

DOI: 10.20103/j.stxb.202405221170

李瑞玲,王海,哈斯巴根,才文旦周,王佳豪,石红霄.不同保护和利用措施对高寒草甸植被-土壤碳密度的影响.生态学报,2025,45(6):2595-2604.
Li R L, Wang H, Hasibagen, Caiwendanzhou, Wang J H, Shi H X. The effects of different conservation and utilization measures on the vegetation-soil carbon density in alpine meadow. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(6): 2595-2604.

不同保护和利用措施对高寒草甸植被-土壤碳密度的影响

李瑞玲¹, 王海¹, 哈斯巴根¹, 才文旦周¹, 王佳豪¹, 石红霄^{1,2,3,*}

¹ 中国农业科学院草原研究所, 呼和浩特 010010

² 青海大学畜牧兽医科学院, 西宁 810016

³ 青海省草原总站, 西宁 810008

摘要: 草地作为陆地生态系统主体, 直接参与全球碳循环, 对草地碳储量的研究一直是生态学前沿的热点和难点。高寒草甸是“地球第三极”青藏高原的主要植被类型, 具有重要的固碳和水源涵养功能。目前, 关于不同保护和利用措施对高寒草甸碳储量的影响尚不明确。研究不同保护和利用措施下高寒草甸植被-土壤碳密度, 对科学评估高寒草甸碳储量及生态保护具有重要的理论和现实意义。以高寒草甸为研究对象, 采集 6 种不同保护和利用措施(全年放牧、夏季放牧、冬季放牧、围栏封育、补播、人工草地)下的样地地上生物量、枯落物和不同深度(0—10cm, 10—20cm, 20—30cm)的根系和土壤, 通过比较分析植被碳密度、土壤碳密度、根冠碳密度比以及植被土壤碳密度分配特征, 旨在为高寒草甸草地生态系统科学管理提供理论依据, 同时为不同保护和利用措施下高寒草甸碳密度估算提供数据支撑。结果表明: (1) 不同保护和利用措施下高寒草甸植被-土壤系统碳密度存在显著差异, 碳密度含量为人工草地>围栏封育>补播, 冬季放牧>夏季放牧>全年放牧; (2) 在三种不同保护措施中, 补播草地植被碳密度($619.08\text{g}/\text{m}^2$)显著高于人工草地和围栏封育草地碳密度($P<0.05$), 人工草地土壤碳密度($19409.25\text{g}/\text{m}^2$)、植被-土壤系统碳密度($19654.90\text{g}/\text{m}^2$)、土壤碳密度/植被-土壤系统碳密度(99%)均显著高于补播和围栏封育草地($P<0.05$), 而根冠碳密度比(2.71:1)低于其他保护措施; (3) 在三种不同利用措施中, 冬季放牧高寒草甸植被碳密度($1305.63\text{g}/\text{m}^2$)、土壤碳密度($14369.58\text{g}/\text{m}^2$)、植被-土壤碳密度($15740.66\text{g}/\text{m}^2$)和根冠碳密度比(27.14:1)均显著高于夏季放牧和全年放牧草地, 相反, 土壤碳密度/植被-土壤系统碳密度(91%)低于其他两种放牧利用草地。综上所述, 人工草地和冬季放牧是提升高寒草甸碳汇潜力的优化管理措施。研究结果强调了有针对性的保护和利用措施对加强高寒草甸碳固存的重要性, 并为实现高寒草甸碳汇潜力的最大化提供数据支撑。

关键词: 高寒草甸; 保护利用措施; 植被碳密度; 土壤碳密度

The effects of different conservation and utilization measures on the vegetation-soil carbon density in alpine meadow

LI Ruiling¹, WANG Hai¹, Hasibagen¹, Caiwendanzhou¹, WANG Jiahao¹, SHI Hongxiao^{1,2,3,*}

¹ Grassland Research Institute of Chinese Academy of Agricultural Sciences, Hohhot 010010, China

² School of Animal and Veterinary Sciences, Qinghai University, Xining 810016, China

³ The Engineer Consulting Center of Qinghai Province, Xining 810008, China

Abstract: Grasslands, as the central components of terrestrial ecosystems, directly participate in the global carbon cycle. The study of grassland carbon storage has always been a hot and difficult point in the forefront of ecological science. Alpine meadows, which cover much of the Qinghai-Tibet Plateau, the ‘Third Pole of the Earth’, are vital for carbon sequestration

基金项目: 青海省科技计划项目(2022-ZJ-702); 中国农业科学院草原研究所科技创新工程所级统筹协同项目(CAAS-ASTIP-2024-IGR-XT02)

