

基于meta分析的放牧压力对内蒙古高原草地生态系统的影响

詹天宇, 孙建, 张振超, 刘某承

引用本文:

詹天宇, 孙建, 张振超, 等. 基于meta分析的放牧压力对内蒙古高原草地生态系统的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2020, 28(12): 1847–1858.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.200383>

(向下翻页, 阅读全文)

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

典型喀斯特洼地植被恢复过程中土壤碳氮储量动态及其对极端内涝灾害的响应

Soil carbon and nitrogen dynamics during vegetation restoration and their responses to extreme water-logging disasters in a typical karst depression

中国生态农业学报(中英文). 2020, 28(3): 429–437 <https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.190711>

土壤氮素内循环对生态覆被变化响应的研究进展

Research progress on soil nitrogen internal cycling response to ecological cover change

中国生态农业学报(中英文). 2020, 28(10): 1543–1550 <https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.190908>

基于3S技术的绵羊牧食行为与草地环境相互作用研究

Analysis of sheep grazing behavior and interaction with grassland environment in desert steppes using 3S

中国生态农业学报. 2015(7): 860–867 <https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.141364>

马铃薯||玉米间作对土壤细菌多样性的影响

Effects of potato intercropped with maize on soil bacterial diversity

中国生态农业学报(中英文). 2020, 28(11): 1715–1725 <https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.200240>

基于农牧户视角的荒漠化治理中退牧还草技术综合评价——以内蒙古鄂托克旗为例

Comprehensive evaluation of returning grazing lands to grasslands in a desertification control area based on the perspectives of farmers and herdsmen: A case study of Etoke Banner, Inner Mongolia

中国生态农业学报(中英文). 2020, 28(1): 147–158 <https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.190788>

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.200383

詹天宇, 孙建, 张振超, 刘某承. 基于 meta 分析的放牧压力对内蒙古高原草地生态系统的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2020, 28(12): 1847-1858

ZHAN T Y, SUN J, ZHANG Z C, LIU M C. Effects of grazing on temperate grassland ecosystem based on a meta-analysis[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2020, 28(12): 1847-1858

基于 meta 分析的放牧压力对内蒙古高原草地生态系统的影 响*

詹天宇^{1,2,3}, 孙 建^{1,2**}, 张振超^{1,2}, 刘某承²

(1. 生态系统研究网络综合研究中心/生态网络观测与模拟重点实验室 北京 100101; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所 北京 100101; 3. 北京师范大学地理科学学部陆地表层系统科学与可持续发展研究院 北京 100875)

摘 要: 放牧是最主要的草地利用模式, 直接或间接地影响草地物质循环和能量流动, 放牧强度对草地的健康状况和演替方向起决定作用。本文基于 40 篇内蒙古草原放牧相关文献数据, 通过 meta 分析探讨温带草原对放牧强度的响应特征。结果表明, 与未放牧草地相比, 轻度放牧草地对群落植物地上、地下生物量和土壤全氮和全磷含量无显著影响, 而土壤有机碳、微生物生物量碳、细菌和真菌数量分别显著上升 3.60%、7.80%、11.40%和 10.83%($P<0.05$); 中度放牧下群落植物地下生物量和土壤微生物数量无显著变化, 而地上生物量和土壤有机碳、全氮、全磷和微生物生物量氮含量分别显著降低 21.62%、4.44%、2.15%、8.35%和 6.76%($P<0.05$); 重度放牧下群落植物地上和地下生物量, 土壤有机碳、全氮、全磷、微生物生物量碳含量, 细菌和放线菌数量分别显著下降 39.72%、16.30%、7.62%、6.46%、8.03%、8.76%、12.92%和 18.27% ($P<0.05$)。以上结果表明轻度放牧有利于土壤肥力和草地生产力的保持和提升, 而当放牧干扰超出一定的限度时, 草地各项功能均显著下降而发生退化。本研究可为内蒙古温带草原的合理利用和适应性管理提供理论基础。

关键词: meta 分析; 温带草原; 放牧强度; 草地生产力; 土壤养分; 土壤微生物

中图分类号: S812.6

开放科学码(资源服务)标识码(OSID):



Effects of grazing on temperate grassland ecosystem based on a meta-analysis*

ZHAN Tianyu^{1,2,3}, SUN Jian^{1,2**}, ZHANG Zhenchao^{1,2}, LIU Moucheng²

(1. Synthesis Research Centre of Chinese Ecosystem Research Network / Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modelling, Beijing 100101, China; 2. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 3. Institute of Land Surface System and Sustainable Development, Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: The temperate semi-arid grassland in Inner Mongolia is primarily used for grazing, which directly and indirectly affects material circulation and energy flow. Grazing intensity plays a decisive role in the health status and direction of grassland succession. Data from 40 studies about Inner Mongolia grassland grazing intensity were analyzed via a meta-analysis. The results showed that compared to the non-grazing grassland, light grazing did not affect the above- and below-ground biomass, soil total nitrogen, and

* 国家重点研发计划项目(2017YFC0506402)资助

** 通信作者: 孙建, 主要从事高原植被地理研究。E-mail: sunjian@igsrr.ac.cn

詹天宇, 主要从事高原生态学研究。E-mail: zty5327@163.com

收稿日期: 2020-05-22 接受日期: 2020-06-23

* This study was supported by the National Key Research and Development Project of China (2017YFC0506402).

** Corresponding author, E-mail: sunjian@igsrr.ac.cn

Received May 22, 2020; accepted Jun. 23, 2020

total phosphorus, but significantly increased ($P < 0.05$) the soil organic carbon (3.60%), microbial carbon (7.80%), bacteria (11.40%), and fungi (10.83%). Moderate grazing did not affect the below-ground biomass and the number of microorganisms, but significantly reduced ($P < 0.05$) the above-ground biomass (21.62%), soil organic carbon (4.44%), total nitrogen (2.15%), total phosphorus (8.35%), and microbial biomass nitrogen (6.76%). Heavy grazing significantly decreased ($P < 0.05$) the above- and below-ground biomass (39.72% and 16.30%, respectively), soil organic carbon (7.62%), total nitrogen (6.46%), total phosphorus (8.03%), microbial biomass carbon (8.76%), bacteria (12.92%), and actinomyces (18.27%). These findings suggest that light grazing benefits soil fertility and grassland productivity; however, the grassland ecosystem's functional capacity weakens once the grazing intensity exceeds a certain threshold. This information is useful for adapting management strategies to prevent grassland degradation.

Keywords: Meta-analysis; Temperate grasslands; Grazing intensity; Grassland productivity; Soil nutrient; Soil microorganism

放牧是中国温带典型草原的主要扰动因素之一, 作为人类对草地生态系统管理和利用的主要手段, 也是影响草地群落结构和功能的最主要人为干扰方式^[1]。放牧影响土壤属性, 改变了碳(C)和氮(N)循环^[2], 进而影响生态系统功能。目前, 对放牧的研究多侧重于草原生态系统碳储量动态变化^[3]、植被群落生物多样性和功能群^[4]、土壤水分空间异质性^[5]等。研究表明, 随着放牧压力的增大, 草原地上生物量和植被多样性逐渐降低, 土壤养分周转加速和土壤肥力的下降也和放牧行为息息相关^[6-8]。另外, 中度干扰假说理论^[9-11]提出适度放牧对草地生态系统的可持续发展具有积极作用。在中度放牧压力下草地的净初级生产力根系生物量和草地植物群落多样性反而最高。有关放牧对土壤有机碳影响的报道也存在争议。例如, 对草地碳库的研究表明, 放牧可以对土壤碳产生中性^[12]、积极^[13]或消极^[14]的影响。放牧对土壤碳反应的差异可能反映了气候、土壤固有特性、植物群落组成和放牧管理措施的差异^[15]。植物通过输入碳和有机物分解过程中呼吸作用造成碳损失来平衡生态系统中土壤碳储量^[16]。此外, 过去的研究强调了当代畜牧业管理下草地群落组合和植物生产力变化的潜力^[17-18]。由于气候、土壤性质和优势植被的区域差异, 以及放牧活动和植物种类等干扰因素, 草地土壤碳可能在空间上也发生变化^[19]。另外, 土壤微生物群落在土壤生态系统功能和土壤生物地球化学中起着关键作用^[20], 它调节生态系统的能量和物质流动, 改变土壤的生物地球化学性质。同时, 它在结构和活动水平上受到环境变化的影响^[21]。越来越多的研究探讨了微生物群落的变化如何影响生态系统过程的稳定性和质量^[22], 以及地上植被的生物多样性和生产力^[23]。

