

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

王悦骅, 宋晓辉, 王占文, 康 静, 韩国栋, 王忠武*

(内蒙古农业大学 草原与资源环境学院, 呼和浩特 010010)

摘 要: 该研究于内蒙古自治区乌兰察布市四子王旗农牧科学院基地进行, 试验采用完全随机区组设计, 3 个区组内各自设置了对照(CK)、轻度载畜率(LG)、中度载畜率(MG)、重度载畜率(HG)处理, 在每个载畜率试验小区内随机设置了 4 个降水梯度(自然降水、减少 50% 降水、增加 50% 降水、增加 100% 降水), 在短花针茅荒漠草原不同载畜率试验基础上模拟降水试验, 分析植物地上地下生物量对载畜率和降水变化的响应特征。结果表明: (1) 4 种载畜率基础上增加 50% 降水, 短花针茅荒漠草原的植物种数显著高于减少 50% 降水 ($P < 0.05$), 但与增加 100% 降水无显著差异; 轻度载畜率下增加 50% 降水时物种数最多。(2) 轻度、中度载畜率下增加 50% 降水地上生物量显著高于减少 50% 降水和自然降水, 但与增加 100% 降水无显著差异; 水分改变均没有使围封、重度载畜率地上生物量出现显著变化。(3) 随着载畜率的增加, 根系现存量随着土层的深度增加而逐渐降低, 水分增加使得根系现存量出现降低趋势。(4) 根系现存量与地上生物量呈一次函数极显著正相关关系 ($R = 0.92, P < 0.01$)。

关键词: 短花针茅; 荒漠草原; 载畜率; 降水; 地上生物量; 根现存量

中图分类号: Q948.11

文献标志码: A

Responses of Plant Above and Underground Productivity of *Stipa breviflora* Desert Steppe to Stocking Rates and Precipitation

WANG Yuehua, SONG Xiaohui, WANG Zhanwen, KANG Jing, HAN Guodong, WANG Zhongwu*

(College of Grassland Resources and Environment Science, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010010, China)

Abstract: The study was conducted at the Siziwangqi Agriculture and Animal Husbandry Academy Base in Wulanchabu of Inner Mongolia. The stocking rate test used a completely randomized block design, which is included contrast, light stocking rate, moderate stocking rate and high stocking rate in each of three blocks, and four precipitation gradients were randomly set in each stocking rate test area; natural precipitation, 50% reduced, 50% increased and 100% increased. The simulated precipitation test and the stocking rate test based on the different stocking rate tests of *Stipa breviflora* desert were carried out to analyze the corresponding characteristics of the aboveground and underground biomass of the plant on the stocking rate and precipitation and the results have been showed that: (1) the number of plant species in *S. breviflora* desert based on 4 species of stocking rates in 50% increased precipitation was significantly higher than that of 50% reduced precipitation ($P < 0.05$), but it was no significant difference with 100% in-

收稿日期: 2018-05-21; 修改稿收到日期: 2018-07-20

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0500504); 国家自然科学基金(31560140, 31260124, 31270502, 31760143); 内蒙古自治区重大科技专项和西部之光项目。本项目受教育部草地资源重点实验室和农业部饲草加工、生产和高校利用重点实验室以及教育部创新团队(IRT17R59)资助

作者简介: 王悦骅(1992-)在读硕士研究生, 研究方向为草地生态与资源管理。E-mail: yuehuawang1992@163.com

* 通信作者: 王忠武, 教授, 研究方向草地生态与资源管理。E-mail: zhongwuwang1979@163.com

creased precipitation, ($P > 0.05$) and in light stocking rate, the number of species in 50% increased precipitation was the most; (2) The aboveground biomass of 50% increased precipitation in light and moderate stocking rate was significantly higher than that of 50% reduced precipitation and environmental rainfall, but it was not different with 100% increased precipitation ($P > 0.05$). Whereas, precipitation did not lead to significant changes in the amount of aboveground biomass ($P < 0.05$) in the enclosure and the heavy stocking rate; (3) With the increase of stocking rate, the root stock decreased gradually as the depth of the soil layer increased, increased water content also reduced the amount of root stock; (4) There was a significant positive correlation which has been shown as a linear function between root exudates and aboveground biomass ($r = 0.92, P < 0.01$).

