

DOI: 10.5846/stxb202002150261

靳茗茗, 徐增让, 成升魁. 藏北高寒草地植被和土壤对不同放牧强度的响应. 生态学报, 2020, 40(23): 8753-8762.

Jin M M, Xu Z R, Cheng S K. Response of vegetation and soil to different grazing intensities of alpine grassland in Northern Tibet. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(23): 8753-8762.

藏北高寒草地植被和土壤对不同放牧强度的响应

靳茗茗^{1,2}, 徐增让^{1,*}, 成升魁¹

1 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101

2 中国科学院大学, 北京 100049

摘要:放牧压力在时间和空间的不均衡分布导致局部土地过度利用和生态退化,然而当前对放牧强度的量化多采用替代性指标或对照试验,缺乏直接监测数据,也缺乏不同草地类型对放牧强度变化的响应差异性研究。以西藏自治区那曲市为研究区,利用佩戴式 GPS 牛羊定位器构建高精度放牧轨迹数据集模拟放牧强度,构建栅格尺度放牧强度空间分布和划分方法,结合草地群落样方调查,通过 Duncan 法(Duncan's multiple comparative analysis)进行多重比较分析,探究自由放牧模式下高寒草甸和高寒草原两类区域植被和土壤对不同放牧强度的响应方式及差异性。本研究可为放牧行为环境效应监测提供新思路,并根据不同草地状况因地制宜提出放牧优化管理策略,助力高寒传统牧区的可持续发展。主要结论有:1)随着放牧强度的增大,高寒草原地上生物量先升高后降低,高强度放牧对高寒草原植被的影响大于高寒草甸。2)高放牧强度下,高寒草原土壤水分显著高于中低强度,高寒草甸土壤容重显著低于低强度。可能原因是放牧压力多集聚于水源附近。高寒草原区土壤的砂粒含量随放牧强度的增大而增加。放牧强度的增大导致草甸上层土壤有机质增加,草甸下层、草原上层、草原下层土壤有机质先增加后减小。草甸上下层土壤全磷含量在低放牧强度下显著低于中高强度。3)植被土壤变化受到自然因子和放牧活动的共同影响。高寒草甸更加耐牧,高强度放牧对高寒草原的负面影响更大,而中度放牧有利于草地尤其是高寒草原的放牧利用。4)放牧生生态系统是一个环境-植物-家畜自适应系统。在放牧管理中不能仅通过控制载畜量缓解草地超载,还需要综合考虑生态系统的弹性及各营养级的适应性,合理配置放牧强度,控制季节性超载和局部超载。

关键词:放牧强度;GPS 牛羊定位器;高寒草地;植被;土壤;自由放牧

Response of vegetation and soil to different grazing intensities of alpine grassland in Northern Tibet

JIN Mingming^{1,2}, XU Zengrang^{1,*}, CHENG Shengkui¹

1 Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: An uneven distribution of grazing pressure in time and space leads to local land overuse and ecological degradation. However, the quantification of grazing intensity lacks direct monitoring data. It is difficult to accurately simulate the response of vegetation and soil to different grazing pressures under free grazing patterns using alternative indicators or controlled experiments. There is also a lack of research on the varying response of different grassland types with grazing intensity. In this study, a high-precision grazing trajectory dataset derived from wearable GPS locators, used for cattle and sheep, to simulate the grazing intensity, construct a grid-scale grazing spatial distribution and grazing intensity division method, and combine grassland community plot survey. Nagqu, Tibet was used as the study area. We could explore

基金项目:第二次青藏高原综合科学考察研究(2019QZKK0603);国家重点研发计划项目课题(2016YFC0503403);国家自然科学基金项目(41971263,41571496)

收稿日期:2020-02-15; **网络出版日期:**2020-10-30

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xuzr@igsrr.ac.cn

the responses and differences of vegetation and soil of alpine meadows and steppe under different grazing intensities in free grazing patterns using Duncan's multiple comparative analysis. This study can provide new ideas for monitoring the environmental effects of grazing behavior, and put forward grazing optimization management strategies according to different grassland and local conditions; this can help with the sustainable development of traditional alpine pastoral areas. The results indicated that as the grazing intensity increased, the above-ground biomass of the steppe increased at first and then decreased, and the impact of high-intensity grazing on steppe vegetation was greater than that of the meadow. Under high grazing intensity, the soil moisture of the steppe was significantly higher than that of medium and low grazing intensity, and the bulk density of the meadow soil was significantly lower than that of the low grazing intensity, which may be because the grazing pressure was concentrated near the water source. The content of sand grains in the steppe increased with an increase in the grazing intensity. The increase in the grazing intensity led to an increase in organic matter present in the upper layer of meadow, and the organic matter of lower layer of meadow, upper and lower layer of steppe increased first and then decreased. The total phosphorus content in the upper and lower meadow soils in low grazing intensity was significantly lower than that in the medium and high intensities. Furthermore, vegetation and soil changes were affected by both natural ecological factors and the grazing activities. The alpine meadows were more tolerant to the grazing, and the high-intensity grazing had a higher negative impact on the alpine steppes; moderate grazing was conducive to the use of grassland, especially the alpine steppes. A grazing ecosystem is an environment-plant-livestock adaptive system. In grazing management, a grassland overload cannot be alleviated by only controlling the amount of livestock carried. It is also necessary to comprehensively consider the resilience of the ecosystem and the adaptability of various trophic levels, rationally configure the grazing intensity, and avoid seasonal and local overload.

