

DOI: 10.20103/j.stxb.202312232798

刘嘉慧, 李乐, 罗玉红, 丁勇, 徐诺, 包雨凡, 闫玉春. 放牧强度对典型草原积雪及融雪土壤水分的影响. 生态学报, 2024, 44(15): 6609–6617.

Liu J H, Li L, Luo Y H, Ding Y, Xu N, Bao Y F, Yan Y C. Effects of grazing intensities on snow accumulation and soil water after snowmelt in a typical grassland. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(15): 6609–6617.

放牧强度对典型草原积雪及融雪土壤水分的影响

刘嘉慧¹, 李 乐¹, 罗玉红¹, 丁 勇², 徐 诺¹, 包雨凡¹, 闫玉春^{1,*}

1 北方干旱半干旱耕地高效利用全国重点实验室/中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081

2 内蒙古自治区草原保护生态学重点实验室, 呼和浩特 010010

摘要: 积雪是影响草原春季土壤水分的重要因素, 积雪量主要受降雪量和积雪再分配影响。然而, 很少有研究探讨放牧对积雪量及融雪后土壤水分的潜在影响。研究不同放牧强度对典型草原积雪量及春季融雪后土壤水分的影响及机制, 为草原的合理利用与优化管理提供科学依据。基于锡林郭勒典型草原长期控制放牧试验平台, 于 2016 年和 2017 年, 对禁牧 (G0)、轻度放牧 (G0.75)、中度放牧 (G1.50)、重度放牧 (G2.25)、极重度放牧 (G3.00) 等 5 种放牧处理下的植被、积雪量和土壤水分进行测定。结果表明, 随着放牧强度的增加, 积雪量逐渐减少, 并且 2016 年的平均积雪量比 2017 年高 57.63%。具体而言, 与禁牧处理相比, 极重度放牧使 2016 年和 2017 年的积雪量减少了 75.20% 和 74.53%。随着放牧强度的增加, 春季土壤水分呈逐渐减少的趋势。2016 年和 2017 年禁牧处理的春季土壤水分 (0–40 cm) 为 14.91% 和 10.70%, 是极重度放牧处理的 1.5 倍和 1.4 倍。土壤水分与植被特征 (地上生物量和植被高度) 和积雪 (积雪量和积雪深度) 呈显著正相关 ($P < 0.05$)。相比底层土壤, 表层土壤 (0–5 cm) 水分对放牧的响应更敏感。结构方程模型结果显示, 降雪量、植被和积雪对春季土壤水分具有显著的正作用。放牧通过去除植被, 对草原积雪量和春季土壤水分有负作用。因此, 为了获得更多的积雪量和春季土壤水分, 土地管理者应考虑降低放牧强度或保留部分地块不放牧。

关键词: 放牧; 积雪; 土壤水分; 植被特征; 典型草原

Effects of grazing intensities on snow accumulation and soil water after snowmelt in a typical grassland

LIU Jiahui¹, LI Le¹, LUO Yuhong¹, DING Yong², XU Nuo¹, BAO Yufan¹, YAN Yuchun^{1,*}

1 State Key Laboratory of Efficient Utilization of Arid and Semi-arid Arable Land in Northern China/Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China

2 Key Laboratory of Grassland Conservation Ecology, Inner Mongolia Autonomous Region, Hohhot 010010, China

Abstract: Snow accumulation is a critical factor influencing spring soil water dynamics in grassland ecosystems, with snow mass primarily affected by snowfall and redistribution processes. Nevertheless, there exists a paucity of research investigating the potential impacts of grazing on snow accumulation and subsequent soil water content during the spring thaw period. This study aims to elucidate the effects and underlying mechanisms of various grazing intensities on snow accumulation and the soil water content following snowmelt in spring in a representative grassland ecosystem. By doing so, it seeks to provide a scientific foundation for the rational utilization and optimal management of grasslands. Utilizing a long-term controlled grazing experimental setup established in the Xilingol grasslands, we quantified vegetation characteristics, snow accumulation, and soil water content under five grazing intensities, including ungrazed (G0), lightly grazed (G0.75), moderately grazed (G1.50), heavily grazed (G2.25), and extremely heavy grazed (G3.00) during 2016 and

基金项目: 国家自然科学基金项目 (32230065, 42071070); 重点研发计划课题 (2023YFF1304102); 内蒙古科技计划项目 (2023KYPT0006)

收稿日期: 2023-12-23; **网络出版日期:** 2024-05-24

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yanyuchun@caas.cn

2017. The results revealed a gradual reduction in snow mass with the increasing grazing intensity, with an average snow mass in 2016 being 57.63% higher compared to 2017. Specifically, extremely heavy grazing led to a substantial decrease in snow mass by 75.20% and 74.53% in 2016 and 2017, respectively, when compared to the ungrazed treatment. Soil water content tended to decrease gradually in the spring as grazing intensity increased. In the ungrazed treatment, spring soil water content (0—40 cm) measured 14.91% and 10.70% in 2016 and 2017, respectively, representing 1.5 and 1.4 times higher values than those observed in the extremely heavily grazed treatment. Our analysis indicated significant positive correlation between soil water content and vegetation characteristics (aboveground biomass and plant height), as well as snow accumulation metrics (snow mass and snow depth). The top soil layer (0—5 cm) water exhibited greater sensitivity to grazing compared to deeper soil layers. The results of structural equation modeling showed that snowfall, vegetation characteristics and snow accumulation had significant positive effect on spring soil water. Grazing activities exerted a detrimental effect on snow mass and spring soil water content by depleting vegetation cover. Hence, to obtain increased amounts of snow accumulation and spring soil water, land managers should consider to mitigate the grazing intensity or implementing ungrazed plots as management strategies.

