

DOI: 10.5846/stxb201909292043

张子胥, 于倚龙, 李永强, 焦树英, 董智, 韩国栋, 徐子云. 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. 生态学报, 2021, 41(15): 6257-6266.

Zhang Z X, Yu Y L, Li Y Q, Jiao S Y, Dong Z, Han G D, Xu Z Y. Effects of grazing intensity on soil organic carbon and its spatial heterogeneity in desert steppe of Inner Mongolia. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(15): 6257-6266.

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

张子胥^{1,2}, 于倚龙¹, 李永强^{1,*}, 焦树英¹, 董智², 韩国栋³, 徐子云¹

1 山东农业大学, 资源与环境学院, 土壤资源高效利用国家工程实验室, 泰安 271018

2 山东农业大学, 林学院, 泰山森林生态站, 泰安 271018

3 内蒙古农业大学草原与资源环境学院, 呼和浩特 010018

摘要:放牧是内蒙古荒漠草原主要利用方式之一, 研究不同放牧强度下土壤有机碳分布规律对退化草原恢复以及推广精准放牧技术具有重要的指导意义。基于不同放牧强度长期放牧样地(0、0.93、1.82、2.71 羊单位 $\text{hm}^{-2}(\text{a}/2)^{-1}$), 采用高样本数量的取样设计并结合地统计学分析方法, 研究荒漠草原土壤有机碳及其空间异质性。结果表明: 中度放牧会显著降低 0—30 cm 土层全氮含量($P<0.05$), 全磷含量随放牧强度增强出现先降低后升高趋势; 放牧样地土壤有机碳含量均显著低于对照样地($P<0.05$), 不同放牧强度处理土壤有机碳含量没有显著差异; 土壤有机碳密度受放牧影响在 0—20 cm 土层出现显著下降($P<0.05$), 变化趋势同有机碳含量相似, 碳氮比在重度放牧区 0—10 cm 土层显著降低($P<0.05$)。土壤有机碳空间异质性和异质性斑块的破碎程度随放牧强度增加而增大; 土壤有机碳含量与海拔高度在对照、轻度放牧和中度放牧区均呈极显著负相关($P<0.01$), 在重度放牧区土壤有机碳含量和海拔无显著相关性; 土壤有机碳含量与土壤全氮、全磷含量均呈极显著正相关($P<0.01$)。综上所述, 放牧降低土壤有机碳含量, 提高土壤有机碳空间异质性, 土壤有机碳含量的空间变异受海拔和土壤养分含量等因素的共同影响。

关键词:荒漠草原; 放牧强度; 土壤有机碳; 空间异质性

Effects of grazing intensity on soil organic carbon and its spatial heterogeneity in desert steppe of Inner Mongolia

ZHANG Zixu^{1,2}, YU Yilong¹, LI Yongqiang^{1,*}, JIAO Shuying¹, DONG Zhi², HAN Guodong³, XU Ziyun¹

1 National Engineering Laboratory for Efficient Utilization of Soil and Fertilizer Resources, College of Resources and Environment, Shandong Agriculture University, Taian 271018, China

2 Forestry Ecological Station, College of Forestry, Shandong Agriculture University, Taian 271018, China

3 College of Grassland, Resources and Environmental Science, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China

Abstract: Grazing is the main utilization method of desert steppe in Inner Mongolia. It is also one of the main anthropic disturbances contributing to desert steppe degradation. Studying the distribution pattern of soil organic carbon under different grazing intensity has important guiding significance for restoration of the degraded grassland and promotion of precision grazing technology. This experiment was based on long-term grazing plots with different grazing intensities (0, 0.93, 1.82, 2.71 sheep units/ hm^2 /half year), using high-density sampling combined with geostatistics to study soil organic carbon and

基金项目: 十三五国家重点研发计划(2016YFC0500504); 教育部草地资源重点实验室和创新团队支持项目; 国家自然科学基金项目(31870708)

收稿日期: 2019-09-29; **网络出版日期:** 2021-05-20

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lyqlinda@163.com

its spatial heterogeneity in desert steppe. The results showed that the total nitrogen content of 0—30 cm soil layer decreased significantly in moderate grazing ($P<0.05$), and the soil total phosphorus content firstly decreased and then increased with the increase of grazing intensity. Soil total nitrogen content decreased significantly with the deepening of soil depth in 0—30 cm soil layer of four treatments ($P<0.05$), but soil total phosphorus did not change significantly. Soil organic carbon content of the control plots was significantly higher than that of other treatments, and there was no significant difference in soil organic carbon content among different grazing treatments. Soil organic carbon content in every treatment decreased gradually with the deepening of the soil layer. The data distribution of organic carbon content in the four treatments was symmetrical, and the degree of data dispersion decreased with the deepening of soil layer. Soil organic carbon density decreased significantly in 0—20 cm soil layer under grazing ($P<0.05$), and the change trend was similar to that of organic carbon content. The C/N ratio in the 0—10 cm soil layer in heavy grazing area decreased significantly, but there was no significant change in 20—30 cm soil layer. In vertical distribution, the C/N ratio decreased significantly with the deepening of soil layer ($P<0.05$). The spatial heterogeneity of soil organic carbon and the degree of fragmentation of heterogeneous plaques increased with the increase of grazing intensity, but heavy grazing would change this trend, especially in moderate grazing to achieve a strong class of structural dependence. The nugget values of control and heavy grazing were higher, and the control had the largest base values among the four treatments. Elevation was negatively correlated with soil organic carbon content in control ($P<0.01$), lightly grazed and moderately grazed, but not with heavily grazed. Soil organic carbon content was positively correlated with soil total nitrogen content ($P<0.01$). Soil organic carbon content was positively correlated with soil total phosphorus content, and the correlation increased with the grazing intensity ($P<0.01$). In general, grazing reduced soil organic carbon content and storage, and improved spatial heterogeneity of soil organic carbon. Spatial variability of soil organic carbon content was affected by altitude and soil nutrients.

