

西鄂尔多斯荒漠主要灌丛特征对放牧干扰环境的响应

张磊^{1,3}, 李锦荣^{2*}, 高永³, 党晓宏⁴, 岳秀贤¹, 李旻宇¹, 东明¹

(1. 内蒙古自治区林业和草原监测规划院, 内蒙古 呼和浩特 010020; 2. 中国水利水电科学研究院 内蒙古阴山北麓草原生态水文国家野外科学观测研究站, 北京 100038; 3. 内蒙古农业大学 沙漠治理学院, 内蒙古 呼和浩特 010019; 4. 包头市林业和草原局, 内蒙古 包头 014030)

摘要:为探讨荒漠灌丛群落特征和土壤性状对放牧干扰的响应,以西鄂尔多斯广泛分布的霸王、沙冬青和四合木灌丛为对象,对3种放牧强度下灌丛生长及土壤养分进行比较研究。结果表明:1)放牧区灌丛覆盖度、平均冠幅、高度和基径显著低于轮牧区和围封区;2)牲畜对霸王和沙冬青灌丛的啃食主要发生在叶结构部分,而四合木灌丛主要啃食三级枝结构;不同放牧强度下根生物量和总生物量均为围封区>轮牧区>放牧区,围封区3种灌木总生物量分别为放牧区的1.78,1.98倍和1.84倍;3)各放牧强度下,3种灌丛土壤有机碳、全N和全P均随土层深度的增加显著减少,土壤容重随土层深度的增加而增大;4)放牧干扰显著降低表层土壤有机碳含量,3种灌丛均为放牧区显著低于围封区和轮牧区;轮牧区深层土壤(20~40、40~60 cm和60~80 cm)的全N含量显著高于放牧区和围封区;全P对放牧干扰的响应规律与有机碳和全N恰好相反,为放牧区显著高于围封区和轮牧区;放牧干扰后土壤容重的变化趋势为放牧区>轮牧区>围封区。综合来说,放牧会显著降低灌丛覆盖度、生产力、土壤养分和透气性,而轮牧和围封有助于植被覆盖度和各生长指标的恢复,并提高土壤固碳能力和对氮素的积累。因此不合理放牧是导致荒漠地区灌木植被退化的重要原因,合理的放牧制度可以有效提高荒漠灌丛生产力。

关键词:荒漠灌丛;放牧干扰;生物量;土壤特征

中图分类号:S718.45

文献标志码:A

文章编号:1001-7461(2023)03-0001-09

Response of the Main Desert Shrub Community Characteristics to Grazing Disturbance Environment Factors in Western Ordos

ZHANG Lei^{1,3}, LI Jin-rong^{2*}, GAO Yong³, DANG Xiao-hong⁴, YUE Xiu-xian¹, LI Min-yu¹, DONG Ming¹

(1. The Institute of Forestry and Grassland Monitoring and Planning of Inner Mongolia Autonomous Region,

Hohhot 010020, Inner Mongolia, China; 2. Yinshanbeilu National Field Research Station of Steppe

Eco-hydrological System, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China;

3. Desert Science and Engineering College, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010019, Inner Mongolia, China;

4. Forestry and Grassland Bureau of Baotou, Baotou 014030, Inner Mongolia, China)

Abstract: In order to study the response of desert shrub community and soil characteristics to grazing disturbance, 3 bush species (including *Sarcosygium xanthoxylon*, *Ammopiptanthus mongolicus* and *Tetraena mongolica*) widely occurring in Western Ordos were selected as the research objects to compare the shrub growth status and soil nutrient status under 3 grazing intensities, i. e., enclosure, seasonal rotation grazing and uncontrolled grazing. The results showed that 1) the shrub coverage, average canopy, average height, and average branch diameter in uncontrolled grazing region were significantly lower than those of

收稿日期:2022-03-25 修回日期:2022-07-29

基金项目:中国水利水电科学研究院基本科研业务费项目(MK0145B022052, MK2020J08);国家自然科学基金(41967009)。

第一作者:张磊,博士,林业高级工程师。研究方向:水土保持与荒漠化防治。E-mail:zl9664@126.com

*通信作者:李锦荣,博士,教授。研究方向:水土保持与荒漠化防治。E-mail:lijinrong918@126.com

the other two. 2) For *S. xanthoxylon* and *A. mongolicus*, livestock eating activity mainly occurred at the leaf structure, while for *T. mongolia*, it mainly occurred at the tertiary branch structure. Under all 3 grazing intensities, both root biomass and total biomass were in the order of enclosed region > rotational grazed region > uncontrolled grazing region. The total biomasses of the 3 bushes in the enclosed region were 1.78, 1.98, 1.84 times higher than the grazing region, respectively. 3) In each grazing intensity, the soil organic carbon, total nitrogen and total phosphorus had significantly negative correlation with the soil depth. Soil bulk density had positive correlation with the soil depth. 4) Grazing disturbance significantly reduced the surface soil organic carbon content, all 3 species had lower organic carbon content in uncontrolled grazing region than the other two. In rotational grazed region, the deep soil (20–40 cm, 40–60 cm, 60–80 cm) total nitrogen content was higher than uncontrolled grazing region and enclosed region. The response of total phosphorus to grazing disturbance was in opposite to organic carbon and total nitrogen, the content was higher in uncontrolled grazing region than the other two. The change trend of soil bulk density after grazing disturbance presented the order of uncontrolled grazing region > rotational grazed region > enclosed region. In conclusion, uncontrolled grazing will significantly decrease the shrub coverage, productivity, soil nutrient and permeability, while rotational grazing and enclosure are beneficial for the recovery of shrub coverage and other growth indicators, moreover strengthen the soil carbon fixation ability as well as nitrogen accumulation. Therefore, unreasonable grazing is one of the dominant causes of vegetation degeneration of desert shrub, grazing system rationalization would effectively enhance the productivity of the desert shrub community.

