

藏羊和牦牛放牧对青藏高原高寒草甸有机碳储量的影响

王琳,白梅梅,魏孔涛,景媛媛,徐长林,鱼小军*

(甘肃农业大学草业学院,草业生态系统教育部重点实验室,甘肃省草业工程实验室,中-美草地畜牧业可持续发展研究中心,甘肃 兰州 730070)

摘要:【目的】探讨藏羊和牦牛放牧对青藏高原高寒草甸有机碳储量影响的分异。【方法】2021年在甘肃省武威市天祝藏族自治县抓喜秀龙乡,研究了长期放牧的高寒草甸冷季牧场。3种不同放牧管理方式(放牧藏羊、混牧藏羊+牦牛、放牧牦牛)对高寒草甸植被、根系、土壤、生态系统碳储量的影响。【结果】与其他处理相比,放牧藏羊有利于地上生物量的提高,约为放牧藏羊+牦牛的1.17倍,放牧牦牛的1.93倍;放牧牦牛更有利于根系生物量的提高,约为放牧藏羊+牦牛的1.14倍,放牧藏羊的1.04倍。放牧藏羊更有利于植被有机碳储量、土壤有机碳储量和根—土—草系统有机碳储量的输入,而放牧牦牛有利于高寒草甸根系有机碳储量的输入。相关性分析表明,地上生物量、土壤有机碳储量和地上有机碳储量的变化是影响根—土—草系统有机碳储量的主要原因。【结论】综合考虑高寒草甸生态功能和经济功能的实现,放牧藏羊有利于高寒草甸生态系统碳储量的输入。

关键词:高寒草甸;放牧管理;生态系统;有机碳储量

中图分类号:S812 **文献标志码:**A **文章编号:**1009-5500(2025)01-0025-10

DOI:10.13817/j.cnki.cycp.2025.01.004



碳循环作为全球生态系统中最重要循环之一,直接影响气候、环境等问题,引起了全球科学、政治、外交等部门的共同重视^[1]。2020年中国在联合国报告会议上指出,力争于2030年前达到峰值,努力争取2060年前实现碳中和,2021年国务院政府工作报告会中正式提出方案,落实碳达峰和碳中和各项工作^[2]。同时,碳循环也成为青藏高原地区生态研究关注的热点问题。由于特殊的地理环境和较弱的恢复弹性,青藏高原对全球碳波动十分敏感^[3]。高寒草甸是青藏高原地区主要草地类型,约占青藏高原总面积的50%,青藏高原高寒草甸放牧历史悠久,家畜数量庞大,是

我国重要的畜牧业发展基地^[4]。对高寒草甸生态系统有机碳储量的研究能够更加全面揭示高寒草甸在碳循环过程中的生态效应^[5]。放牧作为主要干扰形式,对高寒草甸碳储功能和碳汇功能具有强烈影响。增加有机碳储量、减少碳排放是完善高寒草甸碳循环、维持高寒草甸科学、合理利用的重要依据。

目前,针对放牧条件下高寒草甸生态系统有机碳储量的研究较少,且并未得出一致结论^[3-4,6]。且放牧季节、放牧方式、草地类型等也会显著影响高寒草甸碳的循环^[7-8]。研究放牧条件下高寒草甸生态系统有机碳储量的量变有助于厘清人类干扰对生态系统有机碳储量和碳排放的影响,对高寒草甸科学合理的放牧利用具有重要意义。目前约有1 400万头牦牛和5 000万只藏羊在青藏高原高寒草甸繁衍生息^[9-10],牦牛和藏羊对碳排放的影响在性别、年龄、粪斑大小等方面具有差异性^[11-12]。但不同家畜放牧对高寒草甸有机碳储量的影响规律尚不清楚,影响高寒草甸有机

收稿日期:2022-04-10;**修回日期:**2022-04-22

基金资助:国家自然科学基金项目(31760695)

作者简介:王琳(1994-),女,内蒙古通辽人,博士研究生。

E-mail:359012271@qq.com

*通信作者,研究方向为草地生态、饲草学。

E-mail:20253968@qq.com

碳储量的因素也尚不明确。因此,对祁连山东北缘长期放牧的高寒草甸冷季牧场进行取样,对比研究不同放牧方式(放牧藏羊、混牧藏羊和牦牛、放牧牦牛)对高寒草甸生态系统有机碳储量的影响,通过对不同放牧方式下植被、根系、土壤有机碳储量的测定和计算筛选适合高寒草甸的放牧管理方式,为高寒草甸科学、合理的放牧利用提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

试验地设在青藏高原东北缘的甘肃省武威市天祝藏族自治县抓喜秀龙乡天祝高山草原生态系统试验站,地理坐标为102°40′~102°47′ E,36°31′~37°55′ N,海拔高度2 960~3 050 m。该地区雨热同步,昼夜温差较大,日照强烈,气候寒冷潮湿,年平均气温为-0.3~0℃,其中温度最低月和最高月分别为1月和7月,平均气温分别为-12.2℃和11.3℃,该地≥0℃和≥10℃的年积温分别为1 581 d和1 026 d;年降水量

为416 mm,多集中在生长季节,年蒸发量为1 590 mm,是降水量的4倍,无绝对无霜期,植物生长期120~140 d,根据Spaargaren提出的土壤分类方法,该地区属于高山黑钙土^[13],该地区植被特征为典型高寒草甸草原。