内蒙古温带草原不但是重要的生态屏障, 也是我国畜牧业重要生产基地之一^[24]。此外, 内蒙古草地面积大, 且畜牧业生产应用广泛, 了解放牧对草地碳过程及相关生物地球化学循环的影响具有重要

意义。目前, 有关放牧在大尺度上影响植被-土壤系统和微生物的研究尚不完善, 从区域尺度上了解不同放牧压力对植被生产力、土壤碳氮和微生物的影响, 以及土壤养分的循环机制非常必要。因此, 本文利用 meta 分析探索不同放牧压力下温带草原植被生产力、土壤养分和微生物的变化, 探究相关指标相互关系, 旨在为温带草原的放牧管理生态保护及恢复提供科学依据。

1 研究区域概况与研究方法

1.1 研究区域概况

内蒙古(37°25'~53°23'N, 97°13'~126°04'E)位于中国北部地区, 草地面积 8 666.7 万 hm^2 , 是该区面积最大的生态系统类型, 占全国草地面积的 1/4 以上, 主要分布于大兴安岭以西, 阴山、贺兰山以北的内蒙古高原及其边缘地带的丘陵山地及鄂尔多斯高原, 是我国北方重要的草地资源和国土的绿色屏障^[25]。内蒙古地区草原主要以温带草原为主, 常见的植物群落有羊草(*Leymus chinensis*)群落、针茅(*Stipa capillata*)群落、糙隐子草(*Cleistogenes squarrosa*)群落、落草(*Koeleria cristata*)群落和冷蒿(*Artemisia frigida*)群落等^[26]。该地区属于典型的温带半干旱大陆性季风气候, 年均气温 1.1 $^{\circ}\text{C}$, 最冷月份(1 月)平均气温低至 -21.4 $^{\circ}\text{C}$, 最热月份(7 月)平均温度为 19.0 $^{\circ}\text{C}$, 年均降雨量 333.5 mm^[27]。土壤类型主要为石灰性栗钙土, 肥力较差。生态系统稳定性小, 脆弱程度较高, 本身隐含着极大的潜在退化倾向和危险, 一旦人为利用不当, 极易导致植物群落的衰退, 风蚀与水蚀加剧, 土地荒漠化, 从而导致生态系统不平衡。

1.2 数据获取

利用 Web of Science 和中国知网学术期刊, 分别以主题词“grazing & grassland”和“放牧&草原”检索文献, 并设置筛选标准如下: 1) 试验数据基于内蒙古草原生态系统放牧条件的野外试验; 2) 试验包括放牧和

对照, 以及放牧强度的描述; 3) 试验数据包含草地植被生物量、土壤因子(0~30 cm)和微生物因子, 同时以放牧和禁牧的平均值、标准偏差(SD)或标准误差(SE)格式整理。最后共收集 40 篇有效文献(表 1)。

文献汇总数据具体指标如下: 植物群落数据包含地上生物量(AGB)、地下生物量(BGB)、植被盖度、物种均匀度(E)和物种丰富度(R), 土壤数据库包括土壤容重(SBD)、含水量(SWC)、有机质(SOC)含量、全氮(TN)含量及全磷(TP)含量, 土壤微生物库包括微生物生物量碳(MBC)、微生物生物量氮(MBN)、

细菌、真菌和放线菌。同时, 记录试验样点位置信息经度、纬度、海拔以及气象因子年平均温度(MAT)、年均降雨量(mm)。当研究点没有给出年平均温度和年平均降雨信息时, 根据研究点的经纬度, 通过使用全球气候数据库(<http://www.worldclim.org/>)进行补充。

根据牧草利用率(%), 食草动物数($\cdot\text{hm}^{-2}$)和水源距离, 将放牧强度分为 4 个梯度, 分别是未放牧(NG)、轻度放牧(LG)、中度放牧(MG)和重度放牧草地(HG)(表 2)。

表 1 文献内相关数据
Table 1 Data in the literatures

文献题目 Title of literature	经度 Longitude	纬度 Latitude	海拔 Altitude (m)	年平均温度 Mean annual temperature ($^{\circ}$)	年均降雨 Mean annual precipitation (mm)	年份 Year
不同放牧率对冷蒿小禾草草原土壤微生物数量和生物量的影响 Effect of stocking rates on soil microbial number and biomass in steppe	116°42'00"	43°38'00"	1 187	0.75	350	1999
放牧和补播对草地土壤有机碳和微生物量碳的影响 Effects of grassland managements on soil organic carbon and microbial biomass carbon	115°16'00"	43°02'00"	1 225	1.0	350	2014
放牧对冷蒿根际微生物区系及土壤酶活性的影响 Effects of grazing intensity on soil microbial flora and soil enzyme activities in the <i>Artemisia frigida</i> rhizosphere	116°28'56.8"	44°10'02.4"	1 160	2.6	365.6	2017
不同放牧梯度下草甸草原土壤微生物和酶活性研究 Changes in microorganisms and enzyme activities in soil under different grazing intensities in meadow steppe, Inner Mongolia	119°56'52.1"	49°19'34.9"	673	-3.5	375	2011
草原土壤生态系统对放牧干扰的响应 Response of grassland soil ecosystem to grazing disturbance	116°33'00"	43°33'00"	—	1.5	375	2011
放牧强度对典型草原大针茅根际土壤的影响 The effort of grazing intensity to nutrition of <i>Stipa grandis</i> rhizosphere which is the mainly built plants of typical steppe	116°35'00"	43°32'00"	—	-0.5	275	2001
放牧对荒漠草原土壤养分及微生物量的影响 Effects of grazing on soil nutrients and microbial biomass in desert steppe	112°01'50"	41°46'35"	1 450	6.3	280	2015
内蒙古草甸草原不同放牧强度下土壤微生物与土壤肥力关系的研究 Study on relationships between soil microorganism and fertilities under different grazing intensities in meadow steppe of Inner Mongolia	116°21'00"	43°57'00"	1 100	1.2	342.4	2007
放牧强度对典型草原土壤微生物特征的影响 Effects of grazing intensity on soil microbial characteristics of typical grassland	116°04'00"	43°26'00"	1 250	0.75	350	2013
不同利用方式对小针茅荒漠草原土壤活性有机碳的影响 Effects of different land-use types on soil active organic carbon in the <i>Stipa klemenaii</i> desert steppe of Inner Mongolia	112°40'00"	42°46'00"	1 079	3.9	181.2	2016
不同利用方式对内蒙古小针茅荒漠草原土壤有机碳库及其结构的影响 Effect of different land use types on storage and structure of soil organic carbon in <i>Stipa klemenaii</i> steppe in Inner Mongolia	112°40'00"	42°46'00"	1 079	3.9	181.2	2016
放牧对内蒙古锡林河流域草原土壤碳组分的影响 Impacts of grazing on soil carbon fractions in the grasslands of Xilin River Basin, Inner Mongolia	116°37'00"	43°33'00"	987	1.0	350	2005
放牧对典型草原土壤中几种生态因子影响的研究 Effect of grazing on several ecological factors of the soil in typical steppe	116°39'00"	43°26'00"	—	1.5	375	2010

