植物营养与肥料学报 2013,19(3):705-712
Journal of Plant Nutrition and Fertilizer doi: 10.11674/zwyf.2013.0322

放牧对荒漠草原植物生物量及土壤养分的影响

安 慧, 李国旗
(宁夏大学西北退化生态系统恢复与重建教育部重点实验室/西部生态与生物资源开发联合研究中心,宁夏银川 750021)

摘要: 以宁夏荒漠草原为研究对象,探讨放牧对荒漠草原植物多样性、生物量及土壤养分特征的影响。结果表明,放牧对荒漠草原植物群落多样性、均匀度和丰富度影响显著。植物群落多样性和均匀度随着放牧强度的增加均呈先增加后降低的趋势,在轻度放牧达到最大值。同围封禁牧相比,重度、中度和轻度放牧草地的植物地上和地下部生物量显著降低,分别降低了43.8%、42.0%、15.4%和27.7%、16.2%、11.9%。土壤有机碳随着放牧强度的增加而降低,而土壤全氮含量随着放牧强度的增加呈先增加后降低的趋势。围封禁牧草地土壤有机碳比重度放牧增加了18.1%,而土壤全磷、速效磷和全钾含量分别降低了21.1%、51.9%和11.0%。土壤有机碳含量对植物群落地上和地下部生物量的影响大于土壤全氮、全磷、全钾、速效磷和速效钾。放牧干扰下荒漠草原土壤环境及其养分含量,能在一定程度上反映植物群落多样性和生物量的变化。

关键词: 荒漠草原; 放牧; 生物量; 土壤养分
中图分类号: S812.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 1008-505X(2013)03-0705-08

Effects of grazing on plant biomass and soil nutrient in desert steppe

AN Hui, LI Guo-qi
(*Key Laboratory of Restoration and Reconstruction of Degraded Ecosystem in Northwestern China of Ministry of Education/ United Center for Ecology Research and Bioresource Exploitation in Western China, Ningxia University, Yinchuan 750021, China*)

Abstract: Effects of grazing on plant diversity, biomass and characteristics of soil nutrients were examined in a desert steppe in Ningxia. The result indicates that the grazing has significant effects on plant diversity, evenness and richness. With the increase of grazing intensity, the plant diversity and evenness are decreased after an initial increase and are the highest in the light grazing plots. As compared with the ungrazed plots, the grazed plots (heavy grazing, moderate grazing and light grazing) result in significant decreases of the aboveground and belowground biomass by 43.8%, 42.0%, 15.4% and 27.7%, 16.2%, 11.9%. With the increase of the grazing intensity, soil total nitrogen is decreased after an initial increase, and soil organic carbon is decreased. Compared with the grazed plots, soil organic carbon is increased by 18.1% in the ungrazed plots, while total phosphorus, available phosphorus and total potassium are decreased by 21.1%, 51.9% and 11.0%, respectively. The effects of soil organic carbon on aboveground biomass and belowground biomass are more significant than those of other soil properties (total nitrogen, total phosphorus, total potassium and available potassium). The soil environment and nutrients are influenced by grazing disturbance to reflect plant diversity, community biomass change of desert steppe.

Key words: desert steppe; grazing; biomass; soil nutrients

放牧作为人类对草地生态系统最主要的干扰方式,对生态系统过程产生重要的影响。家畜可以通过其选择性采食行为直接影响某些植物种群动态,并间接地改变了群落结构[1]。适度放牧可以增加群落的物种多样性,进而影响草地的生产力和稳定性;过度放牧则会导致群落多样性降低,草地生产

收稿日期: 2012-09-06 **接受日期:** 2013-02-04
基金项目: 国家自然科学青年基金(31000214);高等学校博士学科点专项科研基金(20106401120001);国家科技支撑计划项目(2010BAC07B03)资助。
作者简介: 安慧(1981—),女,宁夏固原人,博士,副研究员,主要从事恢复生态学和植物生理生态学研究。E-mail: anhui08@163.com

力下降[2]。退化草原冷蒿群落、内蒙古沙质草地和高寒草甸的研究表明,中度放牧植物多样性最高,围封禁牧植物多样性显著低于放牧[3-5]。禁牧和适度放牧有利于提高植物多样性,长期过度放牧使草地植被的物种丰富度和均匀度降低,植被的物种结构受到破坏。青藏高原高寒草甸、内蒙古典型草原和沙质草地植物地上生物量和地下生物量随着放牧强度的增加呈下降趋势[6-8],而小嵩草草甸植物地下生物量随放牧强度的增加而增大[9]。放牧对植物群落生物量的影响因生态系统、放牧强度、动物对植物的采食部位等因素而异。