Key Words: grazing; snow accumulation; soil water; vegetation properties; typical grassland

积雪在陆地生态系统季节性积雪覆盖区域具有重要的生态意义,积雪变化能够显著改变积雪期和融雪后的土壤水热状况,进而对植物生长发育、土壤微生物活性、养分循环、温室气体排放等均产生重要影响^[1-3]。积雪融化后能够提供植物萌发等生长关键期所需的土壤水分,对于干旱、半干旱区牧草返青及生产力提升具有重要作用^[4-5]。近几十年来,随着人类活动(如过度放牧)和气候变化影响的加剧,草原区退化趋势明显,冬季积雪量减少使土壤暴露在冷空气中^[6],积雪融化后植被所需的水分和养分也会减少^[7],导致春季干旱尤为严重,直接影响牧草的返青和生产力^[8]。因此,在全球草地退化和干旱化的背景下,研究不同放牧强度对积雪量和土壤水分的影响及机制具有重要意义。

放牧主要通过减少地表植被覆盖对积雪量产生负面影响^[9]。植被覆盖是风吹雪再分配的关键调节因子,主要通过改变地表附近的风速来调节^[10-11],植被覆盖的空间格局直接影响着积雪深度和积雪量的分布格局^[12]。董智等^[13]研究表明,输雪量随着植被高度和盖度的减少呈指数减少的趋势。Essery and Pomeroy^[14]在北极苔原研究表明,积雪会随着灌丛高度的增加而增加,最终累积量受到降雪和风吹雪供应的限制。在内蒙古小叶锦鸡儿灌丛化草地研究表明,积雪厚度与灌丛高度呈显著正相关^[15]。另外,放牧可以通过改变植被和土壤特性来影响土壤水文过程^[16-17]。例如放牧能够通过啃食植被降低植被高度和盖度而减少植被的蒸腾直接耗水,但降低的植被覆盖度也会同时导致土壤表面的蒸发增加^[18-20];放牧过程中家畜踩踏会通过增加土壤紧实度降低土壤的渗透性,进而影响土壤水分^[21]。此外,随着放牧强度的增加,由于植被现存量减少,不能有效地截存风吹雪,从而使积雪量和春季土壤水分下降^[22-23]。

受人类活动及全球变暖等因素的影响,我国90%以上的草原都出现了退化,且由于过度放牧导致植被覆盖减少,在冬春季节强风蚀的作用下,地表积雪难以被有效截存而大量流失,进而加剧了春季干旱影响植物生长,形成负反馈的恶性循环机制。然而,目前有关放牧强度增加对于积雪及积雪融雪后土壤水分的影响还不明确。基于此,本文以内蒙古典型草原为研究区,通过野外实验调查、室内分析相结合,开展不同放牧强度对积雪及春季融雪后土壤水分影响的研究,旨在为草原有效管理雪水资源提供科学依据。

1 试验地概况

研究区位于内蒙古锡林浩特市毛登牧场(116°02′—116°30′E,44°48′—44°49′N)(图1),海拔高度1100 m左右。属于中温带半干旱大陆性草原气候,冬季温度低,降水少,夏季温度高,降水相对较多。年均温-1—0℃,最高温度37.4℃,最低温度-39.9℃,年降雨量约200—350 mm,无霜期90—105 d,年平均风速为3.1 m/s。

土壤以栗钙土为主,土壤有机质含量 2%—3%,土壤肥力相对较高。研究区植被类型为典型草原,优势种为大针茅(*Stipa grandis*)、羊草(*Leymus chinensis*),常见种为多根葱(*Allium polyrhizum*)、糙隐子草(*Cleistogenes squarrosa*)、冰草(*Agropyron cristatum*)等。

实验样地于 2007 至 2014 年间禁牧,以割草利用为主,植被长势良好,于 2014 年建立放牧试验平台。采用完全随机设计 5 个放牧强度处理(图 1):0(禁牧)、0.75(轻度放牧,4 只绵羊)、1.50(中度放牧,8 只绵羊)、2.25(重度放牧,12 只绵羊)、3.00(极重度放牧,16 只绵羊)羊只/hm²,分别记为 G0、G0.75、G1.50、G2.25、G3.00。每个放牧处理 3 个空间重复,每个小区面积为 1.33 hm²。试验动物为乌珠穆沁绵羊(2 龄羯羊),于 2014 年 6 月 10 日开始放牧,9 月 10 日结束,持续放牧 90 d。