续表 1

文献题目 Title of literature	经度 Longitude	纬度 Latitude	海拔 Altitude (m)	年平均温度 Mean annual temperature ()	年均降雨 Mean annual precipitation (mm)	年份 Year
不同利用强度下草原土壤微生物的生物量和数量的动态研究 Dynamic of microorganisms and microbial biomass under different use intensity in steppe soil	116°33' 00"	43°32'3 00"	—	1.5	375	2011
利用强度对草原土壤酶活性和养分影响的动态研究 Dynamic research on the effect of grassland soil enzyme activities and nutrient under different use intensities	116°40'11.03"	43°23'11"	—	1.5	375	2011
内蒙古短花针茅草原不同放牧强度下土壤主要微生物类群、酶及养分的动态变化研究 Research on dynamic changes of soil microorganisms, soil enzymes and soil nutrition in different grazing intensities in <i>Stipa breviflora</i> desert steppe of Inner Mongolia	112°05'00"	41°46'00"	1 492	3	280	2005
短期放牧对草甸草原土壤微生物与土壤酶活性的影响 Effect of short-term grazing on soil microorganisms and soil enzyme activities in meadow steppe	119°56'521"	49°19'349"	673	-3.5	350	2012
Intermediate grazing intensities by sheep increase soil bacterial diversities in an Inner Mongolian steppe	116°34'00"	43°50'00"	1 100	-0.4	350	2010
Impact of grazing on soil carbon and microbial biomass in typical steppe and desert steppe of Inner Mongolia	111°53'00"	41°47'00"	1 450	3.4	280	2012
	116°42'00"	43°38'00"	1 200	0.7	335	
Belowground net primary productivity and biomass allocation of a grassland in Inner Mongolia is affected by grazing intensity	—	—	—	0.7	343	2008
Grassland responses to grazing disturbance: plant diversity changes with grazing intensity in a desert steppe	107°31'00"	37°43'00"	1 312	6.9	262	2014
Vegetation traits and soil properties in response to utilization patterns of grassland in Hulun Buir City, Inner Mongolia, China	116°35'6.1"	48°29'25"	—	—	—	2014
	117°02'32.1"	48°29'25.3"	—	—	—	
	118°04'9.4"	48°20'33"	—	—	—	
	118°59'25"	48°04'0.2"	—	—	—	
	119°30'4.2"	49°26'27.2"	—	—	—	
119°15'17"	49°54'24"	—	—	—		
放牧对小针茅荒漠草原枯落物及植被生产力的影响 The influence of grazing intensities on litter storage and vegetation productivity of <i>Stipa klemenzii</i> desert steppe	112°46'00"	42°47'00"	—	4.3	180	2016
不同放牧时间对荒漠草原群落地下生物量的影响 Effect of different grazing time on under-ground biomass of plant communities in desert steppe	112°47'16.9"	42°16'26.2"	1 125	4.3	180	2016
不同放牧强度对短花针茅荒漠草原地上生物量和枯落物量的影响 Effects of different grazing intensity on aboveground biomass and litterfall amount in Inner Mongolia <i>Stipa breviflora</i> desert steppe	111°53'46"	41°47'17"	1 450	—	244.6	2019
不同载畜率和模拟降水对荒漠草原土壤养分的影响 Effects of different stocking rates and simulated precipitation on soil nutrient of desert steppe	111°53'46"	41°47'17"	1 450	—	244.6	2019
短花针茅荒漠草原植物地上地下生物量对载畜率和降水的响应 Responses of plant above and underground productivity of <i>Stipa breviflora</i> desert steppe to stocking rates and precipitation	111°53'46"	41°47'17"	—	—	337	2018
放牧对内蒙古荒漠草原草地植被及土壤养分的影响 Effect of grazing on vegetation and soil nutrients of a desert steppe in Inner Mongolia	111°53'46"	41°47'17"	—	—	280	2018
放牧强度对内蒙古大针茅典型草原地下生物量及其垂直分布的影响 Effects of different grazing intensities on the underground biomass and its vertical distribution of the typical <i>Stipa grandis</i> steppe	116°42'00"	43°38'00"	1 100	-0.4	350	2011
荒漠草原不同放牧强度下土壤酶活性及养分含量的动态研究 Study on dynamics of soil enzyme activity and nutrient of desert steppe under different grazing intensities	112°05'00"	41°46'00"	—	—	—	2007

续表 1

文献题目 Title of literature	经度 Longitude	纬度 Latitude	海拔 Altitude (m)	年平均温度 Mean annual temperature ()	年均降雨 Mean annual precipitation (mm)	年份 Year
温带典型草原土壤理化性质及微生物量对放牧强度的响应 Response of soil properties and microbial biomass to different grazing intensities in temperate typical steppe	116°20'00"	44°08'00"	1 100	3	250	2018
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 Organic carbon storage properties in <i>Stipa breviflora</i> desert steppe vegetation soil systems under different grazing intensities	110°21'00"	42°00'00"	—	3.4	281	2016
不同放牧强度下土壤氨氧化和反硝化微生物的变化特征 Responses of soil ammonia oxidizers and denitrifiers to different grazing intensities	111°53'46"	41°47'17"	1 450	3.4	180	2018
不同放牧强度对短花针茅荒漠草原地上生物量和枯落物量的影响 Effects of different grazing intensity on aboveground biomass and litterfall amount in Inner Mongolia <i>Stipa breviflora</i> desert steppe	111°53'46"	41°47'17"	1 450	3.4	220	2019
放牧强度对无芒隐子草小尺度空间分布特征的影响 Effects of grazing intensities on <i>Cleistogenes songorica</i> spatial distribution characteristics at small scales	111°53'46"	41°47'17"	1 450	3.4	280	2018
短花针茅荒漠草原不同载畜率对土壤的影响 Effect of stocking rate on <i>Stipa breviflora</i> desert steppe soil	111°53'46"	41°47'17"	1 450	3.4	280	2016
短期放牧强度对典型草原土壤理化性质的影响 The effects of short term grazing intensities on soil physical and chemical properties in the Inner Monglia typical steppe	115°16'00"	42°09'00"	1 400	1.9	363	2014
放牧强度对荒漠草原地区土壤有机碳及全氮含量的影响 Influences of grazing intensity on carbon and nitrogen contents in desert steppe	115°16'00"	42°09'00"	1 400	1.9	363	2011
乌拉特荒漠草原群落物种多样性和生物量关系对放牧强度的响应 Response of relationship between community species diversity and aboveground biomass to grazing intensity in the Urat desert steppe in North China	106°58'00"	41°25'00"	1 650	5.3	180	2020
重度放牧对欧亚温带草原东缘生态样带土壤氮矿化及其温度敏感性的影响 Effects of heavy grazing on soil nitrogen mineralization and temperature sensitivity along the Eastern Eurasia Steppe Transect	116°07'00"	44°55'00"	880	1.4	239	2019

表 2 放牧强度划分标准

Table 2 Criterion of grazing intensity

放牧强度 Grazing intensity	牧草利用率 Utilization of forage grass (%)	食草动物数 Herbivore number (·hm ⁻²)	水源距离 Distance to water source
未放牧 No grazing	0	0	—
轻度 Light	0~30	0~6.25	远 Far
中度 Moderate	30~60	6.25~12.5	中等 Medium
重度 Heavy	>60	>12.5	近 Nearby

