accumulation and transformation in the short term, while heavy grazing poses a risk of carbon loss despite no significant SOC reduction. Protecting surface carbon pools through controlled grazing intensity is critical for sustainable grassland management.

Key words: Typical Grassland; Grazing Capacity; Organic Carbon; Soil Physical and Chemical Properties

草地是地球上面积最大的陆地生态系统之一, 约占全球陆地面积的40%^[1]。草地不仅是主要的畜牧业生产基地, 而且在水土保持、水源涵养、生物多样性维持等方面发挥着重要作用^[2]。此外, 草地还是地球上非常重要的碳库, 储存着全球陆地大约34%的碳^[3], 其中, 近90%的碳以有机碳的形态贮存在草地土壤中, 并在全球碳平衡方面至关重要^[4]。土壤有机碳主要源于植物残体、枯落物、微生物残体以及植物根系分泌物等^[5]。作为指示草地健康状况的指标之一, 土壤有机碳对环境的变化非常敏感, 受多种生物和非生物因素的影响, 如禁牧、放牧强度、土壤质地等因素^[6]。

近年来, 全球气候变化与高强度的人类活动给草原生态系统带来了巨大的挑战。放牧作为草原地区主要的利用方式, 其强度变化深刻影响着草原生态^[7-8], 放牧可通过改变地表植物群落、土壤下垫面结构, 显著影响草地防风固沙、碳固持等生态系统服务功能^[9-10]。放牧对土壤有机碳的影响已有大量研究, 但由于放牧强度、放牧年限、放牧方式、研究方法以及环境因素等差异, 研究的结论不尽相同。其中, 一部分研究认为放牧对土壤有机碳无显著影响^[11]; 另一部分认为随放牧强度的增加, 土壤有机碳含量先增加后降低, 重度放牧使土壤有机碳含量降低^[12-13]; 还有的研究认为不同条件下放牧与土壤有机碳含量之间存在着复杂的关系^[14-15]。

在典型草原生态系统中, 虽已有研究提及不同放牧强度可能导致土壤有机碳分布的变化, 但既往研究多聚焦于长期放牧干扰对表层土壤有机碳的影响^[16-18], 对短期放牧压力下深层土壤有机碳的分布特征及其影响因素缺乏系统深入的研究。基于此, 本文以锡林郭勒盟正镶白旗典型草原为研究对象, 探究不同放牧梯度下0~50 cm土层中土壤有机碳的垂直分布特征, 深入剖析土壤有机碳在不同土层深度的含量及影响因素进而评估放牧对土壤有机碳的直接影响与间接调控作用, 以期能够揭示合理放牧强度与土壤有机碳动态变化之间的内在联系, 为制定典型草原的科学放牧管理制度、优化放牧策略以及增强其草地碳汇潜力提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

研究区额里图牧场位于内蒙古自治区锡林郭勒盟正镶白旗(正镶白旗位于内蒙古自治区中部、锡林郭勒盟西南部, 地处浑善达克沙地南缘的典型草原区)明安图镇, 属温带干旱大陆性气候, 冬长春短, 夏热秋凉, 降水量少而集中, 昼夜温差大, 光照充足。地理坐标为115°14'E, 42°15'N, 海拔高度在1200~1400 m之间。该区气温年较差大, 2023年年均气温4.34℃, 年降水量为260.2 mm, 年最高温和最大降水量均出现在7月, 分别为20.24℃和83.0 mm(图1)。土壤为典型栗钙土。研究区草地类型为温性草原, 草地建群种为克氏针茅(*Stipa krylovii*), 优势种为羊草(*Leymus chinensis*)、冷蒿(*Artemisia frigida*), 伴生种有寸草苔(*Carex duriuscula*)、木地肤(*Bassia prostrata*)、瓣蕊唐松草(*Thalictrum petaloideum*)等。