家畜采食活动及排泄物归还等影响草地营养物质的循环,从而使草地土壤的化学成分发生变化[10]。因草地类型、放牧强度、放牧年限以及研究方法的不同,放牧对草地生态系统土壤有机碳和全氮影响的研究结果还不尽一致。有研究认为随着放牧强度增加,土壤中全氮含量降低[11-13]。随着放牧强度的增加,阿根廷稀树草原极端过度放牧草地土壤全氮含量比禁牧草地降低了50%[14]。也有研究认为,土壤全氮随放牧强度增加而增加[15]。放牧使土壤氮含量增加的主要原因是动物的粪便增加了土壤中的氮素特别是速效氮,放牧家畜使消耗的植物养分的大部分返还到土壤中。放牧对澳大利亚东北部半干旱草原[16]、矮草草原[17]和内蒙古典型草原[18]土壤有机碳含量没有显著影响。而有研究认为放牧降低土壤有机碳含量[19-20]。随着放牧强度的增加,阿根廷稀树草原极端过度放牧草地土壤有机碳含量比禁牧草地降低了69%[14]。我国东北羊草草原[21]、内蒙古草甸草原[11]、松嫩平原羊草草甸[22]土壤有机碳含量随着放牧强度增加逐渐降低。内蒙古半干旱沙化草地自由放牧比封育草地土壤有机碳下降11.78%[12]。放牧减少了碳素向土壤的输入,从而减少了土壤有机碳含量。

作为最主要的草地利用方式,放牧是规模最大的人类活动影响因素。不同的放牧利用方式(放牧制度和放牧强度)对草地的土壤和植被产生影响。放牧对于草地生产力、土壤养分的影响以及影响机制如何,是关系如何合理保护和利用草地的重要命题。放牧对草地生物多样性[5]、生物量[8]、土壤养分变化[23]等影响的研究主要集中于草甸草原和典型草原,针对荒漠草原的研究较少。荒漠草原是荒漠与典型草原间的缓冲地带,由于生态环境的严酷性和气候的波动性,其生态系统十分脆弱,具有发生荒漠化的潜在危险。探讨放牧对荒漠草原植物多样性、生物量及土壤养分特征的影响,并分析土壤养分与植物多样性、生物量的关系,旨在为确定荒漠草原合理的放牧管理方式及生态系统恢复提供科学依据。

1 材料方法

1.1 研究区自然概况

研究区位于宁夏盐池县高沙窝镇草原资源生态观测站(37°57′N、107°00′E),该地区属于典型中温带大陆性气候,是干旱与半干旱气候的过渡地带。年均气温为8.1℃,年均无霜期为165 d。年降水量仅250～350mm,其中70%以上的降水集中在6～9月,降水年际变率大,年蒸发量2710 mm。土壤类型主要是灰钙土,其次是风沙土和黑垆土。土壤结构松散,肥力低下。

植被类型主要是灌丛、沙生植被和荒漠植被,群落中常见植物种类以旱生和中旱生类型为主。主要荒漠植被类型有沙蒿(*Artemisia desertorum*)、赖草(*Leymus secalinus*)、蒙古冰草(*Agropyron mongolicum*)、短花针茅(*Stipa breviflora*)、甘草(*Glycyrrhiza uralensis*)、牛心朴子(*Cynanchum komarovii*)、二裂委陵菜(*Potentilla bifurca*)、川青锦鸡儿(*Caragana tibetica*)、刺叶柄棘豆(*Oxytropis aciphylla*)、砂珍棘豆(*Oxytropis racemosa*)、新疆猪毛菜(*Salsola sinkiangensis*)、茵陈蒿(*Artemisia capillaries*)和盐爪爪(*Kalidium foliatum*)等。

1.2 试验设计

样地设在宁夏盐池县高沙窝镇草原资源生态监测站的围封草地及附近的退化荒漠草地。围栏放牧试验于2004年开始,每年5月开始放牧,10月放牧终止。参照任继周[24]对放牧强度和草地演替阶段的划分标准,根据草地地上生物量、家畜理论采食量和草场面积及放牧时间,分别设置4个放牧处理:围封禁牧(ungrazed plots, CK,0 sheep/hm^2)、轻度放牧(light grazing,LG,0.45 sheep/hm^2)、中度放牧(moderate grazing,MG,1.00 sheep/hm^2)和重度放牧(heavy grazing,HG,1.50 sheep/hm^2)。每个处理3次重复,共12块样地;各放牧试验小区面积均为6 hm^2,围封禁牧(CK)样地为草原资源生态监测站的禁牧样地(2004年禁牧),各样地间草地发育环境及地形条件一致。

1.3 研究方法

1.3.1 植物多样性及生物量 植物多样性和生物量调查在2011年8月中旬进行。在各处理样地设置

3 条 100 m 的样线(相邻样线间隔 50 m),在每条样线上 10 m 设置 1 个 1m×1m 调查样方(每个样地共 30 个样方)。在每个样方内调查物种组成及每种植物营养枝高度、繁殖枝高度和多度,分物种剪取植物地上部分带回实验室,105℃杀青 30 min,在 65℃下烘干称取植物地上部生物量。主要植物种类的 4 个功能群分别是: 可食禾草(germinal species group, GSG)、可食豆科草(leguminous species group, LSG); 毒草类(noxious species group, NSG),包括牛心朴子、乳浆大戟等; 以及可食杂类草(forbs species group, FSG)。