利用 GetData 2.2.0 软件提取图片格式数据, 并按照试验中放牧组和禁牧组的均值(mean)、标准偏差(SD)或标准误差(SE)、样方数(n)形式进行整理分析。对于未报告标准差或者标准误的研究, 标准差估计为平均值的 0.1 倍^[28]。文献中的标准误差(SE), 根据下式进行转换:

$$SD = SE\sqrt{n} \quad (1)$$

1.3 数据分析

利用 MetaWin 2.1 software package 软件对数据进行荟萃分析^[29], 用响应比(lnR)表示相关参数对放牧的响应效应, 公式如下:

$$\ln R = \ln \left(\frac{X_t}{X_c} \right) = \ln X_t - \ln X_c \quad (2)$$

式中: X_t 代表放牧组的平均值, X_c 代表禁牧组的平均值。

方差(v)通过以下公式计算得到:

$$v = \frac{S_t^2}{n_t \bar{X}_t^2} + \frac{S_c^2}{n_c \bar{X}_t^2} \quad (3)$$

式中: n_t 和 n_c 分别为放牧组和禁牧组的样本量, S_t 和 S_c 分别为放牧组和对照组所选变量的标准差。

经过非参数权重因子(w)对所有结论的效应值

进行加权, 权重因子(w)是 v 的倒数:

$$W=1/v \tag{4}$$

$\ln R_R(\text{effect size})$ 作为非参数权重加权之后的效应值:

$$\ln R_R = \ln R \times w \tag{5}$$

2 结果与分析

2.1 不同放牧强度下植物群落生物量的差异性特征 不同放牧强度对植被生产力的影响存在显著差

异。与未放牧草地相比, 轻度放牧草地植物地上生物量无显著变化; 在中度放牧下植物地上生物量显著降低 21.62% ($P < 0.05$), 而地下生物量变化不显著; 地上和地下生物量在重度放牧下分别显著降低 39.72% 和 16.30% ($P < 0.05$) (图 1)。随着放牧强度的增加, 地上和地下生物量都有显著下降的趋势。尤其重度放牧草地, 地上生物量下降严重, 这可能是由于牲畜过多啃食作用引起的。

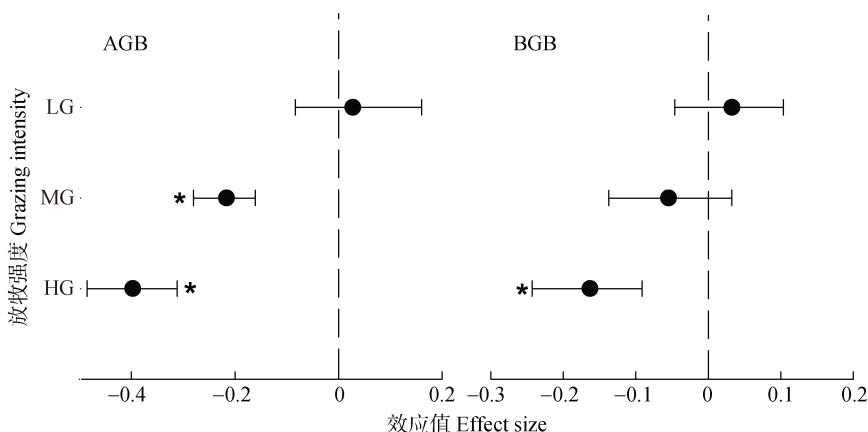


图 1 放牧强度对内蒙古草原植物群落生物量的影响

Fig. 1 Effects of grazing intensity on vegetation biomass of grassland in Inner Mongolia

AGB: 地上生物量; BGB: 地下生物量; LG: 轻度放牧; MG: 中度放牧; HG: 重度放牧。当 95% 置信区间与 0 不重叠, 则说明效应具有显著性。*表示显著影响。AGB: above-ground biomass; BGB: below-ground biomass; LG: light grazing; MG: moderate grazing; HG: heavy grazing. If the 95% confidence interval of the effect size did not overlap with zero, a significant effect was considered; * indicates significant impact.

2.2 不同放牧强度对土壤化学性质的影响

土壤有机碳、全氮和全磷含量均随着放牧强度的增强逐渐下降, 且放牧强度越高, 变化幅度越大(图 2)。与未放牧草地相比, 轻度放牧下土壤有机碳显著升高 3.13% ($P < 0.05$), 而土壤全氮和全磷无显著变化; 中

度放牧下土壤有机碳、全氮和全磷分别显著下降 4.44%、2.15% 和 8.35% ($P < 0.05$); 重度放牧下土壤有机碳、全氮和全磷比未放牧草地分别显著下降 7.62%、6.46% 和 8.03% ($P < 0.05$) (图 2)。随着放牧强度的上升, 放牧对土壤有机碳影响逐渐由正效应转为负效应。

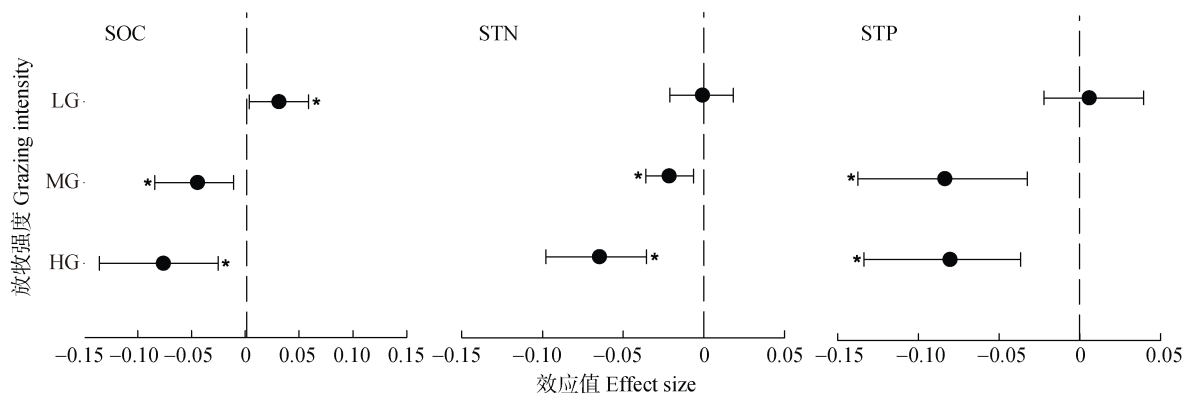


图 2 放牧强度对内蒙古草原土壤化学性质的影响

Fig. 2 Effects of grazing intensity on soil chemical properties of grassland in Inner Mongolia

SOC: 土壤有机碳; STN: 土壤全氮; STP: 土壤全磷。LG: 轻度放牧; MG: 中度放牧; HG: 重度放牧。当 95% 置信区间与 0 不重叠, 则说明效应具有显著性。*表示显著影响。SOC: soil organic carbon; STN: soil total nitrogen; STP: soil total phosphorus. LG: light grazing; MG: moderate grazing; HG: heavy grazing. If the 95% confidence interval of the effect size did not overlap with zero, a significant effect was considered; * indicates significant impact.

2.3 不同放牧强度对土壤微生物的影响

如图 3 所示, 各类土壤微生物指标对放牧强度具有明显的相应, 其中, 微生物生物量碳比微生物生物量氮对放牧干扰的反应更敏感, 同时放牧强度对细菌比对真菌和放线菌具有更强的影响。与未放牧草地相比, 轻度放牧草地土壤微生物生物量碳、细菌和真菌分别显著上升 7.80%、11.40%和

10.83% ($P < 0.05$), 土壤微生物生物量氮和放线菌数量变化不显著; 中度放牧下土壤微生物生物量氮显著下降 6.76% ($P < 0.05$), 土壤微生物生物量碳、细菌、真菌和放线菌数量无显著变化; 重度放牧条件下土壤微生物生物量碳、细菌和放线菌数量分别显著降低 8.76%、12.92%和 18.27% ($P < 0.05$), 土壤微生物生物量氮和真菌数量变化不显著(图 3)。