1.2 试验设计

在天祝藏族自治县赛马滩长期放牧的冷季牧场进行研究。该牧场在1983年之前没有围栏围封,草地植被均匀一致。1983年草地承包到户后,选择放牧藏羊(S)、藏羊+牦牛(S_Y)和放牧牦牛(Y)的3户牧民的牧场进行研究,牧场用1.5 m高围栏围封。至本研究取样时,该放牧制度已经持续了39年。该试验设计于1983年,根据每年的入户调查数据和草原站长期驻扎人员数据进行统计和分析,放牧面积、放牧情况如图1所示。由于冷季牧场贮草量随放牧时间减少,在每年2~5月,各牧户会对放牧家畜进行干草补饲。藏羊补饲量约为0.25~0.5 kg/d,牦牛补饲量为1~2.5 kg/d^[14-15]。

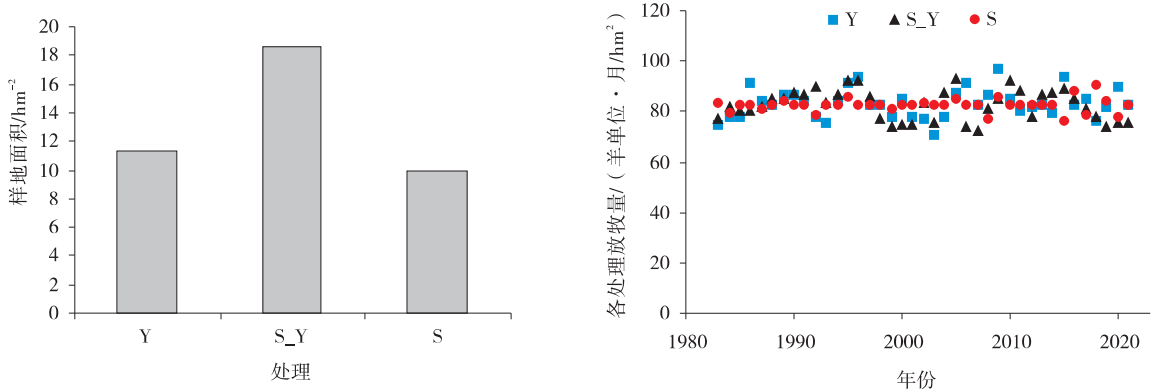


图1 各处理放牧率年际变化。

Fig. 1 The interannual variation of grazing rate in each treatment

注:A表示各样地面积,B示各处理放牧率。

表1 各试验地地理位置和优势种情况

Table 1 Geographical location and dominant species of each test site

家畜	地理位置	优势种
羊	37°20.168' N 102°77.795' E	垂穗披碱草(<i>Elymus nutans</i>)、紫花针茅(<i>Stipa purpurea</i>)、赖草(<i>Leymus secalinus</i>)、矮生嵩草(<i>Kobresia humilis</i>)等。
牛+羊	37°19.803' N 102°78.550' E	垂穗披碱草、紫花针茅、矮生嵩草、麻花艽(<i>Gentiana straminea</i>)、蓝花韭(<i>Allium beesianum</i>)等。
牛	37°19.445' N 102°78.388' E	矮生嵩草、阴山扁蓿豆(<i>Medicago ruthenia</i>)、垂穗披碱草、麻花艽、蓝花韭等。

1.3 样品采集

样品于2021年9月采集。采用“样方法”采集植

被和枯落物。分别从放牧藏羊、放牧藏羊+牦牛和放牧牦牛处理中随机选取4个10 m×10 m的取样小区。

各取样小区远离围栏,且相互之间距离大于50 m。在每个小区内随机设置3个1 m×1 m的样方。每个处理共设置样方12个,按功能群对地上植被进行统计后,齐地面进行刈割。随后收集样方内所有枯落物,一起带回实验室。105℃杀青后,65℃烘干至恒重,随后粉碎备用。采用“土柱法”进行植物根系和土壤样品的采集。在每个样方内分0~10、10~20、20~30和30~40 cm土层分别挖取10 cm×10 cm土柱,装入袋中带回实验室。同时采用“环刀法”对每层土壤进行取样,以测定土壤容重。将带回的土柱中土壤和根系分离,使用标准方法对每一层土壤样品进行筛分、均质和细分后阴干,过直径为2 mm的筛备用。采用“根袋法”冲洗干净根系上附着的泥土,105℃杀青后,65℃烘干至恒重,随后粉碎备用。

1.4 测定指标及相关计算

植被、枯落物、根系和土壤有机碳含量的测定采用重铬酸钾外加热法进行测定。

地上总有机碳储量由以下公式计算^[16]:

$$C_a = B_1 \times C_{11} / 1000 \quad (1)$$

$$C_1 = B_2 \times C_{12} / 1000 \quad (2)$$

$$C_v = C_a + C_1 \quad (3)$$

式中: C_a 为植被有机碳储量(g/m^2), B_1 为植被生物量(g/m^2), C_{11} 为植被有机碳含量(g/kg); C_1 为枯落物有机碳储量(g/m^2), B_2 为枯落物量(g/m^2), C_{12} 为枯落物有机碳含量(g/kg); C_v 为地上总有机碳储量(g/m^2);

根系有机碳储量由以下公式计算^[16]:

$$C_r = B_3 \times C_{13} / 1000 \quad (4)$$

式中: C_r 为根系有机碳储量(g/m^2), B_3 为根系生物量(g/m^2), C_{13} 为根系有机碳含量(g/kg);

土壤总有机碳储量由以下公式计算^[16]:

$$C_{si} = D_i \times B_i \times TC_i \times 10 \quad (5)$$

$$C_s = \sum_{i=0}^k C_{si} \quad (k=1, 2, 3, 4) \quad (6)$$

式中: C_{si} 为第*i*层土壤有机有机碳储量(g/m^2), D_i 为土层厚度(cm), B_i 为第*i*层土壤容重(g/m^3), TC_i 为第*i*层土壤有机碳含量(g/kg), C_s 为土壤总有机有机碳储量(g/m^2),*i*为土层,且*i*=1,2,3,4。