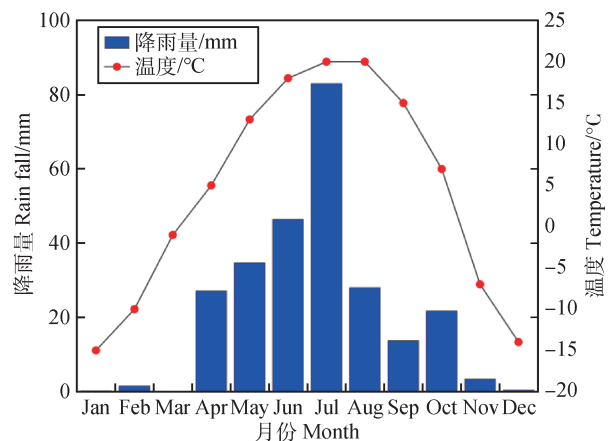


图1 研究区域水温图

Fig. 1 Map of rain fall and temperature in the study area

1.2 试验设计

实验开始前, 该草地的利用方式为自由放牧, 于放牧季白天放牧, 夜晚收牧。放牧试验开始于2021年, 试验根据样地地形、植被条件共设3个放牧强度, 分别为无牧(CK), 中度放牧(MG), 重度放牧(HG), 每个处理5次重复(图2), 放牧载畜率根据当地适宜载畜率进行设置, 为1.65羊单位·hm⁻²·a⁻¹, 三个放牧强度分别放羊0, 6, 9只, 折合成载畜率

分别为 0, 1.63, 2.45 羊单位·hm⁻²·a⁻¹。试验采用随机区组排列, 每一小区面积 3.67 ha。放牧时间为生长

季: 6 月 1 日—10 月 31 日。放牧家畜选用 2 岁羯羊, 放牧季全天放牧, 设置饮水点提供充足饮水。

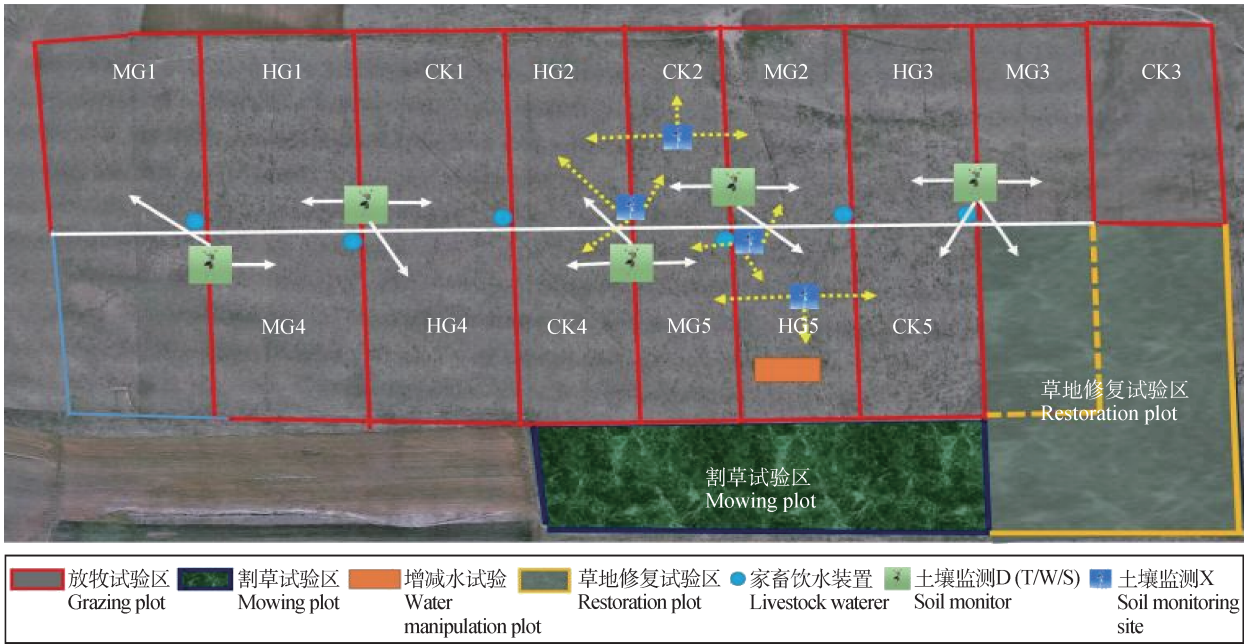


图 2 试验样地概况

Fig. 2 Overview of the experimental sample plots

表 1 放牧试验设计

Table 1 Grazing trial design

放牧强度 Grazing capacity	处理缩写 Processing abbreviation	小区面积 Plot area/ha	羊数量 Number of sheep/只	载畜率 Stocking rate/(羊单位·hm ⁻² ·a ⁻¹)
无牧	CK	3.67	0	0
中度放牧	MG	3.67	6	1.63
重度放牧	HG	3.67	9	2.45

1.3 样品采集

于 2023 年 8 月中旬在每个小区的样地内纵向设置长 100 m 的样线, 样线上隔 20 m 设置一个 1 m×1 m 的样方, 每个小区五个样方, 用于监测草地地上生物量。将样方内植物齐地面剪下, 装在信封袋内, 带回实验室于 85℃ 烘箱烘干至恒重, 称重后记为地上生物量。在收集地上生物量的样方中, 按 0~10 cm, 10~20 cm, 20~30 cm, 30~40 cm, 40~50 cm 分层, 用直径为 7 cm 的土钻分层用五点取样法依次取样。去除植物根系、石砾后分两份保存, 一份装入自封袋中作为鲜土保存, 一份自然风干后保存。