收稿日期: 2024-05-22; **网络出版日期:** 2024-12-23

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

and water conservation. The effects of various conservation and utilization strategies on the carbon storage in alpine meadows are not yet fully comprehended. Examining the vegetation-soil carbon density across various conservation and utilization practices in alpine meadows is crucial for precisely evaluating carbon reserves and ecological conservation efforts. This study examined the impacts of six distinct management practices on alpine meadows: year-round grazing, summer grazing, winter grazing, grazing exclusion, reseeding grassland, and artificial grassland establishment. To assess these impacts, aboveground biomass, litter, and soil samples were systematically collected from three soil depths (0—10 cm, 10—20 cm, and 20—30 cm). To improve the accuracy of carbon density estimation under various conservation and utilization practices, this research compares vegetation and soil carbon densities, their root-to-shoot ratio, and their spatial distribution. The goal is to provide a solid theoretical foundation for the scientific management of alpine meadow ecosystems. The results showed that: (1) carbon density demonstrated significant differences within the vegetation-soil system of alpine meadows in under various protection and utilization regimes, with artificial grasslands > enclosure > reseeding, and winter grazing > summer grazing > year-round grazing in terms of carbon density content; (2) among the three conservation measures, reseeded grasslands exhibited a notably higher vegetation carbon density (619.08g/m^2) compared to artificial and enclosed grasslands ($P < 0.05$). Artificial grasslands boasted significantly higher soil carbon density (19409.25g/m^2), vegetation-soil system carbon density (19654.90g/m^2), and a soil carbon density/vegetation-soil system carbon density ratio of 99%, in contrast to reseeding and enclosed grasslands ($P < 0.05$), while the root-to-shoot carbon density ratio (2.71:1) was lower than other measures; (3) among the three utilization measures, winter-grazed alpine meadows had significantly higher vegetation carbon density (1305.63g/m^2), soil carbon density (14369.58g/m^2), vegetation-soil carbon density (15740.66g/m^2), and root-to-shoot carbon density ratio (27.14:1) compared to summer-grazed and year-round grazed grasslands, with a lower soil carbon density/vegetation-soil system carbon density ratio of 91%. In conclusion, the implementation of artificial grassland and winter grazing practices represents an optimal management approach for augmenting the carbon sink potential of alpine meadow ecosystems. These findings underscore the importance of tailored conservation strategies for enhancing carbon sequestration and provide data support for maximizing the carbon sequestration potential of alpine meadow ecosystems under various conservation and utilization practices.

Key Words: alpine meadow; conservation and utilization measures; vegetation carbon density; soil carbon density

中国草地面积约为 $394.93 \times 10^4 \text{km}^2$ ^[1], 草地生态系统占据了我国约 41% 的国土面积^[2], 成为我国最大的陆地生态系统, 同时也是全球分布最广泛的陆地生态系统之一^[1]。草地生态系统在陆地碳循环中发挥关键作用^[3], 并且在实现碳达峰、碳中和这两个全球应对气候变化的目标中, 扮演着至关重要的角色^[4]。中国草地生态系统植被和土壤碳储量分别占中国陆地生态系统植被和土壤碳储量的 2.65%—13.58% 和 12.62%—64.59%^[5]。草地-土壤有机碳库是组成陆地土壤有机碳库的关键部分, 即使是微小的变动也能对整个陆地生态系统的碳循环产生影响, 进而对全球气候变化造成影响^[6]。

青藏高原是我国草地分布最广的区域之一^[7], 高寒草甸作为其最主要的植被类型, 约占青藏高原总面积的 35%。高寒草甸不仅是青藏高原重要的碳汇, 拥有丰富的碳储量^[8], 也构成了中国生态安全的屏障和水源的主要涵养区。高寒草甸生态系统的稳定对于维持区域乃至全球性的生态系统平衡具有重要作用^[9]。

目前对于草地生态系统碳储量相关研究中, 多为对不同草地类型的研究^[10], 对不同保护和利用措施下的研究较为薄弱。而草地保护和利用措施是影响碳循环最重要、最直接的人类活动之一, 不同的保护和利用措施对地上植被生长和土壤营养物质周转有不同程度的干扰^[11]。目前, 广泛采用的草地保护和利用措施包括人工草地、补播、围栏封育和季节轮牧等, 这些措施对植被格局产生了深远的影响, 不仅改变草地生态系统的物种组成和结构, 也影响草地生态系统碳储量^[12]。黄政^[13]的研究表明, 人工草地的植被土壤有机碳密度高于耕地; 刘朋涛等^[14]的研究表明, 在不同放牧强度下荒漠草原植被地上部和根系碳密度均随着放牧强度的增加而降低, 轻度放牧有助于土壤有机碳含量的增加; 闫宝龙等^[15]的研究表明, 围封显著增加了典型草原地上、地下生物量碳密度和土壤碳密度, 能有效增加草原生态系统的碳储量。目前基于单一措施下的草地碳密度的