根—土—草系统有机碳储量由以下公式计算:

$$C_t = C_v + C_r + C_s \quad (7)$$

式中: C_t 代表根—土—草系统有机有机碳储量

(g/m^2)。

1.5 数据分析

所有数据均采用SAS(version V8)软件进行单因素方差分析(one-way ANOVA),并在95%置信区间进行显著性检验,利用SPSS(statistics 25)进行正态分布检验,采用Pearson矩阵进行相关性分析,利用Microsoft Excel 2010作图。

2 结果与分析

2.1 藏羊和牦牛放牧对植被生物量和枯落物量及其有机碳储量的影响

2.1.1 藏羊和牦牛放牧对植被和枯落物量的影响
豆科(Fabaceae)生物量放牧牦牛样地最高,显著高于其他样地($P<0.05$),而放牧藏羊和混牧藏羊+牦牛之间差异不显著;禾本科(Poaceae)生物量放牧藏羊显著高于其他样地($P<0.05$),约为混牧藏羊+牦牛样地的1.58倍,约为放牧牦牛样地的7.81倍;莎草科(Cyperaceae)混牧藏羊+牦牛样地生物量($569.04 \text{ kg}/\text{hm}^2$)显著低于放牧藏羊样地($674.08 \text{ kg}/\text{hm}^2$)和放牧牦牛样地($766.08 \text{ kg}/\text{hm}^2$)($P<0.05$),毒草和杂类草生物量都表现为混牧样地最高,分别为 $969.44 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 和 $804.48 \text{ kg}/\text{hm}^2$,显著高于其他样地($P<0.05$)(图2)。

藏羊和牦牛放牧导致各功能群生物量差异显著。放牧藏羊样地禾本科>杂类草>莎草科>毒草>豆科,禾本科生物量达到 $3092.64 \text{ kg}/\text{hm}^2$,而豆科生物量仅为 $238.08 \text{ kg}/\text{hm}^2$,除莎草科和毒草之间差异不显著外,其他功能群差异显著($P<0.05$);混牧藏羊+牦牛样地各功能群生物量表现为禾本科>毒草>杂类草>莎草科>豆科,且各功能群间具有显著差异($P<0.05$),禾本科和豆科生物量分别为 1955.68 、 $237.20 \text{ kg}/\text{hm}^2$;而放牧牦牛样地生物量莎草科>毒草>杂类草>禾本科>豆科,莎草科生物量为 $766.08 \text{ kg}/\text{hm}^2$,而豆科生物量为 $377.12 \text{ kg}/\text{hm}^2$,除禾本科和豆科之间差异不显著外,其他各功能群生物量差异显著($P<0.05$)。

放牧藏羊枯落物量显著高于混牧藏羊+牦牛($P<0.05$),分别为 699.04 、 $143.92 \text{ kg}/\text{hm}^2$,混牧枯落物量与放牧牦牛($39.28 \text{ kg}/\text{hm}^2$)之间也具有显著差异($P<0.05$);植被生物量和总生物量都表现为放牧藏

羊>混牧藏羊+牦牛>放牧牦牛,各处理间差异显著($P<0.05$),植被生物量分别为6 007.84、4679.76和2 791.28 kg/hm²,放牧藏羊总生物量约为混牧藏羊+牦牛的1.39倍,为放牧牦牛的2.37倍(图3)。

2.1.2 藏羊和牦牛放牧对植被和枯落物有机碳储量的影响 藏羊和牦牛放牧显著影响了植被有机碳储量和枯落物有机碳储量。放牧藏羊样地植被有机碳

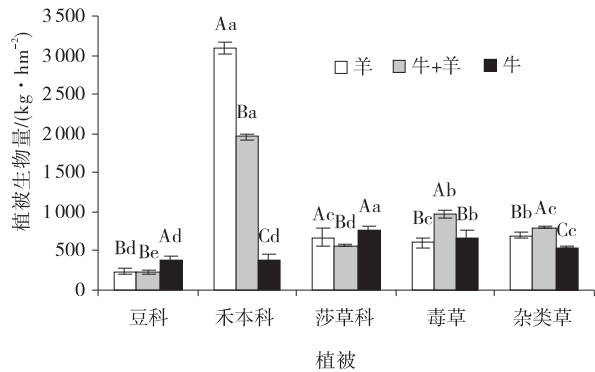


图2 藏羊和牦牛放牧对各功能群生物量的影响

Fig. 2 Effect of grazing patterns on biomass of functional groups

注:不同大写字母表示各处理生物量之间具有显著差异($P<0.05$),不同小写字母表示各功能群生物量之间有显著差异($P<0.05$),下同。

表2 藏羊和牦牛放牧对植被和枯落物有机碳储量的影响

Table 2 Effects of different grazing patterns on vegetation and litter carbon storage

g/m²

指标	羊	牛+羊	牛
植被有机碳储量	304.93±9.62 ^A	220.51±14.90 ^B	102.39±13.24 ^C
枯落物有机碳储量	30.39±0.78 ^A	6.53±0.33 ^B	1.74±0.01 ^C

注:不同大写字母表示各处理有机碳储量之间具有显著差异($P<0.05$)。

2.2 藏羊和牦牛放牧对根系生物量及有机碳储量的影响

2.2.1 藏羊和牦牛放牧对根系生物量的影响 不同深度根系生物量仍遵循“深少浅多”的分布规律,不同处理各土层之间差异显著($P<0.05$)。0~10 cm放牧藏羊根系生物量为3 738.40 kg/hm²,显著高于混牧藏羊+牦牛处理(3 146.00 kg/hm²)和放牧牦牛处理(3 488.40 kg/hm²)($P<0.05$),混牧藏羊+牦牛和放牧牦牛之间差异不显著($P>0.05$);10~20、20~30和30~40 cm土层根系生物量都是放牧牦牛较高,显著高于放牧藏羊和混牧藏羊+牦牛($P<0.05$),而后两者在20~30 cm土层差异显著($P<0.05$),其他土层未