Key Words: grazing intensity; GPS locators for cattle and sheep; alpine grassland; vegetation; soil; free grazing patterns

放牧对资源环境的影响是放牧生态学的重要研究内容。为确定合理载畜量、减少高强度放牧对草地的破坏,大量研究评估了放牧强度对植物群落和土壤理化性质的影响,认为过度放牧导致土壤侵蚀^[1]、土壤养分改变^[2]、生物量减少和物种组成改变^[3-4]。高强度放牧对草地植被和土壤结构的干扰作用不利于草地生态系统的可持续发展^[5]。然而,放牧对草地不一定仅有负面影响,家畜的践踏、排泄和采食等行为可促进牧草更新并改变土壤理化性质^[6]。随着放牧强度的增大,部分群落密度增大,中度放牧强度下多样性指数最大^[7]。重度放牧会显著降低土壤全量养分和总有机碳含量,轻度放牧可增加土壤有机碳、总氮、硝态氮的含量^[8-10]。适度放牧是保护生物多样性、维持土壤养分及提高草地生产力的有效途径^[11]。

在当前研究中,对放牧强度的量化主要有两种方式:一是采用替代性指标,如牲畜存栏量的统计数据、饲草消耗量、距离定居点或水源的远近^[5, 12],这种方式缺乏放牧行为的直接监测数据,很难精确量化放牧强度的空间分布;二是设计不同管理策略下的放牧对照试验^[13],这种方式虽然可以比较准确的量化放牧强度,但难以刻画自由放牧模式的畜群行为。放牧行为受到资源环境异质性、家畜觅食的选择性以及人类活动的共同影响,往往使牲畜集中在特定的景观区域内^[14-15]。放牧压力从聚落中心到边缘非线性下降,分布在特定的距离和角度上^[12],导致在时间和空间的不均衡分布,造成局部过度利用和生态退化。受制于数据质量,对自由放牧模式下高分辨率的放牧行为环境效应缺乏研究。同时,当前研究较少探讨不同类型的草地对放牧强度的响应的差异^[16]。

佩戴式定位技术精度提高以及动物项圈体积和质量的小型化为更准确地评估自由放牧模式下放牧行为在景观尺度上对资源环境的影响提供了可能^[17]。通过全球导航卫星系统(GNSS)监测动物行为,遥感(RS)监测景观格局,在地理信息系统(GIS)中分析动物-景观之间的相互作用^[18-20],实现放牧强度、采食量监测,超载预警和放牧规划^[21-22],有助于制定更加科学的可持续管理方案,有效缓解草地超载和草场退化。本研究以西藏自治区那曲市为研究区,利用佩戴式GPS牛羊定位器构建高精度放牧轨迹数据集,精确量化自由放牧模

式下放牧强度分布;采集植被和土壤样本,探究高寒草甸和高寒草原植被和土壤指标对不同放牧强度的响应是否存在差异。本研究可为放牧行为的环境效应监测提供新思路,并根据不同草地状况因地制宜提出放牧优化管理策略,助力高寒传统牧区的可持续发展。

1 研究区概况

那曲市位于西藏自治区北部、藏北高原东部,平均海拔 4500m 以上,属亚寒带气候区,多大风天气,年降水量 247.3—513.6mm,由东南向西北递减。全年无绝对无霜期,5—9 月气候相对温和,降水量约占全年的 80%。年植物生长期 100 d 左右,植被覆盖从东南向西北表现为亚高山疏林灌丛草甸、高寒草甸、高寒草原以及高寒荒漠草原。那曲是西藏传统牧区,大部分县区均为牧业县,2017 年末常住人口 50.37 万。色尼区位于那曲东南部,属高原亚寒带半湿润季风气候区,年均温 - 2.2℃,年降水量约 400mm;安多县位于那曲东北部,属高原亚寒带季风半湿润气候区,年均温 - 2.8℃,年降水量 435mm;尼玛县位于那曲最西部,属高原亚寒带半干旱季风性气候和高原寒带干旱气候,年均温 - 4℃,年降水量 150mm。色尼区罗马镇 5 村和安多县措玛乡 1 村作为高寒草甸,平均海拔 4500—4630m,主要草地类型为高山嵩草 (*Kobresia pygmaea*) 和小嵩草 (*Kobresia humilis*) 草甸;安多县强玛镇 1 村和尼玛县俄久乡 4 村作为高寒草原,平均海拔 4620—4700m,主要草地类型为紫花针茅 (*Stipa purpurata*) 和青藏薹草 (*Carex moorcroftii*) 草原(图 1)。各牧场草地状况、水源分布、草场经营情况、放牧管理、放牧家畜种类及数目详见表 1。

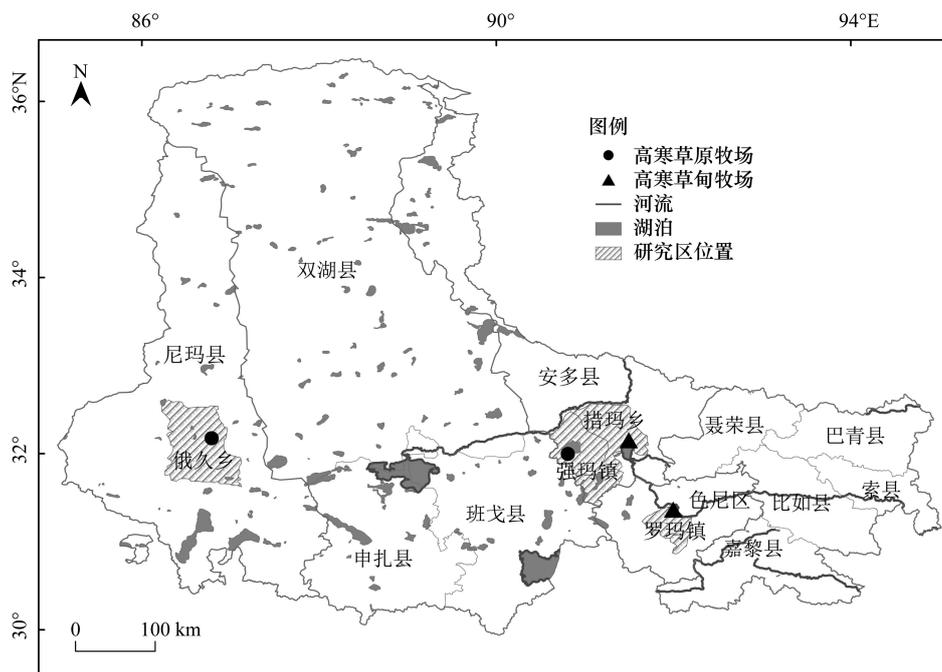


图 1 研究区-4 个典型牧场

Fig.1 Study area-4 typical pastures

2 研究方法

2.1 放牧强度监测

放牧轨迹通过革泰 GPS 牛羊定位器获取,该设备采用 GPS+北斗定位,定位精度为 2—10m,牧民充电后可运行 7—10 d,定位信息(包括经纬度和定位时刻)利用通用分组无线服务技术(GPRS)传输,可在手机 APP 和网站上实时查看,设备质量较轻(180g),佩戴后对家畜影响较小。在畜群的头牛或头羊颈部佩戴 1 个定位