Key words: desert shrub; grazing disturbance; biomass; soil characteristics

西鄂尔多斯荒漠是我国西北干旱、半干旱地区荒漠与草原的过渡地带,是典型的荒漠化草原,也是陆地生态系统中水分较为匮乏、生境极端恶劣的典型脆弱区^[1-2]。该区植物群落以霸王(*Sarcosygium xanthoxylon*)、沙冬青(*Ammopiptanthus mongolicus*)、四合木(*Tetraena mongolica*)等强旱生灌木为主^[3],形成了独特的荒漠灌木群落,也是该区域最重要的绿色生态屏障^[4]。不合理的放牧制度会导致生物多样性和植被恢复能力显著下降^[5],如何在草地资源紧张的刚性条件下协同提高该区域生态系统自我恢复能力,对实现草地资源的可持续利用具有举足轻重的作用。

生态系统的生产力是由生物多样性、群落结构、环境条件和外界干扰等因素共同决定的^[6-7]。不同土壤养分影响着植物群落的生物量大小、物种组成和多样性^[8]。不同方式和不同程度的外界干扰是造成生态系统失衡或功能发生变化的主要因素,放牧作为草地资源重要利用方式的同时,也是干扰草地生态系统生产力的主要因素之一^[9]。研究表明,过度放牧会导致草地生态系统植物群落物种多样性降低、地上植被生物量下降及土壤养分快速转移导致的土壤肥力含量下降^[10-12]。随着放牧强度的改变,物种在灌木群落中的优势度也会随之变化,从而改变荒漠草原植物群落组成、结构和功能^[5]。

放牧干扰对草地植被及土壤的影响一直是生态

学和土壤学中的研究热点,诸多学者针对放牧对群落特征^[13]、植物种组成^[14]、物种多样性^[15]、生产力^[16]和土壤养分^[17]等方面做了相关研究,但多分布在高寒草原、草甸草原以及典型草原,对荒漠草原植被和土壤养分的研究较少。

目前,对于该地区霸王、沙冬青和四合木灌木的研究多集中于地理分布^[18]、水分利用策略^[19]、生理生态适应机制、濒危机理^[20],以及对于干旱胁迫、矿区治理中生理生态适应性研究^[21-22],其目的在于保护植被群落中的优势种,以保证群落结构的稳定性以及区域生态系统的完整性,但西鄂尔多斯地区不同放牧强度对灌木的影响作用还鲜有报道。本研究以该地区广泛分布的3种灌木霸王、沙冬青和四合木为对象,运用野外调查与室内试验分析相结合的方法,从放牧强度(围封、季节性轮牧和自由放牧)的角度,研究不同放牧强度对灌木群落生态学特征及土壤性质的影响,揭示灌木群落和土壤特征对放牧管理干扰响应机制,旨在为该地区荒漠灌木资源合理利用及珍稀濒危植物保护提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于鄂尔多斯市蒙西镇伊克布拉格苏木(图1),属典型的暖温带大陆性气候,干旱少雨,风大沙多,光热资源丰富。全年平均气温 7.8~

8.1℃,全年日照总时数3 047.3~3 227.4 h,年降水量162.4~271.6 mm,干燥度4.0以上。 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 的活动积温3 335.6℃, $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 的活动积温2 729.0℃。地带性土壤为淡钙土,此外还分布有棕钙土、栗钙土、风沙土、盐土等^[23]。研究区主要分布有霸王、沙冬青、四合木,此外,还零星分布有绵刺(*Potania mongolica*)、狭叶锦鸡儿(*Caragana stenophylla*)、沙木蓼(*Atraphaxis bracteata*)、猫头刺(*Oxytropis aciphylla*)、沙生针茅(*Stipa caucasica*)、蒙古韭(*Allium mongolicum*)、三芒草(*Aristida adscensionis*)、锋芒草(*Tragus racemosus*)等。

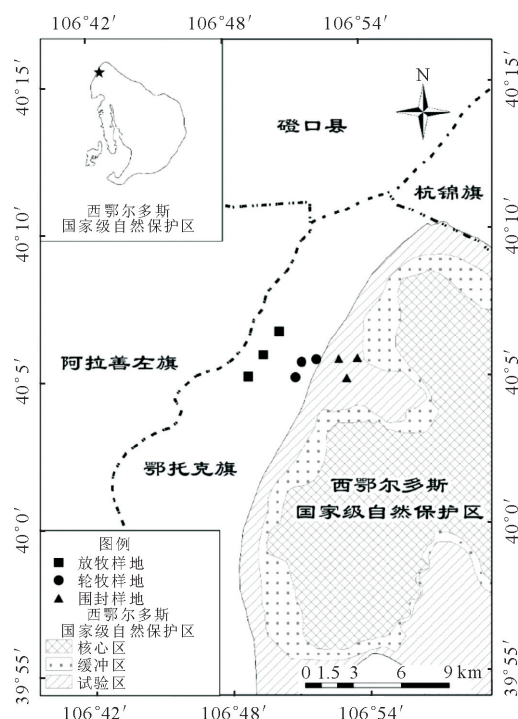


图1 研究区地理位置

Fig. 1 Location of the study area

根据中国地面区域气象站蒙西镇2018年6月1日至2018年9月30日逐日数据,平均气温23.4℃,最高气温38.7℃,最低气温4.4℃,月平均降水量38.0 mm。

1.2 研究方法

1.2.1 样地设置 根据不同放牧模式设置围封区、轮牧区、放牧区各3块重复样地,样地面积均为50 m×50 m,所选区域地表平坦、群落外貌均匀且具有代表性。其中,围封区位于西鄂尔多斯国家级自然保护区试验区内,重复样地间隔距离约1.2 km;轮牧区在围封区正西约2 km,为季节性轮牧,放牧季节为夏秋季(6—10月),冬春季(11月—次年5月)休牧,放牧强度(羊)约1.2只·hm⁻²;重复样地间隔距离约为1 km;放牧区在围封区西偏南约5 km,放牧强度约1.8只·hm⁻²,为自由放牧,重复样地间隔距离约为1.7 km。

1.2.2 灌丛生物量调查及土壤采集方法 2018年7—8月,在围封区、轮牧区、放牧区样地内,分别对所有灌丛进行调查,依据株高、冠幅和地径指标,在每个样地内各选取3株霸王、沙冬青和四合木作为标准株重复样本。生物量调查采用“收获法”,将整株植物全部挖出,挖坑深度为灌丛根系分布范围。灌丛鲜重在试验样地直接获取,整株灌丛分为叶片、枝条、根系3类营养器官,用蒸馏水冲洗干净根系上附着的土壤,并在野外样地现场用精度为0.01 g的天平进行各器官生物量鲜重称量。枝序分级采用“离心式”法^[24],即1级枝是着生在根部的枝条,2级枝是着生在1级枝上的枝条,3级枝是着生在2级枝上的枝条,以此类推;在距标准株根部约0.5 m处挖取土壤剖面,用100 cm³环刀分别于0~20、20~40、40~60、60~80 cm土层取样,用于计算土壤容重。每层另取约500 g土样装入封口袋中,混合均匀带回实验室,风干、去杂、过筛用来测定土壤有机质、碱解N、速效P、速效K、全N、全P、全K、有机碳等指标。