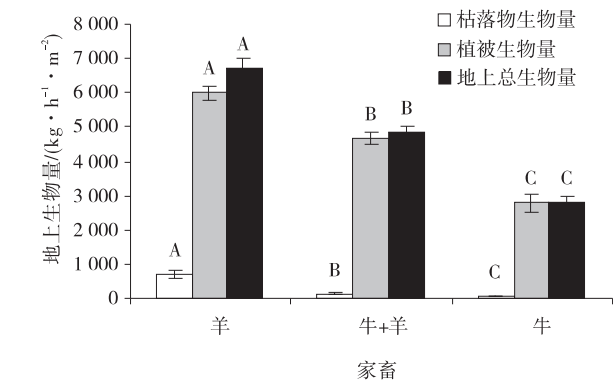


图3 藏羊和牦牛放牧对地上生物量的影响

Fig. 3 The effect of grazing patterns on aboveground biomass

储量显著高于混牧藏羊+牦牛和放牧牦牛($P<0.05$),分别为两样地的1.38倍和2.98倍;混牧藏羊+牦牛样地植被有机碳储量约为放牧牦牛样地的2.15倍;枯落物有机碳储量显著低于植被有机碳储量,在不同处理下也表现出相同变化趋势,即放牧藏羊>混牧藏羊+牦牛>放牧牦牛,各处理间差异显著($P<0.05$),放牧牦牛枯落物有机碳储量约为放牧藏羊样地的5.73%,约为混牧藏羊+牦牛样地的26.65%(表2)。

见显著差异(图4)。

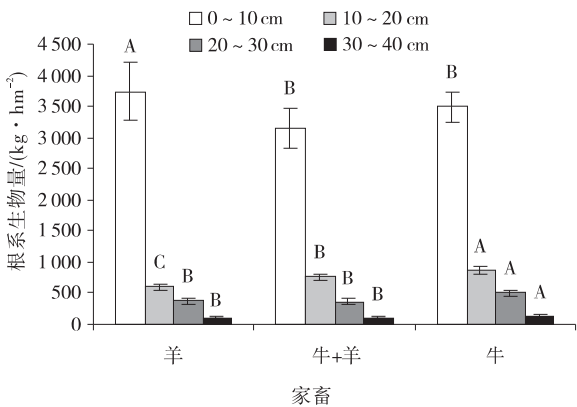


图4 藏羊和牦牛放牧对不同深度根系生物量的影响

Fig. 4 The effect of grazing patterns on root biomass at different depths

2.2.2 藏羊和牦牛放牧对根系有机碳储量的影响 随着深度的增加,根系有机碳储量表现出递减的变化趋势,各处理间都表现为 0~10 cm 土层显著高于其他各土壤深度($P<0.05$)。其中,10~20 cm 土层根系有机碳储量显著高于 20~30、30~40 cm,后两者之间没

有显著差异($P>0.05$);不同处理间比较,0~10、20~30 和 30~40 cm 土层根系有机碳储量差异不显著,而 10~20 cm 放牧牦牛根系有机碳储量达到 27.12 g/m^2 ,显著高于放牧藏羊(11.66 g/m^2)和混牧藏羊+牦牛处理(19.98 g/m^2)($P<0.05$)(表 3)。

表 3 藏羊和牦牛放牧对根系有机碳储量的影响

Table 3 Effects of different grazing patterns on root carbon storage

g/m^2

根系长度/cm	羊	牛+羊	牛
0~10	$137.04 \pm 8.67^{\text{Aa}}$	$133.10 \pm 13.94^{\text{Aa}}$	$147.15 \pm 22.85^{\text{Aa}}$
10~20	$11.66 \pm 3.45^{\text{Bb}}$	$19.98 \pm 5.23^{\text{Bb}}$	$27.12 \pm 7.50^{\text{Ab}}$
20~30	$5.78 \pm 1.73^{\text{Ac}}$	$5.80 \pm 1.19^{\text{Ac}}$	$8.58 \pm 2.61^{\text{Ac}}$
30~40	$1.38 \pm 0.41^{\text{Ac}}$	$1.22 \pm 0.25^{\text{Ac}}$	$1.84 \pm 0.56^{\text{Ac}}$

注:不同大写字母表示不同处理相同土层差异显著($P<0.05$),不同小写字母表示不同土层根系有机碳储量之间差异显著($P<0.05$),下同。

2.3 藏羊和牦牛放牧对土壤容重及土壤有机碳储量的影响

2.3.1 藏羊和牦牛放牧对土壤容重的影响 土壤容重随土层深度的增加呈逐渐升高的单峰曲线。不同处理间,放牧牦牛 0~10 cm 土壤容重(0.84 g/cm^3)显著高于放牧藏羊(0.74 g/cm^3)和混牧藏羊+牦牛(0.77 g/cm^3)($P<0.05$),且后两者之间没有显著差异($P>0.05$)。但各处理土壤容重在 10~20、20~30 和 30~40 cm 差异不显著;相同处理不同土壤深度间比较,放牧藏羊 30~40 cm 土壤容重为 1.05 g/cm^3 ,显著高于其他土层,10~20、20~30 cm 之间差异不显著,但显著高于表层土壤(0.74 g/cm^3)($P<0.05$),混牧藏羊+牦牛也表现为 30~40 cm 土壤容重最大,达到 1.06 g/cm^3 ,显著高于其他土层($P<0.05$),其余土层之间差异不显著;放牧牦牛 30~40 cm 土壤容重为 1.03 g/cm^3 ,显著高于 0~10、10~20 和 20~30 cm($P<0.05$),且前两者之间差异不显著(图 5)。