研究较为常见,但综合多种保护和利用措施下草地碳密度的对比研究还有欠缺。基于此,本研究以青海省三江源区高寒草甸 6 种长期不同保护和利用措施样地为研究对象,分析不同保护和利用措施下植被生物量碳密度、土壤碳密度的变化,以及土壤碳库的空间分布规律,以揭示不同保护和利用措施对高寒草甸碳积累的影响,为准确估算草甸碳储量和科学保护利用高寒草甸提供理论支撑。

1 材料和方法

1.1 研究区域概况

试验点位于国家土壤质量玉树观测实验站,具体位置为青海省玉树州(33°24′30″N、97°18′00″E),海拔 4230m,属于典型的高原高寒气候,年平均气温为-0.07℃,年降水量为 300—500mm,年蒸发量为 2273.85mm,年日照时间为 3454.13h。草地类型为高山嵩草杂类草草地,草场主要优势种为高山嵩草(*Kobresia pygmea*)、矮嵩草(*Kobresia humilis*),次优势种为异针茅(*Stipa aliena*)、高原早熟禾(*Poa crymophila*)、垂穗披碱草(*Elymus nutans*)、钉柱委陵菜(*Potentilla saundersiana*)、乳白香青(*Anaphalis lactea*)、高山唐松草(*Thalictrum alpinum*)等,伴生植物有高山紫菀(*Aster alpinus*)、美丽风毛菊(*Saussurea superba*)、川藏蒲公英(*Taraxacum maurocarpum*)等,杂类草、毒草有甘肃棘豆(*Oxytropis kansuensis*)、华丽龙胆(*Gentiana sino-ornata*)、甘肃马先蒿(*Pedicularis kansuensis*)等。

1.2 样地设置

试验地原为一地势平坦的高山嵩草杂类草场,面积约为 7hm²,近 10 年来采取了 6 种不同保护和利用措施(图 1),分别为全年放牧(YG)、夏季放牧(SG)、冬季放牧(WG)、围栏封育(UG)、补播(RG)和人工草地(AG),样地基本特征见表 1。

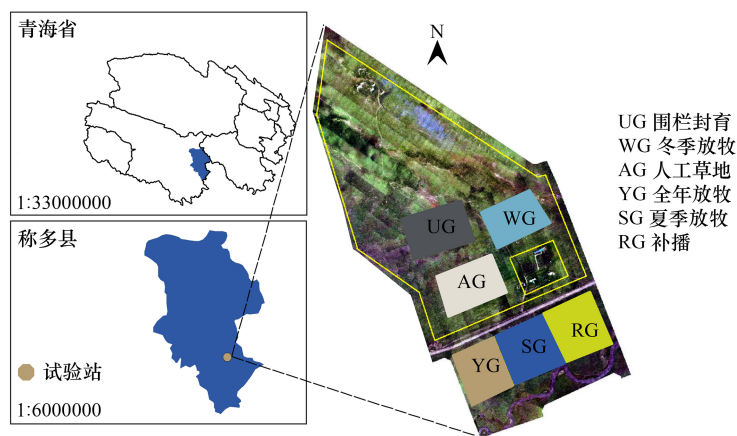


图 1 国家土壤质量玉树观测实验站样地示意图

Fig.1 Schematic diagram of the sampling plots in the National Soil Quality Yushu Observation Experimental Station

1.3 样品采集和指标测定

在不同保护和利用措施下的样地内选择微地形差异较小、植物生长均匀、连片集中分布的群落,每个样地随机选取 3 个重复样区,在每个重复样区内取 50cm×50cm 的样方,3 次重复。采样时间为 8 月初,地上生物量测定采用齐地面剪割,按优良牧草、杂类草和枯落物分类,将其剪下的植株分装后带回实验室,80℃ 恒温箱内烘干至恒重。土壤容重用环刀法测定,地下生物量和土壤取样采用根钻法,在已齐地剪平的样方框内,分别对 0—10cm、10—20cm、20—30cm 深度的土壤分层取样,用土壤筛分出根系、砾石和土壤,挑出死根,将根洗净后烘干至恒重,过筛后的土壤样品带回实验室自然烘干,依托青海省农林科学院采用重铬酸钾硫酸氧化-外加热法检测土壤有机碳含量。鉴于青藏高原土层较浅,且草地保护利用措施对土壤发生的作用主要集中在表层,因此以 0—30cm 土层的碳密度作为研究的变化范围。