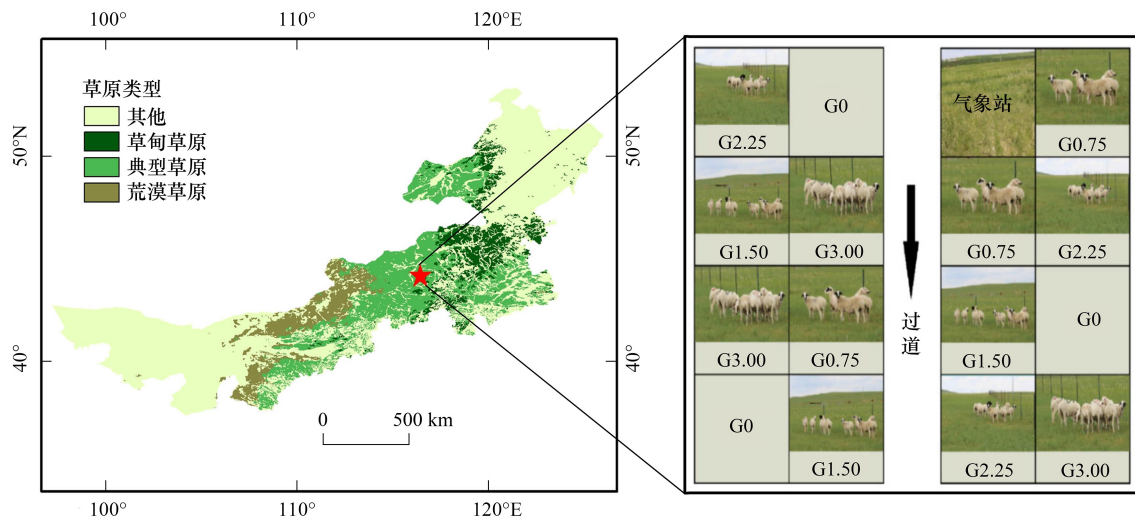


图 1 研究区地理位置和放牧试验设计

Fig.1 Geographic location of the study area and grazing experiment design

G0:禁牧;G0.75:轻度放牧;G1.50:中度放牧;G2.25:重度放牧;G3.00:极重度放牧

2 研究方法

2.1 气象条件调查

有关气温、降水和风速的气象资料均来自于研究区气象站的数据资料。2016 年和 2017 年日气温和日降水量均显示出典型的季节性变化,雨热同期,3 月至 5 月有大风(图 2)。2016 年和 2017 年积雪调查前的累计降雪量(雪水当量)分别为 41.6 mm 和 21.7 mm。

2.2 植物群落特征

在 2015 年 8 月和 2016 年 8 月,每个放牧小区内随机选择 5 个 1 m×1 m 的样方,任意两个样方之间的最小距离>10 m。在每个样方内,每种植物随机选取 3 株以确定其平均高度,记录每种植物的株丛数,将其地上部分物种齐地面刈割,将植物样品带回实验室在 65℃ 下烘干 48 h,用电子天平测定地上生物量。

2.3 积雪调查

为了获得最终的年度积雪数据,在 2016 年 3 月 9 日和 2017 年 3 月 1 日积雪融化前测量了每个不同放牧强度下的积雪深度和积雪量。在每个放牧强度的小区内,沿对角线选择 10 个取样点,每个取样点间隔约 30 m,用尺子测量积雪深度,然后用内径为 5.2 cm 的不锈钢管取样。雪样收集在塑料袋中被带回实验室,然后用电子天平称雪样品的质量(0.01 g)。

2.4 土壤水分测量

在 2016 年 4 月 11 日和 2017 年 4 月 14 日测定各放牧处理下的土壤水分。在每个放牧小区内,采用五点

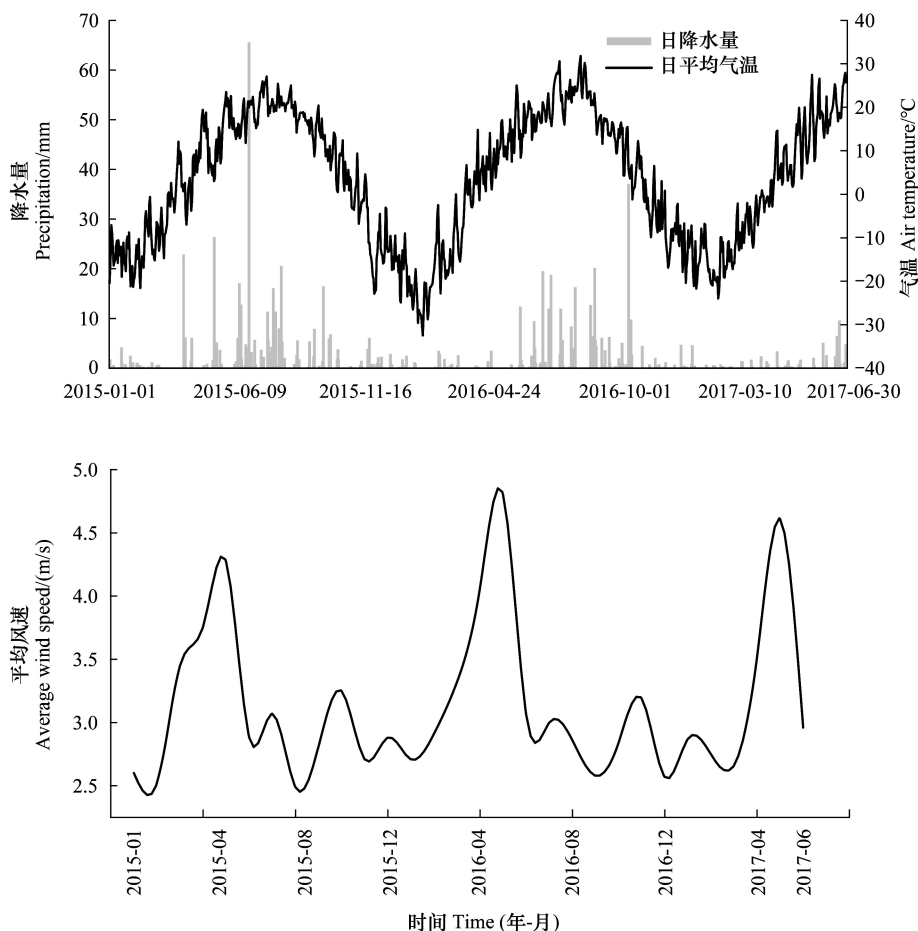


图2 2015—2017年研究区日平均降水量、气温和月平均风速

Fig.2 Daily average precipitation, air temperature and monthly average wind speeds at the study area, 2015—2017

取样法选择了5个取样点,每个取样点有5个土层(0—5、5—10、10—20、20—30和30—40 cm),土壤样品被带回实验室,在105℃下干燥48 h至恒重,以测定土壤水分。