器,设置定位间隔为 5min,8:00—21:00 监测畜群行为特征,监测时间范围为 2019 年牧草生长季(6—8 月)。

表 1 4 个典型牧场概况

Table 1 4 typical pastures overview

草地类型 Grassland types	牧场 Pastures	草地状况 Grassland conditions	水源分布 Water source distribution	草场经营情况 Pastures operation	放牧管理手段 Grazing management	家畜种类及数目 Types and number of livestock
高寒草甸 Alpine meadows	罗玛镇 5 村	不退化	多条河流,下游汇入村东部的那曲河,水源充沛	家庭放牧,整村共用草场。夏秋草场 837.1 hm ² ,冬春草场 88.5 hm ² 。6—8 月实际放牧面积 1423.5 hm ²	6—8 月一般使用夏秋草场。不轮牧,不转场,不补饲	西藏牦牛(<i>Bos grunniens</i>) 38 头
	措玛乡 1 村	基本不退化,部分区域有鼠害和杂草	多处湖泊河流,临近错那湖,水源充沛	家庭牧场无固定边界。6—8 月实际放牧面积 831.2 hm ²	不轮牧,不转场,冬春季有时补饲	牦牛 50 头
高寒草原 Alpine steppes	强玛镇 1 村	退化严重,土壤肥力差,杂草沙石多	兹格塘错及周边湖泊、河流,水源较充沛	家庭牧场 420 hm ² ,不区分冬春、夏秋草场。6—8 月实际放牧面积 3256.7 hm ²	不轮牧,9—10 月转场,10—11 月返回,冬春季补饲	牦牛 21 头
	俄久乡 4 村	退化严重,土壤肥力差沙石多	牧场外部有小湖,内部夏季山涧中有泉水,水源匮乏	家庭牧场 402 hm ² ,不区分冬春、夏秋草场,未达到草畜平衡要求。6—8 月实际放牧面积 2152 hm ²	不轮牧,不转场,冬春季需借用乡邻草场+补饲	藏绵羊(<i>Ovis aries</i>) 230 只

2.2 植物土壤采样

2019 年 7—8 月,在各牧场条件相近的区域按照离定居点的远近采样。各牧场水源附近生长藏北嵩草沼泽草甸(*Kobresia littledale meadow*),是隐域性植被,且样方设置难度大,故不在该区域采集样本。高寒草甸或草原等广域性植被区采样在当地牧户的家庭牧场开展,不便设置大面积样方,故样方尺度确定为 25cm×25cm。利用直尺测量样方内大多数草层叶片集中分布的平均自然高度作为群落高,利用土壤四参数速测仪 TZS-pHW-4G 测定土壤含水量,利用环刀法测定容重。以上指标均进行三次测量取平均值。将植物的地上部分齐地面刈割后,带回实验室 85°C 烘干至恒重,测量其干重作为地上生物量。去除地表凋落物后,利用四分法使用土钻采集上层(0—10cm)、下层(10—20cm)土壤样品,分别装入密封袋,经风干研磨后送往实验室测定土壤粒度、pH、有机质、全磷、全钾。土壤粒度利用 ATC-162 粒度分析仪采用新帕泰克激光粒度分析仪方法测定;土壤 pH 采用电位计法利用 ATC-125 笔式酸度计测定(LY/T 1239—1999);土壤有机质采用重铬酸钾容量法(NY/T 1121.6—2006)测定;全磷含量采用 NaOH 熔融-钼锑抗比色法测定(NY/T 88—1988),全钾含量采用火焰光度测定(NY/T 87—1988),主要仪器为 ATC-001 紫外/可见分光光度计、ATC-006 原子吸收分光光度计。

2.3 放牧强度计算及分类

$$D_{Gt} = \frac{C \times N}{S} \quad (1)$$

D_{Gt} 为一定时间内的放牧强度(羊单位/hm²),1 头牛=5 个羊单位,1 只绵羊=1 个羊单位, C 为每个格网内的畜群轨迹 GPS 记录点数, N 为每个 GPS 点代表的畜群数量(羊单位个数), S 为格网面积(hm²)。

在 4 个典型牧场,统计 2019 年 6 月 1 日—8 月 31 日内各格网中的畜群出现 GPS 点数,利用 ArcGIS 构建 50m×50m 渔网(fishnet),构建栅格尺度的放牧点数空间分布数据。据公式(1)及表 1,计算获得 4 个典型牧场

的放牧强度空间分布图(图 2)。将各牧场的采样点与放牧强度进行空间叠置分析,可知:在高寒草甸牧场,放牧强度低($0 \leq D_{GI} \leq 2000$)、中($2000 < D_{GI} \leq 4000$)、高($D_{GI} > 4000$)区域的采样点个数分别为 6 个、5 个、8 个;在高寒草原牧场,放牧强度低、中、高区域的采样点个数分别为 6 个、7 个、5 个。在两种草地类型区三种放牧