Key Words: desert steppe; grazing intensity; soil organic carbon; spatial heterogeneity

草原生态系统是陆地生态系统重要组成部分,其碳储量约占陆地生态系统总碳量的 34%^[1]。土壤有机碳也是评估土壤肥力和土壤退化的重要指标,影响着土壤的理化性质和生物特性^[2]。Dlamini 等在 2016 年总结全球范围内 55 项研究中的 628 个土壤样品的分析结果后发现:在气候干燥地区(降水量小于 600 mm),退化草地土壤有机碳含量较退化前减少了 16%,在气候潮湿地区(降水量大于 1000 mm)这一比例仅为 8%,干旱地区土壤退化伴随的有机碳流失问题更加严重^[3]。因此,关于干旱区草地土壤有机碳流失问题的研究具有重要意义。

放牧是荒漠草原的主要利用方式之一,放牧强度过大被认为是引起草原区土壤退化的主要原因,放牧和土壤侵蚀导致的土壤碳流失问题受到广泛关注^[4],关于放牧强度对土壤有机碳影响的研究逐渐增加。目前,这类研究主要集中在土壤碳组分、土壤有机碳与土壤微生物数量和酶活性之间的互作关系等方面^[5-7],对土壤有机碳空间异质性影响的研究相对较少。土壤空间异质性是土壤的重要属性之一^[8],在干旱或半干旱生态系统中有机碳的空间异质性通常表现为土壤有机碳含量的斑块化分布;地统计学方法是研究土壤养分空间格局最常用的方法之一,通过地统计学中的半方差分析可以检验随取样间距增大测量值的变化情况,同时反映斑块平均大小和破碎程度等信息,解释土壤养分的空间分布特征^[9-11]。

本研究采用高密度取样结合半方差分析研究土壤有机碳在不同放牧强度影响下的空间分布特征,并结合地形因素和其它土壤养分指标探究放牧与有机碳空间异质性的关系,以期退化荒漠草原恢复、草地放牧生态系统可持续性管理提供数据和理论支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验区位于内蒙古自治区乌兰察布市内蒙古农牧业科学院四子王旗基地(111°54'E、41°47'N, 1456 m)。

该地区属典型中温带大陆性季风气候,冬季漫长寒冷,夏季短促干燥,降水稀少而集中,多年平均降水量 280 mm,昼夜温差大,多年平均气温 3.4℃,7 月份平均气温最高,无霜期 90—120 d。试验区属短花针茅荒漠草原,植物群落由近 30 种植物种组成,建群种为短花针茅(*Stipa breviflora*),优势种为冷蒿(*Artemisia frigida*)、无芒隐子草(*Cleistogenes songorica*)、冰草(*Agropyron cristatum*)、银灰旋花(*Convolvulus ammannii*)。荒漠草原植被高度、盖度和地上生物量季节变化明显,植物群落特征采用生物量最高的 8 月份数据(表 1)。试验区土壤类型为淡栗钙土,土层厚度较浅,钙积层位于地表下 40 cm 左右,土体坚硬,渗透能力较差。

1.2 试验设计

试验区属长期定位试验基地,2002 年 7 月份开始进行围栏放牧,进行前期定量放牧观测。于 2004 年采用随机区组试验方法将试验小区分成 3 个区组,每个区组包含轻度放牧(Lightly grazed, LG)、中度放牧(Moderately grazed, MG)、重度放牧(Heavily grazed, HG)和对照样地(CK)4 个处理。每个处理 3 个重复,共 12 个小区。基于当地的气候类型和牧民对草地的利用强度,设定 4 个放牧强度为 0(CK)、0.93(LG)、1.82(MG)和 2.71(HG) 羊单位 $\text{hm}^{-2}(\text{a}/2)^{-1}$ 。每个小区面积约为 4.4 hm^2 ,区组内随机排列。每年于 6 月初到 11 月底放牧 6 个月,每天 7:00 将家畜赶入放牧区让其自由采食,19:00 将其赶回畜圈。

表 1 8 月份试验区植被特征

Table 1 Characteristics of vegetation in August in the experimental area

放牧强度 Grazing intensity	高度 Height/m	盖度 Coverage/%	地上生物量 Aboveground biomass/(kg/hm^2)
CK	11.17±8.89a	23.61±14.72a	1113.64±920.85a
LG	10.48±6.63a	19.41±11.42b	929.68±781.21b
MG	8.58±4.99b	14.72±8.95c	744.68±600.73c
HG	7.59±4.18c	11.18±8.10d	680.72±577.60c

表中数据为平均值±标准差;同一列不同字母表示不同处理间差异显著($P<0.05$);CK:对照 Control check;LG:轻度放牧 Lightly grazed;MG:中度放牧 Moderately grazed;HG:重度放牧 Heavily grazed

1.3 样品的采集和分析

2016 年 9 月选取纵向长度基本一致的小区 CK1、LG1、MG1 和 HG1 进行土壤取样。鉴于长条状的小区设置,本研究采用线性取样。由南向北在每个小区中线处设置长度为 497.5 m 的样线,为减少羊群进出小区对土壤理化性质的影响,每个小区样线起始点设置在距离小区入口 50 m 处。样点依样线布设,样点间隔 2.5 m。在每个样点进行 GPS 定位,并记录经纬度、海拔等地形因子,样点所在样线的海拔变化如图 1 所示。用长 20 cm、内径 7 cm 的土壤取样器按 0—10、10—20、20—30 cm 分层采集土壤样品,样品数量共 2400 个,另外每 50 m 用环刀在取样点附近取一份土壤样品用于容重测定。

土壤样品经室内风干后除去凋落物和根系等杂物,先过 2 mm 筛,取一半 2 mm 土壤样品研磨过 80 目筛后分别装袋密封保存。于 2017 年 3 月开始进行土壤样品测定,全氮和全磷含量采用全自动化学分析仪 Smartchem-200 进行测定;土壤有机碳含量用重铬酸钾-浓硫酸油浴外加热法测定;环刀内土壤样品经烘箱 65℃ 烘至恒重后进行称重,计算土壤容重。

1.4 数据处理

(1) 土壤有机碳密度计算:

$$\text{SOC}_{\text{stock},i} = \text{SOC}_i \times D_i \times H_i \times (1 - G_i) \times 1000$$

式中, $\text{SOC}_{\text{stock},i}$ 为 i 层的土壤有机碳密度(g/m^2); SOC_i 为 i 层的土壤有机碳含量(g/kg); D_i 为 i 层土壤容重

