

DOI: 10.20103/j.stxb.202211123256

刘敏敏, 赵鸿彬, 张圣微, 叶德成, 林汐, 赵星宇, 王帅. 放牧到禁牧对草地土壤有机碳累积及其主控因子的影响. 生态学报, 2023, 43(21): 8739-8748.  
Liu M M, Zhao H B, Zhang S W, Ye D C, Lin X, Zhao X Y, Wang S. Change of soil organic carbon accumulation in grasslands and main control factors from grazing to prohibition of grazing. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(21): 8739-8748.

# 放牧到禁牧对草地土壤有机碳累积及其主控因子的影响

刘敏敏<sup>1</sup>, 赵鸿彬<sup>2</sup>, 张圣微<sup>1,3,4,\*</sup>, 叶德成<sup>5</sup>, 林汐<sup>1</sup>, 赵星宇<sup>1</sup>, 王帅<sup>1</sup>

1 内蒙古农业大学水利与土木建筑工程学院, 呼和浩特 010018

2 内蒙古农业大学生命科学学院, 呼和浩特 010018

3 黄河流域内蒙段水资源与水环境综合治理自治区协同创新中心, 呼和浩特 010018

4 内蒙古自治区水资源保护与利用重点实验室, 呼和浩特 010018

5 内蒙古水利事业发展中心, 呼和浩特 010020

**摘要:**放牧是草地生态系统最为重要的人为影响因子, 禁牧则是修复退化草原最有效的措施之一, 不同管理模式势必会影响土壤理化指标和土壤有机碳 (Soil Organic Carbon, SOC) 及其累积量 (SCS) 的时空分布。为了明确从放牧到禁牧草地 SCS 变化过程及其影响因子, 对锡林郭勒盟额里图牧场 2019—2021 年从放牧到禁牧 SOC 及土壤容重、水分、pH 和生物量等进行分析。结果表明, 禁牧区 SCS 逐年呈递增趋势, 尤其是 60cm 土层 SCS 从 2.54kg/m<sup>2</sup> 增加到 4.61kg/m<sup>2</sup>, 增加了 81.5%。放牧区则呈递减趋势, 从 5.27kg/m<sup>2</sup> 下降到 4.05kg/m<sup>2</sup>, 降低了 23.15%。放牧既破坏了土壤结构又影响了草原植被, 使草原生物量和土壤水分减少, 土壤容重增加, 同时 Mantel-test 分析和结构方程表明, 土壤容重、全氮、温度、水分、地下生物量对 SCS 不同程度的影响比较明显, 本研究可为草地生态研究及管理模式优化提供参考。

**关键词:**典型草原; 管理模式; 土壤理化指标; 土壤有机碳累积; 影响因素

## Change of soil organic carbon accumulation in grasslands and main control factors from grazing to prohibition of grazing

LIU Minmin<sup>1</sup>, ZHAO Hongbin<sup>2</sup>, ZHANG Shengwei<sup>1,3,4,\*</sup>, YE Decheng<sup>5</sup>, LIN Xi<sup>1</sup>, ZHAO Xingyu<sup>1</sup>, WANG Shuai<sup>1</sup>

1 College of Water Conservancy and Civil Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China

2 College of Life Sciences, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China

3 Autonomous Region Collaborative Innovation Center for Integrated Management of Water Resources and Water Environment in the Inner Mongolia Reaches of the Yellow River, Hohhot 010018, China

4 Inner Mongolia Autonomous Region Key Laboratory of Water Resources Protection and Utilization, Hohhot 010018, China

5 Inner Mongolia Water Resources Development Center, Hohhot 010020, China

**Abstract:** Grazing is the most importantly anthropogenic influence on grassland ecosystem. One of the most effective measures to rehabilitate the degraded grasslands is prohibition of grazing. However, different management patterns will inevitably affect the spatial and temporal distribution of soil physicochemical indicators and soil organic carbon (SOC) and its accumulation (SCS). In order to clarify the process of SCS change from grazing to prohibition of grazing and its influencing factors, this paper analysed the SOC and soil capacitance, moisture, pH and biomass from grazing to prohibition

**基金项目:**国家自然科学基金资助项目(52079063, 52279017); 内蒙古自然科学基金资助(2021MS03094); 内蒙古自治区高等学校创新团队发展计划(NMGIRT2313)

**收稿日期:**2022-11-12; **网络出版日期:**2023-06-30

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zsw@imau.edu.cn

of grazing in Eritu pasture in Xilingole Meng from 2019—2021. The results indicated that the SCS in the prohibition of grazing area showed an increasing trend year by year, especially in the 60 cm soil layer where the SCS increased by 81.5%, i.e. from 2.54 kg/m<sup>2</sup> to 4.61 kg/m<sup>2</sup>. The SCS in the grazing areas decreased by 23.15%, i.e. from 5.27 kg/m<sup>2</sup> to 4.05 g/m<sup>2</sup>. Grazing destroyed soil structure and affected grassland vegetation, which reduced grassland biomass and soil moisture, as well as increased soil capacity. Mantel-test analysis and structural equations also showed that soil bulk, total N, temperature, moisture and belowground biomass had significant effect on the SCS. This study can be used as a reference for ecological research and management optimization of grasslands.

**Key Words:** typical grassland; management models; soil physical and chemical indicators; soil organic carbon accumulation; influencing factors

草地生态系统中土壤碳储存约占 90%, 其余碳储存在地上生物量中<sup>[1]</sup>, 土壤有机碳是全球碳循环的重要组成部分, 草原碳储量约占世界上 30%, 然而碳储量的作用常常被人们忽视<sup>[2-4]</sup>。近几十年来, 不合理的草地利用和管理方式, 例如: 过度放牧、过度旅游开发, 造成了草地大幅度退化, 导致土壤碳储量下降<sup>[5-6]</sup>。不过随着生态保护和草地恢复政策的实施情况有所好转, 比如通过建设围栏对草地进行封闭, 禁止放牧, 利用群落内部的恢复力稳定性原理使退化草地自然恢复<sup>[7-8]</sup>。土壤有机碳(SOC)作为指示草原的健康状况的指标之一, 其对环境变化很敏感, 受多种生物和非生物因素的影响, 如禁牧、放牧强度、气候变化、土壤质地等因素<sup>[9]</sup>。因此, 研究禁牧环境下土壤有机碳累积变化对草地恢复及草原碳汇有重要意义。