1.4 样品测定

SOC 采用重铬酸钾外加热法测定, 使用元素分析仪(德国, elemental-Macrio cube)测定 STC、STN 含量, 采用酸溶-钼锑抗分光光度法测定 STP 含量。SBD 采用环刀法测量, SWC 采用差值法测量, 土壤 pH 使用 PHS-3G 数字 pH 计测量。

1.5 数据处理

所有数据采用 Microsoft Excel 2019 软件对植物地上生物量和土壤的原始数据进行处理; 利用 SPSS27.0 软件进行单因素方差分析。采用 Duncan 多重比较法评估不同处理下各指标的差异显著性 ($P<0.05$)。采用 R. 4.2.2 软件的 Mantel-test 检验分析土壤有机碳与各因子之间的相关性。利用 Excel 2019 软件制作表格, 采用软件 Origin 2021 作图。

2 结果与分析

2.1 不同放牧强度下土壤有机碳的分布特征

SOC 含量在不同深度土层间的分布存在差异(图 3)。在 MG 和 HG 条件下, SOC 含量均随土层深度的增加而降低, 均为 0~10 cm 的 SOC 含量最高。CK 各土层间的差异不显著。MG 中 30~40 cm 的 SOC 含量显著低于 0~10 cm ($P<0.05$), 降低了 7%, 40~50 cm 的 SOC 含量显著低于 0~10 cm,

10~20 cm, 20~30 cm 和 30~40 cm ($P<0.05$), 分别降低了 17%, 15%, 14% 和 11%, 0~30 cm 各土层间 SOC 含量无显著差异。HG 中 0~10 cm 的 SOC 含量显著高于 20~30 cm, 30~40 cm, 40~50 cm ($P<0.05$), 分别降低了 4%, 5% 和 8%。10~20 cm 土层的 SOC 含量显著高于 30~40 cm, 40~50 cm ($P<0.05$), 分别降低了 4% 和 6%。20~30 cm 土层的 SOC 含量显著高于 40~50 cm ($P<0.05$), 降低了 4%。30~50 cm 中 SOC 含量无显著差异。

不同放牧强度对 SOC 含量产生了显著影响 ($P<0.05$), 随放牧强度的增加 SOC 含量呈先升高后降低的趋势 (图 3)。除 30~40 cm 和 40~50 cm 外, MG 各土层的 SOC 含量均显著高于 CK 和 HG ($P<0.05$), 在 40~50 cm 土层, SOC 含量在各放牧强度下差异不显著。其中 0~10 cm 土层相较于 10~20 cm 和 20~30 cm 的增幅最大, 从 $35.33 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 增加到 $39.45 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 增幅为 11%。随着土层深度的增加放牧对 SOC 的影响逐渐减弱。

2.2 放牧对地上生物量和土壤理化性质的影响

由表 2 可知, 放牧强度对 AGB 和土壤理化因子有显著影响 ($P<0.05$), HG 显著降低了 AGB ($P<0.05$), 降幅为 29.7%; SBD 随放牧强度增大先减少后增大, MG 显著低于 CK 和 HG, 降幅分别为 9% 和 10% ($P<0.05$); 随放牧强度的增大 SWC 呈现和 SBD 一致的趋势, MG 显著高于 CK 和 HG ($P<0.05$), 增幅分别为 6% 和 36.4%, CK 显著高于 HG ($P<0.05$); pH 随放牧强度的增大而增加。MG 和

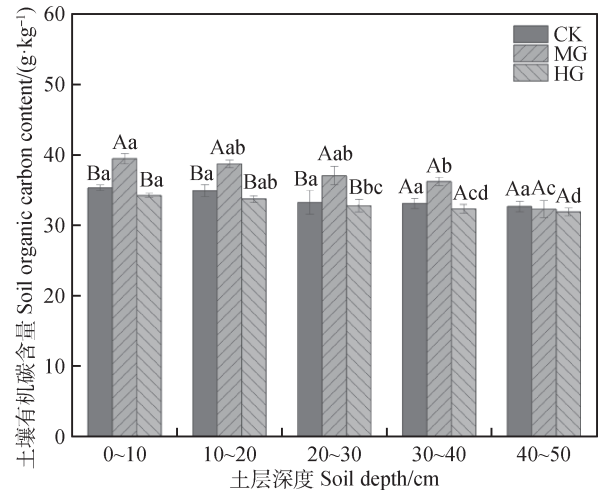


图3 不同放牧强度下的土壤有机碳分布特征

Fig. 3 Characteristics of soil organic carbon distribution under different grazing intensities