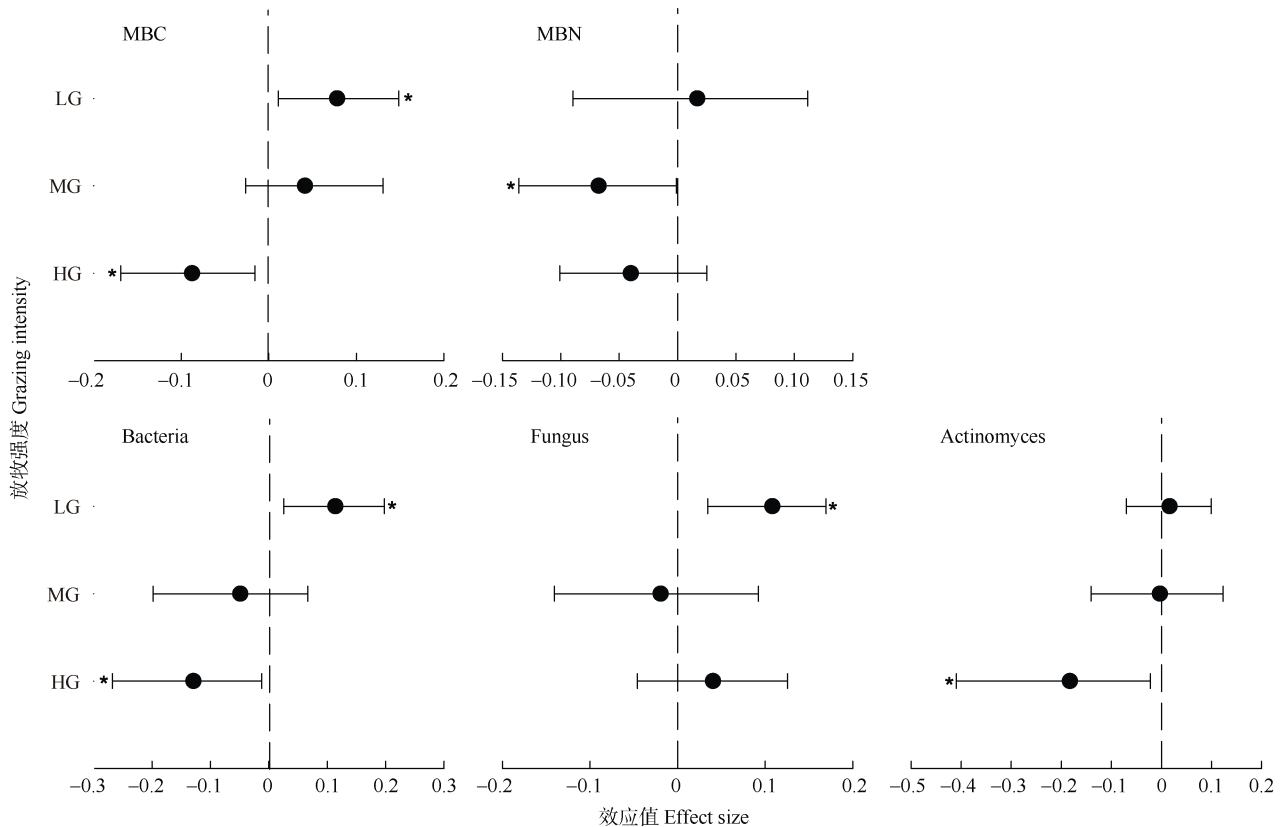


图 3 放牧强度对内蒙古草原土壤微生物的影响

Fig. 3 Effects of grazing intensity on microorganisms of grassland in Inner Mongolia

MBC: 微生物生物量碳; MBN: 微生物生物量氮; Bacteria: 细菌; Fungus: 真菌; Actinomyces: 放线菌. LG: 轻度放牧; MG: 中度放牧; HG: 重度放牧。当 95%置信区间与 0 不重叠, 则说明效应具有显著性。*表示显著影响。MBC: microbial biomass carbon; MBN: microbial biomass nitrogen. LG: light grazing; MG: moderate grazing; HG: heavy grazing. If the 95% confidence interval of the effect size did not overlap with zero, a significant effect was considered; * indicates significant impact.

2.4 不同放牧强度下土壤有机碳与微生物生物量碳和全氮的关系

草地放牧作用过程中土壤有机碳和微生物生物量碳及土壤全氮密切相关(图 4)。在轻度放牧草地 ($R^2=0.60$, $P < 0.01$) 和重度放牧草地 ($R^2=0.89$, $P < 0.0001$), 土壤有机碳与微生物生物量碳呈显著正相关关系; 在中度放牧条件下, 二者则无显著相关关系(图 4a)。土壤有机碳与土壤全氮在重度放牧草地作用下显著正相关($R^2=0.70$, $P < 0.0001$, 图 4b), 在轻度和中度放牧草地上, 土壤全氮变化速率和土壤有机碳变化速率并不显著相关。

3 讨论

3.1 放牧对植物群落生产力的影响

Bai 等^[30]揭示了在群落层面和物种层面, 放牧对内蒙古半干旱草地地上生物量存在负面影响。这可以用放牧施加在植物上的压力来解释, 由于家畜对植物组织的损失、破坏以及土壤含水量的减少, 导致植物生物量的下降^[31]。然而, 本研究发现与未放牧草地相比, 轻度放牧的植物地上和地下生物量以及中度放牧的地下生物量均无显著变化(图 1), 符合中度干扰理论^[32]。其原因是生态系统具有一定的

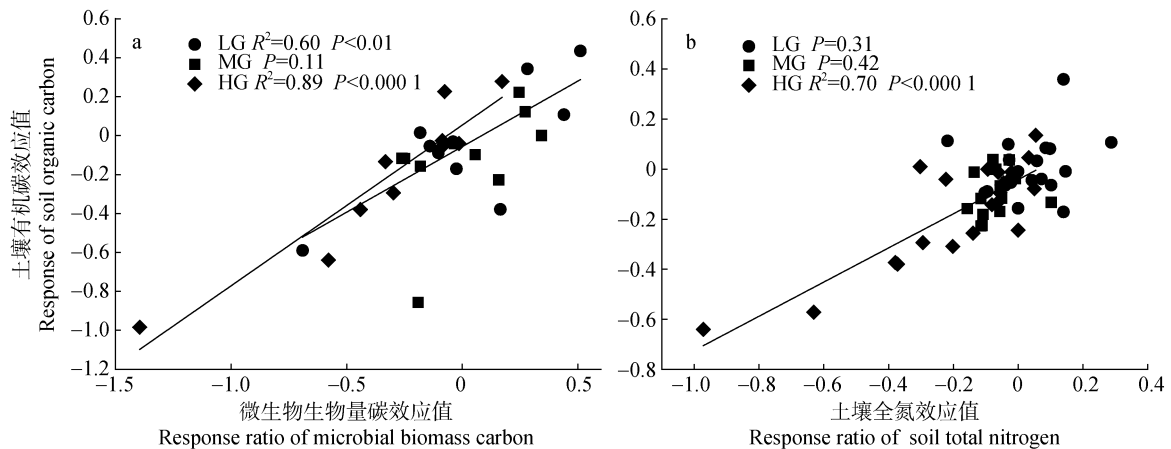


图 4 内蒙古草原土壤有机碳效应值与微生物量碳和土壤全氮效应值的关系

Fig. 4 Relationship between soil organic carbon response effect size with response ratios of microbial biomass carbon and soil total nitrogen of grassland in Inner Mongolia

LG: 轻度放牧; MG: 中度放牧; HG: 重度放牧. LG: light grazing; MG: moderate grazing; HG: heavy grazing.