2.5 数据处理与分析

本文在分析前用Levene检验样本间残差的正态性和同质性。采用单因素方差分析(one-way ANOVA)来检验5种放牧处理间植被、土壤水分和积雪特征的差异。如果差异显著($P < 0.05$),则采用Duncan多重比较检验5个放牧处理之间的潜在差异。在修正的赤池信息量准则(Akaike Information Criteria, AIC)基础上进行模型选择,利用指数拟合植被特征与积雪深度、积雪量之间的关系。采用Spearman相关分析,研究放牧强度、植被特征、积雪与不同土层土壤水分之间的关系。在分析前对植被指标(植被高度和地上生物量)和积雪指标(积雪量和积雪深度)分别进行主成分分析^[24],得到每一类指标的第一主成分(PC1)作为结构方程分析的自变量,采用结构方程模型^[25](SEM)研究放牧、降雪量、植被指标和积雪指标对土壤水分(0—40 cm)的影响。模型的拟合优度由 χ^2 、 df 、正态拟合指数(GFI)和近似误差均方根(RMSEA)决定。使用SPSS 26.0软件进行统计分析,利用Origin 17和R语言进行绘图。

3 结果

3.1 不同放牧强度对植被特征的影响

总体而言,2016年和2017年的植被高度和地上生物量都随着放牧强度的增加而逐渐降低(表1)。例如,

2016 年和 2017 年的地上生物量分别从禁牧处理(G0)的 185.47 g/m^2 和 122.90 g/m^2 显著下降到极重度放牧处理(G3.00)的 50.77 g/m^2 和 13.77 g/m^2 ($P<0.05$) (表 1)。在 2016 年和 2017 年,禁牧处理(G0)与轻度放牧处理(G0.75)的植被高度和地上生物量无显著差异($P>0.05$),但禁牧处理和轻度放牧处理的植被高度和地上生物量均显著大于其他高放牧强度处理($P<0.05$)。

表 1 不同放牧强度下的植物群落、积雪和土壤水分(0—40 cm)特征

Table 1 Plant community, snow accumulation and soil water (0—40 cm) properties under various grazing intensities

年份 Year	指数 Index	放牧强度 Grazing intensity/(羊只/hm ²)				
		0	0.75	1.50	2.25	3.00
2016	植被高度/cm	30.88±0.86a	30.02±0.21a	20.20±0.63b	12.17±0.79c	7.42±0.55d
	地上生物量/(g/m ²)	185.47±2.39a	169.13±15.64a	108.50±4.88b	70.38±3.23c	50.77±6.51c
	积雪量/(kg/m ²)	99.67±11.88a	67.49±6.42b	51.80±8.49bc	32.57±1.96cd	24.72±3.78d
	积雪深度/cm	39.90±1.45a	29.63±4.14b	22.43±2.13b	13.13±0.34c	11.27±2.07c
	土壤水分/%	14.90±0.68a	13.66±0.69a	11.91±0.51b	10.36±0.14bc	10.02±0.12c
2017	植被高度/cm	28.91±0.51a	28.60±0.66a	16.67±0.17b	9.09±0.08c	4.63±0.44d
	地上生物量/(g/m ²)	122.90±3.94a	116.90±3.51a	67.22±1.09b	39.67±2.20c	13.77±1.32d
	积雪量/(kg/m ²)	40.80±6.37a	30.18±3.72b	24.78±1.30b	10.90±0.57c	10.39±0.54c
	积雪深度/cm	22.30±2.09a	17.61±1.22b	14.55±1.03b	5.74±1.11c	4.46±0.39c
	土壤水分/%	10.70±0.17a	9.90±0.32ab	9.22±0.40b	7.85±0.02c	7.57±0.25c

表中同一行不同字母表示该变量在不同放牧强度间差异显著($P<0.05$)

3.2 不同放牧强度对积雪的影响

由表 1 可知,随着放牧强度的增加,2016 年和 2017 年的积雪量和积雪深度均呈现逐渐降低的趋势。在 2016 年和 2017 年,禁牧处理(G0)的积雪量和积雪深度均显著高于其他 4 个放牧强度处理(G0.75、G1.50、G2.25、G3.00)的积雪量和积雪深度($P<0.05$)。以 2016 年为例,禁牧处理(G0)的积雪量和积雪深度分别为 99.67 kg/m^2 和 39.90 cm ,与 G0 相比,极重度放牧处理(G3.00)的积雪量和积雪深度分别下降了 75.20% 和 71.75% (表 1)。

由图 3 可知,2016 年和 2017 年的积雪量和积雪深度分别随植被高度和地上生物量的增加呈线性增长趋势。在所有放牧处理下,2016 年的平均积雪量比 2017 年的平均积雪量高 57.63% (表 1)。

3.3 不同放牧强度对土壤水分的影响

从相关性分析结果中可以看出(图 4),在 2016 年和 2017 年,各土层土壤水分与放牧强度(GI)呈显著负相关,相关系数达到 70% 以上($P<0.01$)。2016 年和 2017 年禁牧处理(G0)的平均含水量(0—40 cm)达到 14.91% 和 10.70%,是极重度放牧处理(G3.00)的 1.5 倍和 1.4 倍(表 1)。各土层土壤水分与植被高度和地上生物量呈显著正相关,与积雪量和积雪深度也呈显著正相关($P<0.05$; 图 4)。由图 5 可知,随着土层增加,土壤水分与各影响因素线性拟合关系的斜率呈下降趋势。结构方程模型结果表明(图 6),降雪量、植被和积雪对春季土壤水分具有显著的正作用,放牧强度的增加对积雪和春季土壤水分具有间接的负作用。

4 讨论

4.1 放牧对积雪量的影响

本研究发现,2016 年和 2017 年禁牧处理下的积雪量和积雪深度均显著高于其他放牧处理下的积雪量和积雪深度($P<0.05$; 表 1),并且积雪量和积雪深度随着放牧强度的增加而减少,这与草甸草原不同放牧强度对积雪的研究结果一致^[9]。值得注意的是,积雪量主要受植被特征的影响^[4],放牧通过减少植被从而间接影响积雪量,本研究的结构方程模型也充分证明了这一点(图 6)。另外,本文的研究结果也显示,放牧对植被特征的影响与放牧强度密切相关(表 1)。一方面,随着放牧强度的增加,植被高度和地上生物量均呈下降趋势,导