然而放牧作为草地生态系统极为重要的人为影响因子<sup>[10]</sup>, 且与不断变化的气候条件相互作用<sup>[11-12]</sup>改变了地表植物群落、土壤结构, 显著影响了草原防风固沙、水源涵养、碳固存等生态系统服务功能<sup>[13]</sup>。有研究表明放牧会对土壤结构的造成明显影响, 如家畜的践踏造成地面裸露、土壤通透性下降、草地植被覆盖度、土壤含水率和渗透率显著减少<sup>[14]</sup>; 同时也有研究表明禁牧对草地的土壤理化性质、土地质量以及植被存在一定程度的影响, 进而导致土壤有机碳和及其碳累积量发生变化<sup>[15]</sup>。目前土壤有机碳的研究主要为不同土地利用方式对土壤有机碳分布的影响、不同放牧方式下土壤碳的对比、禁牧对于草地土壤碳储量的生态影响。由于研究尺度, 研究范围, 研究区特点的不同, 致使对于地理、气候特征及其人文环境特殊的内蒙古干旱半干旱典型草原, 从放牧到禁牧过程中土壤有机碳累积多年尺度变化及其主控因子变化如何变化仍不清楚, 主控因子对土壤有机碳累积影响机制及其差异变化的描述也较少。

因此, 本研究在锡林郭勒盟干旱半干旱草地开展了为期 3 年(2019—2021)的禁牧和放牧试验, 并对生长季气象、土壤理化指标进行连续监测, 探究放牧到禁牧条件下土壤有机碳的时间分布特征, 探讨气象因子、土壤理化性质等主控因子变化规律, 揭示众多影响因素中主控因子对于草原土壤有机碳累积的影响, 为草原生态系统的稳定以及土壤质量健康发展提供基础参考和理论支持。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区设在内蒙古自治区锡林郭勒盟西南部的正镶白旗, 地理坐标为东经 114°05'—115°37', 北纬 42°05'—43°02', 干旱半干旱草原, 属于中温带干旱半干旱大陆性季风气候, 降雨量少并且集中在夏季, 年平均气温 1.9℃, 全年平均风速 4m/s, 风力达到 6 级天数占全年的 20%以上, 年均蒸发 2021.6mm 是降水量的 7 倍之多<sup>[16]</sup>, 土壤类型为栗钙土, 由实验数据可知土壤 pH 多年均值 8.26 偏碱性, 土壤植被以禾本科和菊科植物为主, 草层低矮稀疏, 代表性植物有羊草(*Leymus chinensis* (Trin.) Tzel.)、冷蒿(*Artemisia frigida* Willd.)、克氏针茅(*Stipa krylovii* Roshev)、糙隐子草(*Cleistogenes squarrosa* (Trin.) Keng)等。研究区牧场设置: 分为禁牧区和放牧区, 样地等大且面积为 30m×30m, 样地间隔 5m。每个样地设置 9 个 6m×6m 样方。禁牧站点和放牧站点处于相似的初始条件并具有相似的特征, 例如海拔、土壤类型以及地形等。实验前未对草地施肥或除草, 放牧时

间为生长季 6 个月(5—10 月),放牧强度为只羊  $\text{hm}^{-2}\text{a}^{-1}$ 。

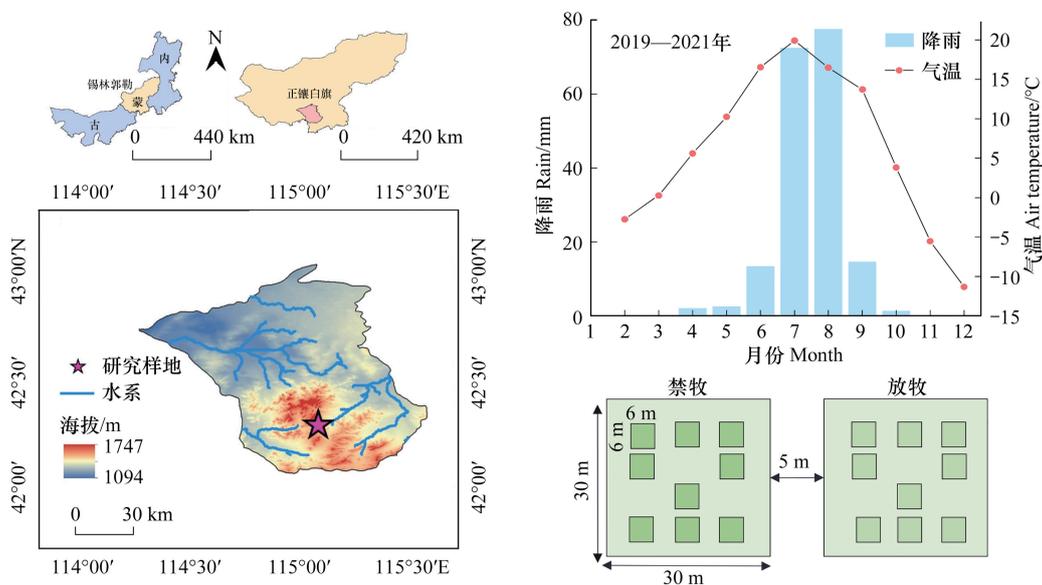


图 1 研究区位置、气候状况及样地布设图

Fig.1 Location of the study area, climatic conditions and sample plot layout

## 1.2 土壤植被采集

研究区于 2018 年 6 月正式建立并开始取样,采集的土壤样品作为初始值,之后在每年生长季 5—10 月的月初取样一次,且每两年取一次环刀。每月共随机选取调查样方 6 个。在每个样方内采用直径 5cm 土钻进行土壤样品取样,取样深度为 5、15、30、60cm,去除植物根系、石砾,经过风干,研磨,过筛,来测定土壤含水率、pH、有机碳和全氮等。将植被样本称取鲜重后用信封保存,置于烘箱 80°C 烘至质量恒重取干重,称取干重作为地上生物量,将剩下的土样洗净至只剩植物根系,烘干后称取干重作为地下生物量。

## 1.3 样品测定方法

土壤质量含水量测定:采用烘干法测定铝盒中的土样;土壤容重测定:采用环刀法测定,将环刀土烘干(105°C)至恒重,烘干土质量与环刀容积的比值为土壤容重;采用便携式电导率仪和 pH 计测定电导率和 pH 值;土壤全氮:采用凯氏定氮法测定土壤全氮;采用重铬酸钾氧化法<sup>[17]</sup>计算土壤有机碳(SOC);土壤有机碳累积量按美国农业部自然资源保护局方法计算:

$$\text{SCS}(\text{kg}/\text{m}^2) = W_{t_{oc}} \times 0.1 \times p \times H_{cm} \times C_m$$

其中:SCS:土壤有机碳累积量; $W_{t_{oc}}$ 为以<2mm 土壤为基数的有机碳的含量百分数(%);0.1 为转换因子,常数; $p$ 为<2mm,土壤容重( $\text{g}/\text{cm}^3$ ); $H_{cm}$ 为土层厚度(cm); $C_m$ 为>2mm 砾石转换系数,如无砾石则  $C_m = 1$ 。