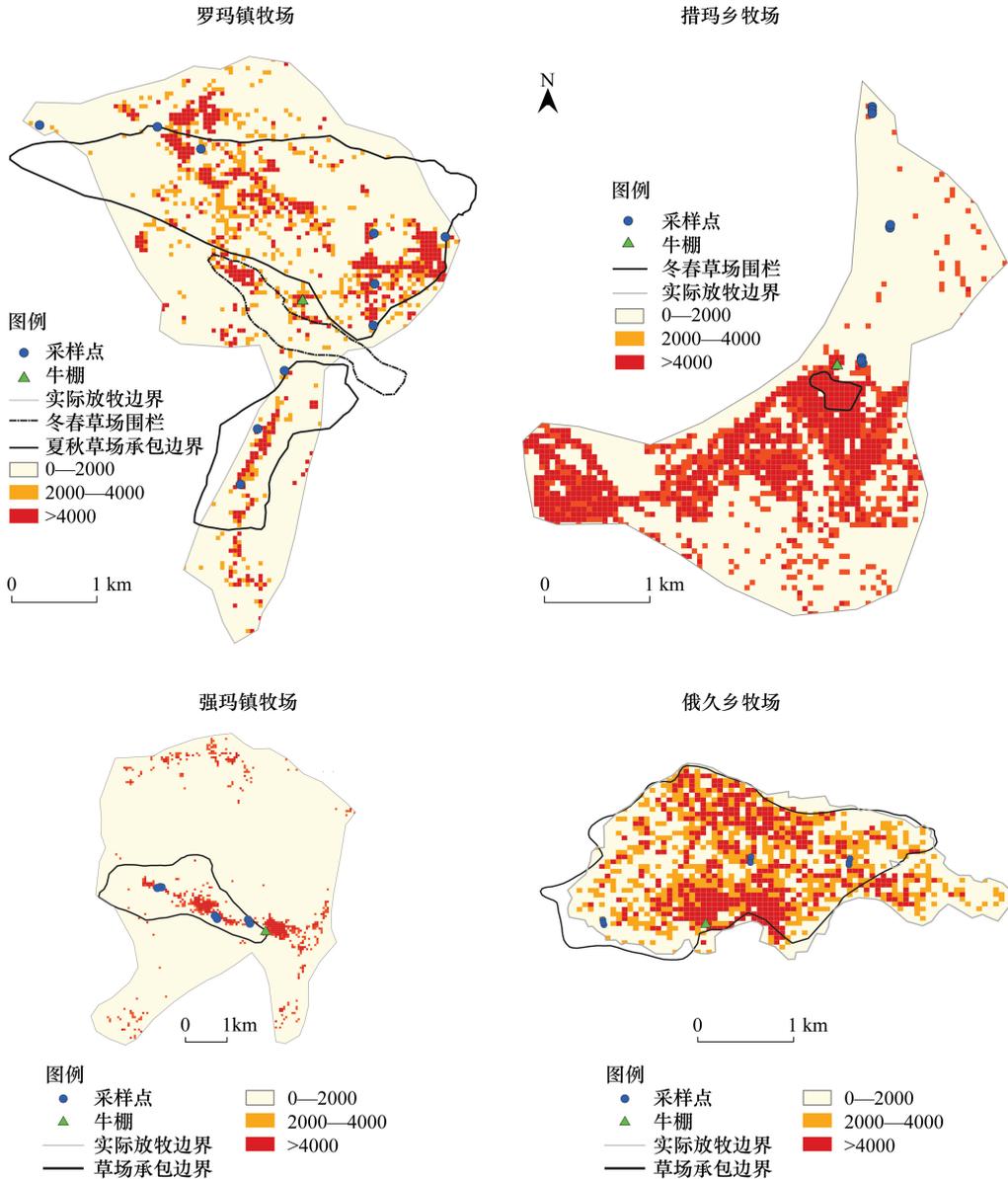


图 2 典型牧场 2019 年生长季(6—8 月)放牧强度(羊单位/hm²)分布

Fig.2 Grazing intensity (sheep unit/hm²) distribution in the growing season (June-August 2019) of typical pastures

根据牧户访谈确定草场承包边界,利用 95%自适应局部凸包(Adaptive Local Convex Hull, a-LoCoH)^[23]确定实际放牧边界

强度间采样点个数较均衡。

2.4 数据分析

利用 SPSS 单因素方差分析(one-way ANOVA)中的 Duncan 法(Duncan's multiple comparative analysis)研究放牧强度是否会对高寒草甸和高寒草原的植被和土壤指标产生影响,在 $\alpha = 0.05$ 显著水平下检验,利用 Excel 制图。采用冗余分析(RDA)探究植被和土壤间的相互作用,利用 Canoco 5 制图。

3 结果与分析

3.1 植被对放牧强度的响应

草甸群落高度均值普遍低于草原,而地上生物量一般高于草原(图3),这是由于高寒草甸的优势种为小嵩草和高山嵩草,其高度一般低于草原的优势种青藏藁草和紫花针茅;但草甸的盖度普遍高于草原,因此其地上生物量相对较高。放牧强度对草甸和草原群落高度的影响均不显著。随着放牧强度的增加,草甸地上生物量均值升高,但不同放牧强度类别间没有显著差异。草原地上生物量先升高后降低,在不同放牧强度间存在显著差异,中强度放牧时地上生物量显著高于高强度放牧,低、中强度及低、高强度放牧间差异不显著。高强度放牧造成了草原地上生物量的明显减少,对草甸的影响较小。

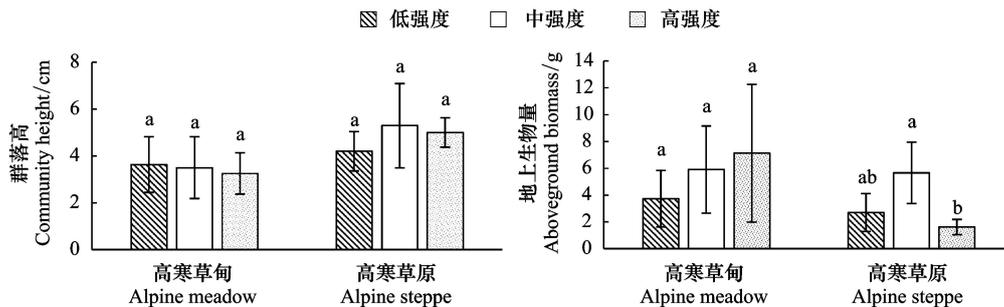


图3 不同放牧强度下植被群落高、地上生物量

Fig.3 Vegetation community height and aboveground biomass under different grazing intensities

a 与 b 间存在显著差异 ($\alpha < 0.05$), ab 与 a、b 间均无显著差异

3.2 土壤对不同放牧强度的响应

3.2.1 表层土壤含水量及容重对放牧强度的响应

草甸土壤水分均值高于草原,在低、中放牧强度下,草甸土壤水分超过 10%,而草原土壤水分低于 5%,有明显差异,而在高放牧强度下,二者土壤水分十分接近(图4)。草甸土壤水分在不同放牧强度间没有显著差异。草原土壤水分在不同放牧强度间有显著差异,高放牧强度下土壤水分显著高于低中强度。这是由于家畜倾向于在水源附近采食,高寒草甸研究区内存在多条溪流,可以分散放牧压力,而高寒草原研究区一般只有湖泊作为水源,高放牧强度下土壤水分高多是由于水源附近放牧压力集聚所致。