在地上生物量收获后的调查样方内,用小样方(20cm×50cm)收集 0—30 cm 土层的根系样品(共 30 个样方)。土样编号后装入自封袋带回实验室,在实验室用 0.5 mm 筛网冲洗,洗净后的根系 105℃杀青 30 min,在 65℃下烘干称取植物地下生物量。

植物群落多样性指数: 群落 α 多样性指数选用 Shannon-Wiener 多样性指数:

$$H' = -\sum_{i=1}^{S} P_i \ln P_i \ \left(P_i = \frac{n_i}{N} \right)$$

均匀度指数选用 Pielou 指数:

$$E = \frac{\left(-\sum_{i=1}^{S} P_i \ln P_i \right)}{\ln S}$$

丰富度指数 R = S

式中: S 为物种的种类数; n_i 为第 i 个物种的多度; N 为群落中所有物种的多度之和; P_i 为第 i 物种的多度占所有物种的多度之和的比例。

1.3.2 土壤养分含量　在测定植物地上生物量的样方内用土钻采集 0—20 cm 土壤样品(共 30 个样方),3 钻土壤样品混合带回实验室,风干后过 1mm 土壤筛备用。土壤样品经浓 H_2SO_4 和混合加速剂(Na_2SO_4-$CuSO_4$-Se, 质量之比 100∶10∶1)消煮后,用凯氏定氮法测定土壤全氮。土壤有机碳用重铬酸钾容量外加热法测定; 土壤全磷用钼锑抗比色法; 速效磷用碳酸氢钠浸提—钼锑抗比色法; 土壤全钾用 NaOH 碱熔—火焰光度计法; 土壤速效钾用 NH_4OAc 浸提—火焰光度计法测定。

1.4 数据处理

试验数据采用 SPSS 15.0 软件进行统计分析,用 one-way ANOVA 进行方差分析,最小显著差异法(LSD)比较不同处理间的差异显著性,用 Pearson 相关系数分析植物多样性、生物量与土壤养分的相关关系。

2 结果与分析

2.1 植物多样性

放牧对荒漠草原植物群落多样性、均匀度和丰富度影响显著(表 1)。放牧草地(重度、中度和轻度放牧)物种丰富度比围封禁牧均有所下降,中度放牧物种丰富度显著低于围封禁牧。随放牧强度的增加植物多样性和均匀度均呈先增加后降低的趋势,轻度放牧达到最大值。中度放牧物种多样性、均匀度和丰富度均略低于重度放牧,但与重度放牧的物种多样性、均匀度和丰富度无显著差异。随着放牧强度的增加,优良牧草比例下降,毒杂草类群比例增高(图 1)。中度和轻度放牧的优良牧草(禾本科和豆科植物)比例分别是重度放牧的 1.39 和 1.43 倍,毒杂草类比例分别是重度放牧的 80% 和 44%。

表 1　放牧对荒漠草原植物群落多样性指数的影响

Table 1　Effect of grazing on plant diversity in desert steppe

处理 Treatment	Shannon-Wiener 指数 Shannon-Wiener index	丰富度指数 Richness index	均匀度指数 Evenness index
重度放牧 HG	1.79 ±0.24 b	21.3 ±0.6 ab	0.58 ±0.07 b
中度放牧 MG	1.62 ±0.08 b	19.7 ±0.6 b	0.54 ±0.03 b
轻度放牧 LG	2.41 ±0.18 a	23.3 ±1.5 a	0.77 ±0.07 a
围封禁牧 CK	1.94 ±0.23 b	24.0 ±2.6 a	0.61 ±0.08 b

注(Note): HG—Heavy grazing; MG—Moderate grazing; LG—Light grazing; CK—Ungrazed plots. 同列数据后不同小写字母表示不同放牧强度间差异达到 5% 显著水平 Different small letters in the same column indicate significant differences under different grazing intensity at the 5% level.

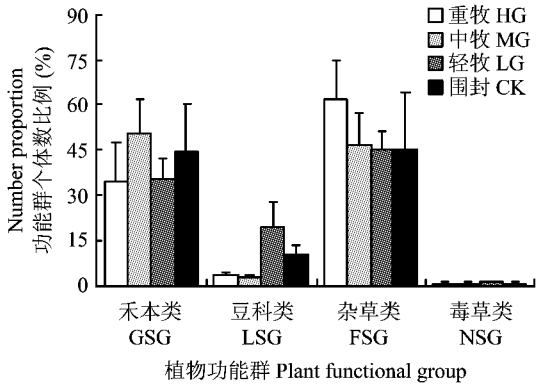

图1 植物群落功能群个体数比例对放牧的响应

Fig. 1 Response of mean number proportion for four plant functional groups (PFG) to grazing in desert steppe communities