## 1.4 数据处理与分析

本文利用 R.4.2.0 软件中的“ggalluvial”<sup>[18]</sup>程序包绘制了 2019—2021 年 0—5cm、5—15cm、15—30cm、30—60cm 各土层的有机碳累积量变化图;文中采用了皮尔逊相关系数和 t 检验以及 Mantel-test 检验来分析环境变量对土壤有机碳累积的影响及土壤理化性质之间的相关性,并使用“vegan”<sup>[19]</sup>程序包绘制土壤理化指标对有机碳累积的相关性图;最后使用偏最小二乘路径模型(The partial least squares path model, PLS-PM)来分析禁牧和放牧通过改变土壤理化指标进而改变土壤有机碳累积的调控机制,并利用 R 语言“plspl”<sup>[20]</sup>程序包对气象因素、生物量、土壤特性、有机碳累积量之间的关系进行路径分析,并绘制土壤有机碳累积的偏最小二乘结构方程模型图;其他图形则由 Origin2021 绘制。

## 2 结果

### 2.1 土壤有机碳累积变化规律

随着禁牧措施的施行,禁牧区草地 SCS 逐年增加,2019 年到 2020 年各土层增加趋势大于 2020 年到 2021 年,三年内 60cm 土层 SCS 从  $2.54\text{kg}/\text{m}^2$  增加到  $4.61\text{kg}/\text{m}^2$ 。但每年有机碳累积百分比变化不大,如深层土壤 60cm 土层 2021 年比 2019 年增加了 5.18%,而 5cm、15、30cm 土层有机碳累积量百分比变化稳定(图 2)。放牧环境下草地 SCS 逐年递减,2019 年到 2020 年各土层递减趋势明显,60cm 土层有机碳累积量从  $5.27\text{kg}/\text{m}^2$  下降到  $3.89\text{kg}/\text{m}^2$ ,土壤有机碳累积百分数下降了 9.03%,5cm、15cm、30cm 土层累积量百分比波动范围在 1% 以内。而 2021 年较 2020 年土层有机碳累积量小幅度增加,同样各土层土壤有机碳累积百分数波动范围也在 1% 以内(图 2)。

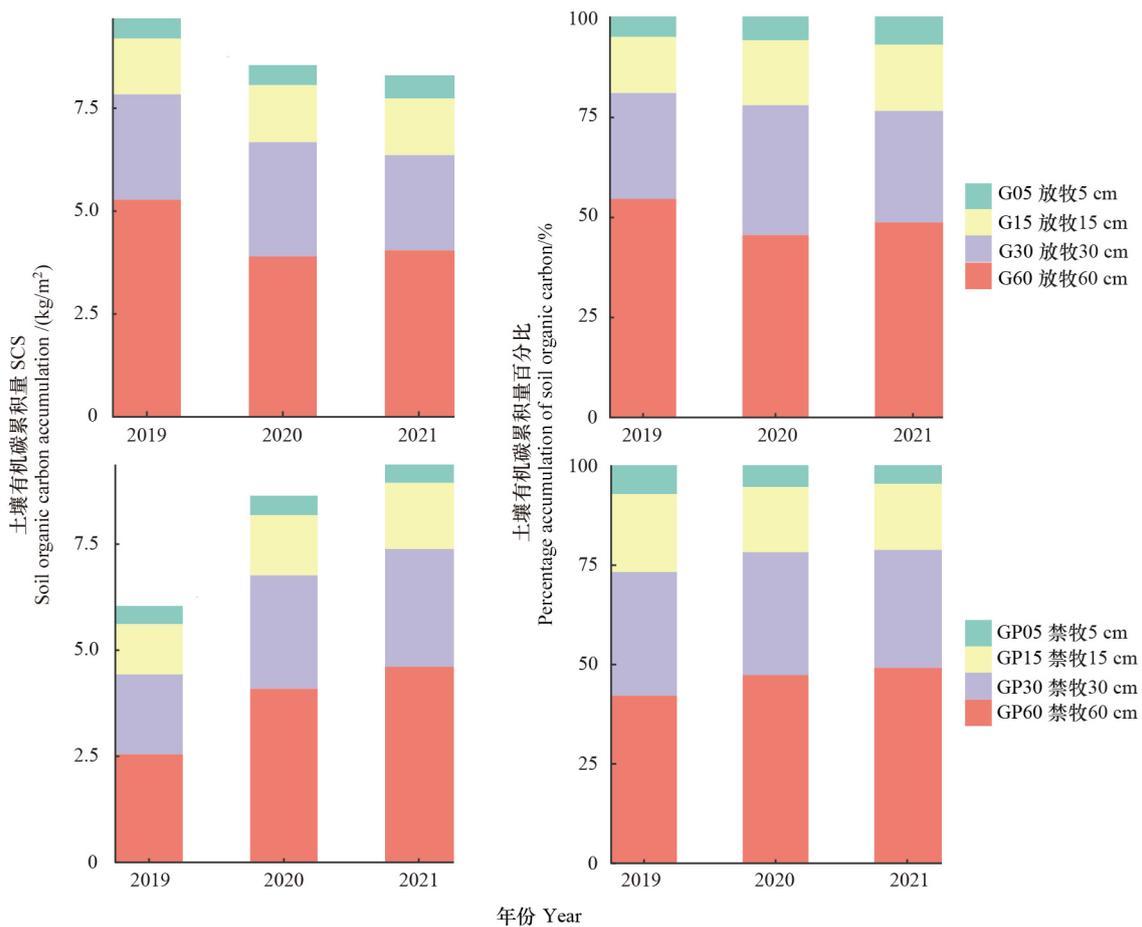


图 2 2019—2021 年禁牧区和放牧区有机碳累积量及百分比变化

Fig.2 Patterns of organic carbon accumulation and percentage change in the grazing area and prohibition of grazing areas for 2019 to 2021

### 2.2 土壤理化指标变化规律

由图 3 可知禁牧土壤容重(BD)明显小于放牧区,随着时间的积累除 5—15cm 土层,禁牧区和放牧区 BD 都随时间增长,随土层加深 BD 越大,60cm 土层 BD 最大。图 3 显示禁牧区土壤水分(SM)高于放牧区,且 SM 逐年递增,随土层加深 SM 越少。三年内禁牧区表层土壤的地下生物量(BGB)大于放牧区,2020 年 BGB 比 2019、2020 年的都少,随土层加深 BGB 逐层减少。放牧区土壤碱性大于禁牧区,土层越深碱性越大。0—30cm 土层土壤全氮(TN)禁牧区大于放牧区,30cm—60cm 土层放牧区大于禁牧区;随土层加深 TN 逐渐减小,

放牧区 5—30cm 土层,三年的 TN 值基本一致。禁、放牧区的土壤温度随土层深度增加而减小,放牧区土壤温度大于禁牧区,除 2020 年、2021 年的 30cm 土层,温度逐年呈递减趋势,如图 3 所示。