1.2.3 样品分析方法 将野外收获的标准株样品分别按比例取部分带回实验室,先105℃杀青30 min,然后将烘箱温度调至65℃,烘干至恒重,称重天平精度为0.01 g。通过3种灌木的各器官生物量鲜重、干重计算出各器官生物量干鲜比,求和计算出各标准灌丛生物量。

土壤理化性质采用烘干法测定土壤含水率,环刀法测定土壤容重。土壤中有有机质的测定采用重铬酸钾容量法;碱解N采用碱解扩散法;速效P采用NaHCO₃浸提钼锑抗比色法;速效K的测定采用NH₄OAc浸提,火焰光度法;全N采用半微量开式法;全P采用NaOH熔融—钼锑抗比色法;全K采用NaOH熔融,火焰光度法;有机碳采用重铬酸钾外加加热法测定。

物种重要值计算:

$$\text{重要值} = (\text{相对多度} + \text{相对盖度} + \text{相对频度} + \text{相对高度}) / 4 \quad (1)$$

$$\text{相对多度} = (\text{某种植物的多度} / \text{全部植物的多度之和}) \times 100\% \quad (2)$$

$$\text{相对频度} = (\text{某种植物的频度} / \text{全部植物的频度之和}) \times 100\% \quad (3)$$

$$\text{相对盖度} = (\text{某种植物的盖度} / \text{全部植物的盖度之和}) \times 100\% \quad (4)$$

$$\text{相对高度} = (\text{某种植物的高度} / \text{全部植物的高度之和}) \times 100\% \quad (5)$$

应用Excel2013、SPSS20.0软件对数据进行分析处理,用Pearson相关分析描述植被特征与土壤

性状的相关性。

现地调查时,目测试验样地草本盖度小于 5%,故草本相关因子未做调查。根据重要值计算,3 个

样地均以霸王为建群种。根据不同样地植物灌丛密度、灌丛盖度、植株平均地径、平均高度排序均为霸王>沙冬青>四合木(表 1)。

表 1 样地基本情况

Table 1 The basic conditions of two sample areas

样地	主要植物种	灌丛密度/ (株·hm ⁻²)	灌丛覆盖度 (%)	平均地径 /cm	平均高度 /cm	相对频度 (%)	重要值 (%)
围封	霸王	793	10.11	1.62	81.14	70	63
	沙冬青	129	2.74	1.56	55.62	11	18
	四合木	206	2.72	0.99	36.17	19	19
轮牧	霸王	621	10.42	1.68	81.21	59	62
	沙冬青	287	4.61	1.49	65.34	27	23
	四合木	144	2.08	0.92	41.77	14	15
放牧	霸王	894	4.04	1.25	61.49	73	52
	沙冬青	246	1.47	1.01	45.48	20	27
	四合木	85	1.54	0.74	33.64	7	21

2 结果与分析

2.1 放牧干扰对荒漠灌丛生长特征的影响

霸王灌丛植被覆盖度、平均冠幅、平均高度和平均基径在 3 种样地中均表现为轮牧区>围封区>放牧区(图 2),平均冠幅和平均基径在各放牧强度间均具有显著差异($P<0.05$),围封区和轮牧区的平均高度显著高于放牧区($P<0.05$)。沙冬青灌丛的生长特征变化规律与霸王灌丛基本一致,且四合木的生长特征除平均基径外,轮牧区和围封区的平均冠幅和平均高度均显著大于放牧区($P<0.05$);对平均基径而言,虽然围封区在数值上高于轮牧区,但二者间并不存在显著差异。说明放牧严重影响了该地区主要灌木的生长,而围封和轮牧对于这种状况具有明显的改善作用。

2.2 放牧干扰对荒漠灌丛生物量分配的影响

围封区霸王灌丛的叶生物量最大,轮牧区次之,放牧区最小,且在不同放牧强度间均存在显著差异($P<0.05$);放牧区的一级枝生物量显著低于围封区($P<0.05$),而与轮牧区间不存在显著差异;围封区和轮牧区的二级枝生物量显著大于放牧区($P<0.05$);三级枝生物量在不同放牧方式间均具有显著差异($P<0.05$)。围封区和轮牧区沙冬青的各级地上生物量(叶、一级枝、二级枝、三级枝)均显著大于放牧区($P<0.05$)。与霸王和沙冬青灌丛的地上生物量类似,放牧区的四合木灌丛各级地上生物量均显著低于围封区和轮牧区($P<0.05$)(表 2)。上述结果说明牲畜对灌丛的啃食在叶以及各级枝上均有发生。为明确牲畜主要啃食灌丛的哪一部分,进一步分析放牧区较围封区各级地上生物量的下降比率,发现放牧区的霸王和沙冬青的叶生物量较围封