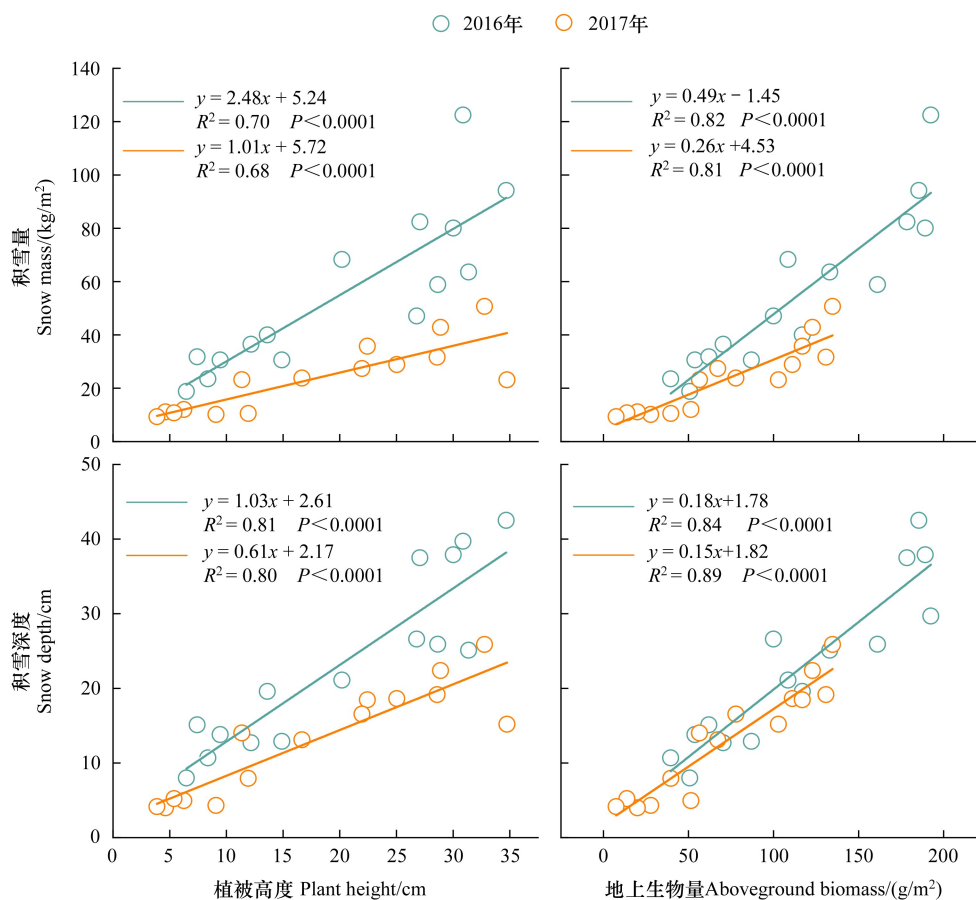


图3 植被特征与积雪量和积雪深度的关系

Fig.3 Relationships between plant properties and both snow mass and snow depth

致地面的粗糙度减小,风蚀增加^[26–28]。另一方面,植被也被认为在捕获风吹雪方面发挥重要作用,因为植被可以通过降低地表风速来增加沉积速率^[29–30]。另外,植物的茎和叶对风吹雪的直接拦截也增加了沉积速率^[8]。因此,低植被覆盖导致风蚀增加和沉积速率降低是造成极重度放牧处理净积雪量减少的主要原因(表1)。此外,从拟合曲线的趋势(图3)也可以反映这一结果:随着地上生物量和植被高度的增加,积雪量和积雪深度呈指数增长。显然,植被高度越高,地上生物量越大,其截存风吹雪的能力就越大,从而使积雪量增加^[31]。另外,最终的积雪量除了受到风吹雪再分配的影响,还与当年的降雪量有很大的关系^[14],这与本研究的结构方程模型结果一致(图6)。因此,本研究发现与2017年的积雪量和积雪深度相比,2016年的积雪量和积雪深度更大,这可能是因为2016年的降雪量高于2017年。

4.2 放牧对土壤水分的影响

有研究发现,土壤水分的急剧增加与春季积雪融化同时发生,表明冬季的积雪在春季土壤水分中起着关键作用^[22]。本研究的结果表明,随着放牧强度的增加,土壤水分逐渐降低(图4)。主要由两个潜在的机制支持这一结果。首先,在禁牧(G0)条件下,植被高、生物量大的植被覆盖区可以捕获更多的风吹雪,从而促进积雪量的增加。除了大气降水的影响外,冬季的积雪可对土壤增墒保湿,较高的积雪量也会增加融雪后的水分输入,从而提高土壤水分含量^[32–34]。其次,放牧通过减少植被生物量和凋落物以及表层土壤的压实直接影响了蒸腾、蒸发和入渗等一系列水文过程^[21]。茂密的植被可以通过遮阳减少蒸发损失和减少土壤中的水平和垂直水流来增加土壤水分^[16]。另外,在非生长季节或生长季节早期几乎没有植被产生蒸腾作用,因此,植被不会消耗土壤中的水分^[35]。春季不同土层土壤水分与植被和积雪特征之间的相关分析也支持了上述两种可