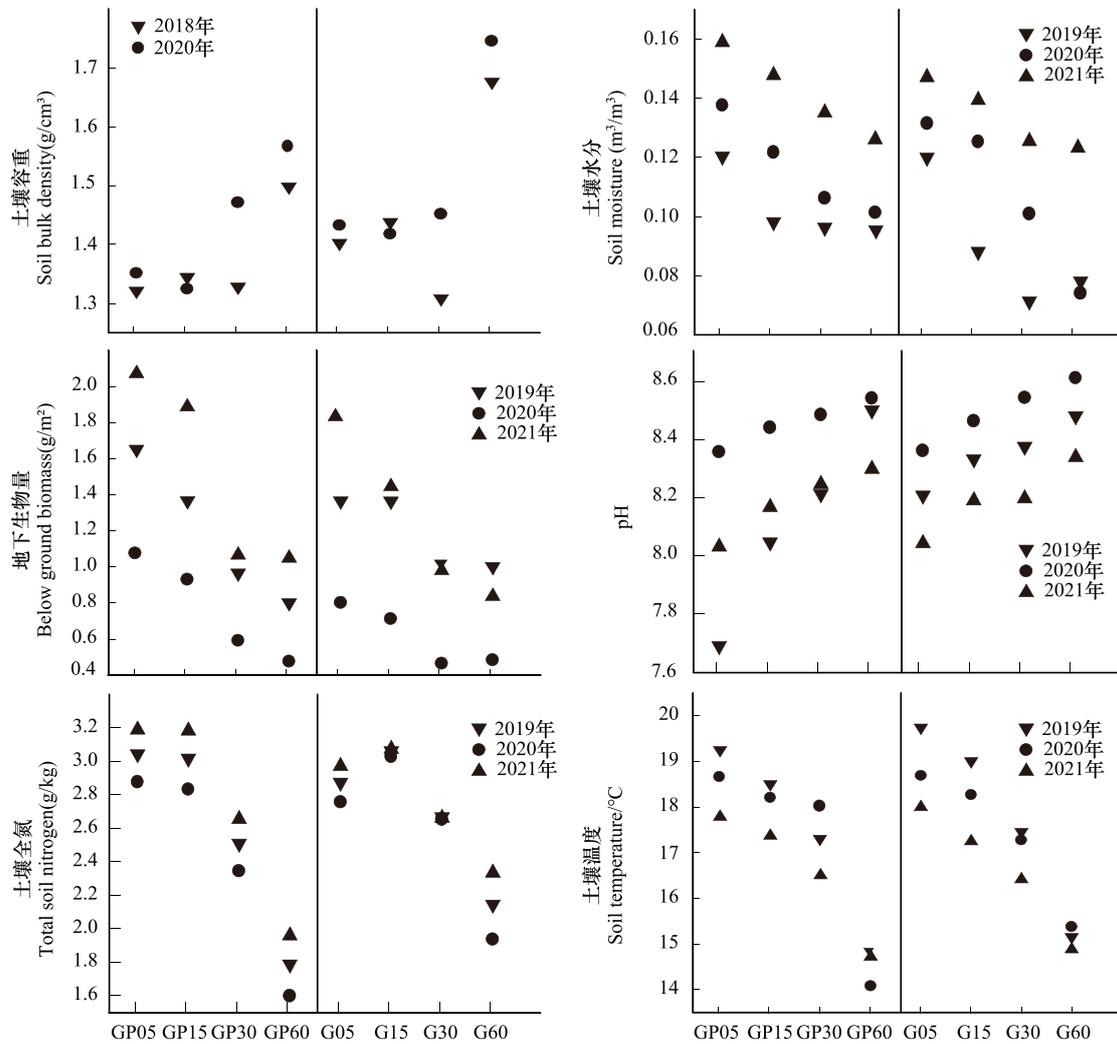


图 3 2019—2021 年禁牧区和放牧区土壤理化指标的变化

Fig.3 Changes in soil physicochemical indicators in the grazing area and prohibition of grazing areas for 2019 to 2021

### 2.3 土壤有机碳累积影响因素

由图 4 可知,禁牧区 SCS 与土壤容重(BD)、全氮(TN)以及土壤温度(Soil Temperature, ST)有较强的显著性( $P < 0.01$ ),与土壤 pH 值、地下生物量(BGB)有一般显著性( $P < 0.05$ )。放牧区 SCS 与 BD、ST、SOC、pH、BGB、TN 有较强的显著性( $P < 0.01$ ),且 BD、ST、有机质(SOM)与 SCS 相关性强于其他。对比禁牧区可知,放牧区 SCS 与土壤水分(SM)有一般显著性( $P < 0.05$ ),并且放牧区 SCS 对草原土壤理化性质较为敏感,而禁牧区的 SM 与 SOC 呈不明显的正相关性,放牧区反而有明显负相关性。

为了识别和量化 SCS 主要环境变量之间的关系,本文使用了偏最小二乘路径模型,综合推断禁、放牧条件下降雨、土壤特性、生物量对土壤碳累积量的潜在直接和间接影响。图 5 显示禁牧区总生物量(TB)对 SCS 有较大负向间接影响,放牧区是正向间接影响,并且禁牧区总影响大于放牧区;禁牧区 BD 对 SCS 正向直接影响大于放牧区;禁牧区 ST 对 SCS 负向直接影响小于放牧区;放牧区 TN 对 SCS 的影响较禁牧区不明显;禁牧区 SM 对 SCS 正向间接影响,小于放牧区的负向的间接影响;放牧区 pH 对 SCS 的正向直接影响大于禁牧区的负向直接影响;禁牧区降雨(Rain)对 SCS 的影响大于放牧区。