[注(Note): GSG—Germinal species group; LSG—Leguminous species group; FSG—Forbs species group; NSG—Noxious species group; HG—Heavy grazing; MG—Moderate grazing; LG—Light grazing; CK—Ungrazed plots]

2.2 植物生物量

放牧对荒漠草原植物群落地上生物量和地下生物量影响显著(图2)。植物地上生物量和地下生物量随着放牧强度的增加呈下降趋势,同围封禁牧相比,放牧草地(重度、中度和轻度)的植物群落地上和地下生物量均显著降低($P<0.01$)。重度、中度和轻度放牧植物群落地上生物量比围封禁牧分别降低43.8%、42.0%和15.4%,地下生物量比围封禁牧分别降低27.7%、16.2%和11.9%。重度和中度放牧植物地上部生物量差异不显著,而中度和轻度放牧植物地下生物量差异不显著。

2.3 土壤养分

放牧对荒漠草原土壤有机碳、全氮、全磷、速效磷和速效钾的影响显著,而对土壤全钾无显著影响(表2)。土壤有机碳随着放牧强度的增加而降低,围封禁牧、轻度放牧土壤有机碳均显著高于重度和中度放牧,是重度和中度放牧土壤有机碳的1.2倍。围封禁牧和轻度放牧,重度和中度放牧土壤有机碳均无显著差异。土壤全氮含量随着放牧强度的增加呈先增加后降低趋势,轻度放牧土壤全氮显著高于重度、中度放牧和围封禁牧。土壤全磷、速效磷和全钾含量随着放牧强度的增加而增加,围封禁牧土壤速效磷含量显著低于放牧草地(重度、中度和轻度放牧),而围封禁牧土壤全磷和全钾含量显著低于重度放牧,与中度、轻度放牧差异不显著。土壤速效钾含量随着放牧强度的增加呈先增加后降低趋势,围封禁牧土壤速效钾含量显著低于轻度放牧,与重度、中度放牧差异不显著。

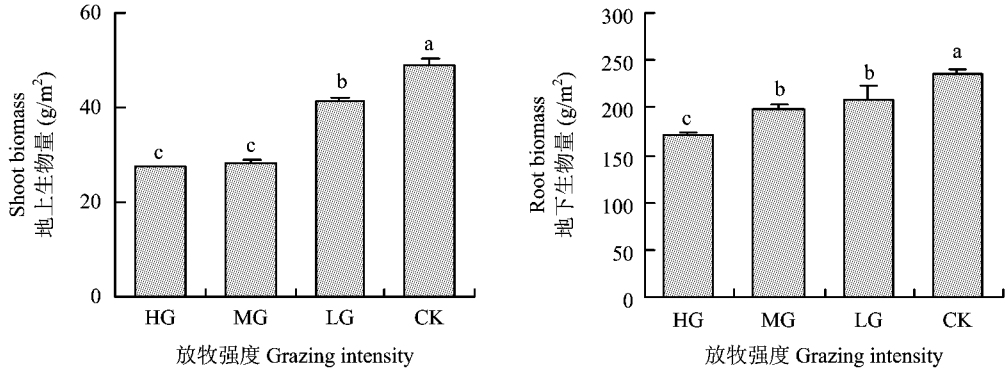

图2 放牧对荒漠草原植物生物量的影响

Fig. 2 Effect of grazing on plant biomass in desert steppe

[注(Note): HG—Heavy grazing; MG—Moderate grazing; LG—Light grazing; CK—Ungrazed plots. 图中柱上的不同字母表示不同放牧强度间差异达到5%显著水平 Different letters above the bars indicate significant differences under different grazing intensity at the 5% level.]

2.4 植物多样性、生物量与土壤养分的关系

荒漠草原植物群落多样性、生物量与土壤养分的相关性(表3)表明,群落地上生物量对土壤有机碳、全氮具有正效应,而对土壤全磷、全钾、速效磷和速效钾具有负效应。地下生物量对土壤有机碳、全氮、全磷、全钾和速效磷具有负效应,而对土壤速效钾具有正效应。植物地上生物量与土壤有机碳、全磷、全钾和速效磷相关性显著,而植物地下生物量与土壤有机碳、全氮相关性显著。植物多样性对土壤有机碳、全氮、全磷、全钾和速效钾具有正效应,而对土壤速效磷具有负效应。植物多样性指数与土壤有机碳、全氮和植物地上生物量呈显著

正相关,与地下生物量呈显著负相关。植物地上生物量与地下生物量的负相关性不显著。土壤有机碳与土壤全氮、全磷含量呈显著正相关,而与土壤全钾、速效磷和速效钾的相关性不显著。