Key words: *Stipa breviflora*; desert steppe; stocking rate; precipitation; aboveground biomass; root stock

草地是陆地生态系统中重要的组成部分^[1],它除了具有刈割、放牧的功能,还有更重要的调节碳平衡、减缓温室效应、维持全球气候稳定等生态功能^[2]。草地植物通过光合作用将大气中的二氧化碳固定利用,植物的光合作用不但调节了全球气候还改善了碳循环,并减少了温室气体浓度,对保护环境具有很重要的作用,所以草地生物量的研究受到了越来越多的关注^[3-4]。生物量是植被碳汇的载体,它是群落中所有植物在某一时间单位面积上的总和,生物量的变化可以反映碳平衡状况。近年来环境问题愈演愈烈,越来越多的学者开始研究碳循环并把生态系统中生物量作为重点研究指标^[5]。

放牧一直是草地利用最简单、普遍的利用方式,根据“中度干扰假说”适度的放牧不但可以增加植物多样性还可以提高草地生态系统稳定性,但是,不合理的放牧将会使植物种类组成和多样性发生变化进而导致植物生物量降低^[6]。冯金虎在不同放牧强度对高寒草甸草场的研究报道中指出^[7],轻、中等程度的载畜率会促进地上生物量的增加,而过度放牧会导致生物量的降低。王德利的研究表明^[8],虽然草地生物量在生长季节有两个峰值,但是,随着载畜率的增加峰值出现降低的趋势。王玉辉的研究也表明:随着载畜率的增加,羊草的盖度、生物量都会降低^[9]。家畜的采食除了影响地上生物量,还使地下根的生物量也受到不同程度的影响,在水分的作用下地下生物量也会发生改变^[10-11],地下生物量作为草地植被碳汇的重要部分,在全球碳循环中凸显了重要作用,作为碳汇的基础因此对地下生物量的精确测量变得很有必要^[12]。

土壤温度和水分是影响根系生物量、根系生长和死亡的两个主要环境因子,近年来随着气候的变暖降水格局发生了改变,据 IPCC 预计全球降雨量每 10 年将增加约 0.5% ~ 1%^[13]。Bai 研究发

现^[14],在半干旱温带草原,根产量、死亡率和立根生物量随着降水的增加而减少,而 Green、Meir 等研究表明^[15-16],植物的根由于受到水分胁迫导致死亡率增加,最终导致根系总生物量降低,但是当水分的利用效率增加而减弱水分胁迫时,植物的根系生物量开始增加^[17]。

当放牧和降雨相互作用时,不但会影响植物群落结构还直接威胁到草原生态系统功能。本实验通过野外监测和控制性增加降水相结合的试验方法,以草地植被地上地下生物量在长期不同载畜率下和降水增加状态下的变化规律为研究内容,探讨不同载畜率和降水交互作用下地上地下生物量的变化规律,为荒漠草原寻找合适的放牧策略,并为生态系统的稳定性维持及对降水格局的变化提供一定的理论基础和科学依据。

1 材料和方法

1.1 试验区概况

试验样地位于内蒙古自治区乌兰察布市四子王旗农牧科学院基地(N 41°47'17", E 111°53'46"),典型的大陆性季风气候,2016 年降水主要集中在 6~9 月份,年降水量为 337 mm。植被建群种为短花针茅(*Stipa breviflora*),优势种为冷蒿(*Artemisia frigida*)、无芒隐子草(*Cleistogenes songorica*)。主要伴生种有银灰旋花(*Convolvulus ammannii*)、阿尔泰狗娃花(*Heteropappus altaicus*)、栉叶蒿(*Neopallasia pectinata*)、木地肤(*Kochia prostrata*)、狭叶锦鸡儿(*Caragana stenophylla*)、羊草(*Leymus chinensis*)和冰草(*Agropyron cristatum*)等,植被稀疏且低矮,平均高度为 8 cm,盖度为 17%~20%,由于试验前该地一直属于不合理的放牧方式,使得短花针茅荒漠草地生产力较低。

1.2 试验设计

模拟降水试验是在载畜率试验的基础上建设完

成,载畜率试验采用完全随机区组设计,分为3个区组,每个区组内设有3个载畜率水平和1个不放牧的对照(CK),分别为轻度载畜率(LG)、中度载畜率(MG)、重度载畜率(HG),载畜率值分别为0、0.8、1.92、2.71[羊/(hm²·a)],共4个处理,各个试验区面积均为4.4 hm²,载畜率设计根据王明玖和马长升^[18]以及卫智军^[19]等对内蒙古短花针茅荒漠草原载畜率的研究,进行实地调查研究确定轻度载畜率放羊只数为4只,中度载畜率8只,重度载畜率12只。每年6月开始放牧11月结束放牧,试验羊选用当地2岁蒙古羯羊,早上6点前将各个圈的羊赶到对应小区,傍晚6点赶回羊圈,早晚饮水并在圈内设置羊砖供羊舔食,定期药浴驱虫,每个圈内管理措施一致。在每个载畜率小区随机选取20 m×20 m的地势平坦植被均匀的小样地进行围封,内设4个4 m×4 m降水梯度处理样地分别为:减少降水量的50%(W₋₅₀)、自然降水(W_{CK})、增加降水量的50%(W₊₅₀)和增加降水量100%(W₊₁₀₀)。增加降水的处理数据由样地内气象站提供(Gro Weather® software version 12, Davis instruments corporation, USA),增雨样地所需降水量根据当地每月累积降水量计算得出,每月月中、月末通过人工喷洒到既定样方内,减少50%降水通过自制减雨架子控制降雨量。