注:同一土层不同处理间标注不同大写字母表示存在显著差异 ($P<0.05$);同一处理不同土层间标注不同小写字母表示存在显著差异 ($P<0.05$)。下同

Note: different capital letters mean significant differences between different treatments in the same soil layer ($P<0.05$). Lowercase letters mean significant differences between different soil layers in the same treatment ($P<0.05$). The same as below

HG 显著高于 CK ($P<0.05$); STC 含量随放牧强度的增大而降低, CK 显著高于 MG 和 HG ($P<0.05$), 增幅分别为 15% 和 27%, MG 显著高于 HG ($P<0.05$), 增幅为 9%; STN 随放牧强度的增大先增加后减少, MG 显著高于 CK 和 HG ($P<0.05$), 增幅分别为 16% 和 21%, CK 显著高于 HG ($P<0.05$), 增幅为 8%; STP 随放牧强度的增大先增加后减少。MG 显著高于 HG ($P<0.05$), 增幅为 32%。

表2 不同放牧强度下的地上生物量和土壤理化性质

Table 2 Aboveground biomass and soil physicochemical properties under different grazing intensities

放牧强度	AGB/ ($\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$)	SBD/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	SWC/ %	pH	STC/ %	STN/ %	STP/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)
CK	77.96 ± 14.15^A	1.57 ± 0.01^A	9.65 ± 0.08^B	8.26 ± 0.01^B	3.88 ± 0.01^A	0.24 ± 0.01^B	0.30 ± 0.02^{AB}
MG	70.40 ± 5.01^A	1.42 ± 0.02^B	10.23 ± 0.16^A	8.38 ± 0.04^A	3.35 ± 0.01^B	0.28 ± 0.01^A	0.37 ± 0.03^A
HG	54.81 ± 12.53^B	1.59 ± 0.02^A	7.50 ± 0.08^C	8.50 ± 0.02^A	3.05 ± 0.02^C	0.23 ± 0.00^C	0.28 ± 0.01^B

注:同列不同大写字母表示不同处理间存在显著差异 ($P<0.05$)

Note: Different capital letters in the same column indicate that there are significant differences between different treatments ($P<0.05$)

2.3 不同放牧强度下土壤有机碳与土壤理化性质、地上生物量间的相关性分析

从图 4 可以看出, SOC 与 AGB 和土壤理化因子之间在不同放牧强度下相关关系具有差异性,在不放牧的条件下 SOC 与 SWC 和 AGB 之间呈显著的正相关关系 ($P<0.05$), 在中度放牧条件下 SOC 与

SWC, AGB 之间呈显著正相关关系 ($P<0.05$), 与 STN 呈极显著正相关关系, 与 SBD 和 pH 呈极显著负相关关系 ($P<0.01$)。在重度放牧条件下 SOC 与 AGB 呈显著正相关关系 ($P<0.05$), 与 STC, STN, STP 之间极显著正相关关系 ($P<0.01$), 与 SBD 之间呈极显著负相关关系 ($P<0.01$)。通过 Mantel-

test分析表明,在不放牧条件下影响土壤有机碳含量的主要因素为AGB和SWC;在中度放牧条件下,影响土壤有机碳含量的主要因素为AGB,pH,SBD,SWC,STN;在重度放牧条件下,影响土壤有机碳含量的主要因素为STC,STN,STP,AGB,SBD。