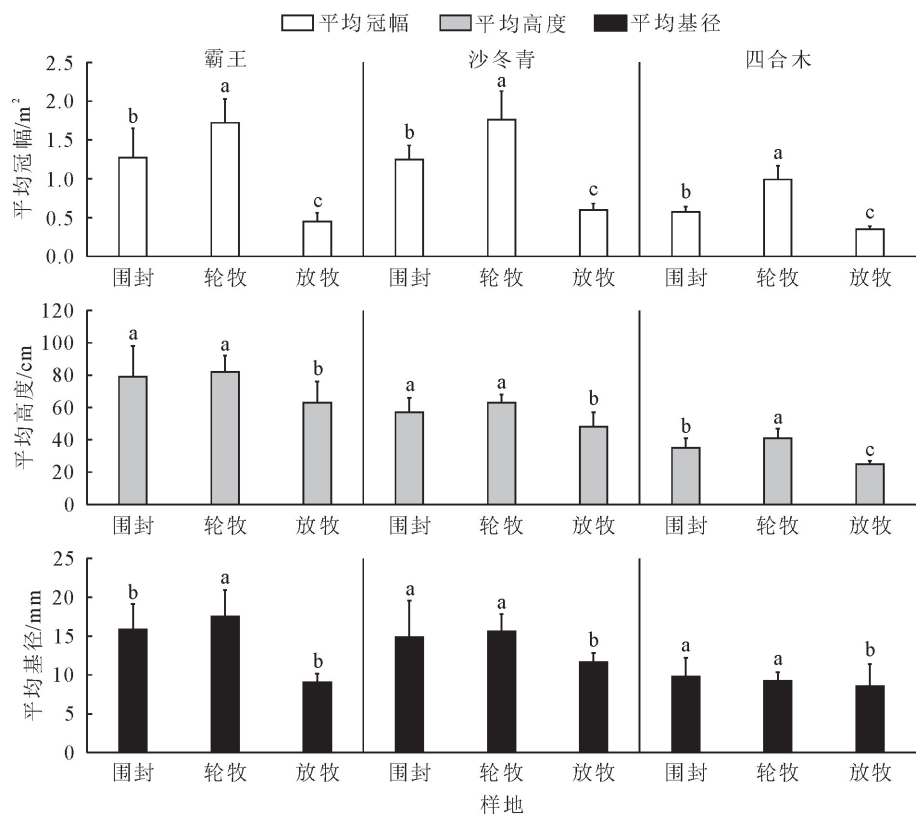
区的下降率最大,分别为 59.36%和 53.46%,而四合木的三级枝生物量在放牧区和围封区间差异最大,放牧区较围封区降低了 66.3%。这说明,该地区牲畜主要啃食霸王和沙冬青的叶结构以及四合木灌丛的三级枝。3 种灌木的根生物量和总生物量均表现出围封>轮牧>放牧的规律($P<0.05$)。围封区霸王、沙冬青和四合木的根生物量分别是放牧区的 2.16、2.29 倍和 1.59 倍,总生物量分别是放牧区的 1.78、1.98 倍和 1.84 倍。由此可见,放牧导致灌木生物量明显降低,而围封则是恢复灌木生物量的有效手段。

2.3 放牧干扰对荒漠灌丛土壤性状的影响

3 种灌丛土壤有机碳均随土层深度的增加逐渐递减(图 3),且各土层间差异显著($P<0.05$)。放牧区霸王灌丛 0~20 cm 土层土壤有机碳含量低于围封区和轮牧区,较二者分别显著下降了 43.8%和 36.9%;在 20~40、60~80 cm 土层内,轮牧区的土壤有机碳含量最大,围封区次之,放牧区最小($P<0.05$)。沙冬青灌丛 0~60 cm 土层土壤有机碳含量均为围封区>轮牧区>放牧区,而深层土壤(60~80 cm)的有机碳含量变化稍有不同,为轮牧区低于围封区和放牧区。放牧区四合木灌丛 0~20 cm 的土壤有机碳含量显著低于轮牧区和围封区,且不同放牧强度间存在显著差异($P<0.05$),随着土层深度的增加,有机碳含量在各放牧区间的变化规律发生了改变。总体而言,放牧降低了各种灌丛浅层土壤(0~20 cm)中的有机碳含量。

3 种灌丛下土壤全 N 均随土层深度的增加逐渐递减,且各灌丛土壤在 0~20 cm 土层的全 N 含量对放牧干扰的响应规律一致,均表现为放牧区大于围封区和轮牧区。灌丛下层土壤全 N 含量在各放

牧强度间具有显著性差异($P<0.05$),多数土层全 N 含量表现出轮牧区>放牧区>围封区的规律。说明放牧干扰对灌丛土壤全 N 含量的影响几乎相同,放牧区表层土(0~20 cm)中的全 N 含量最高,且干扰作用在 20~80 cm 的较深层土范围内仍然存在,轮牧有助于深层土壤(20 cm 以下)中 N 素的积累。



注:不同小写字母表示不同放牧强度对同一种灌丛生长特征差异显著($P<0.05$)。

图 2 围封和放牧对不同灌木生长特征的影响

Fig. 2 Effects of enclosed and uncontrolled grazing on the growth characteristics of different shrubs

表 2 围封和放牧对不同灌木单株生物量分配特征的影响

Table 2 Effects of enclosed and uncontrolled grazing on the single plant biomass distribution characteristics of different shrubs g

群落类型	处理	叶生物量	一级枝生物量	二级枝生物量	三级枝生物量	根生物量	总生物量
霸王	围封	106.43±5.22a	180.81±4.27a	193.06±14.33a	112.77±0.11b	890.63±86.12a	1483.72±109.84a
	轮牧	80.96±12.14b	149.98±54.46b	182.92±19.01a	163.83±39.19a	701.23±72.79b	1278.95±175.41b
	放牧	43.25±11.20c	144.11±32.17b	136.78±15.08b	97.42±29.56c	411.57±8.81c	833.14±44.24c
沙冬青	围封	229.43±86.30a	220.01±93.33b	168.03±47.51a	65.68±11.07b	757.37±34.67a	1440.53±186.85a
	轮牧	155.15±21.57b	270.20±99.26a	147.21±42.11b	86.15±12.13a	617.19±90.99b	1275.91±241.79b
	放牧	106.78±52.33c	123.36±11.41c	120.71±31.14c	46.01±21.85c	330.62±24.15c	727.49±34.91c
四合木	围封	283.38±14.91a	332.75±11.38b	341.90±74.27b	226.53±38.21a	1129.26±29.97a	2313.84±92.34a
	轮牧	216.99±23.86b	401.27±112.97a	429.77±97.99a	231.72±63.11a	770.98±34.94b	2050.75±106.92b
	放牧	136.41±0.01c	131.85±37.02c	199.67±12.08c	76.33±0.01b	708.22±80.35c	1252.51±105.28c

注:不同小写字母表示不同放牧强度对同一种灌丛各级生物量差异显著($P<0.05$)。

灌丛土壤全 P 含量随土层深度的增加而降低,且相同处理下不同土层间的差异性显著($P<0.05$)。轮牧区霸王灌丛各土层全 P 含量均显著低于围封区和放牧区($P<0.05$),放牧区沙冬青灌丛和四合木灌丛各土层的全 P 含量均显著高于围封区和轮牧区($P<0.05$)。