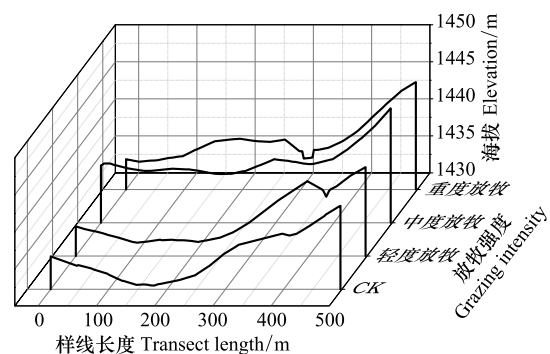


图 1 不同放牧强度下样线海拔变化

Fig.1 Altitude variation of samplelines under different grazing intensities

(g/cm^3); H_i 为 i 层的土层厚度 (cm); G_i 为 i 层的砾石含量; 因供试土壤为沙质淡栗钙土, 砾石含量极低, 远小于 10%^[12], 因此计算时忽略 G_i 。

(2) 土壤有机碳含量半方差分析: 首先用 Excel 2016 软件和 SPSS 19.0 软件进行统计分析, 再进行 K-S 检验验证土壤有机碳含量是否符合正态分布。变异系数 (CV) 反映区域化变量的离散程度, 划分为 3 个变异等级: $\text{CV} < 10\%$, 弱变异; $10\% < \text{CV} < 100\%$, 中等变异; $\text{CV} > 100\%$, 强变异^[13]。用阈值法 (均值加 3 倍标准差) 检验特异值, 若存在特异值, 均值加 3 倍标准差作为最大值, 均值减 3 倍标准差作为最小值。

正态分布检验后, 对不符合正态分布的数据集进行对数转换, 然后运用 GS⁺ 7.0 计算半方差函数对土壤有机碳空间变异特征进行描述, 通过半方差函数得到散点图, 对散点图采用球状模型、高斯模型、指数模型和线性模型等方法进行拟合, 选取拟合度最佳的模型。由模型可以导出 4 个重要参数分别是变程 (a): 指示异质性斑块的平均大小; 块金值 (C_0): 样本之间的随机方差和最小采样尺度内的变化; 基台值 ($C_0 + C$): 包括实验误差和空间结构异质性引起的方差, 指示样地范围内最大的空间异质性程度; 结构比: 空间结构变异占总变异的比, 可以反映空间结构异质性的大小^[14], 用 $C/(C_0 + C)$ 表示。当结构比 $C/(C_0 + C) < 25\%$ 时, 则说明系统具有较弱的空间相关性; 如果该比值在 25%—75%, 则说明系统具有中等程度的空间相关性; 如果 $C/(C_0 + C) > 75\%$, 则说明系统具有强烈的空间相关性^[10]。

半方差函数的计算公式:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^n [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2$$

式中, $\gamma(h)$ 为半方差函数; h 为两个样本的间隔距离; $N(h)$ 是间距为 h 的观测样点的数量; $Z(x_i)$ 和 $Z(x_i + h)$ 为变量 Z 在空间位置 x_i 和 $x_i + h$ 处的实测值, 在一定范围内, $\gamma(h)$ 随着 h 的增大而增大, 当达到最大相关距离时, 趋于平稳^[15]。

2 结果与分析

2.1 不同放牧强度对土壤氮、磷含量的影响

土壤全氮全磷含量是指示土壤养分状况的关键指标。中度放牧和重度放牧会降低土壤全氮含量, 但重度放牧较中度放牧的土壤全氮含量会出现上升, 且在 10—20 cm 和 20—30 cm 土层达到显著水平 ($P < 0.05$)。全磷含量在不同放牧强度下呈现出先下降后升高的现象, 但全磷含量随土层变化并未出现显著差异 (图 2)。

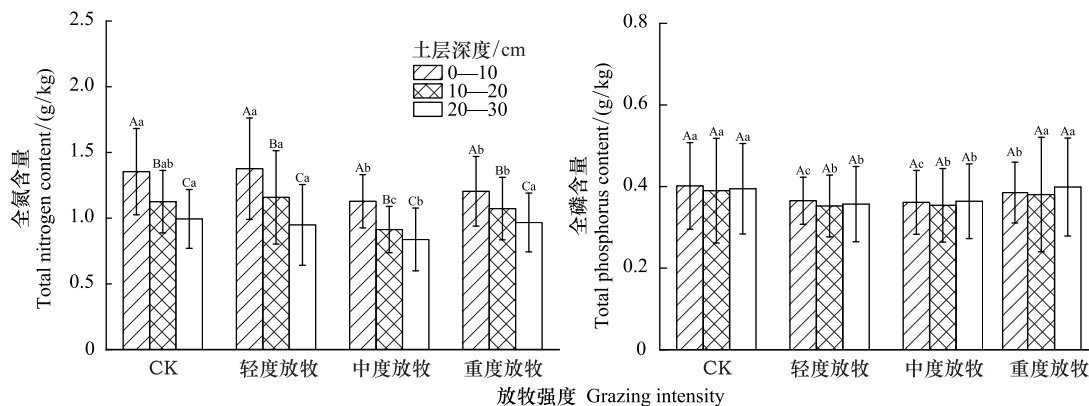


图 2 不同放牧强度下土壤全氮含量和全磷含量变化

Fig.2 Changes of soil total nitrogen and total phosphorus under different grazing intensities

不同小写字母表示同一土层不同放牧强度间差异显著 ($P < 0.05$); 不同大写字母表示同一放牧强度不同土层间差异显著 ($P < 0.05$)

2.2 不同放牧强度对有机碳的影响

放牧导致土壤有机碳含量在 0—20 cm 土层显著降低 ($P < 0.05$), LG、MG 和 HG 依次降低了 9.19%、

9.79%、8.31%,三个放牧处理之间不存在显著差异(图3)。从数据分布情况来看,土壤有机碳含量的数据样本 K-S 检验结果大于 5% 显著水平,数据呈正态分布。从变异系数来看,不同放牧小区各土层有机碳含量均表现为中等程度的变异($10\% < CV < 100\%$)。土壤有机碳密度在 0—20 cm 土层呈现出同含量相近的变化趋势,在 20—30 cm 土层 CK 和 MG 的土壤有机碳密度显著高于 LG 和 HG,在 0—30 cm 三个土层中放牧处理(LG、MG、HG)较对照处理有机碳密度降低幅度由浅到深达 4.96%、4.97%和 5.91%。