表 2　放牧对荒漠草原土壤养分特征的影响

Table 2　Effect of grazing on soil nutrient characteristics in desert steppe

处理 Treatment	有机碳 Organic carbon (g/kg)	全氮 Total N (g/kg)	全磷 Total P (g/kg)	速效磷 Available P (mg/kg)	全钾 Total K (g/kg)	速效钾 Available K (mg/kg)
重度放牧 HG	2.49 ±0.13 b	0.44 ±0.01 b	0.38 ±0.02 a	3.10 ±0.08 a	20.53 ±0.70 a	99.4 ±6.4 ab
中度放牧 MG	2.52 ±0.07 b	0.45 ±0.02 b	0.33 ±0.05 ab	2.11 ±0.29 b	19.41 ±0.80 ab	94.9 ±5.4 b
轻度放牧 LG	2.90 ±0.21 a	0.50 ±0.01 a	0.32 ±0.01 b	2.09 ±0.15 b	19.38 ±1.20 ab	106.0 ±4.1 a
围封禁牧 CK	2.94 ±0.11 a	0.39 ±0.04 c	0.30 ±0.01 b	1.49 ±0.17 c	18.28 ±0.90 b	90.6 ±0.2 b

注(Note): HG—Heavy grazing; MG—Moderate grazing; LG—Light grazing; CK—Ungrazed plots. 同列数据后不同小写字母表示不同放牧强度间差异达到5%显著水平 Different small letters in the same column indicate significant differences under different grazing intensity at the 5% level.

表 3　放牧干扰下荒漠草原植物多样性、生物量与土壤养分的相关系数

Table 3　Coefficients between plant diversity, community biomass and soil nutrients under grazing disturbance in desert steppe

项目 Item	有机碳 SOC	全氮 Total N	全磷 Total P	全钾 Total K	速效磷 Avail. P	速效钾 Avail. K	地上生物量 Aboveground biomass	地下生物量 Belowground biomass	Shannon-Wiener index
有机碳 SOC	1								
全氮 Total N	0.59**	1							
全磷 Total P	0.19*	0.22*	1						
全钾 Total K	-0.06	0.29**	0.16	1					
速效磷 Avail. P	0.03	0.28**	0.54**	0.30**	1				
速效钾 Avail. K	-0.05	0.04	-0.12	0.12	0.03	1			
地上生物量 Aboveground biomass	0.44**	0.06	-0.19*	-0.33**	-0.32**	-0.01	1		
地下生物量 Belowground biomass	-0.30**	-0.42**	-0.01	-0.15	-0.03	0.12	-0.12	1	
Shannon-Wiener index	0.27**	0.29**	0.08	0.05	-0.13	0.07	0.21*	-0.25**	1

注(Note): * $P<0.05$; ** $P<0.01$

3　讨论

放牧通过动物的采食、践踏及排泄物的输入直接或间接对草地生态系统产生影响,从而影响草地生态系统的物质生产和能量分配,间接改变草地群落结构、物种多样性、生物量等[25]。放牧强度对青藏高原高寒草甸、灌丛草甸植物群落特征研究表明,随着放牧强度的增加,高寒草甸、灌丛草甸群落植物地上生物量呈显著降低趋势[8,26]。内蒙古典型草原、沙质草地植物地下生物量随着放牧强度的增加呈下降趋势[6-7],而小嵩草草甸植物地下生物量随着放牧强度的增加而增加[9]。本研究中荒漠草原植物地上、地下生物量均随着放牧强度的增加而呈下降趋势,与赵哈林等[6]、王艳芬等[7]和仁青吉[8]等的研究结果一致。植物地下生物量随着放牧强度增加而增加的可能原因是植物对干扰的适应

对策,植物为防止被采食而导致大量资源的损失,对根的资源分配增大,以减少牲畜采食面积,资源优先分配给贮藏器官[27]。内蒙古典型草原、青藏高原蒿草草甸围封样地植物地上生物量显著高于放牧样地[5,28]。本研究中围封禁牧植物地上、地下生物量显著高于各放牧强度,放牧显著降低了植物地上、地下生物量。围封措施通过排除家畜的践踏、采食,从而使退化草地植被得到明显的恢复,草地群落生物量增加。

植物群落结构和多样性的变化由放牧家畜选择性采食、不同植物对放牧响应的策略、植物种间的竞争、动植物协同进化以及放牧改变的土壤理化性质等综合因素影响[27]。中度水平的家畜放牧使矮草混生草原和矮草草原的植物多样性增多[29-30]。草甸草原植物多样性随放牧强度的增加表现为先增加后降低的趋势,其值在轻度放牧区最大[31]。而羊草草甸草原[32]和东北样带草地群落[33]放牧干扰对植物多样性的影响表明,群落在中度放牧强度条件下能够维持较高的多样性。本研究结果表明,随放牧强度的增加,植物群落多样性呈先增加后降低的趋势,在轻度放牧达到了最大值,与王明君等[31]的研究结果一致。轻度放牧或中度放牧增加物种的多样性,反映出放牧对草原群落影响的公认结论为适当的放牧使草原群落资源丰富度和复杂程度增加,维持草原植物群落的稳定[34]。因草地类型的差异,中度放牧干扰对不同的草地群落类型,特指不同的放牧退化阶段,东北样带草地群落生境较脆弱的湿润草甸,特别是有次生盐碱化威胁的类型,植物多样性最大值出现在轻牧至中牧阶段,而较干旱的针茅草原耐牧性较强,出现在中牧至重牧阶段。本研究中围封禁牧的植物多样性低于轻度放牧,与孟旭辉[32]等的研究结果基本一致。围封禁牧的植物再生性低于适度放牧,其物种多样性略低于适度放牧。