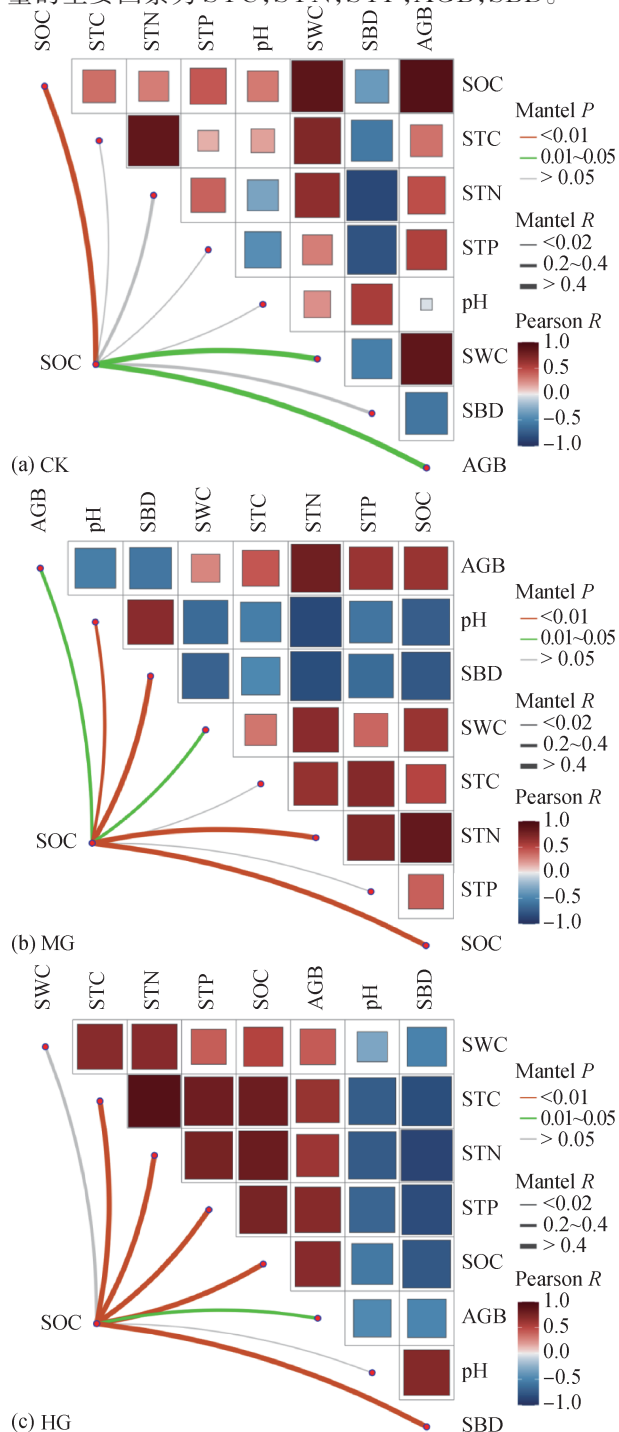


图4 不同放牧强度下土壤有机碳与土壤理化性质、地上生物量间的相关分析

Fig. 4 Correlation analysis between soil organic carbon and soil physical and chemical properties and aboveground biomass under different grazing intensities

3 讨论

3.1 土壤有机碳对不同放牧强度的响应

土壤有机碳作为陆地生态系统碳循环的关键组成部分,其动态变化对于维持生态系统功能、调节全球气候变化具有重要意义。本研究发现,SOC含量随土层深度的增加而显著降低,且这一趋势在所有放牧强度下均保持一致。这一发现与季波等人的研究结论相符^[19],即表层土壤通常含有最高的SOC含量,而随深度增加,SOC含量逐渐下降。这主要是因为表层土壤是植物根系集中分布的区域,也是微生物活动最为活跃的地方,因此有机物的输入和分解速率较高^[20]。随土层深度增大,凋落物运输腐殖质和其他物质进入较深层能力减弱,使较深层土层SOC含量下降^[21]。

在草地生态系统中,放牧作为关键的人类活动之一,对SOC的动态变化具有深远影响。本研究发现随放牧强度的增加SOC含量呈现先升高后降低的趋势,中度放牧下,SOC含量显著高于不放牧和重度放牧,特别是在0~10 cm土层中,增幅达到11%。谢芮等^[22]的研究中也得出相同的结论。其原因可能是中度放牧条件下,土壤微生物量碳含量增加,而土壤微生物量碳含量与SOC之间存在显著正相关关系,所以中度放牧显著提高了SOC的含量^[23];也可能是因为中度放牧条件下维持了较高的根系生物量,其根系的分泌物可以为土壤微生物提供营养物质促进微生物活动,进而加速有机物质的分解和再合成过程,有助于SOC的增加^[24]。与中度放牧相比,重度放牧降低了0~10 cm,10~20 cm和20~30 cm土层的SOC含量,这可能是因为重度放牧降低了AGB导致草地初级生产固碳能力下降进而导致SOC含量降低^[25]。在40~50 cm土壤层中,虽然SOC含量随放牧强度的增加呈降低趋势,但差异不显著。其原因可能有两个,一是因为在深层土壤中,放牧对SOC的影响相对较弱,这可能与深层土壤的物理化学性质及微生物活性较低有关^[26]。二是研究区土壤类型为典型栗钙土,钙积层主要出现在40 cm以下^[27],钙积层的存在可以形成一层物理屏障,固持和保护SOC并减少微生物对其的分解作用^[28]。