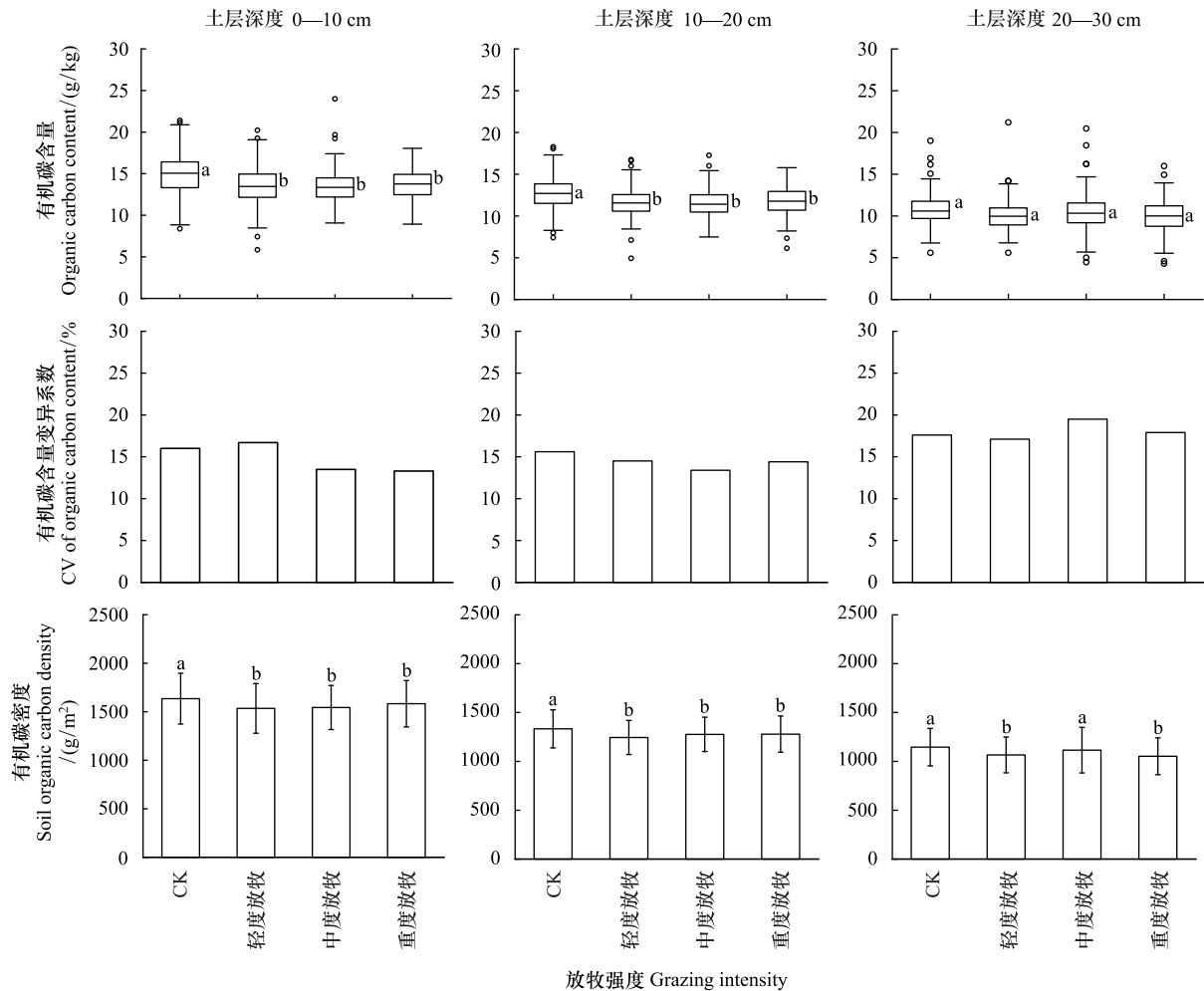


图3 不同放牧强度下土壤有机碳含量和密度变化

Fig.3 Changes of soil organic carbon content and density under different grazing intensities

不同字母表示同一土层不同放牧强度间差异显著($P < 0.05$)

在 0—10 cm 土层土壤碳氮比在 LG 和 MG 较 CK 没有出现显著变化(图4)。在 HG 出现了显著降低($P < 0.05$),较对照处理降低了约 10.14%。在 10—30 cm 土层各放牧强度碳氮比均未出现显著变化。在各放牧强度下碳氮比的垂直变化均是随土层深度加深逐渐减小。

2.3 土壤有机碳含量半方差模型

利用地统计软件 GS⁺ 7.0 对全部采样点的土壤有机碳含量数据进行半方差分析(在半方差分析中有机碳含量数据采用三层土壤的平均值)。由表 2 和图 5 可以看出,研究区不同放牧强度下土壤有机碳含量最优拟合模型不同,其中对照和轻度放牧为球状模型,中度放牧和重度放牧为指数模型。

由表 2 可知,块金值随着放牧强度的增加先降低后升高,CK 与 HG 明显高于其它处理,说明引起变异的不确定成分即随机性因素作用较大。同时 CK 的基台值明显高于其它处理,说明禁牧情况下总的变异程度明

显大于放牧。变程随放牧强度增加先降低后升高,但 HG 的变程仍远低于 LG。各处理之间结构比的变化范围是 66.00%—77.70%,表明土壤有机碳呈现中度到高度的空间相关性。同时放牧处理的结构比均高于 CK,并且 MG 的 $[C/(C_0+C)]$ 值达到 77.70%,具有强烈的空间相关性。

2.4 土壤有机碳含量与土壤氮、磷含量和海拔的相关性

选取海拔、全氮和全磷作为因子与有机碳进行线性拟合,研究不同放牧强度下海拔、全氮和全磷同有机碳互作关系。为了排除土壤层级之间的变化影响相关性结果,使用受放牧扰动最剧烈的表层 0—10 cm 土层的数据进行线性拟合。由图 6 可知,有机碳含量与全氮含量在 4 个放牧强度下均呈极显著正相关($P<0.01$),相关性由大到小为对照样地>中度放牧>重度放牧>轻度放牧。有机碳含量与全磷含量在 4 个处理均呈现极显著正相关($P<0.01$),相关性随放牧强度增强逐渐增强。