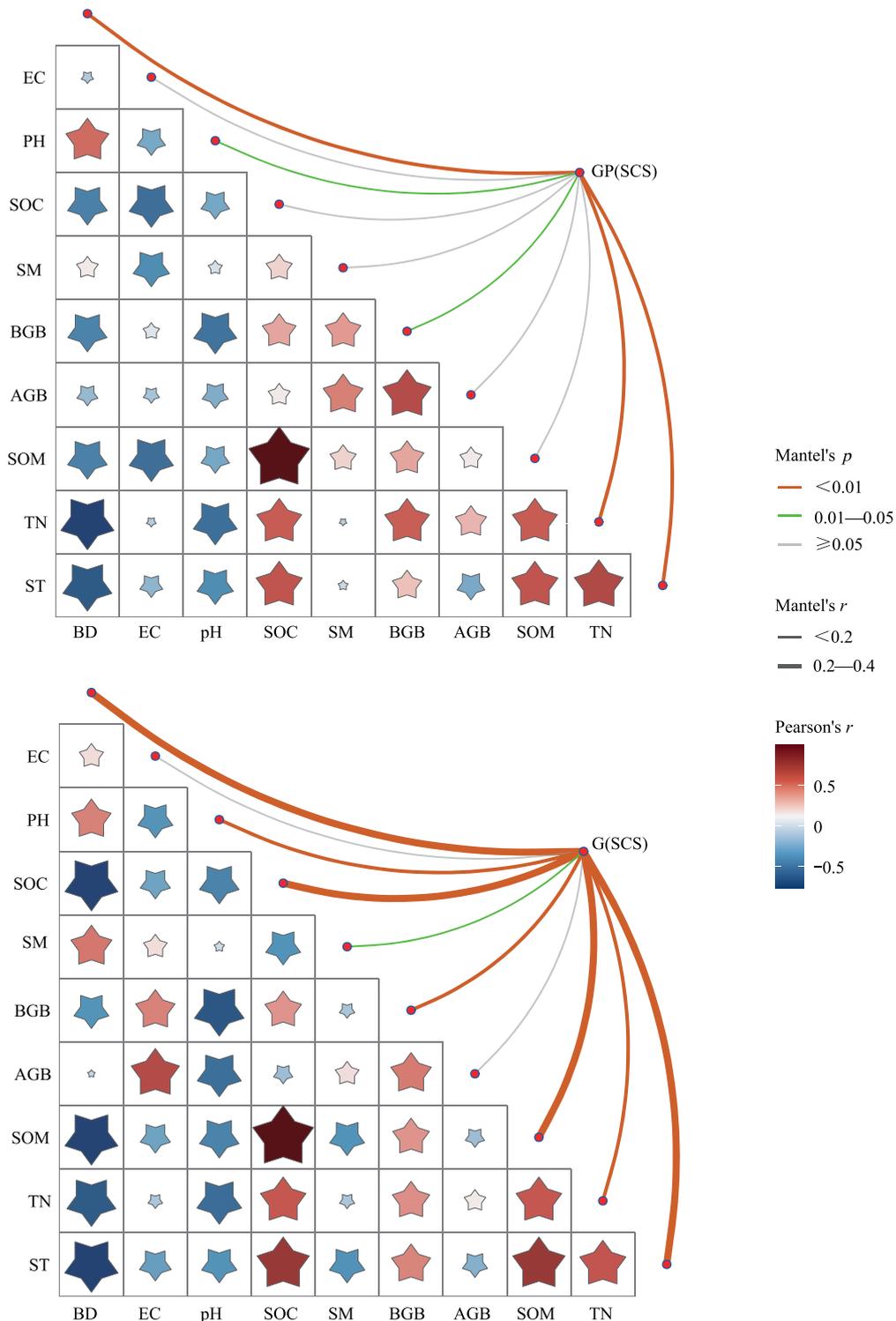


图 4 禁、放牧区影响土壤有机碳积累的 mantel-test 相关分析

Fig.4 Mantel-test correlation analysis affecting SCS in the grazing area and prohibition of grazing areas

电导率(EC), 土壤有机碳(SOC), 土壤水分(SM), 地上生物量(AGB), 地下生物量(BGB), 土壤有机质(SOM), 全氮(TN), 土壤温度(ST), GP(SCS): 禁牧区土壤有机碳累积量, G(SCS): 放牧区土壤有机碳累积量

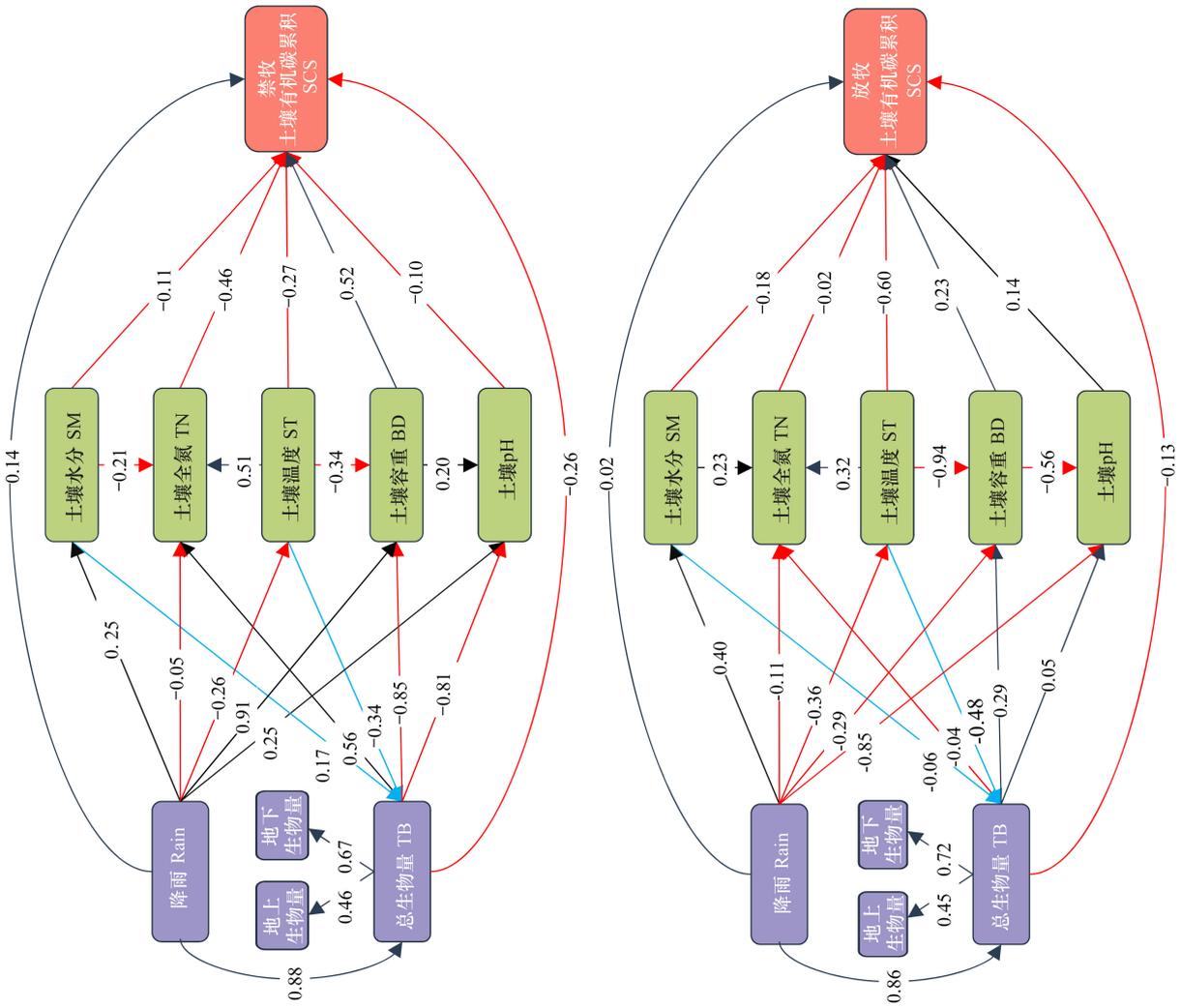
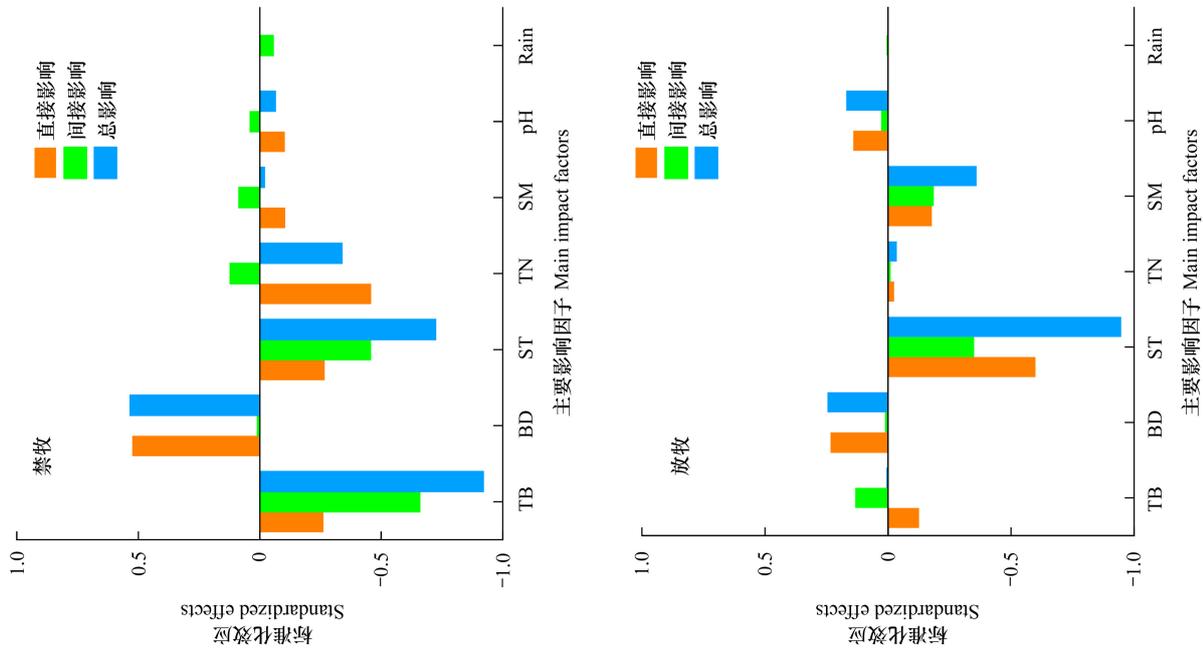