3.2 不同放牧强度下土壤有机碳与土壤理化性质、地上生物量间的关系

分析不同放牧强度下SOC与环境因子的关系时

发现影响SOC含量的因素存在差异。在不放牧条件下,影响SOC含量的主要因素是SWC和AGB。有研究表明土壤中的SOC大都来源于植物,植物根系、残体通过腐化过程向土壤中输入有机质从而影响SOC含量^[29]。Ruiz等人^[30]的研究表明植被覆盖度较高的地区SOC含量较高。SWC是植物生长的必要因素,含水量高植被盖度高,累积到土壤中的SOC就越多,另一方面SWC的增加会导致土壤中好氧性微生物类群的活性降低,使其对SOC的分解作用降低,有利于增加SOC含量^[31]。

在中度放牧条件下,影响SOC含量的主要因素是STN,SBD和土壤pH。氮素是土壤微生物繁殖的必要元素,而高的STN含量可以提高土壤微生物的活性,有利于土壤微生物对土壤有机质的合成^[32],从而增加了SOC含量。pH值是衡量土壤酸碱性的重要指标,会影响有机碳的矿化速率,研究表明pH的含量过高会抑制土壤微生物的活性,土壤微生物活性受到限制,有机碳分解速率降低^[33],从而导致SOC含量增加。SBD的增加通常意味着土壤紧实度提高,这会限制根系生长和微生物活动,从而减少SOC的积累^[34]。本研究中度放牧下SBD降低,增加了土壤微生物活性进而提升了SOC含量。

在重度放牧条件下,影响SOC含量的主要因素是STN,STC,STP和SBD。本研究中,重度放牧下STN含量降低,SBD升高,从而导致SOC含量降低。凋落物是土壤碳的主要输入源^[35],本研究中重度放牧降低了AGB导致凋落物含量减少,进而导致SOC含量降低^[36]。STP虽然在土壤中的含量相对较低,但有机碳的分解可以促进磷元素释放至土壤,而土壤中磷元素的增加又可以促进有机碳的积累^[37]。

4 结论

土壤有机碳含量在中度和重度放牧条件下均随土层深度的增加而降低,土壤表层有机碳含量最高;在试验期内,放牧对土壤有机碳含量有显著影响,中度放牧提高了土壤有机碳含量,有利于土壤有机碳的积累。放牧对土壤有机碳含量的影响主要体现在土壤表层。土层越深,放牧的影响越弱。

放牧强度改变了土壤有机碳与植物群落地上生物量和土壤理化因子的关系,随着放牧强度的增

加,土壤有机碳的影响因素从植物群落地上生物量和土壤含水量逐步转向土壤养分和土壤物理性质。不放牧时,土壤有机碳主要受植物群落地上生物量和土壤含水量的影响;中度放牧时,土壤全氮、容重、pH对土壤有机碳的影响更显著;重度放牧时,土壤全碳、全氮、容重、全磷对土壤有机碳的影响更显著。

参考文献

- [1] ORWIN K H, OSTLE N, WILBY A, et al. Effects of species evenness and dominant species identity on multiple ecosystem functions in model grassland communities[J]. *Oecologia*, 2014, 174(3):979-992
- [2] DLAMINI P, CHIVENG 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 and Environment*, 2016(221):258-269
- [3] EZE S, PALMERSM, CHAPMANPJ. Soil organic carbon in grasslands: effects of inorganic fertilizers, liming and grazing in different climate settings[J]. *Journal of Environmental Management*, 2018, 223(OCT. 1):74
- [4] CHENG J, WU G L, ZHAO L P, et al. Cumulative effects of 20-year exclusion of livestock grazing on above and below-ground biomass of typical steppe communities in arid areas of the Loess Plateau, China[J]. *Plant Soil & Environment*, 2011, 57(1):40-44
- [5] YANG J J, LI A Y, TANG Y F, et al. Soil organic carbon stability under natural and Anthropogenic-induced perturbations anthropogenic-induced perturbations[J]. *Earth-Science Reviews: The International Geological Journal Bridging the Gap between Research Articles and Textbooks*, 2020, 205(1):103199
- [6] 常帅,于红博,曹聪明,等. 锡林郭勒草原土壤有机碳分布特征及其影响因素[J]. *干旱区研究*, 2021, 38(5):1355-1366
CHANG S, YU H F, CAO C M, et al. Distribution characteristics and influencing factors of soil organic carbon in Xilinguole grassland[J]. *Arid Zone Research*, 2021, 38(5):1355-1366
- [7] DIAO H J, HAO J, YANG Q W, et al. Soil environment and annual rainfall co-regulate the response of soil respiration to different grazing intensities in saline-alkaline grassland [J]. *Catena*, 2024, 236:107709
- [8] ZHOU G, LUO Q, CHEN Y, et al. Effects of livestock grazing on grassland carbon storage and release override impacts associated with global climate change[J]. *Global Change Biology*, 2019, 25
- [9] ZHAO Y, LIU Z, WU J. Grassland ecosystem services: a systematic review of research advances and future directions[J]. *Landscape Ecology*, 2020, 35(4):1-22
- [10] REN S, TERRER C, LI J, et al. Historical impacts of grazing on carbon stocks and climate mitigation opportunities [J]. *Nature Climate Change*, 2024, 14(4):380-386