CK、LG 和 MG 的有机碳含量与海拔呈极显著负相关($P<0.01$),而 HG 有机碳含量同海拔的相关性不显著。

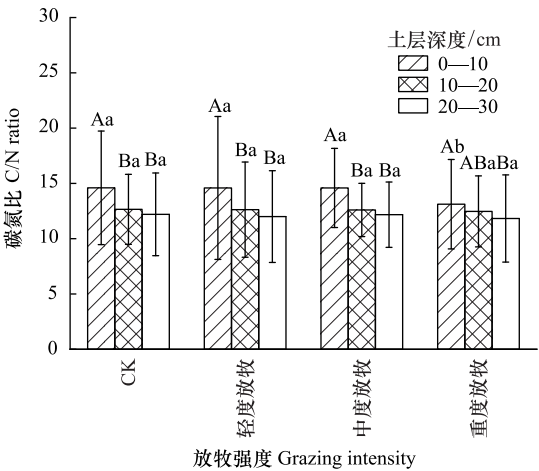


图 4 不同放牧强度下土壤碳氮比

Fig.4 Soil C/N ratio under different grazing intensities

不同小写字母表示同一土层不同放牧强度间差异显著($P<0.05$);
不同大写字母表示同一放牧强度不同土层间差异显著($P<0.05$)

表 2 不同放牧强度下土壤有机碳含量半方差函数模型参数

Table 2 Semi-variance function model parameters of soil organic carbon content under different grazing intensities							
放牧强度 Grazing intensity	模型 Model	块金值 Nugget C_0	基台值 Sill C_0+C	结构比 Proportion/% $C/(C_0+C)$	变程 Range a	R^2	空间相关性等级 Class of structural dependence
CK	球状模型	1.22	3.66	66.00	90.80	0.92	中等
LG	球状模型	0.69	2.54	73.10	53.40	0.89	中等
MG	指数模型	0.69	3.08	77.70	10.80	0.70	强
HG	指数模型	1.02	3.09	67.10	20.20	0.77	中等

3 讨论

有研究表明放牧会使土壤微生物活性增强,加速氮素循环,导致土壤全氮含量降低^[16],在本试验区进行的氮矿化试验也得出类似结论^[17]。当放牧强度由中度增加到重度时,土壤全氮含量较中度放牧出现小幅上升,导致重度放牧区表层土壤碳氮比显著下降,这可能是由家畜的采食和排泄行为会加速植物中的氮素进入土壤导致的^[18]。土壤中全磷的主要来源为枯落物分解^[19],放牧活动造成的生物量降低(表 1)直接导致枯落物减少,磷的输入量也随之减少,从而引起土壤全磷含量较对照样地降低。土壤全氮、全磷含量的垂直变化在四个处理区的趋势基本一致,表明放牧强度变化对全氮、全磷的垂直分布影响较小。由于土壤环境和结构的复杂性,以及土壤有机碳动态过程的复杂性,使得放牧对土壤有机碳含量变化的研究结果不尽一致^[20]。在本研究中,放牧降低了土壤有机碳含量,出现此现象的主要原因是长期放牧降低植被覆盖率,减少了凋落物和地下根系生物量。凋落物和地下根系是土壤碳的主要输入源^[21],导致放牧区土壤有机碳含量显著降低。本试验中三个放牧处理间土壤有机碳含量没有显著差异,表明该地区土壤有机碳含量对放牧强度变化的响应并不灵敏,这可能是由于本试验样地所处荒漠草原,生态环境脆弱且生态系统承载力低^[22],轻度放牧就已经破坏土壤有机碳释固平衡;也有其它学者研究表明草原有机碳含量随放牧强度增大持续降低^[23-24],原因可能是不同草地类型对放牧强度响应存在着差异。有研究认为草地生态系统具有一定的滞后性和弹性^[25],荒漠草原