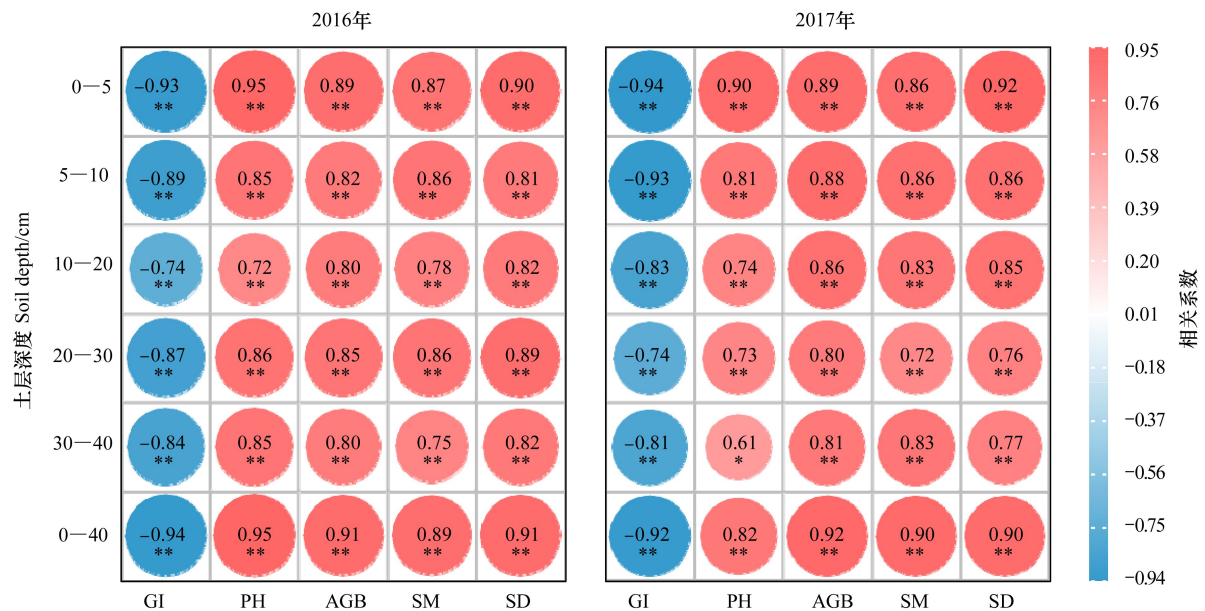


图4 2016年和2017年放牧强度、植被特征、积雪和不同土层土壤水分的相关关系

Fig.4 Correlation of grazing intensity, vegetation characteristics, snow accumulation and soil water content within different soil layers in 2016 and 2017

*表示 $P < 0.05$, **表示 $P < 0.01$; 图例中红色表示正相关, 蓝色表示负相关, 颜色越深表示其正(负)相关性越大; GI: 放牧强度, Grazing intensity; PH: 植被高度, Plant height; AGB: 地上生物量, Aboveground biomass; SM: 积雪量, Snow mass; SD: 积雪深度, Snow depth

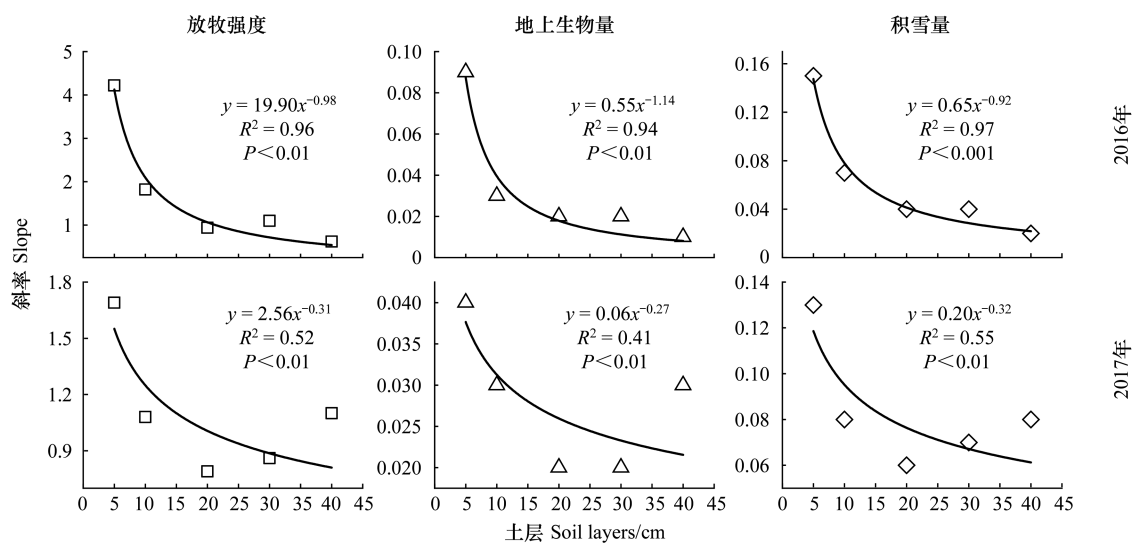


图5 2016年和2017年不同土层下土壤水分与各影响因素线性拟合关系的斜率

Fig.5 Slope of the linearly regression relationship between soil water and each of the influencing factors under different soil layers in 2016 and 2017

能的机制(图4)。结构方程模型结果表明(图6),放牧强度的增加可通过减少植被显著降低积雪和春季土壤水分。本研究还发现这些影响随着土层的增加而减弱(图5),这可能是由于雪水的入渗首先进入到表层(0—5 cm)土壤中,并且下渗过程随土层的加深而逐渐缓慢,从而导致表层土壤水分变化对放牧的响应更明显^[36]。