高寒草甸土壤有机质多、结构性好,其容重低于高寒草原。草甸的容重在不同放牧强度间有显著差异,放牧强度的增大导致容重降低,低放牧强度下土壤容重显著高于高、中强度。草原的容重在不同放牧强度间没有显著差异。家畜倾向于集聚在水土资源好的地区,这部分土壤的容重小,这并不一定代表放牧会降低土壤容重,环境因素对土壤属性的影响可能比放牧强度的影响更大。

3.2.2 不同类型、不同深度土壤对放牧强度的响应

草原砂粒含量在各放牧强度下一般高于草甸(图5)。草原上、下层土壤砂粒含量在不同放牧强度间有显著差异,上层土壤砂粒含量在中强度放牧时最低,显著低于低、高强度,低、高强度间没有显著差异;下层土壤砂粒含量在高放牧强度显著高于低、中强度,低、中放牧强度间没有显著差异。随着放牧强度的增加,草原区土壤砂粒含量增大。草甸上、下层土壤的砂粒含量在不同放牧强度间均无显著差异。

草原 pH 高于草甸。草原下层土壤 pH 在不同放牧强度间有显著差异, pH 在中强度放牧时最小,显著低于低、高强度。草甸上、下层土壤和草原上层土壤 pH 在不同放牧强度间没有显著差异。

草甸土壤有机质含量一般高于草原,上层土壤有机质一般高于下层土壤。不同放牧强度下草甸上下层土壤和草原上下层土壤有机质含量均有显著差异。随着放牧强度的增加,草甸上层土壤有机质增加,低放牧强度时有机质含量显著低于中、高强度,中、高放牧强度间没有显著差异。草甸下层、草原上、下层土壤有机质先

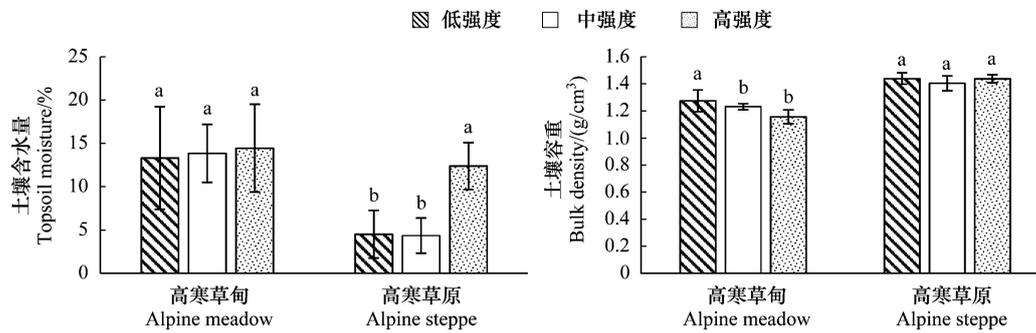


图 4 不同放牧强度下表层土壤含水量及容重

Fig.4 Moisture and bulk density of the topsoil under different grazing intensities

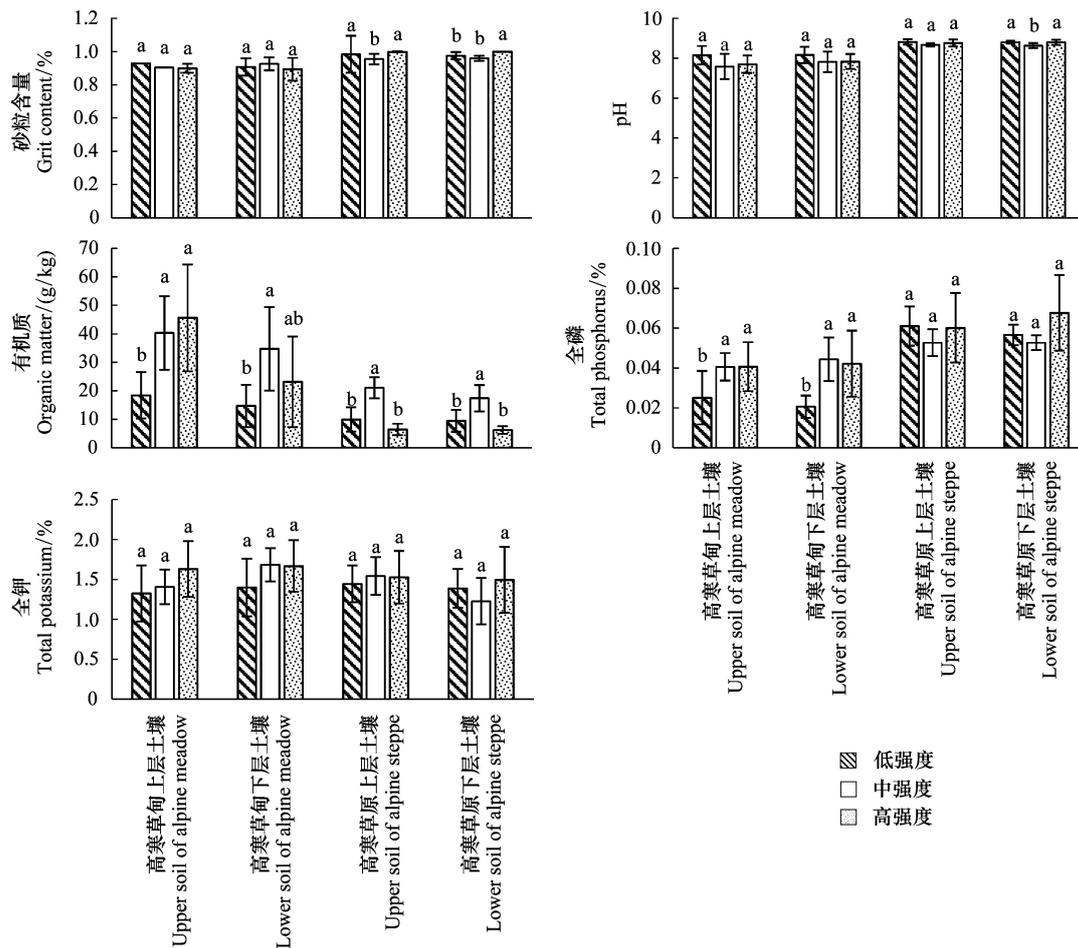


图 5 不同类型、不同深度土壤在各放牧强度间的差异

Fig.5 Differences between different types and depths of soil at different grazing intensities