1.3 生物量测定

1.3.1 地上生物量 在生长旺季(8月份),于每个不同增水处理样方内随机设置1个1 m×1 m的样方,调查植物的物种数并取其地上生物量。

1.3.2 地下生物量 地下生物量的测定时间与地上生物量的测定相同,在与地上生物量测定同同样方内,随机选取1个取样点相同处理共3个重复,用直径8 cm的根钻分别钻取(0~10 cm, 10~20 cm,

20~30 cm, 30~40 cm)土层的根系样品。将带土的根系样品放入孔径1 mm的尼龙网袋中,用水冲洗并分离杂质后,进行烘干和称重,计算取得地下生物量。

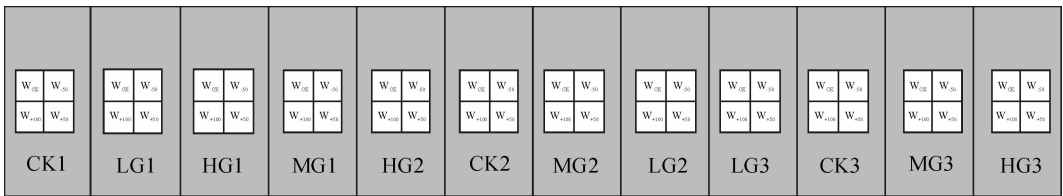
1.4 数据处理

使用Excel 2003进行数据处理统计和Sigma-plot 10.0图表构建;采用SAS 9.1软件进行双因素方差分析(ANOVA),Duncan检验法多重比较(P<0.05)。

2 结果与分析

2.1 短花针茅荒漠草原的植物物种数对载畜率和降水的响应

表1显示,不放牧(CK)时,减少50%降水处理(W₋₅₀)显著低于增加50%降水处理(W₊₅₀),物种数由9种增加到了14种,但W₋₅₀与自然降水、增加100%降水处理(W₊₁₀₀)差异不显著(P>0.05)。轻度载(LG)畜率处理时,W₊₅₀处理的物种数量显著高于W₋₅₀处理(P<0.05),而与W₊₁₀₀处理、自然降水没有显著差异(P>0.05),但W₋₅₀和W₊₁₀₀的物种数量与W₊₅₀处理相比有下降趋势。中度载畜率(MG)处理时,W₋₅₀处理的物种数量显著低于其他3个降水处理(P<0.05),自然降水和W₊₁₀₀处理有11种植物,而W₊₅₀处理植物达到13种,但自然降水、W₊₅₀处理、W₊₁₀₀处理之间却差异不显著(P>0.05)。在重度载畜率(HG)处理基础上W₋₅₀处理的物种数显著低于W₊₅₀处理,W₋₅₀与自然降水和W₊₁₀₀处理的物种数量差异不显著。W₋₅₀、自然降水、W₊₁₀₀下4种放牧处理下的物种数量差异均不显著,而W₊₁₀₀下不放牧显著低于轻度载畜率(P<0.05)。



CK. 对照,不放牧(载畜率值为0);LG. 轻度载畜率[0.8 羊/(hm²·a)];MG. 中度载畜率[1.92 羊/(hm²·a)];HG. 重度载畜率[2.71 羊/(hm²·a)];W₋₅₀. 减少降水量的50%;W_{CK}. 自然降水;W₊₅₀. 增加降水量的50%;W₊₁₀₀. 增加降水量100%。下同

图1 试验设计方案

CK. Ccontrol, no grazing (stocking rate is 0); LG. light stocking rate [0.8 sheep/(hm²·a)]; MG. moderate stocking rate [1.92 sheep/(hm²·a)]; HG. Heavy stocking rate [2.71 sheep/(hm²·a)]; W₋₅₀. Decreased precipitation by 50%; W_{CK}. Natural precipitation; W₊₅₀. Increased precipitation by 50%; W₊₁₀₀. Increase precipitation by 100%. The same as below

Fig. 1 Experiment design program

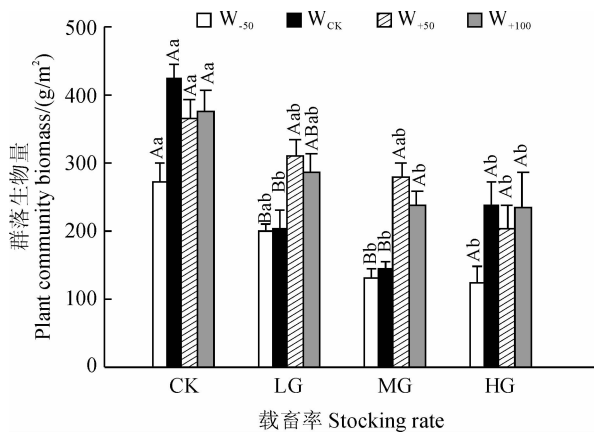
表 1 载畜率和降水梯度对短花针茅荒漠草原植物物种数的影响

Table 1 Effects of stocking rates and precipitation gradients on the number of plant species in *S. breviflora* desert steppe