当放牧强度相同时,不同植物灌丛的土壤容重均随土层深度的增加而增加。各土层土壤容重均为

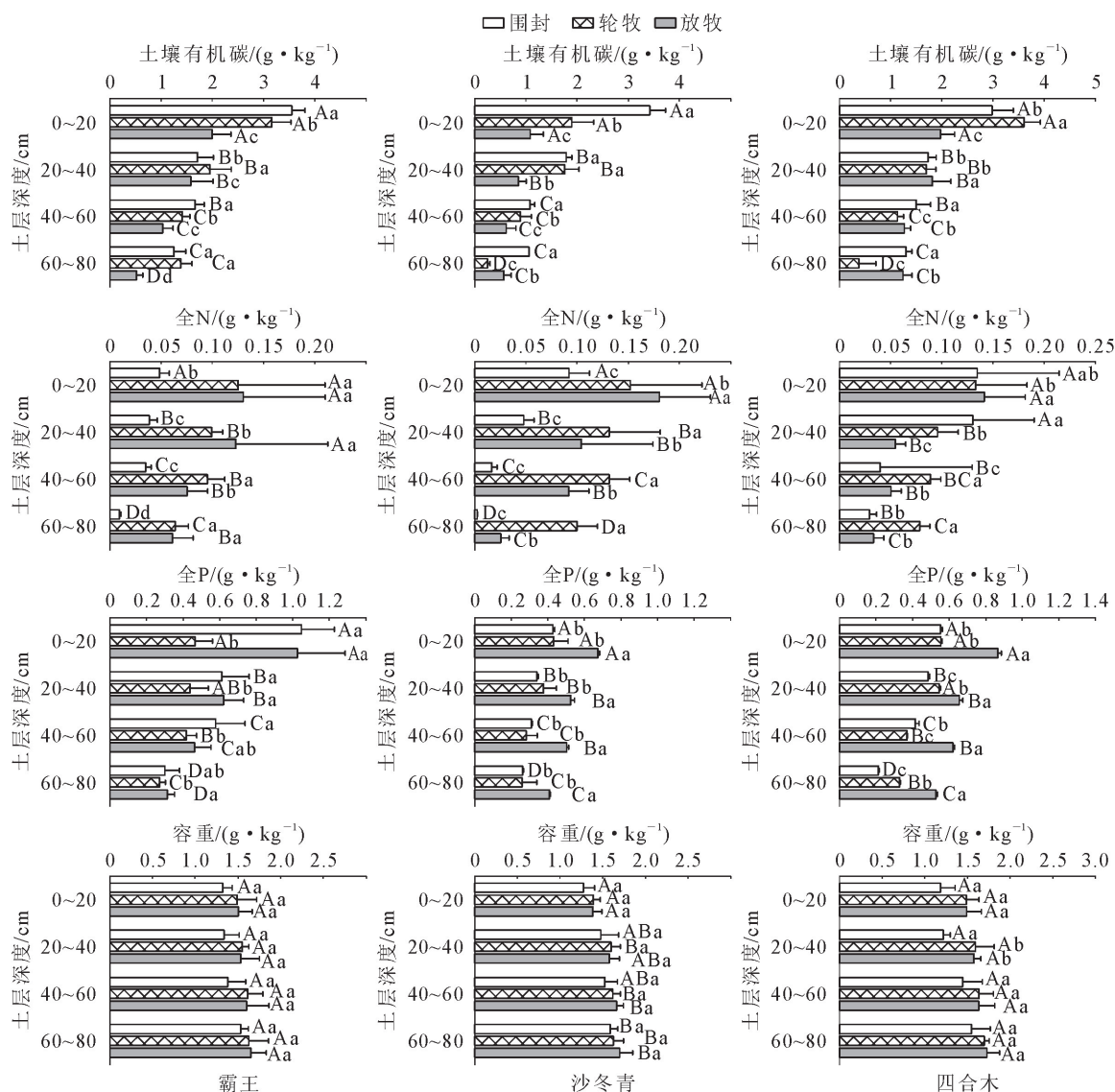
放牧区>轮牧区>围封区,在表层土中(0~20 cm),围封区各灌丛土壤容重分别为 1.32、1.28 g·cm⁻³和 1.19 g·cm⁻³,较放牧区显著降低了 12.58%、7.91%和 20.13%。表明放牧活动会造成土壤容重的增加,改变土壤通气性。

2.4 灌丛群落与土壤性状的关系

霸王灌丛的土壤有机碳含量与覆盖度、平均冠幅、平均基径、叶生物量、枝生物量、根生物量和总生

物量间呈显著正相关;全 N 和全 P 与植被特征间的相关关系并不显著;容重与平均冠幅、枝生物量间呈极显著正相关,相关系数为 0.995 和 0.997,并与覆盖度、平均基径和总生物量的相关性显著。沙冬青灌丛土壤有机碳与叶生物量、根生物量和总生物量显著正相关;全 N 与植被特征间相关性不显著;全 P 与平均基径、叶生物量、枝生物量、根生物量和总生物量间存在显著负相关;容重与叶生物量、平均基径、根生物量和总生物量显著正相关。四合木灌丛

土壤有机碳与覆盖度、平均基径、叶生物量、根生物量和总生物量呈显著正相关;全 N 与平均高度和平均冠幅显著正相关;全 P 与叶生物量、枝生物量和总生物量间存在显著负相关;容重与平均冠幅、枝生物量和总生物量呈显著正相关(表 3)。综上所述,不同灌丛群落土壤性状均与植被各级生物量间存在显著相关关系,说明土壤养分变化对灌木生物量的分配具有重要影响。



注:不同大写字母表示同一群落相同处理下土壤不同土层深度间差异显著($P < 0.05$),不同小写字母表示同一群落相同土层深度不同处理间差异显著($P < 0.05$)。

图 3 围封和放牧对不同灌木群落土壤性状的影响

Fig. 3 Effects of enclosed and uncontrolled grazing on the soil characteristics of different shrubs communities

3 结论与讨论

自由放牧降低了西鄂尔多斯地区霸王、沙冬青和四合木灌丛的覆盖度、平均高度、冠幅、平均基径、生产力和土壤养分含量,增加了土壤容重。而轮牧和围封有助于植被覆盖度和各生长指标的恢复,并

且能够有效提高土壤固碳能力和 N 素积累。长时间不合理无节制的放牧是该地区灌丛植被退化的重要原因,而围封则是恢复植被最为有效的措施。

3.1 荒漠灌丛生物量特征对放牧活动的响应

放牧是对草地资源最主要的利用形式,围封和轮牧有利于草地资源的可持续利用^[25]。植物的生

长主要受到当地的气候条件、土壤质地和地形等环境因素的影响,但对同一区域而言,这些因素基本相同,因而影响群落特征的主要因素是放牧强度的大小^[5]。研究表明,轮牧区的灌丛覆盖度、平均高度、平均冠幅和平均基径均达到最高值,围封区次之,放牧区的植被生长状况最差,表明放牧强度增加会影响灌丛地上枝叶和基径生长状况,导致生长指标下降,覆盖度降低,这与马骏骥等^[26]研究结果一致。