增加后减小,在中放牧强度下,土壤有机质含量普遍较高。中放牧强度下,草甸下层土壤有机质显著高于低放牧强度。草原上、下层土壤在中强度时有机质显著高于低、高强度。可见,中度放牧条件下有机质含量高,高强度放牧条件下草原有机质降低。

草甸土壤全磷含量低于草原。草甸上、下层土壤的全磷含量在不同放牧强度间有显著差异,低强度放牧时,草甸上、下层土壤全磷量显著低于中、高强度,中、高强度间没有显著差异,全磷含量的增加可能受到土壤

属性差异和放牧活动的共同影响。草原上、下层土壤全磷在不同放牧强度间没有显著差异。

草甸上、下层和草原上、下层土壤的全钾含量在不同放牧强度间均无显著差异。

4 讨论

4.1 放牧强度对植被和土壤的影响

1) 不同放牧强度与草地质量及草地退化。超载过牧导致草地退化,适度放牧对植被和土壤质量有一定促进作用^[11]。随着放牧强度增大生物量降低^[10, 24],可能是由于已经属于中强度放牧甚至超过了承载力。中度放牧小区的牧草地上生物量在整个生长季都高于封育小区^[25],适度放牧有利于植物生长^[26],对生态脆弱的荒漠牧场而言,适度放牧仍会起到积极作用^[27]。放牧干扰增大了土壤砂粒含量^[28-29],放牧强度的增大导致土壤全碳、全氮^[9]、全磷和有机质降低,低于 50% 草地采食率的放牧未对土壤有机碳和氮产生决定性影响^[30],全钾在中度放牧强度下最大^[31]。本研究显示:中度放牧地上生物量较高,土壤砂粒含量、pH、有机质性状较优,高放牧强度下一般生物量较低,但高寒草甸地上生物量较高可能是由于高放牧强度仍然没有超出草地承载力,仍属于适度放牧。

2) 自由放牧模式下放牧强度和环本底共同影响着植被和土壤特征。不同放牧强度的对照试验发现,重度放牧加大了土壤水分蒸散^[32],降低了土壤水分含量^[33],使土壤容重增加、孔隙度减少^[34],生态风险加大。放牧实验保证了不同放牧单元的资源禀赋相近,仅探究放牧强度的影响,但在实际自由放牧方式中,由于家畜的选择性,放牧压力会向水源等承载力高的地区集聚,放牧对土壤水分的影响难以掩盖水源附近环境本底好的作用,土壤和植被变化是放牧和环境因子共同作用的结果。本研究发现高强度放牧条件下高寒草原的土壤水分含量较高、容重较低,主要是因为自由放牧方式家畜会集聚于水源附近。本研究亦显示高度放牧条件下土壤养分较低,但考虑到不同土地单元土壤条件的差异,不能证明较高放牧强度地区土壤养分一定低于低放牧强度地区。

3) 基于承载力的放牧强度管理。高寒草甸的承载力一般高于高寒草原,高强度放牧对高寒草原的负面效应大于高寒草甸。在自由放牧模式下,高强度放牧一般出现在水土条件好的区域,这里植被和土壤养分条件好,耐牧性强、承载力高。因此,不能仅通过控制载畜量缓解草地超载,需要综合考虑生态系统的恢复力与放牧强度之间的动态关系,实现动态平衡。未来可根据不同草地的承载力确定放牧强度,进一步探讨放牧行为与生态系统恢复力之间的关系。

4.2 放牧生态系统的复杂性

由于放牧生态系统本身的复杂性和弹性,放牧对植被和土壤的影响没有一致的结论^[35],植物-土壤-家畜系统间存在相互作用。草本植物和家畜之间是相互适应、协同进化的,家畜啃食会损伤植物的光合组织和分生组织,但放牧或割草后植物茎和叶会出现再生性补偿生长,提高存留叶片的光合强度^[36],不同植物对放牧强度的响应不同^[37]。除采食外,家畜践踏作用可影响土壤紧实度和渗透能力,粪便有利于土壤养分的积累和转化,改变土壤理化性质^[6]。放牧的直接影响不利于植被的繁殖,而其间接影响却对繁殖有利,且这两种影响在一定放牧强度内会互相抵消^[38]。在放牧对资源环境产生影响的同时,资源环境异质性也影响家畜的分布。家畜的分布模式受到定居点、水源^[39]、植被质量^[40]、地形、温度^[41]等因素的影响,在空间上存在差异,且会随资源环境的改变而变化^[42]。植被和土壤之间也存在相互作用。将 37 个采样点的群落高、生物量、上下层土壤砂粒含量和上下层土壤有机质含量作为响应变量,将放牧强度、表层土壤水分和含水量、上下层土壤的 pH、全磷和全钾指标共 9 项因子作为解释变量,将 2 个变量组进行 RDA 分析,以探究放牧强度与植被、土壤因子的相互作用(图 6)。第一、二排序轴解释了 69.3% 的信息量,能较充分解释相互作用关系。群落高度与上层土壤 pH 及全磷含量呈高度正相关,上层土壤砂粒含量与上、下层土壤 pH 和上层土壤容重呈高度正相关,上、下层土壤有机质与上、下层土壤 pH、上层土壤容重呈高度负相关。放牧强度与土壤含水量呈较高的正相关,这受到家畜倾向于在水源附近采食的影响;高放牧强度会增加下层土壤砂粒含量并降低地上生物量,这与

詹瑾^[43]、红梅^[44]等的结果一致,但不能忽视外部条件的作用,除了受到放牧强度影响外,土壤和植被指标也受到气候^[8]、地形、土地利用、家畜组成比例^[45]、放牧管理手段(轮牧、围栏等)^[3]等多种因素的影响,不同区域资源禀赋的差异也要大于放牧强度的影响。高寒草地生物量、盖度、生物多样性均具有明显的经度分布格局,主要受降雨量和平均气温所趋动^[46],有机质含量与 pH 之间关系密切,酸性土中有机质含量较高^[47]。可见,放牧行为会对植被和土壤造成影响,但除放牧强度外,植被土壤变化也受到自然生态因子的影响。在适度放牧条件下形成了植物-土壤-家畜自适应系统,这增加了放牧生态系统的复杂性,加大了确定合理放牧强度、维持系统动态平衡的难度。