载畜率 Stocking rate	降水格局 Precipitation pattern			
	W ₋₅₀	W _{CK}	W ₊₅₀	W ₊₁₀₀
CK	9±1.20 aB	11±1.04aAB	14±1.34aA	10±0.51bB
LG	9±1.57aB	11±1.80aAB	15±0.58aA	12±1.01aAB
MG	9±0.51aB	11±1.95aA	13±0.88aA	11±1.40abAB
HG	8±1.33aB	10±1.84aAB	13±1.10aA	11±1.83abAB

注:不同大写字母表示相同载畜率水平不同降水处理间差异显著($P < 0.05$),不同小写字母表示相同降水不同载畜率处理间差异显著($P < 0.05$)

Note: Different capital letters indicate significant differences in different precipitation gradients under the same stocking rate, and different lowercase letters indicate significant differences in different stocking rates under the same precipitation($P < 0.05$)



不同大写字母表示相同载畜率下不同降水间植物生产力差异显著($P < 0.05$)。不同小写字母表示在相同降水条件下不同载畜率间植物生产力显著差异($P < 0.05$)。
下同

图 2 载畜率和降水对短花针茅荒漠草原群落地上生物量的影响

Different capital letters indicate significant differences in plant productivity of different precipitation gradients under the same stocking rate, and different lowercase letters indicate significant differences in plant productivity of different stocking rates under the same precipitation.

The same as below

Fig. 2 Effects of stocking rates and precipitation on aboveground biomass of *S. breviflora* desert steppe community

2.2 短花针茅荒漠草原地上生物量对载畜率和降水的响应

由图 2 可以看出,轻度载畜率(LG)时, W₋₅₀ 下的地上生物量显著低于 W₊₅₀ 生物量($P < 0.05$),而中度载畜率(MG)也出现了这样的结果。不放牧、重度载畜率(HG)下地上生物量没有差异($P >$

0.05)。在 W₋₅₀、自然降水处理时,不放牧(CK)、轻度载畜率地上生物量显著高于中度载畜率、重度载畜率($P < 0.05$)。W₊₅₀ 时,不放牧的地上生物量显著高于重度载畜率($P < 0.05$),且与轻度、中度载畜率没有显著差异($P > 0.05$),而轻度、中度、重度载畜率处理之间的地上生物量均无显著差异。W₊₁₀₀ 时,3 种载畜率之间地上生物量没有显著差异。

2.3 短花针茅荒漠草原根系现存量对载畜率和降水的响应

由图 3 可知,相同降水不同载畜率处理下,0~10 cm 土层 W₋₅₀ 处理时,不放牧、轻度载畜率的根系现存量显著高于中度和重度载畜率;W₊₁₀₀ 时,也出现了同样的结果。10~20 cm 土层时,相同载畜率处理下,不放牧处理 W₋₅₀ 显著高于自然降水、W₊₁₀₀,且 W₋₅₀ 与 W₊₅₀ 无显著差异;轻度载畜率下 W₋₅₀ 显著高于自然降水根系现存量,与 W₊₅₀、W₊₁₀₀ 没有显著差异。中度、重度载畜率下降水格局处理没有差异,然而在 W₋₅₀ 下,不放牧、轻度载畜率根系现存量显著高于中度、重度载畜率;W₊₁₀₀ 时,轻度载畜率显著高于中度、重度载畜率根系现存量,与不放牧根系现存量无显著差异。在 20~30 cm 土层中,相同载畜率不同水分处理下根系现存量已经没有差异,而 W₋₅₀ 时,不放牧的根系现存量显著高于重度载畜率,但与轻度、中度载畜率没有差异;在 W₊₁₀₀ 时,不放牧的根系现存量显著高于另外 3 种载畜率。在 30~40 cm 土层中相同载畜率下水分处理间没有显著差异;而在自然降水处理下,不放牧根系现存量显著高于与中度、重度载畜率,与轻度载畜率没有差异,而 W₊₁₀₀ 处理下,不放牧、轻度载畜率也显著高于中度、重度载畜率根系现存量。在