弹性, 适度放牧下牲畜采食行为在一定程度上刺激了植物的补偿生长^[33-34], 同时抑制了优势种对草地资源的竞争, 为外来物种的存活和本地物种的恢复提供了空间, 群落中耐牧性强的物种增加, 有利于维持草地生态系统的稳定性^[35]。轻度放牧下植被生产力指标达到最佳状态, 尽管相当一部分的植物生物量因被采食而流向家畜, 但剩余的部分与未放牧草地相比无显著差异(图 1)。表明适度放牧可以维持或提高草地生产力, 是实现草地可持续管理的重要措施。

随着放牧强度的增大, 家畜过度啃食和践踏等会直接降低植物的地上生物量^[36], 造成植被盖度降低, 植物光合面积骤减, 光合作用减弱, 影响了植物的正常生长, 其光合产物不能满足其自身生长发育, 分配到地下根系的光合作用产物也相应减少, 导致植物地下生物量下降^[37-38]。随着放牧强度的增加, 地下生物量的降低与其他研究结果一致^[38]。放牧条件下地下生物量的降低通常是由于碳同化器官的来源尺寸减小和根碳水化合物对茎分生组织的再转移增强。另一方面, 家畜的过度踩踏造成土壤孔隙度和入渗率下降, 土壤含水量减少, 透气性变差, 不利于根系的生长发育。此外, 放牧还对植物物种组成和群落结构产生影响, 植物物种丰富度随着放牧强度的增加逐渐降低^[39], 物种多样性在重度放牧下明显减少, 反映了适口性较好的植物在重度放牧下可能因家畜的过度采食减少甚至消失, 造成群落结构简单化^[40]。另外一些植物则变得矮小化降低采食机率, 以缓解过度放牧带来的危害^[41]。这些因素都直接或间接地造成了中度和重度放牧下植被生产力的降低(图 1)。

3.2 放牧对土壤养分的影响

与未放牧草地相比, 较低放牧强度的草地土壤有机碳显著升高(图 2a), 与前人研究结果一致, 表明适当放牧有助于土壤养分的增加^[42-45]。其原因可能是轻度放牧条件下, 家畜粪便对提升土壤养分起到积极作用^[42]。而且, 根据生物量最优分配假说, 植物在适度放牧条件下为了适应放牧的干扰会把更多的资源投入到地下部分, 形成生物量由地上向地下转移的分配格局^[34,46]。在草地生态系统中, 地下部分占总生物碳库的 90%, 作为土壤有机碳的主要来源, 植物根系的增加直接促进了土壤有机碳的积累^[34,47]。此外, 一定程度的放牧利于植物凋落物的增加^[37], 且牲畜对草地的踩踏作用使得土壤中、小颗粒有机物的量增多, 同时被破坏的新鲜植物残体糅合进入土壤并作为新鲜碳源^[15], 均对土壤有机碳积累产生正反馈作用。

然而, 中度和重度放牧条件下, 土壤有机碳、全氮和全磷等养分显著降低($P < 0.05$), 且随放牧强度的增加, 降低幅度逐渐增加(图 2)。因为草地功能的正常维持要求利用强度在其可承受的弹性范围内, 当放牧强度超过一定阈值, 草地生态系统便朝着不利的方向演替, 土壤养分含量会随外界干扰度的增加而降低^[8]。过度放牧使大量植物被家畜消费, 枯枝叶量减少, 降低了土壤有机质的输入^[40]。而且重度放牧引起优势植物或植物功能群组成结构发生改变, 影响进入土壤的凋落物的质量^[48]。动物选择性采食适口性强的物种及植物组织, 留下相对较难分解的杂草类植物^[49], 导致土壤中有机质含量的降低。同时动物踩踏破坏了土壤团聚体结构, 使团聚体中原本被包裹的有机质得以被微生物分解而发生

矿化, 造成土壤养分的减少^[15]。

研究表明, 植物随着放牧干扰的增强不断长出新叶, 更多的碳被分配到新生叶片中, 使根系中碳分布减少, 导致土壤来自根系的碳输入减少^[50], 从而造成中度和重度放牧下土壤有机碳明显下降(图 2a)。另外, 重度放牧导致植被不能及时恢复生长, 进而导致植被地上、地下生物量下降, 群落株数、高度和盖度减少, 表层土壤裸露, 土壤温度上升, 所以重度放牧草地养分流失严重、积累不足^[51]。随着放牧强度增大, 家畜的采食活动更频繁, 草地生物量损失量变大, 植物生物量的生产与分解平衡遭到破坏, 碳、氮和磷素的输出量增加, 归还量降低^[52]。土壤碳、氮和磷元素的大量流失引起草地土壤质量下降, 表现为中度和重度放牧下土壤有机碳、全氮和全磷含量显著低于未放牧草地(图 2)。

3.3 放牧对土壤微生物的影响

土壤微生物影响土壤中物质的转化和循环, 是调控土壤肥力的关键因素, 是最敏感的土壤健康生物指标之一。因其对环境响应敏感, 已被公认为土壤生态系统变化的预警指标^[36]。本研究发现微生物生物量碳的含量顺序为轻度放牧>中度放牧>重度放牧(图 3a), 轻、中度放牧维持较高微生物生物量碳可能是由于动物粪便为土壤微生物提供了碳源^[53]。另一方面, 大型食草动物的放牧可通过根系分泌物改变地下碳分配到根组织或微生物中, 这可能对草地的有机碳池造成重大影响。轻度放牧下较高的植物茎叶、凋落物和根系分泌物进入土壤, 土壤中有机的来源增加, 为微生物提供了充足的物质能源, 微生物活动旺盛, 促进了土壤的碳氮循环, 增加了微生物生物量碳的产量^[52]。

放牧对草原土壤中细菌、真菌和放线菌 3 大类微生物具有显著影响, 而 3 类微生物在不同放牧强度下表现不完全相同, 可能与各自的特点相关。轻度放牧显著提高了土壤细菌和真菌数量(图 3c 和 3d), 与高雪峰等^[26]研究一致。表明适度放牧有利于保持或提高土壤中各类微生物的繁殖和活动, 促进土壤养分循环, 从而提高土壤的肥力^[54]。然而, 随放牧强度的增加, 重度放牧的草地土壤中细菌和放线菌的数量显著降低(图 3c 和 3e), 因为微生物的生长和繁殖所需的营养直接来源于土壤养分^[55], 而过度放牧导致土壤养分显著降低(图 2), 限制了微生物的数量和活动。而且在重度放牧下, 植被因动物采食而过度损耗, 土壤受家畜的践踏而变得紧实, 致使土壤通透性变差, 土壤水分含量降低, 最终抑制了土壤

微生物的生长繁殖^[56]。

放牧对土壤有机碳和微生物生物量碳的影响具有同步性, 轻度放牧有助于生态系统有机碳的积累, 而重度放牧草原生态系统有机碳和微生物生物量碳显著降低。此外, 微生物量碳、氮的减小幅度高于土壤养分减小幅度。这表明放牧通过啃食、践踏和粪便归还等一系列方式作用于草地群落组成、植被生产力和土壤养分, 而植被通过改变其养分利用策略适应环境的变化^[51], 它们可以被视为互相影响的有机一体, 并且土壤微生物量碳和氮对于不同放牧压力的响应高于土壤养分。由图 4 结果可知, 重度放牧干扰下土壤有机碳与土壤微生物量碳和土壤全氮之间密切相关, 说明重度放牧压力下温带草原生态系统土壤养分和微生物生物量等指标变化具有协同性。我们认为不稳定的碳输入(如根分泌物)可能通过对微生物生物量碳积累的影响, 在调节不同放牧强度对有机碳的影响中发挥了重要作用。

4 结论

综上所述, 放牧主要通过改变群落生物量、土壤养分和微生物含量等对草地生态系统产生间接和直接的影响。本研究发现轻度放牧有利于提高植被生产力、土壤有机碳和微生物数量, 有利于保持和提高土壤肥力, 而不同放牧强度下微生物生物量碳也显示出与土壤有机碳变化的同步性。当放牧干扰超出一定的限度时, 随放牧强度的增加, 各项指标均逐渐下降, 表明草地的过度利用是草地质量下降的重要原因。因此, 在未来草地管理措施中, 建议保持适度载畜量, 采取合理的放牧管理方式, 以有效地维持草-畜平衡, 实现草地的可持续性利用。