表 3 植被特征与土壤性状相关性分析

Table 3 Pearson correlation coefficients between vegetation characteristics and soil properties

灌丛	土壤养分	覆盖度	平均高度	平均冠幅	平均基径	叶生物量	枝生物量	根生物量	总生物量
霸王	土壤有机碳	0.990 *	0.941	0.982 *	0.981 *	0.968 *	0.964 *	0.959 *	0.983 *
	全氮	-0.490	-0.188	-0.389	-0.351	-8.818	-0.452	-0.813	-0.757
	全磷	0.145	-0.027	0.266	0.110	0.414	0.375	0.376	0.361
	容重	0.953 *	0.921	0.995 * *	0.962 *	0.929	0.997 * *	0.908	0.946 *
沙冬青	土壤有机碳	0.577	0.680	0.744	0.827	0.970 *	0.799	0.970 *	0.950 *
	全氮	0.621	0.573	0.682	0.506	0.228	0.468	0.130	0.227
	全磷	-0.884	-0.938	-0.905	-0.986 *	-0.973 *	-0.985 *	-0.968 *	-0.988 *
	容重	0.809	0.880	0.928	0.970 *	0.990 * *	0.946	0.967 *	0.984 *
四合木	土壤有机碳	0.982 *	0.605	0.791	0.981 *	0.978 *	0.811	0.968 *	0.968 *
	全氮	0.712	0.956 *	0.980 *	0.862	0.755	0.941	0.586	0.874
	全磷	-0.943	-0.815	-0.935	-0.937	-0.966 *	-0.962 *	-0.840	-0.994 * *
	容重	0.912	0.860	0.963 *	0.946	0.939	0.973 *	0.806	0.988 *

注: * 表示 $P<0.05$, * * 表示 $P<0.01$ 。

植物生物量是生态系统生产力的重要表现,也是衡量该生态系统健康与否的重要指标^[28],在面对干旱胁迫时,植物营养器官分配会表现出一定的差异性,促进根冠比增加^[29]。研究结果表明,放牧区的各级生物量均显著低于轮牧区和围封区。这是因为家畜对灌丛更为频繁的啃食导致植株的生物量显著下降,同时损害了其营养器官,使光合速率减慢,物质能量的积累变慢。轮牧作为一种适度的放牧方式,对草地资源的利用相对合理且节制,家畜对灌丛顶端和衰老组织进行采食有助于刺激植物生长,维持植物的正常生产力。对草地实施围封措施后,家畜对灌丛不再进行啃食和踩踏,灌木生长速度加快,生物量增加,从而达到植被恢复的效果^[30-32]。

3.2 荒漠灌丛土壤性状对放牧活动的响应

放牧对草地生态系统的影响还体现在土壤结构和养分含量的变化^[33]。土壤肥力主要通过土壤养分含量来体现,在所有土壤养分中,C、N 和 P 是最为重要的化学元素,其含量与生态系统能否正常发挥功能联系紧密^[34]。由于荒漠草原土壤自身结构和养分动态转化过程的复杂性、对外界刺激反应的滞后性和适当应对极端生境的弹性,使得众多学者在放牧干扰对土壤性状影响的研究结果上并不统一^[35-36]。李生军^[37]在高寒草甸土壤养分对放牧压力响应的研究表明,当放牧强度相同时,同种灌丛群

现阶段关于放牧干扰对荒漠灌丛本身的影响研究较少,但研究结果与本研究类似,即围封是恢复灌丛群落正常生长的有效手段。赵生龙等^[5]在对乌拉特荒漠灌丛群落的研究中发现,对照组(围封区)的灌丛盖度、高度和地上生物量均高于中度放牧区和重度放牧区。杨维康等^[27]在类似生境放牧对荒漠植物群落影响的研究中发现,围封区内的梭梭株高和冠幅均显著高于放牧区。

落土壤中的有机质、全 N 和全 P 均随土层深度的增加显著递减,这可能与灌丛根系垂直分布密度有关,在土层较浅的范围内,植物根系与土壤养分交换更为频繁^[38]。各灌丛群落不同土层深度土壤养分含量对放牧干扰的响应规律并不统一。不同灌丛群落在 0~20 cm 的土壤有机碳含量均为放牧区显著低于围封区和轮牧区,随土层深度的增加,除四合木群落 40~60 cm 外,其余各土层有机碳含量同样表现出围封区和轮牧区大于放牧区的规律。土壤有机质是植物养分元素循环的中心,而有机碳是有机质的主要组成,凋落物和土壤有机质能增加土壤团聚体的稳定性和渗透率,能减少雨滴和径流等对土壤的影响,同时也能有利于有机碳的积累^[39]。不同放牧强度对灌丛群落土壤全 N 影响的研究中发现,放牧干扰对各土层全氮含量的影响作用基本相同,即在 0~20 cm 土层中,放牧区的土壤全 N 含量显著高于轮牧区和围封区。分析其原因,可能是表层土壤中含有较多的家畜排泄物,研究区干旱的气候条件有助于 N 循环加速,土壤矿化作用加强,且向表层富集,使得土壤硝态 N 含量增加^[40]。而随土层加深,轮牧区的全 N 含量逐渐大于放牧区和围封区,这说明轮牧有助于深层土壤的 N 素积累^[41]。可以看出,轮牧和围封可以提高灌丛群落的土壤有机碳和全 N 含量。究其原因,轮牧和围封降低了人为干扰,将大

量的枯枝落叶归还地表,且为土壤养分的积累提供了充足的时间^[42-43]。本研究中,全P对放牧干扰的响应规律与有机碳和全N正好相反,除霸王灌丛0~20 cm和40~60 cm土层外,其余各土层全P含量均为放牧区显著高于围封区和轮牧区,这可能和P的化学特性有关,其缓慢的移动性释缓了放牧扰动的压力^[44]。但在高寒草甸草原,全P却表现为随放牧强度的增加逐渐递减^[45]。

研究表明,灌丛土壤容重随土层深度而增加,这与周万海等^[46]的研究结果一致,植物根系的分布与生长是其变化的主导因素^[47]。随土层深度的增加,植物根系分布密度减小,土壤与植物根系的水分和养分循环减弱,加之土壤温度降低,通气性变差,导致土壤结构紧密,土壤孔隙度减小,容重增加^[48]。同时,不同放牧强度下灌丛土壤容重的变化表现为放牧区>轮牧区>围封区。这也证明放牧周期越长,强度越大,土壤紧密程度越高,容重越大,该结果与前期的众多研究结果一致^[49-53]。在植被特征和土壤性状相关性分析中发现,除全N以外,其余的土壤性状均与地上植被的生物量存在显著相关关系。其中,只有全P与生物量的相关关系为显著负相关,这也解释了为什么放牧区的全P含量高于围封区和轮牧区,恰恰是因为放牧降低了该地区的灌丛生物量。