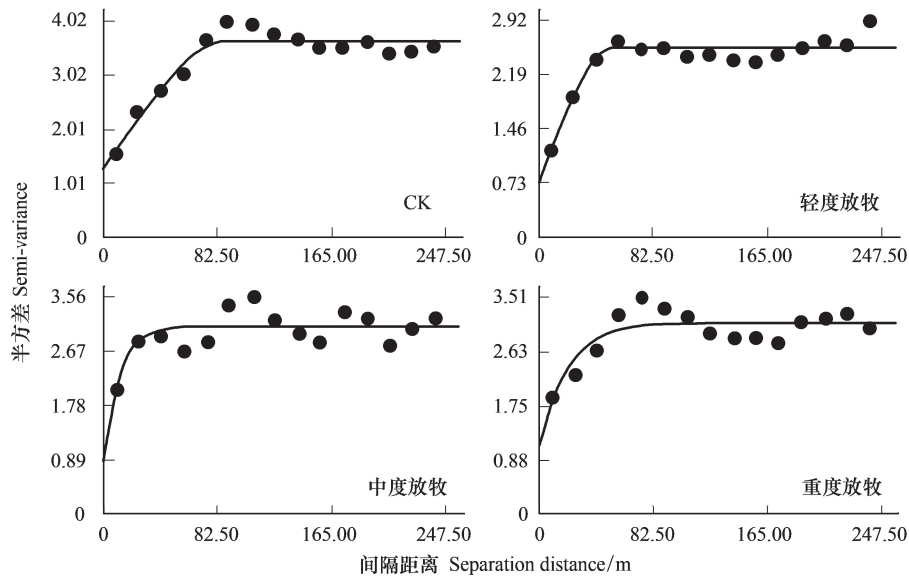


图5 不同放牧强度下土壤有机碳含量半方差函数

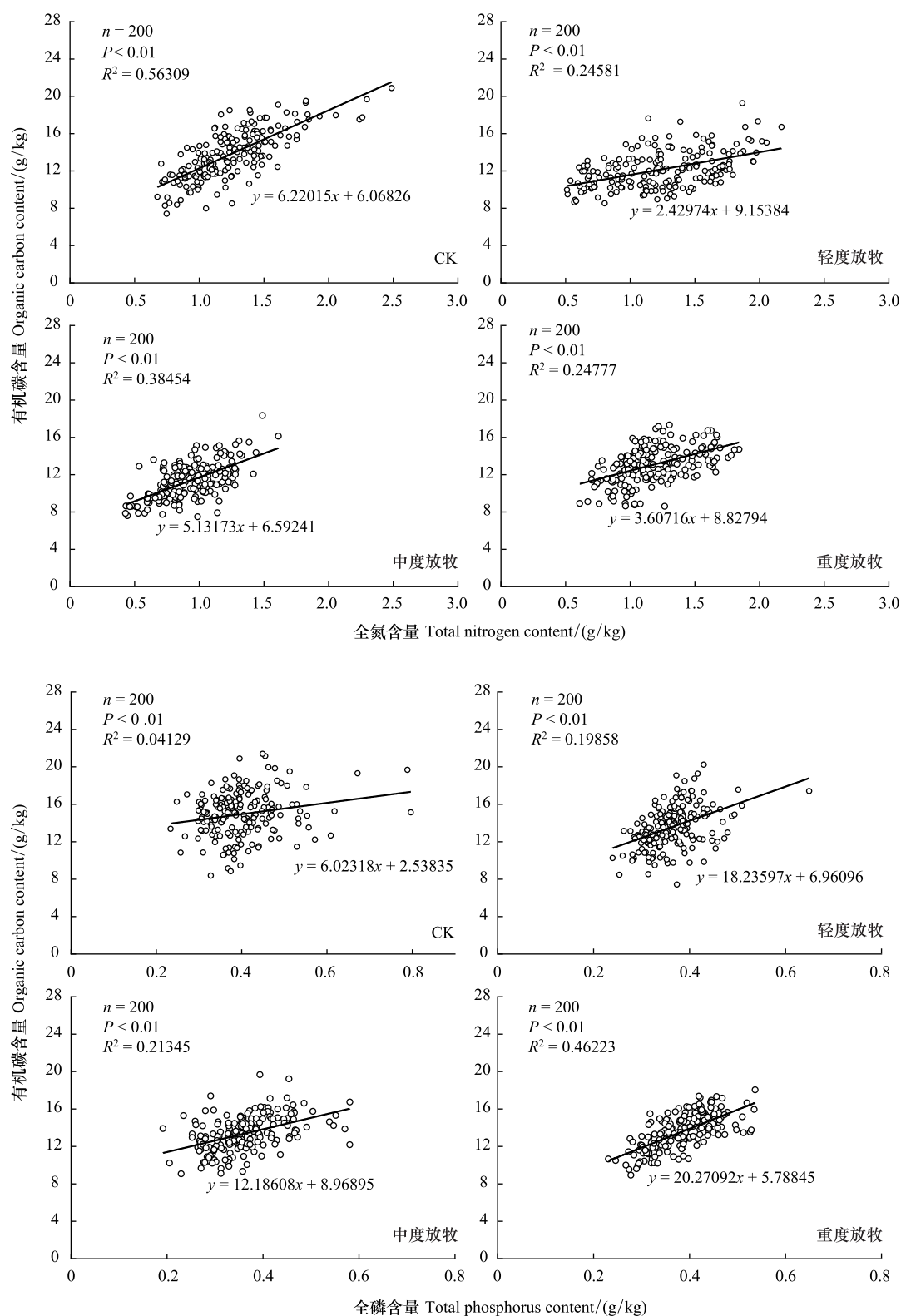
Fig.5 Semi-variance function of soil organic carbon content under different grazing intensities

生态系统弹性较低,易受人为干扰影响。本研究三个放牧处理均出现了显著的碳损失,损失幅度约5%左右。但继续增加放牧强度对荒漠草原土壤有机碳输入/输出平衡关系的影响需要进一步研究。不同土壤养分指标对于放牧强度变化的响应有所不同,在本试验设置的最低放牧强度下土壤有机碳和全磷含量已出现显著降低($P<0.05$),这也一定程度反映了荒漠草原的脆弱性。因此,降低放牧强度的同时进行短期禁牧和季节性休牧等放牧管理措施可能是促进荒漠草原生态系统土壤养分积累更有效措施^[26]。

不同放牧强度会导致荒漠草原植被和表层土壤理化性质的不同程度变化,同时也影响有机碳的空间结构分布^[10]。本研究表明随放牧强度的增加,块金值和基台值均呈现不同程度的上升,反映出随机性因素和总变异性程度逐渐增加,这可能与放牧强度增加导致采食强度、践踏强度和家畜粪便分布等随机因素增加有关。而对照样地土壤有机碳的结构异质性占比最低,可能与对照样地内灌木优势度增加有关。样地内冷蒿、木地肤等灌木的盖度显著高于其它3个放牧区,灌丛促使草原“沃岛”现象的发育,可能会促使有机碳空间变异中的随机性因素增强^[27],从而降低结构性因素占总变异的比。中度放牧区土壤有机碳含量具有强烈的空间相关性且变程最小,反映出中度放牧的空间异质性大且有机碳异质性斑块的破碎化严重,可能是家畜选择性采食适口性较好的冷蒿、木地肤直接导致试验区生物多样性降低^[28],有机碳空间变异中的随机性因素所占比例也随之降低。重度放牧区因采食强度高而导致其植被盖度和高度降低,高践踏强度下草原地面裸露导致地表风蚀增强^[29],随机性因素对土壤有机碳含量的影响逐渐增强,空间相关性逐渐降低。对照区与重度放牧区有较高的块金值,说明它们可能存在更小尺度的空间格局,需进一步研究^[30]。三个放牧处理的有机碳空间分布均呈现出中等到强的空间自相关性。土壤有机碳含量的空间变异程度受地形、水文和成土母质等结构性因素影响^[31]。在轻度放牧和中度放牧土壤有机碳含量与海拔呈极显著负相关($P<0.01$),而重度放牧的结构比较小且有机碳含量与海拔没有显著相关性。重度放牧下羊群采食、践踏、排泄等行为(随机性因素)致使地面出现了大面积裸露和土壤板结,地表径流向草地破碎斑块聚集,可能导致空间异质性程度增强^[32],稀释了结构性因素对有机碳总空间变异的影响。

放牧对土壤养分空间异质性的影响主要是通过影响养分的移动和再分配来实现的^[33],并且土壤有机碳矿化对土壤氮、磷的增加存在响应机制^[34]。本试验中土壤全氮含量与土壤有机碳含量在四个处理中均呈极显著正相关,这与相关研究中碳氮具有耦合效应的结论一致^[35-37]。放牧导致的土壤氮含量变化通过这种耦

合效应也间接影响土壤有机碳含量,以及作为随机性因素影响有机碳含量的空间分布。土壤全磷含量与土壤有机碳含量在 LG、MG 和 HG 呈极显著正相关,且相关性随放牧强度的增加而增强。有研究表明土壤有机碳、全磷的含量变化均与凋落物分解有关^[38],放牧会使植物生物量中 27%—60% 的干物质返还到土壤中^[33],而返还物的有机质含量和品质差异可能是土壤关键元素相关性随放牧强度变化的主要原因。