图5 土壤有机碳累积的偏最小二乘结构方程模型  
Fig.5 Partial least squares-structural equation model for SCS

### 3 讨论

#### 3.1 有机碳累积对草地管理方式的响应

本研究发现,禁牧区 SCS 逐年递增;放牧区 SCS 逐年递减(图 2),随着土层深度增加,研究区 SOC 都逐层递减。因为禁牧后植被逐渐恢复,土壤生物群落的活动和结构受到植物群落组成的强烈影响<sup>[21]</sup>,同时研究区优势物种的根系在 0—30cm 土层分布较广,丰富的植物根系会产生较多的分泌物,在微生物作用下转化为更多的有机物质,土壤有机碳含量因此得到大幅度改善<sup>[22—23]</sup>。并且禁牧使草地地上生物量增加,地表凋落物不断积累,凋落物的分解和腐殖层的增加使更多的有机物质输入进土壤中<sup>[24—25]</sup>。而同一年放牧区的 SCS 高于禁牧区,这是因为牲畜对植被的采食使地上凋落物减少,牲畜的践踏作用促使植被凋落物的分解效率提高,同时促进 0—10cm 土层中团聚体的形成,更好的固持土壤中的细小颗粒,使牲畜排泄的粪便补充到土壤中,地下根系、枯落物以及牲畜的粪便增强了惰性有机碳的积累<sup>[26—27]</sup>,而且牲畜排尿、排便也会产生大量的微生物量使硝化速率增加,进而增加碳向土壤碳库的转移,增加了土壤碳储量<sup>[15,29—30]</sup>。

#### 3.2 土壤主控因子对草地管理方式的响应

禁牧使土壤水分显著增加,这是因为长期禁牧导致草地地上生物量和凋落物重量及厚度增加,有效减弱土壤水分蒸发<sup>[25,31]</sup>,而放牧区地表裸露较多,土壤的蒸发作用剧烈,降雨消耗大。土壤容重随试验时长逐年变大,受放牧影响很大。同时研究区以冷蒿为主的草地在 15—30cm 土层植被根系分布较广,禁牧区根系多于放牧区,有助于增加土壤的通气透水性,导致土壤容重也相对偏低于放牧区,而 60cm 土层根系较少,同时 60cm 土层有机质也相对较少,土壤肥力低于其他土层,因此 60cm 土层容重较其他土层更大。放牧导致草原植被的数量特征发生明显的改变,家畜对植物地上部分的大量啃食,特别是对地上植被群落中优势种的采食<sup>[32]</sup>,大面积的叶面损失抑制这类植物的光合作用,从而降低地上生物量的补偿,最终导致植物地上生物量下降<sup>[33]</sup>。

本研究中,禁牧区土壤 pH 值低于放牧区,原因是放牧家畜的采食和践踏导致地表植物盖度降低,土壤水分蒸发加大,可溶性盐类随水分的蒸发积累于地表,导致土壤 pH 值较大<sup>[34]</sup>。禁牧会提高土壤各种养分的含量如 TN,而且随着禁牧时间的增加而增加,放牧使家畜不断从生态系统中移除氮,由于采食减少了凋落物对土壤营养物质的输入,同时植物的补偿生长增加了植物对 TN 吸收,因此减少了土壤氮的积累<sup>[35]</sup>。

本研究发现放牧提高了 ST,这可能是因为家畜采食导致的植被覆盖度降低,使得表层土壤更加暴露在阳光的直接暴晒下,导致土壤表层温度有所增加;当土壤被压实时,土壤温度会迅速变化,因为土壤颗粒被挤压在一起时,传递温度的速度会变快;其次土壤温度也会受到水分的影响,而年际间的差异可能由于降雨的不同,导致土壤水分不同,较多的水分会防止土壤升温过快<sup>[36]</sup>。

#### 3.3 不同管理方式下各因素对土壤有机碳累积影响

放牧不仅直接影响区域植物群落的供给功能,还会降低其初级生产力<sup>[26—27]</sup>。牲畜的选择性采食,可能会改变植被群落组成、植被群落的数量和质量以及土壤微生物生物量<sup>[37—38]</sup>。其次动物的尿液和粪便排泄物也会影响土壤的理化性质。土壤环境的变化还会影响土壤微生物群落和碳利用效率,从而影响土壤呼吸和碳损失<sup>[39—40]</sup>。