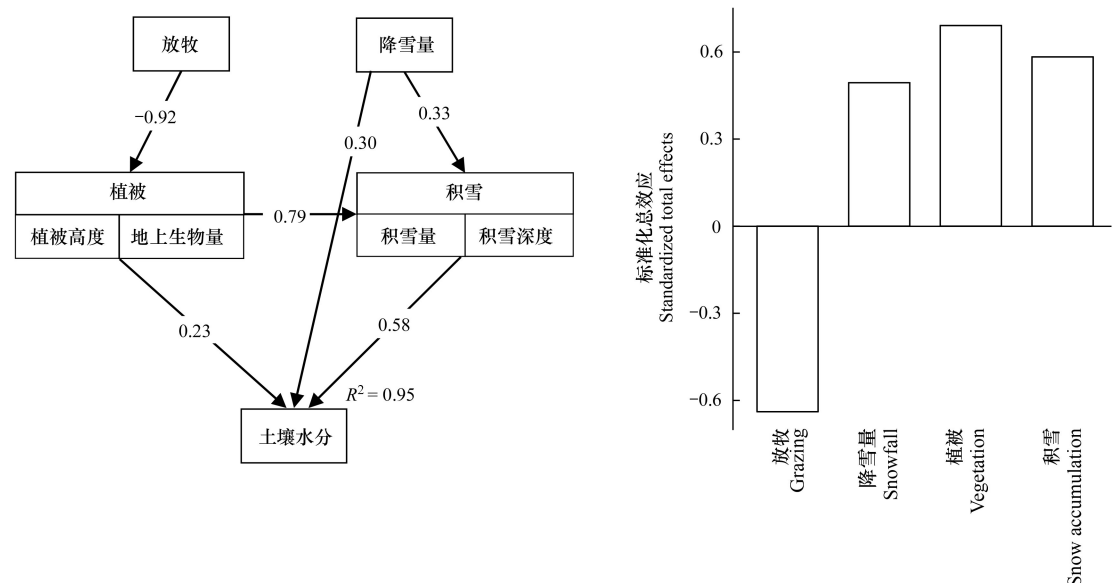


图 6 2016 年和 2017 年放牧、降雪量、植被和积雪对土壤水分(0—40 cm)的影响

Fig.6 Effects of grazing, snowfall, vegetation characteristics and snow accumulation on soil moisture (0—40 cm) in 2016 and 2017

箭头指示效果的方向;箭头上的数字(路径系数)类似于偏相关系数,指示关系的影响大小;模型拟合指数: $\chi^2 = 2.51$, $df = 3$, $P = 0.5$, GFI = 0.97, RMSEA = 0.00

5 结论

研究表明,放牧通过减少地上生物量和植被高度,对中国北方典型草原的积雪和春季土壤水分变化起着关键作用。随着放牧强度的增加,积雪量和积雪深度呈下降趋势。极重度放牧使 2016 年和 2017 年的积雪量减少了 75.20%和 74.53%,积雪深度减少 71.75%和 80.00%。主要是因为放牧减少了植被覆盖,从而减少了捕获风吹雪的能力。本研究还发现,春季不同土层土壤水分与放牧强度呈显著负相关,主要是放牧通过减少植被和积雪量显著降低土壤水分。与底层土壤相比,放牧对表层土壤水分(0—5 cm)的影响更大。因此,草原生态系统应充分考虑放牧对冬季积雪量及春季土壤水分的影响,这对于草原区域雪水的资源优化利用与管理具有重要意义。

参考文献(References):

[1] Wang X Y, Wang T, Guo H, Liu D, Zhao Y T, Zhang T T, Liu Q, Piao S L. Disentangling the mechanisms behind winter snow impact on vegetation activity in northern ecosystems. *Global Change Biology*, 2018, 24(4): 1651-1662.

[2] Tomaszewska M A, Nguyen L H, Henebry G M. Land surface phenology in the highland pastures of montane Central Asia: interactions with snow cover seasonality and terrain characteristics. *Remote Sensing of Environment*, 2020, 240: 111675.

[3] Christiansen C T, Lafrenière M J, Henry G H R, Grogan P. Long-term deepened snow promotes tundra evergreen shrub growth and summertime ecosystem net CO₂ gain but reduces soil carbon and nutrient pools. *Global Change Biology*, 2018, 24(8): 3508-3525.

[4] Peng S S, Piao S L, Ciais P, Fang J Y, Wang X H. Change in winter snow depth and its impacts on vegetation in China. *Global Change Biology*, 2010, 16(11): 3004-3013.

[5] Chen Y F, Zhang L W, Shi X, Ban Y, Liu H L, Zhang D Y. Life history responses of spring-and autumn-germinated ephemeral plants to increased nitrogen and precipitation in the Gurbantunggut Desert. *The Science of the Total Environment*, 2019, 659: 756-763.

[6] Hardy J P, Groffman P M, Fitzhugh R D, Henry K S, Welman A T, Demers J D, Fahey T J, Driscoll C T, Tierney G L, Nolan S. Snow depth manipulation and its influence on soil frost and water dynamics in a northern hardwood forest. *Biogeochemistry*, 2001, 56(2): 151-174.

[7] Aerts R, Cornelissen J H C, Dorrepaal E. Plant performance in a warmer world: general responses of plants from cold, northern biomes and the importance of winter and spring events. *Plant Ecology*, 2006, 182(1): 65-77.

[8] Liu W X, Allison S D, Li P, Wang J, Chen D M, Wang Z H, Yang S, Diao L W, Wang B, Liu L L. The effects of increased snow depth on plant