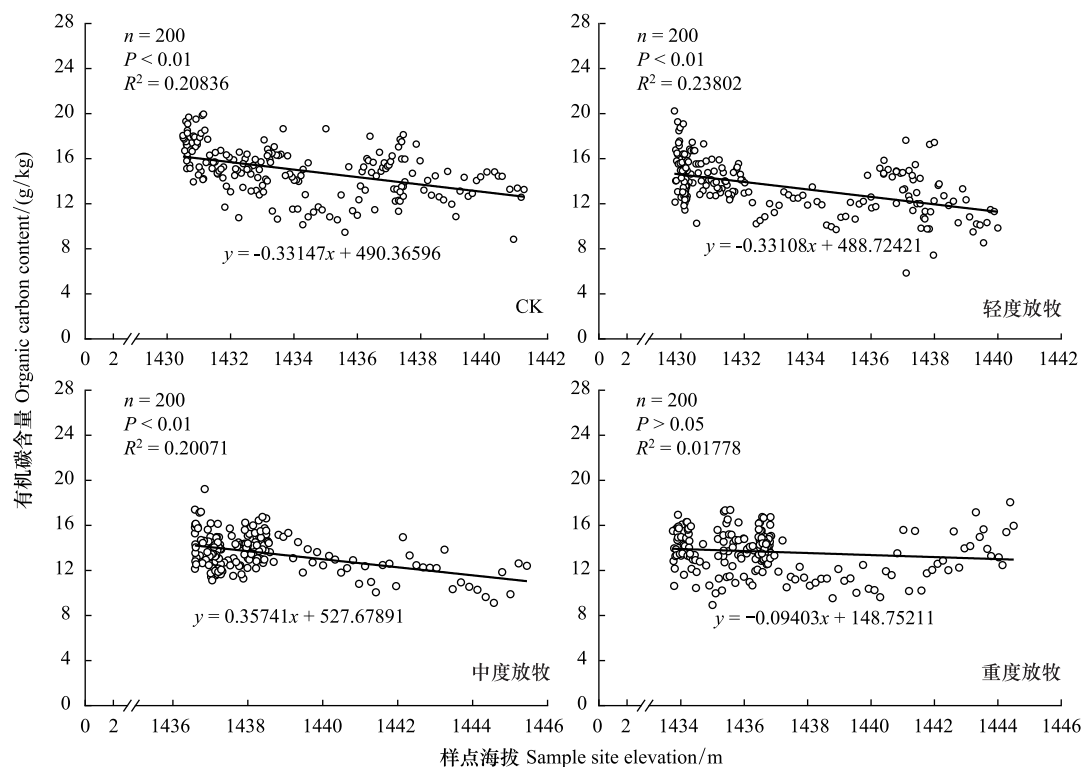


图 6 不同放牧强度下土壤有机碳含量与海拔、全氮含量和全磷含量线性拟合

Fig.6 Linear fitting of soil organic carbon content with elevation, total nitrogen content and total phosphorus content under different grazing intensities

4 结论

(1) 放牧导致 0—20 cm 土层的土壤有机碳含量显著降低,对 20—30 cm 土层没有显著性影响,有机碳密度呈现出同含量相近的变化趋势,放牧区较对照区在 0—10 cm、10—20 cm 和 20—30 cm 的碳损失依次为 4.96%、4.97%、5.91%;中度放牧能够显著降低土壤的全氮含量,重度放牧显著降低 0—10 cm 土层土壤的碳氮比。

(2) 土壤有机碳含量的空间异质性由大到小依次是中度放牧>轻度放牧>重度放牧>对照,空间分布的破碎程度由大到小为中度放牧>重度放牧>轻度放牧>对照,其中中度放牧下土壤有机碳含量具有强烈的空间相关性且异质性斑块呈破碎化分布;对照区和重度放牧区引起空间变异的随机性因素较多,需缩小取样尺度后进一步研究。

(3) 有机碳含量与海拔高度在对照、轻度放牧、中度放牧区呈极显著负相关,在重度放牧区,有机碳含量和海拔高度的相关性减弱;有机碳含量与全氮和全磷含量在 4 个放牧强度均呈极显著正相关,且相关性随放牧强度增加而增强。

参考文献 (References):

- [1] Lal R. Potential of desertification control to sequester carbon and mitigate the greenhouse effect. *Climatic Change*, 2001, 51(1): 35-72.
- [2] Wiesmeier M, Munro S, Barthold F, Steffens M, Schad P, Kögel-Knabner I. Carbon storage capacity of semi-arid grassland soils and sequestration potentials in northern China. *Global Change Biology*, 2015, 21(10): 3836-3845.
- [3] 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. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2016, 221: 258-269.
- [4] Cao J X, Wang X P, Sun X Y, Zhang L, Tian Y. Effects of grazing intensity on soil labile organic carbon fractions in a desert steppe area in Inner