研究发现 SCS 对 BD、BGB、SM、ST、pH 以及 TN 具有显著性(图 4)。放牧区 TB、BD、对 SCS 呈正向总影响,禁牧区 TN 对 SCS 的总得负向影响较大。这是因为放牧导致植被减少,根系不发达,生物量减少,抑制了微生物分解<sup>[9]</sup>,而且动物的践踏容易改变土壤容重,使草原土壤表层中孔隙度变大,促进了 0—10cm 土层中团聚体的形成,更好的固持土壤中的细小颗粒,同时会加快地面植物及凋落物和 SOM 的分解<sup>[27]</sup>,从而促进了 SCS。放牧情况下家畜排尿排便也会产生大量的微生物量使硝化速率增加,进而增加碳向土壤碳库的转移,促进碳累积<sup>[29—30]</sup>。

土壤动物、微生物是分解有机质,促进 SCS 的主要驱动要素<sup>[41]</sup>,受土壤环境如水热关系,环境的酸碱性影

响。在强酸强碱的土壤环境下,会制约土壤微生物的活性<sup>[42]</sup>,而本研究区土壤呈弱碱性,在干旱和半干旱地区的土壤则维持着相当数量的放线菌种群,偏好碱性土壤<sup>[43]</sup>,而放牧区碱性稍大于禁牧区,因此放牧区 pH 对 SCS 正向总影响较大。禁牧区 SM 对 SCS 有间接的正向影响,有研究发现降水量对 SOC 有着明显的制约性,禁牧区 SM 充足,则透气性差,原 SOC 不易矿化,外源有机残体在水分作用下易于腐烂,分解成小分子 SOM,保存于土壤中;同时水分充足抑制微生物呼吸,从而促进了 SCS。本研究禁、放牧区的 ST 均比较低,对 SCS 造成负向的影响(图 5),因为 ST 不仅通过影响植物的生长,改变植物残体向土壤的归还量,而且温度越高,土壤微生物活动增强,分解 SOM 速率加快<sup>[44]</sup>,进而促进碳累积。

#### 4 结论

根据 2019—2021 年生长季期间在草原收集的实验数据,本研究对禁牧和放牧条件下的土壤有机碳累积及其他土壤理化指标进行了分析。研究表明:禁牧有助于 SM、TN、BGB 增加;放牧促使 BD 增大,土壤温度提高,土壤 pH 偏碱性。虽然禁牧能促进 SCS,但三年的 SCS 是放牧区大于禁牧区。并且由 mantel-test 分析可知禁牧区 SCS 与 pH、BGB 具有一般显著性,而与放牧区有强显著性,同时结合结构方程:放牧区主控因子对 SCS 总的影响由大到小排序:ST>SM>BD>TB>pH>TN>Rain,禁牧区 TB>ST>BD>TN>pH>SM>Rain。本项研究为进一步理解禁、放牧草地 SCS 及主控因子变化规律,以及主控因子对 SCS 影响的理论机制提供支持,但还需要对筛选出的影响因子更进一步细化,同时考虑草本植物固碳能力以及土壤呼吸,综合分析其作用机理,从而做出更加准确的判断和评估。

#### 参考文献(References):

- [ 1 ] Wang G Y, Mao J F, Fan L L, Ma X X, Li Y M. Effects of climate and grazing on the soil organic carbon dynamics of the grasslands in Northern Xinjiang during the past twenty years. *Global Ecology and Conservation*, 2022, 34: e02039.
- [ 2 ] Trumbore S E. Potential responses of soil organic carbon to global environmental change. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 1997, 94(16): 8284-8291.
- [ 3 ] Lal R. Digging deeper: a holistic perspective of factors affecting soil organic carbon sequestration in agroecosystems. *Global Change Biology*, 2018, 24(8): 3285-3301.
- [ 4 ] Peters M K, Hemp A, Appelhans T, Becker J N, Behler C, Classen A, Detsch F, Ensslin A, Ferges S W, Frederiksen S B, Gebert F, Gerschlauser F, Gütlein A, Helbig-Bonitz M, Hemp C, Kindeketa W J, Kühnel A, Mayr A V, Mwangomo E, Ngereza C, Njovu H K, Otte I, Pabst H, Renner M, Röder J, Rutten G, Schellenberger Costa D, Sierra-Cornejo N, Vollstädt M G R, Dulle H I, Eardley C D, Howell K M, Keller A, Peters R S, Ssymank A, Kakengi V, Zhang J, Bogner C, Böhning-Gaese K, Brandl R, Hertel D, Huwe B, Kiese R, Kleyer M, Kuzyakov Y, Nauss T, Schleuning M, Tschapka M, Fischer M, Steffan-Dewenter I. Climate-land-use interactions shape tropical mountain biodiversity and ecosystem functions. *Nature*, 2019, 568(7750): 88-92.
- [ 5 ] 赵彩红. 基于植被及土壤生化特性分析旅游对草原生态的影响. *分子植物育种*, 2022, 20(17): 5904-5908.
- [ 6 ] 于志慧, 吕广一, 王新雅, 徐学宝, 贾东璇, 王成杰. 放牧强度对内蒙古荒漠草原土壤碳氮及其稳定同位素的影响. *草地学报*, 2022, 30(3): 544-552.
- [ 7 ] 刘嘉琳. 内蒙古典型草原植被退化对土壤有机碳组分及其稳定性的影响[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2022.
- [ 8 ] Du C J, Jing J, Shen Y, Liu H X, Gao Y H. Short-term grazing exclusion improved topsoil conditions and plant characteristics in degraded alpine grasslands. *Ecological Indicators*, 2020, 108: 105680.
- [ 9 ] 常帅, 于红博, 曹聪明, 马梓策, 刘月璇, 李想. 锡林郭勒草原土壤有机碳分布特征及其影响因素. *干旱区研究*, 2021, 38(5): 1355-1366.
- [ 10 ] Zhou G Y, Luo Q, Chen Y J, He M, Zhou L Y, Frank D, He Y H, Fu Y L, Zhang B C, Zhou X H. Effects of livestock grazing on grassland carbon storage and release override impacts associated with global climate change. *Global Change Biology*, 2019, 25(3): 1119-1132.
- [ 11 ] Bai Y F, Wu J G, Clark C M, Pan Q M, Zhang L X, Chen S P, Wang Q B, Han X G. Grazing alters ecosystem functioning and C: N: P stoichiometry of grasslands along a regional precipitation gradient. *Journal of Applied Ecology*, 2012, 49(6): 1204-1215.
- [ 12 ] Guo T, Weise H N, Fiedler S, Lohmann D, Tietjen B. The role of landscape heterogeneity in regulating plant functional diversity under different precipitation and grazing regimes in semi-arid savannas. *Ecological Modelling*, 2018, 379: 1-9.
- [ 13 ] Zhao Y Y, Liu Z F, Wu J G. Grassland ecosystem services: a systematic review of research advances and future directions. *Landscape Ecology*, 2020, 35(4): 793-814.
- [ 14 ] Leroy G, Hoffmann I, From T, Hiemstra S J, Gandini G. Perception of livestock ecosystem services in grazing areas. *Animal*, 2018, 12(12):

2627-2638.