放牧对草地土壤理化性质的影响较为复杂,并非简单的线性关系。随着放牧强度的增加,家畜啃食量加大,减少了凋落物或死亡地被物的分解,进而减少了土壤中的养分含量。而放牧强度高的草地,家畜又会排泄更多的粪尿,能够增加土壤中养分含量。由于土壤养分在输入输出以及动态转化过程中的复杂性,关于放牧强度对土壤养分含量影响的研究结果不尽一致。高山沼泽草甸和科尔沁沙漠化草地围封禁牧的土壤有机碳高于长期放牧[19-20],而矮草草原轻度放牧土壤有机碳与围封禁牧差异不显著[17]。本研究中草地土壤有机碳随着放牧强度增加呈下降趋势,围封禁牧的土壤有机碳高于各放牧强度,这与 Sun 等[23]的研究结果相同。高寒草甸土壤全氮随着放牧强度的增加而下降[13],而江源等[35]研究表明,随着放牧强度的增加,土壤全氮含量呈先下降后上升的非线性变化,在极度退化草甸下达到最大值。本研究结果显示,草地土壤全氮含量随着放牧强度的增加呈先增加后降低趋势,轻度放牧达到最大值。放牧对草地土壤养分影响的研究结果不尽一致的主要原因为:草地土壤系统有滞后性和弹性,气候、地形、土壤性质、植物组成、放牧动物类型、放牧历史等因素均影响土壤的化学性质;适牧、重牧和过牧的定性指标不能进行定量比较。土壤与植被之间存在着土壤格局制约植被分布,植被分布反过来影响土壤特性的相互关系。放牧退化草地植物群落多样性、生物量与土壤养分变化密切相关。放牧干扰下高寒草甸植物地上、地下生物量与有机质和全氮呈正相关[13]。本研究中荒漠草原植物地上生物量与土壤有机碳和全氮含量呈正相关,与全磷、全钾和速效磷呈显著负相关。地下生物量与土壤有机碳与全氮呈显著负相关,与土壤全磷、全钾和速效磷的负相关性不显著。放牧干扰下荒漠草原土壤有机碳、全氮的变化能在一定程度上反映植物群落多样性和生物量变化。

4 结论

1)随着放牧强度的增加,荒漠草原植物地上、地下生物量呈下降趋势,而植物群落多样性呈先增加后降低的趋势,在轻度放牧达到了最大值。围封禁牧的植物地上、地下生物量显著高于重度、中度和轻度放牧;围封禁牧植物地上、地下生物量分别是重度、中度和轻度放牧的 1.8、1.7、1.2 倍和 1.4、1.2、1.1 倍。轻度放牧植物的 Shannon-Wiener 指数、丰富度指数和均匀度指数均显著高于其他处理,各放牧处理间植物群落特征差异程度不同。

2)土壤有机碳随着放牧强度的增加呈下降趋势,土壤全磷、速效磷和全钾含量呈增加趋势,而土壤全氮和速效钾含量呈先增加后下降趋势。围封禁牧、轻度放牧土壤有机碳是重度和中度放牧的 1.2 倍。不同放牧处理土壤养分特性具有明显的差异。

参 考 文 献:

[1] Diaz S, Lavorel S, Mcintyre S *et al*. Plant trait responses to grazing—a global synthesis[J]. Global Change Biol., 2006, 12: 1-29.

[2] 袁建立, 江小蕾, 黄文冰, 王刚. 放牧季节及放牧强度对高寒草地植物多样性的影响[J]. 草业学报, 2004, 13(3): 16-21.
Yuan J L, Jiang X L, Huang W B, Wang G. Effects of grazing intensity and grazing season on plant species diversity in alpine meadow[J]. Acta Pratac. Sci., 2004, 13(3): 16-21.

[3] 刘振国, 李镇清. 退化草原冷蒿群落 13 年不同放牧强度后的植物多样性[J]. 生态学报, 2006, 26(2): 475-482.
Liu Z G, Li Z Q. Plant biodiversity of *Aretemisia frigida* communities on degraded grasslands under different grazing intensities after thirteen-year enclosure[J]. Acta Ecol. Sin., 2006, 26(2): 475-482.

[4] 赵哈林, 张铜会, 赵学勇, 周瑞莲. 放牧对沙质草地生态系统组分的影响[J]. 应用生态学报, 2004, 15(3): 420-424.
Zhao H L, Zhang T H, Zhao X Y, Zhou R L. Effect of grazing on sandy grassland ecosystem in Inner Mongolia[J]. Chin. J. Appl. Ecol., 2004, 15(3): 420-424.