- [11] LIU C, LI W, XU J, et al. Response of soil nutrients and stoichiometry to grazing management in alpine grassland on the Qinghai-Tibet Plateau [J]. Soil and Tillage Research, 2021 (206):104822
- [12] 任瑾涛, 张璞进, 吴英, 等. 不同放牧退化阶段大针茅草原土壤有机碳稳定性及其来源研究[J]. 中国草地学报, 2021, 43(7):37-44
REN J T, ZHANG P J, LV Y, et al. Study on the stability and source of soil organic carbon in *Stipa grandis* steppe at different grazing degradation stages [J]. Chinese Journal of Grassland, 2021, 43(7):37-44
- [13] 杜凯, 康宇坤, 张德罡, 等. 不同放牧方式对祁连山高寒草甸有机碳、氮库的影响[J]. 草地学报, 2020, 28(5):1412-1420
DU K, KANG Y K, ZHANG D Z, et al. Effects of different grazing methods on organic carbon and nitrogen pools in alpine meadow of Qilian Mountains [J]. Acta Agrestia Sinica, 2020, 28(5):1412-1420
- [14] ZHANG, M, LI X, WANG H, et al. Comprehensive analysis of grazing intensity impacts soil organic carbon: A case study in typical steppe of Inner Mongolia, China [J]. Applied Soil Ecology, 2018(129):1-12
- [15] YU L, CHEN Y, SUN W, et al. Effects of grazing exclusion on soil carbon dynamics in alpine grasslands of the Tibetan Plateau [J]. Geoderma, 2019:133-143
- [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, 2024:1-4
LIU X R. Study on the stability and source of soil organic carbon in *Stipa grandis* steppe at different grazing degradation stages [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2024:1-4
- [17] 刘丝雨, 李晓兵, 李梦圆, 等. 内蒙古典型草原植被和土壤特性对放牧强度的响应[J]. 中国草地学报, 2021, 43(9):23-31
LIU S Y, LI X B, LI M Y, et al. Responses of vegetation and soil properties to grazing intensity in typical steppe of Inner Mongolia [J]. Chinese Journal of Grassland, 2021, 43(9):23-31
- [18] 王合云, 董智, 郭建英, 等. 不同放牧强度下短花针茅荒漠草原植被-土壤系统有机碳组分储量特征[J]. 生态学报, 2016, 36(15):4617-4625
WANG H Y, DONG Z, GUO J Y, et al. Characteristics of organic carbon component storage in vegetation-soil system of *Stipa breviflora* desert steppe under different grazing intensities [J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(15):4617-4625
- [19] 季波, 何建龙, 吴旭东, 等. 宁夏典型天然草地土壤有机碳及其活性组分变化特征[J]. 草业学报, 2021, 30(1):24-35
JI B, HE J L, WU X D, et al. Variation characteristics of soil organic carbon and its active components in typical natural grassland in Ningxia [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2021, 30(1):24-35
- [20] JOBBAGY E, JACKSON R B. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation [J]. Ecological Applications, 2000, 10(2):423-436
- [21] DEDI MA, LEI CHEN, HONGCHAO QU, et al. Impacts of plastic film mulching on crop yields, soil water, nitrate, and organic carbon in Northwestern China: A meta-analysis [J]. Agricultural Water Management, 2018, 202:15-28
- [22] 谢芮, 吴秀芹. 不同放牧强度对内蒙古锡林郭勒草原土壤有机碳的影响(英文)[J]. Journal of Geographical Sciences, 2016, 26(11):1550-1560
XIE R, WU X Q. Effects of different grazing intensities on soil organic carbon in Xilinguole grassland of Inner Mongolia [J]. Journal of Geographical Sciences, 2016, 26(11):1550-1560
- [23] 朱晓亚, 李子豪, 赵小蓉, 等. 连续4年不同放牧强度内蒙古典型草原土壤微生物量碳、氮、磷含量差异[J]. 中国农业大学学报, 2020, 25(9):121-130
ZHU X Y, LI Z H, ZHAO X R, et al. The differences of soil microbial biomass carbon, nitrogen and phosphorus contents in typical steppe of Inner Mongolia under different grazing intensities for 4 consecutive years [J]. Journal of China Agricultural University, 2020, 25(9):121-130
- [24] 赵娜, 庄洋, 赵吉. 放牧和补播对草地土壤有机碳和微生物量碳的影响[J]. 草业科学, 2014, 31(3):367-374
ZHAO N, ZHUANG Y, ZHAO J, et al. Effects of grazing and reseeding on soil organic carbon and microbial biomass carbon in grassland [J]. Lawn Science, 2014, 31(3):367-374
- [25] 门欣洋. 放牧强度对荒漠草原土壤有机碳组分及其稳定性的影响[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2023:31-33
MEN X Y. Effects of grazing intensity on soil organic carbon fractions and their stability in desert steppe [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2023:31-33
- [26] 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, 2023:57-60
FU Q. Effects of grazing intensity on soil organic carbon fractions and their stability in typical steppe [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2023:57-60
- [27] 陈有君. 典型草原区土壤湿度的时序特征[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2006:10-11
CHEN Y J. Temporal characteristics of soil moisture in typical grassland area [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2006:10-11
- [28] 赵天鑫, 俄胜哲, 袁金华, 等. 土壤中钙与有机碳之间相互作用的研究进展与展望[J]. 中国农学通报, 2022, 38(14):77-81
ZHAO T X, E S Z, YUAN J H, et al. Research progress and prospect of the interaction between calcium and organic carbon in soil [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2022, 38(14):77-81
- [29] 丁金梅, 王维珍, 米文宝, 等. 宁夏草地土壤有机碳空间特征及其影响因素[J]. 生态学报, 2023, 43(5):1913-1922
DING J M, WANG W Z, MI W B, et al. Spatial characteristics and influencing factors of grassland soil organic carbon in Ningxia [J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(5):1913-1922
- [30] RUIZ-COLMENERO M, BIENES R, ELDRIDGE D J, et al. Vegetation cover reduces erosion and enhances soil organic carbon in a vineyard in the central Spain [J]. Catena, 2013, 104:153-160