- Mongolia. SpringerPlus, 2013, 2(S1): S1.
- [5] 吴永胜, 马万里, 李浩, 吕桂芬, 卢萍. 内蒙古退化荒漠草原土壤有机碳和微生物生物量碳含量的季节变化. 应用生态学报, 2010, 21(2): 312-316.
- [6] 邱璇, 赵建宁, 李文亚, 张乃芹, 杨殿林. 不同利用方式对小针茅荒漠草原土壤活性有机碳的影响. 草业学报, 2016, 25(9): 1-9.
- [7] Zhang M, Li X B, Wang H, Huang Q. Comprehensive analysis of grazing intensity impacts soil organic carbon: a case study in typical steppe of Inner Mongolia, China. Applied Soil Ecology, 2018, 129: 1-12.
- [8] 王政权, 王庆成. 森林土壤物理性质的空间异质性研究. 生态学报, 2000, 20(6): 945-950.
- [9] Lin Y, Hong M, Han G D, Zhao M L, Bai Y F, Chang S X. Grazing intensity affected spatial patterns of vegetation and soil fertility in a desert steppe. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2010, 138(3/4): 282-292.
- [10] Liu C, Song X X, Wang L, Wang D, Zhou X M, Liu J, Zhao X, Li J, Lin H J. Effects of grazing on soil nitrogen spatial heterogeneity depend on herbivore assemblage and pre-grazing plant diversity. Journal of Applied Ecology, 2016, 53(1): 242-250.
- [11] Zhang S L, Yan L L, Huang J, Mu L L, Huang Y Q, Zhang X Y, Sun Y K. Spatial heterogeneity of soil C: N ratio in a mollisol watershed of northeast China. Land Degradation and Development, 2016, 27(2): 295-304.
- [12] 杨忠芳, 夏学齐, 余涛, 侯青叶, 冯海艳. 内蒙古中北部土壤碳库构成及其影响因素. 地学前缘, 2011, 18(6): 1-10.
- [13] 王政权. 地统计学及在生态学中的应用. 北京: 科学出版社, 1999: 13-22.
- [14] Lane D R, Bassirirad H. Diminishing spatial heterogeneity in soil organic matter across a prairie restoration chronosequence. Restoration Ecology, 2005, 13(2): 403-412.
- [15] Bameri A, Khormali F, Kiani F, Dehghani A A. Spatial variability of soil organic carbon in different hillslope positions in Toshan area, Golestan Province, Iran; geostatistical approaches. Journal of Mountain Science, 2015, 12(6): 1422-1433.
- [16] 罗由林, 李启权, 王昌全, 张维, 张浩, 李林鲜, 陈俊伟, 马煜. 川中丘陵区土壤碳氮比空间变异特征及其影响因素. 应用生态学报, 2015, 26(1): 177-185.
- [17] 韩梦琪, 潘占磊, 靳宇曦, 秦洁, 李江文, 王忠武, 韩国栋. 短花针茅荒漠草原土壤氮素矿化对载畜率的响应. 草业学报, 2017, 26(9): 27-35.
- [18] 张成霞, 南志标. 放牧对草地土壤理化特性影响的研究进展. 草业学报, 2010, 19(4): 204-211.
- [19] 孙海燕, 万书波, 李林, 刘登望. 放牧对荒漠草原土壤养分及微生物量的影响. 水土保持通报, 2015, 35(2): 82-88, 93-93.
- [20] Zhou G Y, Zhou X H, He Y H, Shao J J, Hu Z H, Liu R Q, Zhou H M, Hosseinibai S. Grazing intensity significantly affects belowground carbon and nitrogen cycling in grassland ecosystems: a meta-analysis. Global Change Biology, 2017, 23(3): 1167-1179.
- [21] Feyisa K, Beyene S, Angassa A, Said M Y, de Leeuw J, Abebe A, Megersa B. Effects of enclosure management on carbon sequestration, soil properties and vegetation attributes in East African rangelands. CATENA, 2017, 159: 9-19.
- [22] Abdalla M, Hastings A, Chadwick D R, Jones D L, Evans C D, Jones M B, Rees R M, Smith P. Critical review of the impacts of grazing intensity on soil organic carbon storage and other soil quality indicators in extensively managed grasslands. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2018, 253: 62-81.
- [23] Derner J D, Boutton T W, Briske D D. Grazing and ecosystem carbon storage in the North American Great Plains. Plant and Soil, 2006, 280(1): 77-90.
- [24] Li X D, Zhang C P, Fu H, Guo D, Song X R, Wan C G, Ren J Z. Grazing exclusion alters soil microbial respiration, root respiration and the soil carbon balance in grasslands of the Loess Plateau, northern China. Soil Science and Plant Nutrition, 2013, 59(6): 877-887.
- [25] 安慧, 徐坤. 放牧干扰对荒漠草原土壤性状的影响. 草业学报, 2013, 22(4): 35-42.
- [26] 李文, 曹文侠, 师尚礼, 李小龙, 陈建刚, 徐长林. 放牧管理模式对高寒草甸生态系统有机碳、氮储量特征的影响. 草业学报, 2016, 25(11): 25-33.
- [27] 丁海君, 韩国栋, 王忠武, 王春霞, 张睿洋, 胡吉亚. 短花针茅荒漠草原不同载畜率对植物群落特征的影响. 中国草地学报, 2014, 36(2): 55-60.
- [28] 张睿洋, 王忠武, 韩国栋, 潘占磊, 刘芳, 武倩, 阿木尔萨那. 短花针茅荒漠草原 α 多样性对绵羊载畜率的响应. 生态学报, 2017, 37(3): 906-914.
- [29] Li J R, Okin G S, Alvarez L, Epstein H. Quantitative effects of vegetation cover on wind erosion and soil nutrient loss in a desert grassland of southern New Mexico, USA. Biogeochemistry, 2007, 85(3): 317-332.
- [30] 蒋勇军, 袁道先, 谢世友, 李林立. 典型岩溶流域土壤有机质空间变异——以云南小江流域为例. 生态学报, 2007, 27(5): 2040-2047.
- [31] 赵亚楠, 杜艳艳, 马彦平, 赵延兵, 周玉蓉, 王红梅. 宁夏东部荒漠草原灌丛引入过程中土壤有机碳变化及其空间格局预测. 应用生态学报, 2019, 30(6): 1927-1935.
- [32] Wiesmeier M, Steffens M, Kölbl A, Kögel-knabner I. Degradation and small-scale spatial homogenization of topsoils in intensively-grazed steppes of Northern China. Soil and Tillage Research, 2009, 104(2): 299-310.
- [33] 张蒙, 李晓兵. 放牧对土壤有机碳的影响及相关过程研究进展. 草地学报, 2018, 26(2): 267-276.
- [34] 刘玉槐, 严员英, 张艳杰, 严月, 赵玉皓, 徐燕, 陈伏生, 葛体达, 鲁顺保. 不同温度条件下亚热带森林土壤碳矿化对氮磷添加的响应. 生态学报, 2017, 37(23): 7994-8004.
- [35] Holland E A, Detling J K. Plant response to herbivory and belowground nitrogen cycling. Ecology, 1990, 71(3): 1040-1049.
- [36] Hooker T D, Stark J M. Carbon flow from plant detritus and soil organic matter to microbes—linking carbon and nitrogen cycling in semiarid soils. Soil Science Society of America Journal, 2012, 76(3): 903-914.
- [37] McNaughton S J, Banyikwa F F, McNaughton M M. Promotion of the cycling of diet-enhancing nutrients by African grazers. Science, 1997, 278(5344): 1798-1800.
- [38] Cosmas M. Determination of the soil organic carbon, nitrogen, available phosphorus and the combined aboveground plant materials in the semi-arid Mbulu District, Tanzania. African Journal of Ecology, 2009, 47(3): 352-359.