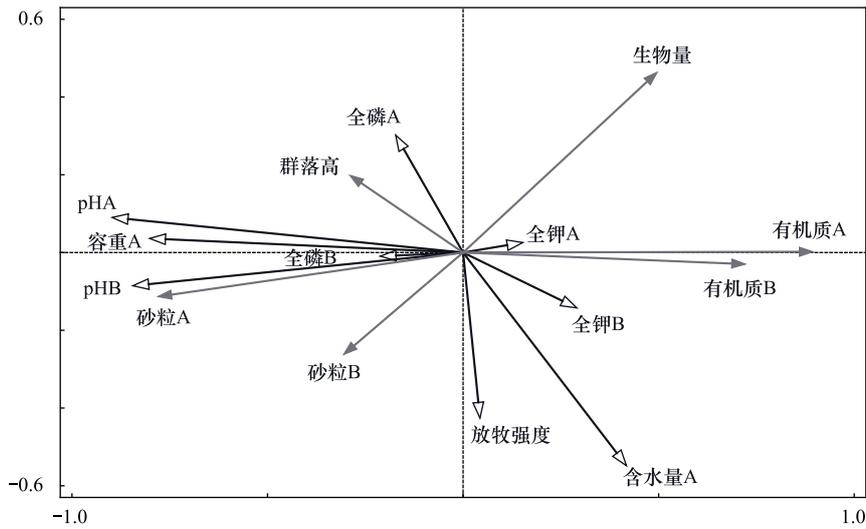


图 6 植被-土壤因子 RDA 排序图

Fig.6 RDA ranking diagram of vegetation-soil factors

A 代表上层土壤,B 代表下层土壤

5 结论

在自由放牧模式下,草甸和草原牧场的植被、土壤对放牧强度的响应不同。高寒草原地上生物量先升高后降低,高强度放牧对高寒草原植被的影响大于高寒草甸。高放牧强度下,高寒草原土壤水分显著高于低、中强度,高寒草甸土壤容重显著低于低强度,可能原因是放牧压力多集聚于水源附近。高寒草原区土壤的砂粒含量随放牧强度的增大而增加。放牧强度的增大导致草甸上层土壤有机质增加,草甸下层、草原上层、草原下层土壤有机质先增加后减小。草甸上、下层土壤全磷含量在低放牧强度下显著低于中、高强度。植被土壤变化受到自然因子和放牧活动的共同影响。高寒草甸更加耐牧,高强度放牧对高寒草原的负面影响更大,中度放牧有利于草地尤其是高寒草原的放牧利用。放牧生态系统是一个环境-植物-家畜自适应系统,在放牧管理中不能仅通过控制载畜量缓解草地超载,还需要综合考虑生态系统的弹性及各营养级的适应性,合理配置放牧强度,控制季节性超载和局部超载。

参考文献 (References):

- [1] Apollo M, Andreychouk V, Bhattarai S S. Short-term impacts of livestock grazing on vegetation and track formation in a high mountain environment: a case study from the himalayan miyar valley (India). *Sustainability*, 2018, 10(4): 951.
- [2] 郭嘉华, 王立新, 张景慧, 卓义, 武胜男, 王凤歌, 徐智超, 祁瑜, 温璐. 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. *草地学报*, 2018, 26(4): 832-840.
- [3] 侯扶江, 杨中艺. 放牧对草地的作用. *生态学报*, 2006, 26(1): 244-264.
- [4] 王立红, 王悦, 王德凯, 解李娜, 马成仓. 放牧对小叶锦鸡儿种群数量特征的影响. *草业科学*, 35(04): 800-806.
- [5] 王向涛, 张世虎, 陈懂懂, 谈嫣蓉, 孙大帅, 杜国祯. 不同放牧强度下高寒草甸植被特征和土壤养分变化研究. *草地学报*, 2010, 18(4):

510-516.