参考文献:

- [1] 王珊,党晓宏,高永,等.西鄂尔多斯高原5种荒漠灌丛土壤碳排放特征[J].干旱区研究,2018,35(4):796-803.
- [2] 孙安安,智颖飙,姜平平,等.西鄂尔多斯4种荒漠植物光合作用特征与差异性[J].生态学报,2019,39(13):4944-4952.
SUN A A,ZHI Y B,JIANG P P,*et al.* Characteristics of and differences in photosynthesis in four desert plants in western Ordos[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(13): 4944-4952. (in Chinese)
- [3] 智颖飙,李红丽,崔艳,等.子遗植物四合木(*Tetraenamongolica*)迁地保护中的光合作用日变化特征与生理生态适应性[J].生态环境学报,2015,24(1):14-21.
- [4] 王彦荣,曾彦军,付华,等.过牧及封育对红砂荒漠植被演替的影响[J].中国沙漠,2002,22(4):14-20.
- [5] 赵生龙,左小安,张铜会,等.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[J].干旱区研究,2020,37(1):1-11.
ZHAO S L,ZUO X A,ZHANG T H,*et al.* Response of relationship between community species diversity and aboveground biomass to grazing intensity in the Urat Desert steppe in north China[J]. Arid Zone Research, 2020, 37(1): 1-11. (in Chinese)
- [6] HOOPER D U,CHAPIN F S,EWEL J J,*et al.* Effects of biodiversity on ecosystem functioning: a consensus of current knowledge[J]. Ecological Monographs, 2005, 75(1): 3-35.
- [7] 赵丽娅,钟韩珊,赵美玉,等.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[J].生态环境学报,2018,27(10):1783-1790.
ZHAO L Y,ZHONG H S,ZHAO M Y,*et al.* Effect of enclosure and grazed management on aboveground biomass and species diversity in sandy grasslands of Horqin sandy land, eastern Inner Mongolia, China[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2018, 27(10): 1783-1790. (in Chinese)
- [8] 何亚龙,李刚,龙凌云,等.黄土丘陵沟壑区不同群落类型对土壤特性及生物量的影响[J].西北林学院学报,2011,26(6):1-7.
HE Y L,LI G, LONG L Y,*et al.* Effects of different vegetation types on soil characteristics and plant biomass in the Loess Hilly region[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2011, 26(6): 1-7. (in Chinese)
- [9] 泽让东科,文勇立,艾鹭,等.放牧对青藏高原高寒草地土壤和生物量的影响[J].草业科学,2016,33(10):1975-1980.
- [10] 汪诗平,李永宏,王艳芬,等.不同放牧率对内蒙古冷蒿草原植物多样性的影响[J].植物学报,2001,43(1):89-96.
- [11] 董全民,赵新全,马玉寿,等.牦牛放牧率与小嵩草高寒草甸暖季草地地上、地下生物量相关分析[J].草业科学,2005,22(5):65-71.
- [12] 红梅,余娜,赵宏儒,等.放牧对土壤碳、氮含量空间变异的影响[J].草业科学,2013,30(4):521-527.
- [13] 宋磊,董全民,李世雄,等.放牧对青海湖北岸高寒草原植物群落特征的影响[J].草业科学,2016,33(8):1625-1632.
- [14] 杨勇,刘爱军,李兰花,等.不同干扰方式对内蒙古典型草原植物种组成和功能群特征的影响[J].应用生态学报,2016,27(3):794-802.
YANG Y,LIU A J,LI L H,*et al.* Effects of different disturbance types on plant species composition and functional group characteristics of typical steppe in Inner Mongolia, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27(3): 794-802. (in Chinese)
- [15] 王兴,宋乃平,杨新国,等.放牧扰动下草地植物多样性对土壤因子的响应[J].草业学报,2013,22(5):27-36.
- [16] 赵康,宝音陶格涛.季节性放牧利用对典型草原群落生产力的影响[J].中国草地学报,2014,36(1):109-115.
ZHAO K,BAOYINTAOGETAO. Effect of seasonal grazing use on productivity of grassland community[J]. Chinese Journal of Grassland, 2014, 36(1): 109-115. (in Chinese)
- [17] 林丽,张德罡,曹广民,等.放牧强度对高寒嵩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. (in Chinese)
- [18] 额尔敦格日乐,包玉海.应用叠加分析揭示四合木(*Tetraenamongolica*)、半日花(*Helianthemum songaricum*)的分布与地形土壤之间的关系[J].中国野生植物资源,2013,32(1):38-41.
- [19] 陈婕.内蒙古西鄂尔多斯荒漠珍稀濒危植物水分利用策略[D].北京:中国林业科学研究院,2016.
- [20] 石松利.不同生境四合木(*Tetraenamongolica* Maxim.)生理生态适应机制及濒危机理研究[D].呼和浩特:内蒙古大学,2009.