2.3.2 藏羊和牦牛放牧对土壤有机碳储量的影响 不同土壤深度比较,放牧藏羊土壤有机碳储量显著高于混牧藏羊+牦牛和放牧牦牛($P<0.05$),在 0~10、10~20 cm 土层混牧藏羊+牦牛和放牧牦牛处理未见显著差异,而在 20~30、30~40 cm 土层混牧藏羊+牦牛处理土壤有机碳储量显著高于放牧牦牛($P<0.05$),分别为放牧牦牛的 1.18 倍和 1.28 倍;放牧藏羊处理,0~10、10~20 cm 土层有机碳储量之间没有显著差异,但显著高于 20~30、30~40 cm($P<0.05$),后

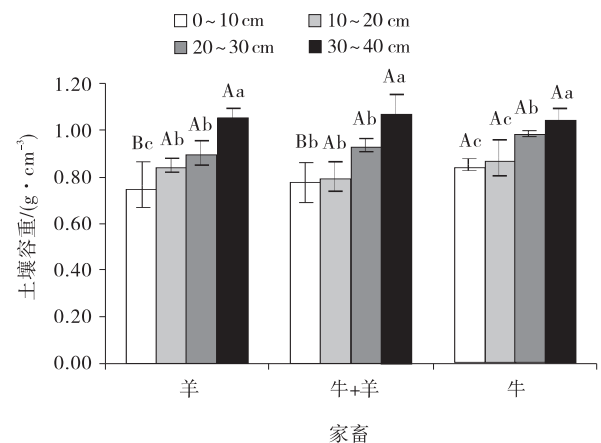


图 5 藏羊和牦牛放牧对土壤容重的影响

Fig. 5 The influence of grazing patterns on soil bulk density

两者之间差异不显著,随土壤深度的增加,表层土壤有机碳储量比其他土层分别高 7.69%、24.26% 和 19.61%;混牧藏羊+牦牛处理,0~10 cm 有机碳储量显著高于其他处理($P<0.05$),10~20、20~30 cm 之间差异不显著,30~40 cm 有机碳储量显著低于其他土壤深度($P<0.05$);放牧牦牛处理各土层间均表现为显著差异($P<0.05$),随土壤深度的增加,表层土壤有机碳储量分别为其他土层的 1.29、1.60 和 2.11 倍(表 4)。

2.4 藏羊和牦牛放牧对根-土-草系统有机碳储量的影响

藏羊和牦牛放牧下土壤总有机碳储量显著高于根系总有机碳储量和地上总有机碳储量,土壤总有机碳储量、地上总有机碳储量和根-土-草系统有机碳

表 4 藏羊和牦牛放牧对土壤有机碳储量的影响
Table 4 Effects of grazing patterns on soil carbon storage g/m²

土层深度/cm	羊	牛+羊	牛
0~10	6 810.60±271.66 ^{Aa}	6 074.96±269.99 ^{Ba}	6 092.38±186.50 ^{Ba}
10~20	6 287.03±258.31 ^{Aa}	4 684.57±243.43 ^{Bb}	4 707.25±286.91 ^{Bb}
20~30	5 158.63±324.17 ^{Ab}	4 486.22±241.15 ^{Bb}	3 817.65±266.09 ^{Cc}
30~40	5 474.82±295.68 ^{Ab}	3 715.50±180.76 ^{Bc}	2 892.39±158.03 ^{Cd}

储量都以放牧藏羊处理为最高,显著高于混牧藏羊+牦牛处理和放牧牦牛处理($P<0.05$),且混牧藏羊+牦牛处理显著高于放牧牦牛处理($P<0.05$);根系总有机碳储量放牧牦牛样地最高,与其他处理相比差异显著($P<0.05$),放牧藏羊和混牧藏羊+牦牛根系有机碳储量分别为 155.86、160.38 g/m²,差异不显著。

表 5 藏羊和牦牛放牧对根-土-草系统有机碳储量的影响
Table 5 Effects of grazing patterns on carbon storage in Root-Soil-Grass system g/m²

指标	羊	牛+羊	牛
土壤总有机碳储量	23 731.08±574.91 ^A	18 961.24±467.67 ^B	17 509.67±448.77 ^C
根系总有机碳储量	155.86±8.95 ^B	160.38±16.07 ^B	186.43±22.86 ^A
地上总有机碳储量	335.32±10.41 ^A	227.04±15.23 ^B	104.12±13.25 ^C
根-土-草系统有机碳储量	24 222.26±474.50 ^A	19 348.66±399.80 ^B	17 800.22±359.83 ^C

2.5 根-土-草系统有机碳储量相关性分析

土壤容重与根系生物量、根系有机碳储量正相关,与其他因子负相关,其中与地上有机碳储量呈显著负相关关系($P<0.05$);地上生物量与土壤有机碳储量、地上有机碳储量及总有机碳储量呈极显著正相关($P<0.01$),与根系生物量负相关,与根系有机碳储量呈显著负相关($P<0.05$);根系生物量与土壤有机

碳储量和根系有机碳储量正相关,与地上有机碳储量和总有机碳储量负相关,但相关性都不显著;土壤有机碳储量与地上有机碳储量和总有机碳储量极显著正相关($P<0.01$),但与根系有机碳储量呈负相关关系;地上有机碳储量与根系有机碳储量显著负相关,与总有机碳储量显著正相关($P<0.05$);根系有机碳储量与总有机碳储量呈负相关关系(表 6)。

表 6 根-土-草系统有机碳储量相关性分析
Table 6 Correlation analysis of organic carbon storage in root-soil-grass system