- [6] 侯扶江, 常生华, 于应文, 林慧龙. 放牧家畜的践踏作用研究评述. 生态学报, 2004, 24(4): 784-789.
- [7] 刘颖, 王德利, 王旭, 巴雷, 孙伟. 放牧强度对羊草草地植被特征的影响. 草业学报, 2002, 11(2): 22-28.
- [8] 何贵永, 孙浩智, 史小明, 齐威, 杜国祯. 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. 草业学报, 2015, 24(4): 12-20.
- [9] 李瑞华, 李晓兵, 王宏, 邓飞, 李旭. 内蒙古典型草原放牧压力评价及土壤 N 储量响应. 生态学报, 2016, 36(3): 758-768.
- [10] 李凤霞, 李晓东, 周秉荣, 祁栋林, 王力, 傅华. 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. 草业科学, 2015, 32(1): 11-18.
- [11] 荀其蕾, 安沙舟, 孙宗玖, 董莉莉, 魏鹏. 放牧对伊犁绢蒿群落结构的影响. 草业科学, 2013, 30(12): 2047-2053.
- [12] Liao C, Clark P E. Rangeland vegetation diversity and transition pathways under indigenous pastoralist management regimes in southern Ethiopia. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2018, 252: 105-113.
- [13] 杨青, 何贵永, 孙浩智, 杜国祯. 青藏高原高寒草甸土壤理化性质及微生物量对放牧强度的响应. 甘肃农业大学学报, 2013, 48(4): 76-81.
- [14] 王旭. 羊草草地放牧家畜采食行为的初步研究[D]. 长春: 东北师范大学, 2002.
- [15] Butt B, Shortridge A, WinklerPrins A M G A. Pastoral herd management, drought coping strategies, and cattle mobility in Southern Kenya. *Annals of the Association of American Geographers*, 2009, 99(2): 309-334.
- [16] Bi X, Li B, Fu Q, Fan Y, Ma L X, Yang Z H, Nan B, Dai X H, Zhang X S. Effects of grazing exclusion on the grassland ecosystems of mountain meadows and temperate typical steppe in a mountain-basin system in Central Asia's arid regions, China. *Science of the Total Environment*, 2018, 630: 254-263.
- [17] Hancock R N, Swain D L, Bishop-Hurley G J, Patison K P, Wark T, Valencia P, Corke P, O'Neill C J. Monitoring animal behaviour and environmental interactions using wireless sensor networks, GPS collars and satellite remote sensing. *Sensors*, 2009, 9(5): 3586-3603.
- [18] Hulbert I A R, French J. The accuracy of GPS for wildlife telemetry and habitat mapping. *Journal of Applied Ecology*, 2001, 38(4): 869-878.
- [19] Cooke S J, Hinch S G, Wikelski M, Andrews R D, Kuchel L J, Wolcott T G, Butler P J. Biotelemetry: a mechanistic approach to ecology. *Trends in Ecology & Evolution*, 2004, 19(6): 334-343.
- [20] Swain D L, Friend M A, Bishop-Hurley G J, Hancock R N, Wark T. Tracking livestock using global positioning systems-are we still lost? *Animal Production Science*, 2011, 51(3): 167-175.
- [21] 陈俊. 卫星放牧系统的设计与实现[D]. 上海: 华东师范大学, 2012.
- [22] 王伟强, 汪传建, 余晓平, 文春雷, 张雅, 孙世泽. 基于 WebGIS 与北斗/GPS 的放牧监测系统. 江苏农业科学, 2017, 45(7): 202-206.
- [23] Wall J. Movement Ecology Tools for ArcGIS (ArcMET) v.10.2.2 vX. (2014) [2020-5-11] www.movementecology.net.
- [24] 董全民, 赵新全, 王玉寿, 施建军, 王彦龙, 李世雄, 杨时海, 王柳英, 盛丽. 放牧对小嵩草草甸生物量及不同植物类群生长率和补偿效应的影响. 生态学报, 2012, 32(9): 2640-2650.
- [25] 方楷, 宋乃平, 魏乐, 安慧. 不同放牧制度对荒漠草原地上生物量及种间关系的影响. 草业学报, 2012, 21(5): 12-22.
- [26] 泽让东科, 文勇立, 艾鹭, 赵洪文, 陈有军. 放牧对青藏高原高寒草地土壤和生物量的影响. 草业科学, 2016, 33(10): 1975-1980.
- [27] Gamoun M. Grazing intensity effects on the vegetation in desert rangelands of Southern Tunisia. *Journal of Arid Land*, 2014, 6(3): 324-333.
- [28] 武红旗, 范燕敏, 靳瑰丽, 刘伟, 阿德列提, 朱萌. 不同利用方式对新源县春秋草地土壤理化性质的影响. 草业科学, 2012, 29(1): 9-14.
- [29] 苗翻, 杨新国, 古君龙, 杨东东. 放牧干扰下短花针茅植丛对表土层土壤性质的影响. 水土保持研究, 2019, 26(3): 49-57.
- [30] Manley J T, Schuman G E, Reeder J D, Hart R H. Rangeland soil carbon and nitrogen responses to grazing. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1995, 50(3): 294-298.
- [31] 白佳君. 放牧对短花针茅荒漠草原土壤水分及植被分布格局的影响[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2010.
- [32] 周秉荣, 李凤霞, 颜亮东, 才仁扎西, 耿晓平. 高寒沼泽湿地土壤湿度对放牧强度的响应. 草业科学, 2008, 25(11): 75-78.
- [33] 周国利, 程云湘, 马青青, 申波, 曲久, 田富, 常生华. 牦牛放牧强度对青藏高原东缘高寒草甸群落结构与土壤理化性质的影响. 草业科学, 2019, 36(4): 1022-1031.
- [34] 张伟华, 关世英, 李跃进. 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. 干旱区资源与环境, 2000, 14(4): 61-64.
- [35] 张成霞, 南志标. 放牧对草地土壤理化特性影响的研究进展. 草业学报, 2010, 19(4): 204-211.
- [36] 赵钢, 许志信, 李德新. 反刍家畜采食行为综述. 内蒙古农业大学学报: 自然科学版, 2000, 21(2): 109-116.
- [37] 李金花, 李镇清. 不同放牧强度下冷蒿、星毛委陵菜的形态可塑性及生物量分配格局. 植物生态学报, 2002, 26(4): 435-440.
- [38] 何茂, 黄建辉. 放牧对小叶锦鸡儿种子产量的影响. 植物学报, 2010, 45(1): 59-65.
- [39] Putfarken D, Dengler J, Lehmann S, Härdtle W. Site use of grazing cattle and sheep in a large-scale pasture landscape: a GPS/GIS assessment. *Applied Animal Behaviour Science*, 2008, 111(1/2): 54-67.
- [40] Díaz Falú E M, Brizuela M Á, Cid M S, Cibils A F, Cendoya M G, Bendersky D. Daily feeding site selection of cattle and sheep co-grazing a heterogeneous subtropical grassland. *Livestock Science*, 2014, 161: 147-157.
- [41] Butt B. Pastoral resource access and utilization: quantifying the spatial and temporal relationships between livestock mobility, density and biomass availability in southern Kenya. *Land Degradation & Development*, 2010, 21(6): 520-539.
- [42] Moritz M, Soma E, Scholte P, Xiao N C, Taylor L, Juran T, Kari S. An integrated approach to modeling grazing pressure in pastoral systems: the case of the logone floodplain (Cameroon). *Human Ecology*, 2010, 38(6): 775-789.
- [43] 詹瑾, 李玉霖, 韩丹, 杨红玲. 放牧对浑善达克沙地丘间低地植被群落及土壤的影响. 中国沙漠, 2019, 39(6): 184-191.
- [44] 红梅, 韩国栋, 赵萌莉, 索培芬, 潘林瑞. 放牧强度对浑善达克沙地土壤物理性质的影响. 草业科学, 2004, 21(12): 108-111.
- [45] Bradley B A, O'sullivan M T. Assessing the short-term impacts of changing grazing regime at the landscape scale with remote sensing. *International Journal of Remote Sensing*, 2011, 32(20): 5797-5813.
- [46] 朱桂丽, 李杰, 魏学红, 何念鹏. 青藏高寒草地植被生产力与生物多样性的经度格局. 自然资源学报, 2017, 32(2): 210-222.
- [47] 刘世全, 高丽丽, 蒲玉琳, 邓良基, 张世熔. 西藏土壤有机质和氮素状况及其影响因素分析. 水土保持学报, 2004, 18(6): 54-57, 67-67.