参考文献 References

- [1] ZHAN T Y, ZHANG Z C, SUN J, et al. Meta-analysis demonstrating that moderate grazing can improve the soil quality across China's grassland ecosystems[J]. *Applied Soil Ecology*, 2020, 147: 103438
- [2] WANG D, WU G L, ZHU Y J, et al. Grazing exclusion effects on above- and below-ground C and N pools of typical grassland on the Loess Plateau (China)[J]. *Catena*, 2014, 123: 113-120
- [3] 方精云, 杨元合, 马文红, 等. 中国草地生态系统碳库及其变化[J]. *中国科学: 生命科学*, 2010, 40(7): 566-576
FANG J Y, YANG Y H, MA W H, et al. Ecosystem carbon stocks and their changes in China's grasslands[J]. *Science China Life Sciences*, 2010, 53(7): 757-765
- [4] LYSENG M P, BORK E W, HEWINS D B, et al. Long-term grazing impacts on vegetation diversity, composition, and exotic species presence across an aridity gradient in northern

- temperate grasslands[J]. *Plant Ecology*, 2018, 219(6): 649–663
- [5] 王普昶, 王志伟, 丁磊磊, 等. 贵州喀斯特人工草地土壤水分空间异质性及对放牧强度的响应[J]. *水土保持学报*, 2016, 30(3): 291–296
WANG P C, WANG Z W, DING L L, et al. The response of small scale spatial variability of pasture soil moisture to grazing intensity in karst grassland of Guizhou[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2016, 30(3): 291–296
- [6] 刘建军, 浦野忠朗, 鞠子茂, 等. 放牧对草原生态系统地下生产力及生物量的影响[J]. *西北植物学报*, 2005, 25(1): 88–93
LIU J J, URANO T, MARIKO S, et al. Influence of grazing pressures on belowground productivity and biomass in Mongolia steppe[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2005, 25(1): 88–93
- [7] 李凤霞, 李晓东, 周秉荣, 等. 放牧强度对三江源典型高寒草甸生物量和土壤理化特征的影响[J]. *草业科学*, 2015, 32(1): 11–18
LI F X, LI X D, ZHOU B R, et al. Effects of grazing intensity on biomass and soil physical and chemical characteristics in alpine meadow in the source of three rivers[J]. *Pratacultural Science*, 2015, 32(1): 11–18
- [8] 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]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2008, 125(1/4): 21–32
- [9] 尚占环, 姚爱兴. 草原生物多样性研究及其保护[J]. *宁夏农学院学报*, 2002, 23(2): 70–75
SHANG Z H, YAO A X. Studies on rangeland biodiversity and conservation[J]. *Journal of Ningxia Agricultural College*, 2002, 23(2): 70–75
- [10] 高永恒, 陈槐, 罗鹏, 等. 放牧强度对川西北高寒草甸植物生物量及其分配的影响[J]. *生态与农村环境学报*, 2008, 24(3): 26–32
GAO Y H, CHEN H, LUO P, et al. Effect of grazing intensity on biomass of alpine meadow and its allocation in the northwestern Sichuan[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2008, 24(3): 26–32
- [11] 白永飞, 许志信, 李德新. 内蒙古高原针茅草原群落 α 多样性研究[J]. *生物多样性*, 2000, 8(4): 353–360
BAI Y F, XU Z X, LI D X. Study on α diversity of four *Stipa* communities in Inner Mongolia Plateau[J]. *Chinese Biodiversity*, 2000, 8(4): 353–360
- [12] DAMIEN H, NATHALIE V, FRÉDÉRIQUE L, et al. How does soil particulate organic carbon respond to grazing intensity in permanent grasslands?[J]. *Plant and Soil*, 2015, 394(1): 239–255
- [13] CHEN J B, HOU F J, CHEN X J, et al. Stocking rate and grazing season modify soil respiration on the Loess Plateau, China[J]. *Rangeland Ecology & Management*, 2015, 68(1): 48–53
- [14] STEFFENS M, KÖLBL A, TOTSHE K U, et al. Grazing effects on soil chemical and physical properties in a semiarid steppe of Inner Mongolia (P. R. China)[J]. *Geoderma*, 2008, 143(1/2): 63–72
- [15] 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[J]. *草地学报*, 2018, 26(2): 267–276
ZHANG M, LI X B. A review: Effects of grazing on soil organic carbon and the related processes[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2018, 26(2): 267–276
- [16] VAN OIJEN M, SCHAPENDONK A, HÖGLIND M. On the relative magnitudes of photosynthesis, respiration, growth and carbon storage in vegetation[J]. *Annals of Botany*, 2010, 105(5): 793–797
- [17] LEZAMA F, BAEZA S, ALTESOR A, et al. Variation of grazing-induced vegetation changes across a large-scale productivity gradient[J]. *Journal of Vegetation Science*, 2014, 25(1): 8–21
- [18] 马红彬, 余治家. 放牧草地植物补偿效应的研究进展[J]. *农业科学研究*, 2006, 27(1): 63–67
MA H B, YU Z J. Review on the research of plant compensation effect for grazing grassland[J]. *Journal of Agricultural Sciences*, 2006, 27(1): 63–67
- [19] 周萍, 刘国彬, 薛蕊. 草地生态系统土壤呼吸及其影响因素研究进展[J]. *草业学报*, 2009, 18(2): 184–193
ZHOU P, LIU G B, XUE S. Review of soil respiration and the impact factors on grassland ecosystem[J]. *Acta Pratacultural Sinica*, 2009, 18(2): 184–193
- [20] GRIFFITHS B S, RITZ K, WHEATLEY R E, et al. An examination of the biodiversity-ecosystem function relationship in arable soil microbial communities[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2001, 33(12/13): 1713–1722
- [21] GLASER K, KUPPARDT A, BOENIGK J, et al. The influence of environmental factors on protistan microorganisms in grassland soils along a land-use gradient[J]. *Science of the Total Environment*, 2015, 537: 33–42
- [22] POTTHOFF M, STEENWERTH K L, JACKSON L E, et al. Soil microbial community composition as affected by restoration practices in California grassland[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, 38(7): 1851–1860
- [23] WILSON C H, STRICKLAND M S, HUTCHINGS J A, et al. Grazing enhances belowground carbon allocation, microbial biomass, and soil carbon in a subtropical grassland[J]. *Global Change Biology*, 2018, 24(7): 2997–3009
- [24] 闫宝龙, 吕世杰, 赵萌莉, 等. 草原生态安全评价方法研究进展[J]. *中国草地学报*, 2019, 41(5): 164–171
YAN B L, LYU S J, ZHAO M L, et al. Advances in the research on assessment methods of grassland ecological security[J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2019, 41(5): 164–171
- [25] 李博. 内蒙古地带性植被的基本类型及其生态地理规律[J]. *内蒙古大学学报: 自然科学版*, 1962, (2): 41–50
LI B. The basic types and ecological geography of zonal vegetation in Inner Mongolia[J]. *Journal of Inner Mongolia University: Natural Science Edition*, 1962, (2): 41–50
- [26] 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
- [27] HE N P, HAN X G, YU G R, et al. Divergent changes in plant community composition under 3-decade grazing exclusion in continental steppe[J]. PLoS One, 2011, 6(11): e26506
- [28] LUO Y Q, HUI D F, ZHANG D Q. Elevated CO₂ stimulates net accumulations of carbon and nitrogen in land ecosystems: A meta-analysis[J]. Ecology, 2006, 87(1): 53–63
- [29] HEDGES L V, GUREVITCH J, CURTIS P S. The meta-analysis of response ratios in experimental[J]. Ecology, 1999, 80(4): 1150–1156
- [30] BAI Y F, HAN X G, WU J G, et al. Ecosystem stability and compensatory effects in the Inner Mongolia grassland[J]. Nature, 2004, 431(7005): 181–184
- [31] FERRARO D O, OESTERHELD M. Effect of defoliation on grass growth. A quantitative review[J]. Oikos, 2002, 98(1): 125–133
- [32] TILMAN D, DOWNING J A. Biodiversity and stability in grasslands[J]. Nature, 1994, 367(6461): 363–365
- [33] RAUTIO P, HUHTA A P, PIIPPO S, et al. Overcompensation and adaptive plasticity of apical dominance in *Erysimum strictum* (Brassicaceae) in response to simulated browsing and resource availability[J]. Oikos, 2005, 111(1): 179–191
- [34] YAN L, ZHOU G S, ZHANG F. Effects of different grazing intensities on grassland production in China: a meta-analysis[J]. PLoS One, 2013, 8: e81466
- [35] 王向涛, 张世虎, 陈懂懂, 等. 不同放牧强度下高寒草甸植被特征和土壤养分变化研究[J]. 草地学报, 2010, 18(4): 510–516
- WANG X T, ZHANG S H, CHEN D D, et al. The effects of natural grazing intensity on plant community and soil nutrients in alpine meadow[J]. Acta Agrestia Sinica, 2010, 18(4): 510–516
- [36] SHIYOMI M, OKADA M, TAKAHASHI S, et al. Spatial pattern changes in aboveground plant biomass in a grazing pasture[J]. Ecological Research, 1998, 13(3): 313–322
- [37] 年勇, 马玉寿, 李世雄, 等. 夏季放牧对大通河上游高寒沼泽草甸植被和土壤化学计量特征的影响[J]. 青海畜牧兽医杂志, 2019, 49(1): 14–18
- NIAN Y, MA Y S, LI S X, et al. Effects of summer grazing on vegetation and soil stoichiometric characteristics of alpine marsh meadow in the upper reaches of Datong river[J]. Chinese Qinghai Journal of Animal and Veterinary Sciences, 2019, 49(1): 14–18
- [38] 白可喻, 韩建国, 王培, 等. 放牧强度对新麦草人工草地植物地下部分生物量及其氮素含量动态的影响[J]. 中国草地, 2000, (2): 15–20
- BAI K Y, HAN J G, WANG P, et al. The dynamic of nitrogen content and biomass of root and tiller on Russian wildryegrass pasture as influenced by grazing[J]. Grassland of China, 2000, (2): 15–20
- [39] 黄国胜, 杨正荣. 不同放牧强度对高寒草甸的影响[J]. 畜牧兽医学, 2019, (6): 9–10
- HUANG G S, YANG Z R. Effects of different grazing intensity on alpine meadows[J]. Graziery Veterinary Sciences, 2019, (6): 9–10
- [40] 许岳飞, 益西措姆, 付娟娟, 等. 青藏高原高山高草草甸植物多样性和土壤养分对放牧的响应机制[J]. 草地学报, 2012, 20(6): 1026–1032
- XU Y F, YIXI C M, FU J J, et al. Response of plant diversity and soil nutrient to grazing intensity in *Kobresia pygmaea* meadow of Qinghai-Tibet Plateau[J]. Acta Agrestia Sinica, 2012, 20(6): 1026–1032
- [41] EVJU M, AUSTRHEIM G, HALVORSEN R, et al. Grazing responses in herbs in relation to herbivore selectivity and plant traits in an alpine ecosystem[J]. Oecologia, 2009, 161(1): 77–85
- [42] YANG Z N, XIONG W, XU Y Y, et al. Soil properties and species composition under different grazing intensity in an alpine meadow on the eastern Tibetan Plateau, China[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2016, 188(12): 678
- [43] 林丽, 张德罡, 曹广民, 等. 放牧强度对高寒高草草甸土壤养分特性的影响[J]. 生态学报, 2016, 36(15): 4664–4671
- LIN L, ZHANG D G, CAO G M, et al. Responses of soil nutrient traits to grazing intensities in alpine *Kobresia* meadows[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(15): 4664–4671
- [44] 李红琴, 毛绍娟, 祝景彬, 等. 放牧强度对高寒草甸群落碳氮磷化学计量特征的影响[J]. 草业科学, 2017, 34(3): 449–455
- LI H Q, MAO S J, ZHU J B, et al. Effects of grazing intensity on the ecological stoichiometry characteristics of alpine meadow[J]. Pratacultural Science, 2017, 34(3): 449–455
- [45] ZHANG T, ZHANG Y J, XU M J, et al. Light-intensity grazing improves alpine meadow productivity and adaption to climate change on the Tibetan Plateau[J]. Scientific Reports, 2015, 5(1): 15949
- [46] AN H, LI G Q. Effects of grazing on carbon and nitrogen in plants and soils in a semiarid desert grassland, China[J]. Journal of Arid Land, 2015, 7(3): 341–349
- [47] 陶贞, 次旦朗杰, 张胜华, 等. 草原土壤有机碳含量的控制因素[J]. 生态学报, 2013, 33(9): 2684–2694
- TAO Z, CIDAN L J, ZHANG S H, et al. Controls over soil organic carbon content in grasslands[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(9): 2684–2694
- [48] 杨丽丽, 龚吉蕊, 王忆慧, 等. 内蒙古温带草原不同放牧强度和围栏封育对凋落物分解的影响[J]. 植物生态学报, 2016, 40(8): 748–759
- YANG L L, GONG J R, WANG Y H, et al. Effects of grazing intensity and grazing exclusion on litter decomposition in the temperate steppe of Nei Mongol, China[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2016, 40(8): 748–759
- [49] KLEINEBECKER T, WEBER H, HÖLZEL N. Effects of grazing on seasonal variation of aboveground biomass quality in calcareous grasslands[J]. Plant Ecology, 2011, 212(9): 1563–1576
- [50] LI C L, HAO X Y, ZHAO M L, et al. Influence of historic sheep grazing on vegetation and soil properties of a desert steppe in Inner Mongolia[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2008, 128(1/2): 109–116
- [51] YANG Z N, ZHU Q A, ZHAN W, et al. The linkage between vegetation and soil nutrients and their variation under differ-