指标	土壤容重	地上生物量	根系生物量	土壤有机碳储量	地上有机碳储量	根系有机碳储量	总有机碳储量
土壤容重	1						
地上生物量	-0.638	1					
根系生物量	0.204	-0.230	1				
土壤有机碳储量	-0.559	.933**	0.070	1			
地上有机碳储量	-.697*	.979**	-0.164	.918**	1		
根系有机碳储量	0.570	-.670*	0.402	-0.473	-.677*	1	
总有机碳储量	-0.544	.950**	-0.010	.992**	.914**	-0.519	1

注:*表示在 0.05 水平相关性显著($P<0.05$),**表示在 0.01 水平相关性显著($P<0.01$)。

3 讨论

3.1 藏羊和牦牛放牧对土壤有机碳储量的影响

高寒草甸草地生态系统有机碳库由植被、凋落物、根系和土壤有机碳库组成,对高寒草甸草地生态

系统养分循环、水土保持、气候调节等具有重要生态学意义^[17]。放牧是高寒草甸干扰的主要方式,放牧家畜的采食、践踏和排泄对高寒草甸植被构成、凋落物积累、土壤结构、土壤养分等具有深远影响^[18-20]。本研究发现,放牧条件下,各有机碳库组成部分中土壤

有机碳储量最高,这与李文等^[6]、邢鹏飞等^[21]、王合云等^[22]在高寒草甸、暖性草原和典型草原的研究结果一致,说明土壤有机碳储量是草地生态系统有机碳储量的重要组成部分。水分、热量等自然条件的变化和放牧、开垦等人类行为产生的干扰是影响草地生态系统土壤有机碳储量的主要因素^[23-24]。土壤中有有机碳主要由植物残体提供,储存在土壤中的碳不仅能稳定和改善土壤结构、减少土壤侵蚀、提高草地初级生产力,而且能为土壤水文特性及以碳为基础的温室气体收支研究提供重要信息^[25]。本研究结果表明,不同家畜放牧显著影响了高寒草甸土壤有机碳储量,放牧藏羊土壤有机碳储量显著高于其他处理。与其他处理相比,放牧藏羊处理枯落物量较高,其分解过程中能向土壤中输入大量碳。同时,放牧藏羊处理较高的植被生物量提高了地表覆盖率,增加了土壤的保水保肥能力,更有利于土壤中碳的固存^[26]。此外,排泄物的分解也是导致放牧藏羊处理土壤有机碳储量较高的原因。牦牛粪因燃烧时产生较高的热值被当地牧民作为重要的生活和生产资料。放牧过程中,大量牦牛粪被牧民捡走,而藏羊粪却几乎全部留存在草地中。羊粪在分解过程中不仅将碳、氮、磷等元素返还到土壤中,分解时还会产生大量腐殖酸,有助于土壤碳的固持^[21,27]。相关性分析表明,土壤有机碳储量和地上有机碳储量相辅相成,互相促进,地上有机碳储量的增加有利于植物残体进入土壤,增加土壤中碳的固持,而土壤有机碳储量增加有利于植被生产力的形成,进而提高地上有机碳储量。

3.2 藏羊和牦牛放牧对植被有机碳储量的影响

根系碳储量、植被碳储量和枯落物碳储量在高寒草甸生态系统碳储量的维持中具有重要作用。而植被构成不仅左右高寒草甸植被演替方向,还对植被有机碳储量具有显著影响^[27]。本研究结果表明,不同家畜放牧改变了高寒草甸植被构成。放牧藏羊处理植被群落中禾本科占比较高,其次是莎草科,放牧藏羊+牦牛处理禾本科占比较高,其次是杂类草,而放牧牦牛处理中莎草科占比最高,其次是豆科植物。与莎草科相比,禾本科拥有更高的地上生物量,在植被碳储量中的贡献显著高于莎草科^[29]。同时,本研究还发现,与其他处理相比,放牧牦牛提高了植被根冠比,导致该处理根系有机碳储量的增加。研究表明,禾本

科植物根系多为须根系,绝大多数根系生物量都聚集在浅层土壤中^[30],而放牧牦牛样地优势种为多年生的矮生嵩草、红棕苔草(*Carex przewalskii*)等莎草科植物,具有根状茎,其根系十分发达,能深入土壤吸收土壤中水分和养分^[31],故而其他深度(10~40 cm)根系生物量放牧牦牛样地最高。Wang等^[32]、Luke等^[33]研究结果也表明,与放牧羊相比,放牧牛导致了根系生物量的增加。豆科植物和禾本科植物根系是导致差异的可能原因。与禾本科植物根系相比,豆科植物根系更粗,寿命更高,且周转率更低。相关性分析表明,地上生物量是影响土壤有机碳储量、地上有机碳储量和总有机碳储量的主要因子,放牧藏羊处理对地上生物量的提高是有机碳储量增加的关键原因。混牧藏羊+牦牛和放牧牦牛处理使地上生物量减少,限制了碳向土壤中的输入^[34],与此同时,有研究表明,放牧牦牛导致土壤呼吸的增加,削弱了草地生态系统碳汇作用而增加了碳源作用^[35],不利于高寒草甸碳的固存。与牦牛放牧相比,放牧藏羊提高了土壤、植被和根系各部分有机碳储量,更有利于草地碳汇功能的发挥。

3.3 藏羊和牦牛放牧对生态系统有机碳储量影响的差异性

探究生态系统碳储量在植被、根系、土壤等各部分的分配规律是研究草地生态系统功能和结构的基础^[36]。本研究发现,地上部分有机碳储量与根系有机碳储量显著负相关,与总有机碳储量极显著正相关,这不仅表明地上有机碳储量是影响总有机碳储量的重要因子,也意味着在地上和地下植物碳分配存在平衡。田玉强^[37]对高寒草甸的研究青藏高原高寒生态系统的研究中得出相似结果,刘玉^[38]对黄土高原半干旱区典型草地、张磊^[39]在干旱区草地的研究中也发现,不同生活型植物在权衡功能性状和有机碳储量方面存在不同的适应策略。本研究中,与其他处理相比,放牧藏羊处理植被有机碳储量较高而根系有机碳含量较低,放牧牦牛处理与之相反,表明放牧不同家畜改变了碳在植物中的分布规律,放牧藏羊更有利于碳在地上部分的储存。