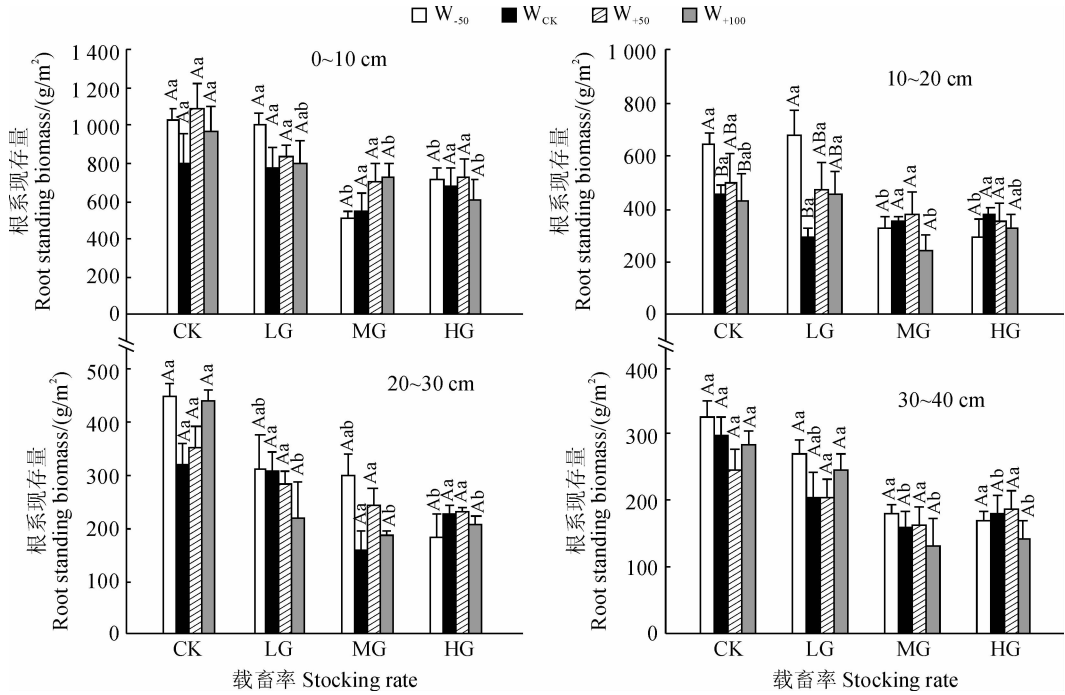


图3 载畜率和降水梯度对短花针茅荒漠草原不同土层根系生物量的影响

Fig. 3 Effects of stocking rates and precipitation gradients on root biomass of different soil layers of *S. breviflora* desert steppe

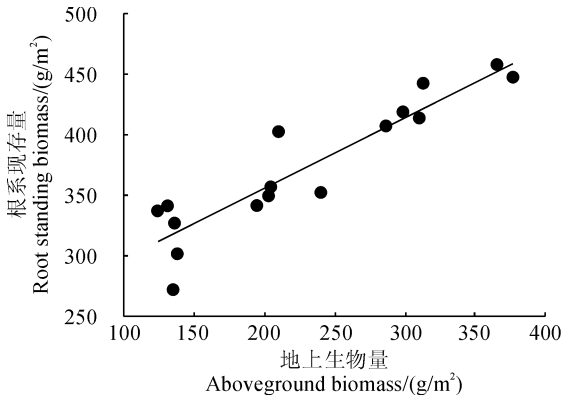


图4 地上生物量与根现存量关系

Fig. 4 Relationship between aboveground biomass and root standing biomass

0~40 cm 土壤中,只有 10~20 cm 土层根系现存量在相同载畜率下受到水分处理显著影响,而其他土层并没有显著变化。

2.4 短花针茅荒漠草原地上生物量与根生物量的关系

在不同载畜率处理基础上开展降水试验,当地上生物量在 132~380 g/m² 时,根系现存量从 272 g/m² 增加到 460 g/m²,对根系现存量(y)和地上生物量(x)建立函数表达式为: $y = 240.623 + 0.5767x$, ($R^2 = 0.84$, $P < 0.01$),表明地上生物量与根系现存量存在着显著正相关关系,即根系现

存量随着地上生物量的增加而增加(图 4)。

3 讨论

3.1 载畜率和降水对物种数的影响

本研究在 4 个不同载畜率处理(每个处理 3 个重复)下发现,从不放牧到重度载畜率时植物物种数出现先增加后减少的趋势,轻度载畜率时物种数目最多,这与王合云的研究结果一致^[20],即适度放牧有利于增加物种的丰富度,而过度放牧破坏了植物的群落结构,地上生物量开始下降,这与黄琛、高伟等的研究结果一致^[21-22],这主要是因为围封小区内,没有被采食过的植物植株高大茂密遮挡了下层植物生长的光资源,抑制了低矮植物生长造成物种数不多;通过适度的载畜率放牧,家畜不但在食草时分泌的唾液能够刺激植物生长,使得牧草的补偿性生长功能得到增强^[23],而且采食过程中的践踏和衰老的组织移除都为植物生长发育提供了生存空间,物种间的竞争能力得到提高^[24],所以植物数目表现出增多的趋势。然而在重度载畜率下适口性好的牧草首先被采食,其光合作用、呼吸作用减弱,这将直接影响到植物的生长、繁殖发育,导致地上生物量减少。在放牧的基础上增加和减少降水,轻度载畜率增加 50% 降水处理物种数比增加 100%、减少 50% 降水的物种数多,这是因为在荒漠草原水分是限制