[5] Wu G L, Du G Z, Liu Z H, Thirgood S. Effect of fencing and grazing on a Kobresia-dominated meadow in the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. Plant Soil, 2009, 319(1): 115-126.

[6] 赵哈林, 赵学勇, 张铜会, 周瑞莲. 放牧胁迫下沙质草地植被的受损过程[J]. 生态学报, 2003, 23(8): 1505-1511.
Zhao H L, Zhao X Y, Zhang T H, Zhou R L. Study on damaged process of the vegetation under grazing stress in sandy grassland[J]. Acta Ecol. Sin., 2003, 23(8): 1505-1511.

[7] 王艳芬, 汪诗平. 不同放牧率对内蒙古典型草原地下生物量的影响[J]. 草地学报, 1999, 7(3): 198-203.
Wang Y F, Wang S P. Influence of different stocking rates on belowground biomass in Inner Mongolia steppe[J]. Acta Agrestia Sin., 1999, 7(3): 198-203.

[8] 仁青吉, 武高林, 任国华. 放牧强度对青藏高原东部高寒草甸植物群落特征的影响[J]. 草业学报, 2009, 18(5): 256-261.
Ren Q J, Wu G L, Ren G H. Effect of grazing intensity on characteristics of alpine meadow communities in the eastern Qinghai-Tibetan Plateau[J]. Pratac. Sci., 2009, 18(5): 256-261.

[9] 王启兰, 曹广民, 王长庭. 放牧对小嵩草草甸土壤酶活性及土壤环境因素的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2007, 13(5): 856-864.
Wang Q L, Cao G M, Wang C T. The impact of grazing on the activities of soil enzymes and soil environmental factors in alpine *Kobresia pygmaea* meadow[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2007, 13(5): 856-864.

[10] Krzic M, Broersma K, Thompson D J, Bomke A A. Soil properties and species diversity of grazed crested wheatgrass and native rangelands[J]. J. Range Manage., 2000, 53(3): 353-358.

[11] Han G D, Hao X Y, Zhao M L *et al*. Effect of grazing intensity on carbon and nitrogen in soil and vegetation in a meadow steppe in Inner Mongolia[J]. Agric. Ecosyst. Environ., 2008, 125(1): 21-32.

[12] Pei S F, Fu H, Wan C G. Changes in soil properties and vegetation following exclosure and grazing in degraded Alxa desert steppe of Inner Mongolia, China[J]. Agric. Ecosyst. Environ., 2008, 124(1): 33-39.

[13] 王长庭, 龙瑞军, 王启兰, 等. 放牧扰动下高寒草甸植物多样性, 生产力对土壤养分条件变化的响应[J]. 生态学报, 2008, 28(9): 4144-4152.
Wang C T, Long R J, Wang Q L *et al*. Response of plant diversity and productivity to soil resources changing under grazing disturbance on an alpine meadow[J]. Acta Ecol. Sin., 2008, 28(9): 4144-4152.

[14] Abril A, Bucher E H. The effects of overgrazing on soil microbial community and fertility in the Chaco dry savannas of Argentina[J]. Appl. Soil Ecol., 1999, 12(2): 159-167.

[15] 戎郁萍, 韩建国, 王培, 毛培胜. 放牧强度对草地土壤理化性质的影响[J]. 中国草地, 2001, 23(4): 41-47.
Rong Y P, Han J G, Wang P, Mao P S. The effects of grazing intensity on soil physics and chemical properties[J]. Grassl. China, 2001, 23(4): 41-47.

[16] Holt J A. Grazing pressure and soil carbon, microbial biomass and enzyme activities in semi-arid northeastern Australia[J]. Appl. Soil Ecol., 1997, 5(2): 143-149.

[17] Reeder J D, Schuman G E, Morgan J A, Lecain D R. Response of organic and inorganic carbon and nitrogen to long-term grazing of the shortgrass steppe[J]. Environ. Manag., 2004, 33(4): 485-495.

[18] 王艳芬, 陈佐忠, Tieszen L T. 人类活动对锡林郭勒地区主要草原土壤有机碳分布的影响[J]. 植物生态学报, 1998, 22(6): 545-551.
Wang Y F, Chen Z Z, Tieszen L T. Distribution of soil organic carbon in the major grasslands of Xilinguole, Inner Mongolia, China[J]. Chin. J. Plant Ecol., 1998, 22(6): 545-551.

[19] Wu G L, Liu Z H, Zhang L *et al*. Long-term fencing improved soil properties and soil organic carbon storage in an alpine swamp meadow of western China[J]. Plant Soil, 2010, 332(1): 331-337.

[20] 陈银萍, 李玉强, 赵学勇, 等. 放牧与围封对沙漠化草地土壤轻组及全土碳氮储量的影响[J]. 水土保持学报, 2010, 24(4): 182-186.
Chen Y P, Li Y Q, Zhao X Y *et al*. Light fraction and total organic carbon and nitrogen stores in desertified sandy grassland soil as affected by grazing and livestock exclusion[J]. J. Soil Water Conserv., 2010, 24(4): 182-186.