4 结论

不同家畜放牧改变了高寒草甸植被和地上生物量构成,放牧藏羊禾本科生物量、莎草科生物量、枯落

物量、地上总生物量和0~10 cm根系生物量显著高于其他处理,放牧牦牛处理豆科生物量和10~40 cm根系生物量显著高于其他处理。

较高的地上生物量不仅提高了放牧藏羊处理地上碳储量,有助于土壤碳储量的增加。地上有机碳储量、土壤有机碳储量和总有机碳储量表现为放牧藏羊>混牧藏羊+牦牛>放牧牦牛。放牧牦牛处理由于粪便采集损失了大量水分和细苗,使营养生长为主的植物根系生物量增加,导致根系有机碳储量放牧牦牛>放牧藏羊>混牧藏羊+牦牛。

相关性分析表明,地上生物量和土壤有机碳储量的变化是导致高寒草甸生态系统有机碳储量波动的主要原因。就提高高寒草甸生态系统有机碳储量,增加青藏高原草地碳汇而言,提倡放牧藏羊为首选放牧管理方式。

参考文献:

- [1] Mallapaty S. How China could be carbon neutral by mid-century[J]. *Nature*, 2020, 586(7830): 482—483.
- [2] Zhang S, Chen W. China's energy transition pathway in a carbon neutral vision[J]. *Engineering*, 2021(9): 004.
- [3] 杜凯, 康宇坤, 张德罡, 等. 不同放牧方式对祁连山高寒草甸有机碳、氮库的影响[J]. *草地学报*, 2020, 28(5): 1412—1420.
- [4] 张建胜. 禁牧对青藏高原高寒草甸植物群落组成和有机碳储量的影响[D]. 兰州: 兰州大学, 2020.
- [5] 李瑾璞, 于秀波, 夏少霞, 等. 白洋淀湿地地区土壤有机碳密度及储量的空间分布特征[J]. *生态学报*, 2020, 40(24): 8928—8935.
- [6] 李文, 曹文侠, 师尚礼, 等. 放牧管理模式对高寒草甸生态系统有机碳、氮储量特征的影响[J]. *草业学报*, 2016, 25(11): 25—33.
- [7] 展鹏飞, 刘振亚, 郭玉静, 等. 不同放牧方式下高寒草甸土壤碳组分的对比研究[J]. *土壤*, 2018, 50(3): 543—551.
- [8] 张岩. 藏羊夏季和冬季轮牧对高寒生态系统植被、土壤和家畜的作用[D]. 兰州: 兰州大学, 2016.
- [9] 郭鹏辉. 高寒牧区藏绵羊消化代谢与肠道甲烷排放特征[D]. 兰州: 兰州大学, 2020.
- [10] 刘丽丽, 李希来. 捡拾牦牛粪对高寒草甸植物功能群特征与生产力的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2016, 24(5): 668—673.
- [11] 薛丹, 熊婉, 何奕忻, 等. 青藏高原东缘高寒草甸生长季自然放牧母牦牛 CO₂ 和 CH₄ 呼吸排放通量特征[J]. *中国科学院大学学报*, 2017, 34(4): 487—497.
- [12] 刘阳, 孙义, 颜才玉, 等. 轮牧高寒草甸温室气体排放的季节动态与羊粪的作用[J]. *草业科学*, 2012, 29(8): 1212—1216.
- [13] Spaargaren O C, Deckers J. The world reference base for soil resources[C]//*Soils of Tropical Forest Ecosystems*. Springer: Berlin, Heidelberg, 1998: 21—28.
- [14] 徐长林, 张普金. 金强河高寒草地放牧绵羊冷季体重变化及其补饲措施的初步探讨[J]. *甘肃农大学学报*, 1985(3): 15—21.
- [15] 王巧玲, 花立民, 周建伟. 冷季补饲对白牦牛生产性能及草地生产力的影响[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2016, 44(2): 8—14.
- [16] 李文. 不同放牧管理模式对高寒草甸植被、土壤和碳氮储量特征的影响[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2016.
- [17] 袁敏, 屈兴乐, 赵津仪, 等. 山区高寒草甸东西坡土壤有机碳及组分差异[J]. *贵州农业科学*, 2020, 48(12): 57—61.
- [18] 杜凯, 康宇坤, 张德罡, 等. 放牧模式对祁连山东缘高寒草甸植被特征的影响[J]. *草原与草坪*, 2021, 41(3): 9—18+25.
- [19] 徐松鹤, 陈宇浩. 休牧对锡林郭勒典型草原土壤养分和植物群落特征的影响[J]. *水土保持研究*, 2018, 25(4): 15—21.
- [20] 潘涛涛, 吴玉宝, 徐长林, 等. 模拟条件下藏羊、牦牛践踏和降水对东祁连山高寒草甸地上植被生长的影响[J]. *草原与草坪*, 2019, 39(1): 60—68.
- [21] 邢鹏飞, 李刚, 赵祥, 等. 山西暖性草地碳密度分布特征及其区域差异[J]. *草地学报*, 2019, 27(6): 1667—1676.
- [22] 王合云, 郭建英, 董智, 等. 不同放牧退化程度的大针茅典型草原有机碳储量特征[J]. *中国草地学报*, 2016, 38(2): 65—71.
- [23] 刘晓辉, 侯光雷, 邹元春, 等. 松嫩平原自然保护区土壤储碳与气候调节功能[J]. *东北林业大学学报*, 2021, 49(10): 122—126.
- [24] 马听听, 赵允格, 马宁, 等. 放牧对黄土高原退耕草地土壤有机碳储量的影响[J]. *应用生态学报*, 2022, 33(1): 67—75.
- [25] Alvarez R, Berhongaray G, Gimenez A. Are grassland soils of the pampas sequestering carbon? [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 763: 142978.
- [26] 连喜红, 祁元, 王宏伟, 等. 人类活动影响下的青海湖流