- [31] 李旭梅,杨钧,李小伟,等. 宁夏天然草地土壤有机碳分布格局及驱动因素[J]. 草原与草坪,2024,44(4):1-8
LI X M, YANG J, LI X W, et al. Distribution pattern and driving factors of soil organic carbon in natural grassland of Ningxia[J]. Grassland and Lawn, 2024, 44(4): 1-8
- [32] 张超飞,马素萍,何晓波,等. 长江源多年冻土区土壤有机碳分布特征及其影响因素[J]. 生态学杂志,2022,41(9):1665-1673
MA C F, MA S P, HE X B, et al. Distribution characteristics of soil organic carbon and its influencing factors in the permafrost region of the source region of the Yangtze River[J]. Chinese Journal of Ecology, 2022, 41(9): 1665-1673
- [33] AN S, MENTLER A, MAYER H, et al. Soil aggregation, aggregate stability, organic carbon and nitrogen in different soil aggregate fractions under forest and shrub vegetation on the Loess Plateau, China[J]. Catena, 2010, 81(3): 226-233
- [34] WIESMEIER M, BARTHOLD F, BLANK B, et al. Digital mapping of soil organic matter stocks using Random Forest modeling in a semi-arid steppe ecosystem[J]. Plant & Soil, 2011, 340(1-2): 7-24
- [35] FEYISA K, BEYENE S, ANGASSA A, et al. Effects of enclosure management on carbon sequestration, soil properties and vegetation attributes in East African rangelands [J]. Catena, 2017(159): 9-19
- [36] 张子胥,于倚龙,李永强,等. 放牧强度对内蒙古荒漠草原土壤有机碳及其空间异质性的影响[J]. 生态学报, 2021, 41(15): 6257-6266
ZHANG Z X, YU Y L, LI Y Q, et al. Effects of grazing intensity on soil organic carbon and its spatial heterogeneity in desert steppe of Inner Mongolia [J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(15): 6257-6266
- [37] 陈梦,袁丛军,舒德远,等. 黔东南丘陵山地5种林分类型土壤有机碳与理化性质间的关系[J]. 水土保持研究, 2024, 31(5): 26-34
CHEN M, YUAN C J, SHU D Y, et al. Relationship between soil organic carbon and physical and chemical properties of five forest types in hilly and mountainous areas of southeastern Guizhou [J]. Soil and Water Conservation, 2021, 2024, 31(5): 26-34

(责任编辑 付 宸)