- and microbial biomass and community composition along a precipitation gradient in temperate steppes. *Soil Biology and Biochemistry*, 2018, 124: 134-141.
- [9] Yan Y C, Yan R R, Wang X, Xu X L, Xu D W, Jin D Y, Chen J Q, Xin X P. Grazing affects snow accumulation and subsequent spring soil water by removing vegetation in a temperate grassland. *The Science of the Total Environment*, 2019, 697: 134189.
- [10] Schön P, Naaim-Bouvet F, Vionnet V, Prokop A. Merging a terrain-based parameter with blowing snow fluxes for assessing snow redistribution in alpine terrain. *Cold Regions Science and Technology*, 2018, 155: 161-173.
- [11] Li S G, Harazono Y, Oikawa T, Zhao H L, He Z Y, Chang X L. Grassland desertification by grazing and the resulting micrometeorological changes in Inner Mongolia. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2000, 102(2/3): 125-137.
- [12] Fang X, Pomeroy J W. Modelling blowing snow redistribution to prairie wetlands. *Hydrological Processes*, 2009, 23(18): 2557-2569.
- [13] 董智, 李红丽, 左合君, 魏江生, 胡春元. 锡林郭勒典型草原植被高度和盖度对风吹雪的影响. *冰川冻土*, 2010, 32(6): 1106-1110.
- [14] Essery R, Pomeroy J. Vegetation and topographic control of wind-blown snow distributions in distributed and aggregated simulations for an Arctic tundra basin. *Journal of Hydrometeorology*, 2004, 5(5): 735-744.
- [15] 闫敏, 左合君, 董智, 刘宝河, 王嫣娇, 魏翔鸿, 李钢铁. 锡林浩特草原小叶锦鸡儿灌丛的阻雪能力及其对积雪形态的影响. *应用生态学报*, 2018, 29(2): 483-491.
- [16] Marín-Castro B E, Negrete-Yankelevich S, Geissert D. Litter thickness, but not root biomass, explains the average and spatial structure of soil hydraulic conductivity in secondary forests and coffee agroecosystems in Veracruz, Mexico. *The Science of the Total Environment*, 2017, 607/608: 1357-1366.
- [17] Cai Y R, Yan Y C, Xu D W, Xu X L, Wang C, Wang X, Chen J Q, Xin X P, Eldridge D J. The fertile island effect collapses under extreme overgrazing: evidence from a shrub-encroached grassland. *Plant and Soil*, 2020, 448(1): 201-212.
- [18] Aalto J, le Roux P C, Luoto M. Vegetation mediates soil temperature and moisture in arctic-alpine environments. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 2013, 45(4): 429-439.
- [19] Naeth M A, Chanasyk D S, Rothwell R L, Bailey A W. Grazing impacts on soil water in mixed prairie and fescue grassland ecosystems of Alberta. *Canadian Journal of Soil Science*, 1991, 71(3): 313-325.
- [20] Yan Y C, Yan R R, Chen J Q, Xin X P, Eldridge D J, Shao C L, Wang X, Lv S J, Jin D Y, Chen J, Guo Z J, Chen B R, Xu L J. Grazing modulates soil temperature and moisture in a Eurasian steppe. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2018, 262: 157-165.
- [21] Vandendorj S, Eldridge D J, Travers S K, Val J, Oliver I. Microsite and grazing intensity drive infiltration in a semiarid woodland. *Ecohydrology*, 2017, 10(4): e1831.
- [22] Yan R R, Xin X P, Yan Y C, Wang X, Zhang B H, Yang G X, Liu S M, Deng Y, Li L H. Impacts of differing grazing rates on canopy structure and species composition in Hulunber meadow steppe. *Rangeland Ecology & Management*, 2015, 68(1): 54-64.
- [23] Fayad A, Gascoin S, Faour G, López-Moreno J, Drapeau L, Page M L, Escadafal R. Snow hydrology in Mediterranean Mountain regions: a review. *Journal of Hydrology*, 2017, 551: 374-396.
- [24] Chen L Y, Liang J Y, Qin S Q, Liu L, Fang K, Xu Y P, Ding J Z, Li F, Luo Y Q, Yang Y H. Determinants of carbon release from the active layer and permafrost deposits on the Tibetan Plateau. *Nature Communications*, 2016, 7: 13046.
- [25] Grace J B. Structural equation modeling and natural systems. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2006.
- [26] Vajda A, Venäläinen A, Hänninen P, Sutinen R. Effect of vegetation on snow cover at the northern timberline: a case study in Finnish Lapland. *Silva Fennica*, 2006, 40(2): 195-207.
- [27] Willms W D, Chanasyk D S. Grazing effects on snow accumulation on rough fescue grasslands. *Rangeland Ecology & Management*, 2006, 59(4): 400-405.
- [28] Yan Y C, Xin X P, Xu X L, Wang X, Yang G X, Yan R R, Chen B R. Quantitative effects of wind erosion on the soil texture and soil nutrients under different vegetation coverage in a semiarid steppe of Northern China. *Plant and Soil*, 2013, 369(1): 585-598.
- [29] Yan Y C, Xin X P, Xu X L, Wang X, Yan R R, Murray P J. Vegetation patches increase wind-blown litter accumulation in a semi-arid steppe of Northern China. *Environmental Research Letters*, 2016, 11(12): 124008.
- [30] Cheng H, Zhang K D, Liu C C, Zou X Y, Kang L Q, Chen T L, He W W, Fang Y. Wind tunnel study of airflow recovery on the lee side of single plants. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2018, 263: 362-372.
- [31] 王永明, 韩国栋, 赵萌萌, 王忠武, 薛志宏. 不同放牧强度对典型草原雪的水文效应. *内蒙古大学学报: 自然科学版*, 2007, 38(5): 530-536.
- [32] Wang T, Li P, Li Z B, Hou J M, Xiao L, Ren Z P, Xu G C, Yu K X, Su Y Y. The effects of freeze-thaw process on soil water migration in dam and slope farmland on the Loess Plateau, China. *The Science of the Total Environment*, 2019, 666: 721-730.
- [33] 张音, 海米旦·贺力力, 古力米热·哈那提, 刘迁迁, 苏里坦. 天山北坡积雪消融对不同冻融阶段土壤温湿度的影响. *生态学报*, 2020, 40(5): 1602-1609.
- [34] 党宁, 马望, 代泽成, 胡玉香, 王志瑞, 王正文, 姜勇, 李慧. 积雪变化对陆地生态系统植被特征和土壤碳氮过程的影响. *生态学报*, 2024, 44(1): 18-35.
- [35] MacDonald M K, Pomeroy J W, Essery R L H. Water and energy fluxes over northern prairies as affected by Chinook winds and winter precipitation. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2018, 248: 372-385.
- [36] 陈伟, 李亚新, 王红阳, 王佳, 孙从建. 黄土丘陵区坡耕地与撂荒地土壤水分对降雨的响应特征. *生态学报*, 2022, 42(1): 332-339.