因子,家畜在践踏草地过程中,土壤变得紧实透气性和渗水性变差^[25]。首先,降水减少直接抑制了土壤微生物和根基微生物活动,植物根系功能受限影响个体生长发育;其次在被采食后植物受损导致竞争能力减弱,所以植物物种数会被减少。在轻度、中度载畜率下草地植被叶片不被完全采食覆盖度较高,而随着载畜率的增加,植被盖度减少裸地增加将导致地表温度过高,土壤蒸发、植物蒸腾的作用使土壤含水量损失最为严重。当增加 50%降水时,调节了由放牧引起的水分失衡,土壤中的水分得到补充,由于家畜在采食过程中打破了土壤养分循环,一方面,家畜的排泄物会增加土壤的肥力,另一方面,家畜的践踏使得凋落物破碎细小化加速分解,而二者促进了养分高效利用,植物得到能量补充能够顺利生长并增强了抵抗力稳定性,竞争能力强,植物物种数增多。重度载畜率下增加 100%降水,由于家畜采食严重,导致植被稀疏使得不能很好拦截水分容易发生地表径流,土壤中氮磷钾等微量元素被冲走,土壤肥力下降,所以,在中等程度下的载畜率增加 50%降水比减 50%、增加 100%降水处理的植物物种数多。

3.2 载畜率和降水对地上生物量影响

本研究中,不放牧小区群落地上生物量高于其他载畜率小区,植物的生产力随着载畜率的增加都开始下降,这一结果与魏志成、张伟华、方楷、董全民、安慧、黄琛相同^[26-29]。这主要是因为围封条件下植物没有受到家畜的采食,根茎叶都保持最初完整状态,利于植物生长使得地上生物量积累,所以围封条件下生物量会表现出最高。而在放牧的整个过程中,首先家畜的践踏作用某种程度上损伤了植物,群落结构发生变化,将会影响到植物对资源的利用分配,最后将影响到植物生长、繁殖发育^[30];其次采食过程中植物的组织、器官、形态受到伤害抑制生长,而衰老组织被移除后则表现出刺激生长。草地生产力主要是受到降水量的影响,水分通过进入土壤进而调控植物生产力和物种组成^[31],而家畜践踏使草地土壤变得紧密导致持水能力下降,植物生长需要的水分得不到供应。本实验中减少 50%降水生物量会出现降低的趋势,而增加 50%、100%降水生物量都出现了增加趋势。在干旱半干旱的短花针

茅荒漠草原,水分是重要的限制因子,水分减少土壤养分不能很好地利用使得植物生长受到影响,增加水分加速了土壤养分循环,土壤微生物、根际微生物活动能力加强,植物的物种组成更加丰富,生物量得到增加。

3.3 载畜率和降水对地下生物量影响

李怡在研究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时表明,载畜率增大地下生物量开始减少,但是轻度载畜率能够增加地下生物量,而且地下生物量都会随着深度增加而减少^[32],本研究也出现了同样的结果。在放牧过程中,地上部分被采食的比例不超过 35%,叶片被采食的比例远小于 40%,根系生长基本不会受到影响;当被采食的比例增大到 50%,根系开始受到影响,生长受到限制,地下根受到抑制后减弱了对干旱、半干旱植物对水分的汲取利用^[33-34]。轻度的载畜率能够刺激植物生长,而过度的采食、践踏使植物叶片破碎化导致根也受到了不同程度的影响。植物生存的环境特点决定了其生物量的分配方式,本试验中当减少水分时,干旱条件下地下生物量分配较多,所以表现出轻度载畜率下减少 50%降水 0~40 cm 土层中根的生物量比其他方式的水分处理高;降水量充足时地下生物量所占比例不大,而把更多的生物量分配给了地上,这是植物自我调节适应环境胁迫的一种功能,这将有利于根系吸收地下水^[35-36]。降水量的减少会影响地下根际分泌物的产生,不利于根从土壤中吸收营养物质;增加降水会促进植物的光合能力,植物地上生物量得到增加,而水分过多时会改变土壤环境形成厌氧环境,土壤微生物会发生诱变形成新的生物影响了对土壤底物的有效利用,不利于植物根生物量的积累^[37]。

4 结 论

根据当地的年降水量可以看出,降水过多或过少的都会影响该地植物的生长发育,而我们可以通过控制载畜率使草原的植物保持最优水平,适度放牧不但可以满足家畜采食的需要,而且还能使植物在生长保育方面达到最佳,是一种比较合理的利用方式,有利于草原长期稳定发展。

参考文献:

- [1] 杨元合, 饶胜, 胡会峰, 等. 青藏高原高寒草地植物物种丰富度及其与环境因子和生物量关系[J]. 生物多样性, 2004, (1): 200-205.
YANG Y H, RAO S, HU H F, *et al.* Plant species richness of alpine grasslands in relation to environmental factors and biomass on the Tibetan Plateau[J]. *Biodiversity Science*, 2004, (1): 200-205.
- [2] 苏日娜, 沮佳星, 金花, 等. 内蒙古草地生产力及载畜量变化分析[J]. 生态环境学报, 2017, 26(4): 605-612.
SU R N, ZU J X, JIN H, *et al.* Changes in grassland productivity and livestock carrying capacity in Inner Mongolia[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2017, 26(4): 605-612.
- [3] 魏志成. 不同类型草地上生物量空间分布格局的研究[D]. 陕西杨陵; 西北农林科技大学, 2016.
- [4] 杨婷婷. 荒漠草原生物量动态及碳储量空间分布研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2013.
- [5] 李刚. 浑善达克沙地稀疏疏林草地生态系统研究: 生物量、生产力与生态恢复途径[D]. 北京; 中国科学院研究生院(植物研究所), 2006.
- [6] 刘秀梅. 不同放牧强度对荒漠草原土壤特性和地上生物量的影响[J]. 草食家畜, 2017, (3): 45-48.
LIU X M. Effects on soil properties and aboveground biomass of desert grassland on different grazing intensities [J]. *Grass-Feeding Livestock*. 2017, (3): 45-48.
- [7] 冯金虎, 赵新全, 皮南林, 等. 不同放牧强度对高寒草甸草场的影响[J]. 青海畜牧兽医学杂志, 1989, (3): 15-17.
FENG J H, ZHAO X Q, PI N L, *et al.* Effect of different grazing intensity on alpine meadow grassland [J]. *Chinese Qinghai Journal of Animal and Veterinary Sciences*, 1989, (3): 15-17.
- [8] 王德利, 王岭. 草食动物与草地植物多样性的互作关系研究进展[J]. 草地学报, 2011, 19(4): 699-704.
WANG D L, WANG L. Interactions between herbivores and plant diversity(Review) [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2011, 19(4): 699-704.
- [9] 王玉辉, 周广胜. 内蒙古羊草草原植物群落地上初级生产力时间动态对降水变化的响应[J]. 生态学报, 2004, (6): 1 140-1 145.
WANG Y H, ZHOU G S. Responses of temporal dynamics of aboveground net primary productivity of *Leymus chinensis* community to precipitation fluctuation in Inner Mongolia[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, (6): 1 140-1 145.
- [10] 董全民, 李青云, 马玉寿, 等. 牦牛放牧率对小嵩草高寒草甸地上、地下生物量的影响初析[J]. 四川草原, 2004, (2): 20-27.
DONG Q M, LI Q Y, MA Y S, *et al.* Effects of yak stocking rates on aboveground and belowground biomass on *Kobresia pava* alpine meadows[J]. *Journal of Sichuan Grassland*. 2004, (2): 20-27.
- [11] 锡林图雅, 徐柱, 郑阳, 等. 不同放牧率对内蒙古克氏针茅草原地下生物量及地上净初级生产量的影响[J]. 中国草地学报, 2009, 31(3): 26-29.
XI L T Y, XU Z, ZHENG Y, *et al.* Influence of different stocking rates on underground biomass and net primary productivity on *Stipa krylovii* steppe in Inner Mongolia [J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2009, 31(3): 26-29.
- [12] 黄德青, 于兰, 张耀生, 等. 祁连山北坡天然草地地下生物量及其与环境因子的关系[J]. 草业学报, 2011, 20(5): 1-10.
HUANG D Q, YU L, ZHANG Y S, *et al.* Belowground biomass and its relationship to environmental factors of natural grassland on the northern slopes of Qilian Mountains [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2011, 20(5): 1-10.
- [13] IPCC. Climate change 2007: The physical Science Basis. Contribution of working Group I to the Fifth Assessment Report of the International Panel on Climate Change[R]. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2007.
- [14] BAI W M, WAN S Q, NIU S L, *et al.* Increased temperature and precipitation interact to affect root production, mortality, and turnover in a temperate steppe: implications for ecosystem cycling[J]. *Glob Change Biol*, 2010, 16: 1 306-1 316.
- [15] GREEN I J, DAWSON LA, PROCTOR J. *et al.* Fine root dynamics in a tropical rain forest is influenced by rainfall [J]. *Plant Soil*, 2005, 276: 23-32.
- [16] METCALFE D B, MEIR P, ARAGAO LEOC, *et al.* The effects of water availability on root growth and morphology in an Amazon rainforest [J]. *Plant Soil*, 2008, 311: 189-199.
- [17] FAY P A, CARLISLE J D, KNAPP A K, *et al.* Productivity responses to altered rainfall patterns in a C4-dominated grassland [J]. *Oecologia*, 2003, 137: 245-51.
- [18] 王明玖, 马长升. 两种方法估算草地载畜量的研究[J]. 中国草地, 1994, (5): 19-22.
WANG M J, MA C S. A study on methods of estimating the carrying capacity of grassland [J]. *Grassland of China*, 1994, (5): 19-22.
- [19] 卫智军, 韩国栋, 杨静, 等. 短花针茅荒漠草原植物群落特征对不同载畜率水平的响应 [J]. 中国草地, 2000, (6): 2-6.
WEI Z J, HAN G D, YANG J, *et al.* The response of *Stipa breviflora* community to stocking rate [J]. *Grassland of China*, 2000, (6): 2-6.
- [20] 王合云. 不同放牧强度对短花针茅荒漠草原植物群落及土壤的影响[D]. 济南: 山东农业大学, 2016.
- [21] 黄琛, 张宇, 赵萌莉, 等. 放牧强度对荒漠草原植被特征的影响[J]. 草业科学, 2013, 30(11): 1 814-1 818.
HUANG C, ZHANG Y, ZHAO M L, *et al.* Effects of different grazing intensities on vegetation characteristics of desert steppe [J]. *Pratacultural Science*, 2013, 30(11): 1 814-1 818.
- [22] 高伟, 鲍雅静, 李政海, 等. 不同保护和利用方式下羊草草原群落生物量及能量功能群构成的比较[J]. 干旱区资源与环境, 2010, 24(6): 132-136.
GAO W, BAO Y J, LI Z H, *et al.* Comparison of biomass and energy functional groups composition under different pro-