- 域生态系统服务空间格局[J]. 冰川冻土, 2019, 41(5): 1254—1263.
- [27] Wang L, Yu X, Xu C, *et al.* Grazing by tibetan sheep enhances soil bacterial and fungal diversity in cold season pastures of alpine meadows on the northern Qinghai—Tibetan Plateau[J]. Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 2022, 1: 1—23.
- [28] 陈雷, 孙冰, 曹福亮, 等. 不同银杏复合经营系统对碳储量的影响[J]. 中南林业科技大学学报, 2017, 37(10): 112—117.
- [29] 张芊妤, 曾奕丰, 李文洁, 等. 季节放牧下青藏高原高寒草甸牧草生物量空间分布特征[J]. 草业科学, 2022, 39(2): 318—327.
- [30] 刘攀, 王文颖, 周华坤, 等. 青藏高原人工草地土壤可溶性氮组分与植被生产力动态变化过程[J]. 植物生态学报, 2021, 45(5): 562—572.
- [31] 张彩军, 姚宝辉, 王小燕, 等. 草地补播对甘南草原高寒草甸高原鼯鼠食性的影响[J]. 草业科学, 2021, 38(5): 967—975.
- [32] Wang Z, Jin J, Zhang Y, *et al.* Impacts of mixed—grazing on root biomass and belowground net primary production in a temperate desert steppe[J]. Royal Society open science, 2019, 6(2): 180890.
- [33] Luke McCormack M, Adams T S, Smithwick E A H, *et al.* Predicting fine root lifespan from plant functional traits in temperate trees[J]. New Phytologist, 2012, 195(4): 823—831.
- [34] Naidoo L, Van Deventer H, Ramoelo A, *et al.* Estimating above ground biomass as an indicator of carbon storage in vegetated wetlands of the grassland biome of South Africa[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2019, 78: 118—129.
- [35] Liu C, Li W, Xu J, *et al.* Response of soil nutrients and stoichiometry to grazing management in alpine grassland on the Qinghai—Tibet Plateau[J]. Soil and Tillage Research, 2021, 206: 104822.
- [36] 林春英, 李希来, 孙海松, 等. 黄河源高寒湿地有机碳组分对不同退化程度的响应[J]. 草地学报, 2021, 29(7): 1540—1548.
- [37] 田玉强, 欧阳华, 宋明华, 等. 青藏高原样带高寒生态系统土壤有机碳分布及其影响因子[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2007(4): 443—449.
- [38] 刘玉. 半干旱区草地自然恢复的地上一地下生态过程研究[D]. 北京: 中国科学院大学(中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心), 2018.
- [39] 张磊, 吕光辉, 蒋腊梅, 等. 干旱区荒漠植物初级生产力及有机碳储量与功能性状之间的关系[J]. 新疆大学学报(自然科学版)(中英文), 2020, 37(1): 63—74.

Effects of Tibetan sheep and yak grazing on organic carbon storage in alpine meadow of Tibetan Plateau

WANG Lin, BAI Mei-mei, WEI Kong-tao, JING Yuan-yuan, XU Chang-lin,
YU Xiao-jun

(College of Grassland Science, Gansu Agricultural University, Key Laboratory for Grassland Ecosystem, Ministry of Education, Grassland Engineering Laboratory of Gansu Province, Sino-U. S. Centers for Grazing Land Ecosystem Sustainability, Lanzhou 730070, China)

Abstract: 【Objective】 The study was carried out to explore the difference of the effect of Tibetan sheep and yak grazing on the organic carbon storage of Alpine Meadow on the Tibetan Plateau. 【Method】 The alpine meadow under long—term grazing in Zhuaxi xiulong Township, Tianzhu Tibetan Autonomous County, Wuwei City, Gansu Province was studied in 2021. The effects of three different grazing management methods (grazing Tibetan sheep, mixed grazing Tibetan sheep + yak and Grazing Yak) on the carbon storage of alpine meadow vegetation, roots, soil and ecosystem were measured. 【Result】 The results showed that compared with other treatments, grazing Tibetan

sheep treatment was conducive to the increase of aboveground biomass, which was about 1.17 times that of grazing Tibetan sheep + yak treatment and 1.93 times that of Grazing Yak treatment. Grazing Yak was more conducive to the improvement of root biomass, which was about 1.14 times that of grazing Tibetan sheep + yak and 1.04 times that of grazing Tibetan sheep. Grazing Tibetan sheep was more conducive to the input of vegetation organic carbon storage, soil organic carbon storage and root—soil—grass system organic carbon storage. And Grazing Yak was conducive to the input of root organic carbon storage in alpine meadow. Correlation analysis showed that the changes of aboveground biomass, soil organic carbon storage and aboveground organic carbon storage were the main reasons affecting the organic carbon storage of root—soil—grass system. 【Conclusion】 Considering the realization of ecological and economic functions of alpine meadow, grazing Tibetan sheep was conducive to the input of carbon storage in alpine meadow ecosystem, which was a more ideal grazing management method in alpine meadow.

Key words: alpine meadow; grazing management; ecosystem; organic carbon storage

(责任编辑:康宇坤)