- ent grazing intensities in an alpine meadow on the eastern Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Ecological Engineering*, 2018, 110: 128–136
- [52] 焦婷, 常根柱, 鱼小军, 等. 温性荒漠草原土壤酶与肥力的关系[J]. *中国草地学报*, 2011, 33(5): 88–93
JIAO T, CHANG G Z, YU X J, et al. Study on relationship between soil enzymes and soil fertilities on temperate desertified grassland[J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2011, 33(5): 88–93
- [53] 柴晓虹, 姚拓, 王理德, 等. 围栏封育对高寒草地土壤微生物特性的影响[J]. *草原与草坪*, 2014, 34(5): 26–31
CHAI X H, YAO T, WANG L D, et al. Impact of enclosure on soil microbial characteristics of alpine grassland[J]. *Grassland and Turf*, 2014, 34(5): 26–31
- [54] 赵吉. 不同放牧率对冷蒿小禾草原土壤微生物数量和生物量的影响[J]. *草地学报*, 1999, 7(3): 223–227
ZHAO J. Effect of stocking rates on soil microbial number and biomass in steppe[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 1999, 7(3): 223–227
- [55] 孙波, 王晓玥, 吕新华. 我国 60 年来土壤养分循环微生物机制的研究历程——基于文献计量学和大数据可视化分析[J]. *植物营养与肥料学报*, 2017, 23(6): 1590–1601
SUN B, WANG X Y, LYU X H. The historical venation in research on microbial mechanisms of soil nutrient cycling in the past 60 years — Based on bibliometric analysis and big data visualization[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2017, 23(6): 1590–1601
- [56] 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 Nutrition and Fertilizer Science*, 2007, 13(5): 856–864