- tection and using styles in *Leymus chinensis* grassland community [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2010, **24**(6): 132-136.
- [23] SCHONBACH P, WAN H, GIERUS M, *et al.* Effect of grazing and precipitation on herbage production, herbage nutritive value and performance of sheep in continental steppe[J]. *Grass and Forage Science*, 2012, **67**(4): 535-545
- [24] 杨 婧,褚鹏飞,陈迪马,等. 放牧对内蒙古典型草原 α 、 β 和 γ 多样性的影响机制 [J]. *植物生态学报*, 2014, **38**(2): 188-200.
- YANG J, CHU P F, CHEN D M, *et al.* Mechanisms underlying the impacts of grazing on plant α , β and γ diversity in a typical steppe of the Inner Mongolia grassland[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology* 2014, **38**(2): 188-200.
- [25] 王忠武. 载畜率对短花针茅荒漠草原生态系统稳定性的影响 [D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2009.
- [26] 张伟华, 关世英, 李跃进, 等. 不同牧压强度对草原土壤水分、养分及其地上生物量的影响 [J]. *干旱区资源与环境*, 2000, (4): 62-65.
- ZHANG W H, GUAN S Y, LI Y J, *et al.* Effect of grazing capacity on water content nutrient and biomass of steppe soil [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*. 2000, (4): 62-65.
- [27] 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.
- FANG K, SONG N P, WEI L, *et al.* The effect of different grazing systems on aboveground biomass and interspecific relationships in desert stepper[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2012, **21**(5): 12-22.
- [28] 董全民, 赵新全, 李青云, 等. 牦牛放牧强度对小嵩草高寒草甸草场生产力的影响研究 [J]. *家畜生态学报*, 2006, (4): 73-77.
- DONG Q M, ZHAO X Q, LI Q Y, *et al.* Regressive analysis between stocking rate for yak and aboveground and underground biomass of warm-season pasture in *Kobrecia parva* alpine meadow [J]. *Journal of Domestic Animal Ecology* 2006, (4): 73-77.
- [29] 安 慧, 李国旗. 放牧对荒漠草原植物生物量及土壤养分的影响 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2013, **19**(3): 705-712.
- AN H, LI G Q. Effects of grazing on plant biomass and soil nutrient in desert steppe [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2013, **19**(3): 705-712.
- [30] 侯扶江. 放牧对牧草光合作用、呼吸作用和氮、碳吸收与转运的影响 [J]. *应用生态学报*, 2001, **12**(6): 938-942.
- HOU F J. Effect of grazing on photosynthesis and respiration of herbage and on its absorption and transporation of nitrogen and carbon [J]. *Chinese Journal of Applied Ecolog.* 2001, **12**(6): 938-942.
- [31] 李绍良, 陈有君. 锡林河流域栗钙土及其物理性状与水分动态的研究 [J]. *中国草地*, 1999, (3): 72-77.
- LI S L, CHEN Y J. Study on the soil water dynamic and physical characteristic of chestnut soil in XiLin River Basin. [J] *Chinese Journal of Grassland*, 1999, (3): 72-77.
- [32] 李 怡, 韩国栋. 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 [J]. *内蒙古农业大学学报*, 2011, **32**(2): 89-92.
- LI Y, HAN G D. Effects of different grazing intensities on the underground biomass and its vertical distrbution of the typical *Stipa grandis* steppe [J]. *Journal of Inner Mongolia Agricultural University*, 2011, **32**(2): 89-92.
- [33] 任继周. 草业科学概论 [M]. 北京: 科学出版社, 2014: 225-226, 239-240.
- [34] 王合云. 不同放牧强度对短花针茅荒漠草原植物群落及土壤的影响 [D]. 济南: 山东农业大学, 2016.
- [35] RAFAEL VILLAR, ERIKJ. VENEKLAAS, PEDRO JORDANO, *et al.* Relative rate and biomass allocation in 20 *Aegilops* (Poaceae) species [J]. *New Phytol*, 1998, 140: 425-437.
- [36] 耿浩林. 克氏针茅群落地上/地下生物量分配及其对水热因子响应研究 [D]. 北京: 中国科学院研究生院(植物研究所), 2006.
- [37] 王赟博. 松嫩草地生态系统 CO₂ 交换对氮沉降、降水增加及放牧的响应机制 [D]. 吉林: 东北师范大学, 2016.

(编辑: 潘新社)