- [21] 肖星卉,高润宏,王树森,等.西鄂尔多斯古地中海孑遗植物干旱胁迫与保护酶响应研究[J].内蒙古科技与经济,2018(12):58-60.
- [22] 孙安安.西鄂尔多斯三种强旱生植物在矿区治理中的生理生态适应性[D].呼和浩特:内蒙古大学,2019.
- [23] 杨美霞.西鄂尔多斯自然保护区简介[J].内蒙古环境保护,1997,9(2):25-26.
- [24] 胡晓静,张文辉,何景峰,等.不同生境栓皮栎天然更新幼苗植冠构型分析[J].生态学报,2015,35(3):788-795.
- [25] 李玉洁,宋晓龙,修伟明,等.春季休牧对内蒙古羊草草原有机碳储量的影响[J].农业环境科学学报,2013,32(11):2221-2230.
- LI Y J, SONG X L, XIU W M, *et al.* Effects of spring rest grazing on organic carbon storage in *Leymus Chinensis* steppe in Inner Mongolia, China[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2013, 32(11): 2221-2230. (in Chinese)
- [26] 马骏骥,李钢铁,刘慧,等.放牧方式对浑善达克沙地东缘草地植被特征影响[J].内蒙古林业科技,2016,42(2):30-34.
- [27] 杨维康,蒋慧萍,乔建芳.放牧对准噶尔荒漠植物群落及土壤特性的影响[J].干旱区地理,2008(5):659-664.
- [28] 刘娜,白可喻,杨云卉,等.放牧对内蒙古荒漠草原草地植被及土壤养分的影响[J].草业科学,2018,35(6):1323-1331.
- LIU N, BAI K Y, YANG Y H, *et al.* Effect of grazing on vegetation and soil nutrients of a desert steppe in Inner Mongolia[J]. Pratacultural Science, 2018, 35(6): 1323-1331. (in Chinese)
- [29] 邱权,李吉跃,王军辉,等.干旱胁迫下青藏高原4种灌木生物量和根系变化特征及抗旱性[J].西北林学院学报,2013,28(3):1-6,33.
- QIU Q, LI J Y, WANG J H, *et al.* Biomass and root system characteristics and drought resistance of 4 shrubs in Tibetan Plateau under drought stress[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2013, 28(3): 1-6, 33. (in Chinese)
- [30] 马少薇,郭建英,李锦荣,等.放牧强度对短花针茅群落特征及冠层截留的影响[J].中国草地学报,2016,38(5):66-70.
- MA S W, GUO J Y, LI J R, *et al.* Effect of grazing intensity on *Stipa breviflora* communities and canopy interception[J]. Chinese Journal of Grassland, 2016, 38(5): 66-70. (in Chinese)
- [31] 方楷,宋乃平,魏乐,等.不同放牧制度对荒漠草原地上生物量及种间关系的影响[J].草业学报,2012,21(5):12-22.
- [32] 苗福泓,郭雅婧,缪鹏飞,等.青藏高原东北边缘地区高寒草甸群落特征对封育的响应[J].草业学报,2012,21(3):11-16.
- [33] 王长庭,龙瑞军,曹广民,等.高寒草甸不同类型草地土壤养分与物种多样性——生产力关系[J].土壤通报,2008,39(1):1-8.
- [34] 何贵永,孙浩智,史小明,等.青藏高原高寒湿地不同季节土壤理化性质对放牧模式的响应[J].草业学报,2015,24(4):12-20.
- HE G Y, SUN H Z, SHI X M, *et al.* Soil properties of Tibetan Plateau alpine wetland affected by grazing and season[J]. Acta Prataculturac Sinica, 2015, 24(4): 12-20. (in Chinese)
- [35] MCSHERRY M E, RITCHIE M E. Effects of grazing on grassland soil carbon: a global review[J]. Global Change Biology, 2013, 19(5): 1347-1357.
- [36] ZHOU G Y, ZHOU X H, HE Y H, *et al.* Grazing intensity significantly affects belowground carbon and nitrogen cycling in grassland ecosystems: a meta-analysis[J]. Glob Chang Biol, 2017, 23(3): 1167-1179.
- [37] 李生军.土壤有机碳氮和生物量对高寒草甸放牧压力的响应[J].青海畜牧兽医杂志,2018,48(5):29-34.
- [38] 卫智军,乌日图,达布希拉图,等.荒漠草原不同放牧制度对土壤理化性质的影响[J].中国草地,2005,27(5):6-10.
- [39] 郑伟,朱进忠,潘存德.喀纳斯草地群落和土壤理化特征对放牧干扰的响应[J].草业科学,2008,25(8):103-109.
- [40] 裴海昆.不同放牧强度对土壤养分及质地的影响[J].青海大学学报:自然科学版,2004,22(4):29-31.
- [41] 闫瑞瑞,卫智军,辛晓平,等.放牧制度对荒漠草原生态系统土壤养分状况的影响[J].生态学报,2010,30(1):43-51.
- [42] 沈艳,马红彬,谢应忠,等.宁夏典型草原土壤理化性状对不同管理方式的响应[J].水土保持学报,2012,26(5):84-89.
- [43] 文海燕,赵哈林,傅华.开垦和封育年限对退化沙质草地土壤性状的影响[J].草业学报,2005,14(1):31-37.
- [44] 安慧,徐坤.放牧干扰对荒漠草原土壤性状的影响[J].草业学报,2013,22(4):35-42.
- [45] 李文,曹文侠,李小龙,等.放牧管理模式对高寒草甸草原土壤养分特征的影响[J].草原与草坪,2016,36(2):8-13,20.
- [46] 周万海,冯瑞章,满元荣.黄河源区不同退化程度高寒草地土壤特征研究[J].草原与草坪,2008,(4):27-31.
- [47] 路远,张万祥,孙榕江,等.天祝高寒草甸土壤容重与孔隙度时空变化研究[J].草原与草坪,2009,(3):51-54.
- [48] 张永明,高润宏,金洪.西鄂尔多斯荒漠四种灌木根系生态特性研究[J].内蒙古农业大学学报,2005,26(3):39-43.
- ZHANG Y M, GAO R H, JIN H. Studies on the ecological characteristics of four bushes roots in desert of west Erdos [J]. Journal of Inner Mongolia Agricultural University, 2005, 26(3): 39-43. (in Chinese)
- [49] WHEELER M A, TRILICA M J, FRASIER G W, *et al.* Seasonal grazing affects soil physical properties of a montane riparian community[J]. Journal of Range Management, 2002, 55(1):49-56.
- [50] 祝景彬,贺慧丹,李红琴,等.牧压梯度下高寒草甸土壤容重及持水能力的变化特征[J].水土保持研究,2018,25(5):66-71.
- ZHU J B, HE H D, LI H Q, *et al.* Characteristics of soil bulk density and soil water-holding capacity in alpine meadow under grazing gradients[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2018, 25(5): 66-71. (in Chinese)
- [51] 柴锦隆.模拟践踏和降水对高寒草甸土壤理化性质和微生物数量的影响[D].兰州:甘肃农业大学,2018.
- [52] 王天乐,卫智军,刘文亭,等.不同放牧强度下荒漠草原土壤养分和植被特征变化研究[J].草地学报,2017,25(4):711-716.
- WANG T L, WEI Z J, LIU W T, *et al.* Study on changes of soil nutrients and plant community of *Stipa breviflora* steppe under different grazing intensities[J]. Acta Agrestia Sinica, 2017, 25(4): 711-716. (in Chinese)
- [53] 杨红善,那·巴特尔,周学辉,等.不同放牧强度对肃北高寒草原土壤肥力的影响[J].水土保持学报,2009,23(1):50-153.