- [15] Wang S, Zhang S W, Lin X, Li X Y, Li R S, Zhao X Y, Liu M M. Response of soil water and carbon storage to short-term grazing prohibition in arid and semi-arid grasslands of China. *Journal of Arid Environments*, 2022, 202: 104754.
- [16] 佟喜梅. 正镶白旗土地荒漠化动态变化及原因分析[D]. 呼和浩特: 内蒙古师范大学, 2008.
- [17] 杜苗, 钟慧琴. 重铬酸钾氧化-容量法测定土壤中有机质的方法改进. *化工管理*, 2021(25): 16-17.
- [18] Long J Y, Bai Y, Yang X B, Lin J Z, Yang X, Wang D X, He L, Zheng Y C, Zhao H T. Construction and comprehensive analysis of a ceRNA network to reveal potential prognostic biomarkers for hepatocellular carcinoma. *Cancer Cell International*, 2019, 19: 90.
- [19] Wu L W, Ning D L, Zhang B, Li Y, Zhang P, Shan X Y, Zhang Q T, Brown M R, Li Z X, Van Nostrand J D, Ling F Q, Xiao N J, Zhang Y, Vierheilig J, Wells G F, Yang Y F, Deng Y, Tu Q C, Wang A J, Zhang T, He Z L, Keller J, Nielsen P H, Alvarez P J J, Criddle C S, Wagner M, Tiedje J M, He Q, Curtis T P, Stahl D A, Alvarez-Cohen L, Rittmann B E, Wen X H, Zhou J Z. Global diversity and biogeography of bacterial communities in wastewater treatment plants. *Nature Microbiology*, 2019, 4(7): 1183-1195.
- [20] Jiang M D, Yang N P, Zhao J S, Shaaban M, Hu R G. Crop straw incorporation mediates the impacts of soil aggregate size on greenhouse gas emissions. *Geoderma*, 2021, 401: 115342.
- [21] Kardol P, Cregger M A, Company C E, Classen A T. Soil ecosystem functioning under climate change: plant species and community effects. *Ecology*, 2010, 91(3): 767-781.
- [22] Mathieu J A, Hatté C, Balesdent J, Parent É. Deep soil carbon dynamics are driven more by soil type than by climate: a worldwide meta-analysis of radiocarbon profiles. *Global Change Biology*, 2015, 21(11): 4278-4292.
- [23] Huang Z, Tian F P, Wu G L, Liu Y, Dang Z Q. Legume Grasslands Promote Precipitation Infiltration better than Gramineous Grasslands in arid Regions. *Land Degradation & Development*, 2017, 28(1): 309-316.
- [24] Castro H, Fortunel C, Freitas H. Effects of land abandonment on plant litter decomposition in a Montado system: relation to litter chemistry and community functional parameters. *Plant and Soil*, 2010, 333(1): 181-190.
- [25] Yan Y C, Xin X P, Xu X L, Wang X, Yan R R, Murray P J. Vegetation patches increase wind-blown litter accumulation in a semi-arid steppe of Northern China. *Environmental Research Letters*, 2016, 11(12): 124008.
- [26] 任瑾涛, 张璞进, 吴英, 朱蔚娜, 金正亮, 张艳丽, 宝文智, 清华. 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. *中国草地学报*, 2021, 43(7): 37-44.
- [27] 许婷婷, 董智, 郭建英, 李红丽, 王树梅, 陈新闻. 放牧对内蒙古典型草原植物群落特征与土壤有机碳的影响. *草地学报*, 2022, 30(09): 2273-2279.
- [28] 马宁, 赵允格, 马昕昕, 李雯, 乔羽, 孙会, 许明祥. 黄土丘陵区退耕草地土壤碳库管理指数对放牧的响应. *草地学报*, 2022, 30(5): 1043-1053.
- [29] Augustine D J, McNaughton S J, Frank D A. Feedbacks between soil nutrients and large herbivores in a managed savanna ecosystem. *Ecological Applications*, 2003, 13(5): 1325-1337.
- [30] Huruba R, Mlambo T, Mundy P J, Sebata A, MacFadyen D N. Short duration overnight cattle kraaling in natural rangelands: implications for grass composition, quality, above ground biomass, species diversity and basal cover. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2018, 257: 144-151.
- [31] Dormaar J F, Carefoot J M. Implications of crop residue management and conservation tillage on soil organic matter. *Canadian Journal of Plant Science*, 1996, 76(4): 627-634.
- [32] 梁茂伟. 放牧对草原群落构建和生态系统功能影响的研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2019.
- [33] 赵丽娅, 钟珊珊, 赵美玉, 张劲. 围封和放牧对科尔沁沙地群落物种多样性与地上生物量的影响. *生态环境学报*, 2018, 27(10): 1783-1790.
- [34] 任强, 艾鹭, 胡健, 田黎明, 陈仕勇, 泽让东科. 不同强度牦牛放牧对青藏高原高寒草地土壤和植物生物量的影响. *生态学报*, 2021, 41(17): 6862-6870.
- [35] 李岚. 滩羊放牧对典型草原生态化学计量特征和多功能性的影响[D]. 兰州: 兰州大学, 2021.
- [36] Haruna S I, Anderson S H, Nkongolo N V, Reinbott T, Zaibon S. Soil thermal properties influenced by perennial biofuel and cover crop management. *Soil Science Society of America Journal*, 2017, 81(5): 1147-1156.
- [37] 韩春雪. 科尔沁沙丘-草甸梯级生态系统土壤呼吸研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2019.
- [38] 赵成义. 陆地不同生态系统土壤呼吸及土壤碳循环研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2004.
- [39] Zhang Q Q, Song Y F, Wu Z, Yan X Y, Gunina A, Kuzzyakov Y, Xiong Z Q. Effects of six-year biochar amendment on soil aggregation, crop growth, and nitrogen and phosphorus use efficiencies in a rice-wheat rotation. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 242: 118435.
- [40] Xu X Y, Liu X R, Li Y, Ran Y, Liu Y P, Zhang Q C, Li Z, He Y, Xu J M, Di H J. High temperatures inhibited the growth of soil bacteria and Archaea but not that of fungi and altered nitrous oxide production mechanisms from different nitrogen sources in an acidic soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 2017, 107: 168-179.
- [41] 贺纪正, 王军涛. 土壤微生物群落构建理论与时空演变特征. *生态学报*, 2015, 35(20): 6575-6583.
- [42] 李忠, 孙波, 林心雄. 我国东部土壤有机碳的密度及转化的控制因素. *地理科学*, 2001, 21(4): 301-307.
- [43] 王建红, 程敏娟, 王淑霞. 日光温室秋延后及冬春茬西红柿育苗技术要点. *北京农业*, 2009(36): 22-24.
- [44] 纪磊. 放牧和割草对内蒙古羊草草原土壤呼吸及土壤微生物群落结构的影响[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2021.