[21] 王玉辉, 何兴元, 周广胜. 放牧强度对羊草草原的影响[J].

草地学报, 2002, 10(1): 45-49.
Wang Y H, He X Y, Zhou G S. Study on the responses of *Leymus chinensis* steppe to grazing in Songnen plain[J]. Acta Agrestia Sin., 2002, 10(1): 45-49.

[22] Wang Y H, Zhou G S, Jia B R. Modeling SOC and NPP responses of meadow steppe to different grazing intensities in Northeast China[J]. Ecol. Model, 2008, 217(1): 72-78.

[23] Sun D S, Wesche K, Chen D D *et al*. Grazing depresses soil carbon storage through changing plant biomass and composition in a Tibetan alpine meadow[J]. Plant Soil Environ, 2011, 57(6): 271-278.

[24] 任继周. 草业科学研究方法[M]. 北京: 中国农业出版社, 1998.
Re J Z. Research method of grass sicence[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1998.

[25] 仁青吉, 崔现亮, 赵彬彬. 放牧对高寒草甸植物群落结构及生产力的影响[J]. 草业学报, 2008, 17(6): 134-140.
Ren Q J, Cui X L, Zhao B B. Effects of grazing impact on community structure and productivity in an alpine meadow[J]. Acta Pratac. Sci., 2008, 17(6): 134-140.

[26] Zhou H K, Tang Y H, Zhao X Q, Zhou L. Long-term grazing alters species composition and biomass of a shrub meadow on the Qinghai-Tibet Plateau[J]. Pakistan J. Bot., 2006, 38(4): 1055-1069.

[27] 马银山, 张世挺. 植物从个体到群落水平对放牧的响应[J]. 生态学杂志, 2009, 28(1): 113-121.
Ma Y S, Zhang S T. Responses of plant from individual to community level to grazing[J]. Chin. J. Ecol., 2009, 28(1): 113-121.

[28] 任海彦, 郑淑霞, 白永飞. 放牧对内蒙古锡林河流域草地群落植物茎叶生物量资源分配的影响[J]. 植物生态学报, 2009, 33(6): 1065-1074.
Ren H Y, Zheng S X, Bai Y F. Effects of grazing on foliage biomass allocation of grassland communities in Xilin River Basin, Inner Mongolia[J]. Chin. J. Plant Ecol., 2009, 33(6): 1065-1074.

[29] Biondini M E, Patton B D, Nyren P E. Grazing intensity and ecosystem processes in a northern mixed-grass prairie, USA[J]. Ecol. Appl., 1998, 8(2): 469-479.

[30] Hart R H. Plant biodiversity on shortgrass steppe after 55 years of zero, light, moderate, or heavy cattle grazing[J]. Plant Ecol., 2001, 155(1): 111-118.

[31] 王明君, 韩国栋, 崔国文. 放牧强度对草甸草原生产力和多样性的影响[J]. 生态学杂志, 2010, 29(5): 862-868.
Wang M J, Han G D, Cui G W. Effects of grazing intensity on the biodiversity and productivity of meadow steppe[J]. Chin. J. Ecol., 2010, 29(5): 862-868.

[32] 蒙旭辉, 李向林, 辛晓平, 周尧治. 不同放牧强度下羊草草甸草原群落特征及多样性分析[J]. 草地学报, 2009, 17(2): 239-244.
Meng X H, Li X L, Xin X P, Zhou Y Z. Study on community characteristics and α diversity under different grazing intensity on *Leymus chinensis* (Trin.) Tzvel. meadow steppe of Hulunbeier[J]. Acta Agrestia Sin., 2009, 17(2): 239-244.

[33] 杨利民, 韩梅, 李建东. 中国东北样带草地群落放牧干扰植物多样性的变化[J]. 植物生态学报, 2001, 25(1): 110-114.
Yang L M, Han M, Li J D. Plant diversity change in grassland communities along a grazing disturance gradient in the Northeast China transect[J]. Chin. J. Plant Ecol., 2001, 25(1): 110-114.

[34] 李金花, 李镇清, 任继周. 放牧对草原植物的影响[J]. 草业学报, 2002, 11(1): 4-11.
Li J H, Li Z Q, Ren J Z. The effects of grazing on grassland plants[J]. Acta Pratac. Sci., 2002, 11(1): 4-11.

[35] 江源, 章异平, 杨艳刚, 等. 放牧对五台山高山、亚高山草甸植被-土壤系统耦合的影响[J]. 生态学报, 2010, 30(4): 837-846.
Jiang Y, Zhang Y P, Yang Y G *et al*. Impacts of grazing on the system coupling between vegetation and soil in the alpine and subalpine meadows of Wutai Mountain[J]. Acta Ecol. Sin., 2010, 30(4): 837-846.