表 1 试验样地基本特征

Table 1 The basic characteristics test sample

样地 Plot	地理位置 Geographical location			利用方式 Land-use-type	优势种 Dominant specids
	经度 (E) Longitude	纬度 (N) Latitude	海拔 Altitude/m		
全年放牧 (YG) Year-round grazing	33°0'27.72"	97°18'13.32"	4279.9	1—12 月全年放牧	高山嵩草 (<i>Kobresia pygmea</i>)、 矮嵩草 (<i>Kobresia kansuensis</i>)
夏季放牧 (SG) Summer grazing	33°22'59.88"	97°27'33.84"	4293.2	6—10 月夏季放牧	高山嵩草 (<i>Kobresia pygmea</i>)、 矮嵩草 (<i>Kobresia kansuensis</i>)
冬季放牧 (WG) Winter grazing	33°21'58.32"	97°17'29.40"	4287.7	11 月至次年 5 月冬 季放牧	高山嵩草 (<i>Kobresia pygmea</i>)、 矮嵩草 (<i>Kobresia kansuensis</i>)
围栏封育 (UG) Grazing exclusion	33°22'58.44"	97°27'33.84"	4192.6	2010 年围栏封育	垂穗披碱草 (<i>Elymus natans</i>)、 高原早熟禾 (<i>Poa crymophila</i>)、 高山嵩草 (<i>Kobresia pygmea</i>)
补播 (RG) Reseeding grassland	33°35'87.95"	97°30'20.13"	4280.5	2010 年补播	高原早熟禾 (<i>Poa crymophila</i>)、 垂穗披碱草 (<i>Elymus natans</i>)、 中华羊茅 (<i>Festuca sinensis</i>)
人工草地 (AG) Artificial grassland	33°21'38	97°17'58	4290.2	2010 年人工重建	林纳燕麦 (<i>Avena sativa</i> cv. LENA)

1.4 碳密度计算

土壤碳密度采用分层累计求和计算而得:

$$SOC = \sum_{i=1}^n (\rho_i \times SOC_i \times H_i \times (1 - G_i) \times 10)$$

式中, SOC 为土壤碳密度 (g/m²), *i* 为第 *i* 土层, *n* 为土层数目, ρ_i 、 SOC_i 、 H_i 和 G_i 分别为第 *i* 层土壤容重 (g/cm³)、有机碳密度 (g/kg)、土层厚度 (cm) 和土壤砾石含量 (%)^[16]。

地下生物量碳密度 (BBC) 和地上植被碳密度 (AVC) 依据下式分层累计而得:

$$BBC = 0.45 \times \sum_{i=1}^n BB_i$$

$$AVC = 0.45 \times (AB + L)$$

式中, BB_i 为第 *i* 层土层内地下生物量干重 (g/m²), *AB* 为地上生物量干重 (g/m²), *L* 为枯落物干重 (g/m²), 植物碳量用植被有机干物质中碳占的比重进行转换, 不同植被转换率不同, 但由于获取各种植被类型的转换率十分有限, 本文中采用国际通用的植物碳转换率 0.45 将地上、地下生物量转换为植被碳含量 (g/m²)^[17]。

1.5 数据统计分析

采用 SPSS 27.0 中单因素方差分析 (One-way ANOVA) 对不同保护和利用措施下地上、地下生物量碳密度和土壤有机碳密度进行差异显著性检验, 组间用 LSD 进行多重比较, 采用 Origin 2022、GraphPad Prism 9.5 作图。

2 结果分析

2.1 不同保护和利用措施下植被碳密度

2.1.1 不同保护和利用措施下地上植被碳密度

由图 2 可知, 不同保护和利用措施对地上生物量碳密度差异显著 ($P < 0.05$), 利用措施下依次为冬季放牧 > 夏季放牧 > 全年放牧, 保护措施下依次为围栏封育 > 人工草地 > 补播; 其中, 围栏封育下地上生物量碳密度显著高于其他保护利用措施 ($P < 0.05$), 为 105.59 g/m²。不同保护和利用措施对枯落物碳密度差异显著 ($P < 0.0001$), 利用措施下依次为夏季放牧 > 全年放牧 > 冬季放牧, 保护措施下依次为围栏封育 > 补播 > 人工草地; 其中, 围栏封育下枯落物碳密度显著高于其他保护利用措施 ($P < 0.0001$), 为 72.32 g/m²。不同保护和利用措施对地上植被碳密度差异显著 ($P < 0.001$), 利用措施下依次为夏季放牧 > 冬季放牧 > 全年放牧, 保护措施下依次

为围栏封育>人工草地>补播,其中,围栏封育下地上植被碳密度显著高于其他保护利用措施($P<0.001$),为 $177.91\text{g}/\text{m}^2$ 。地上植被碳密度的变化主要受枯落物碳密度的影响。

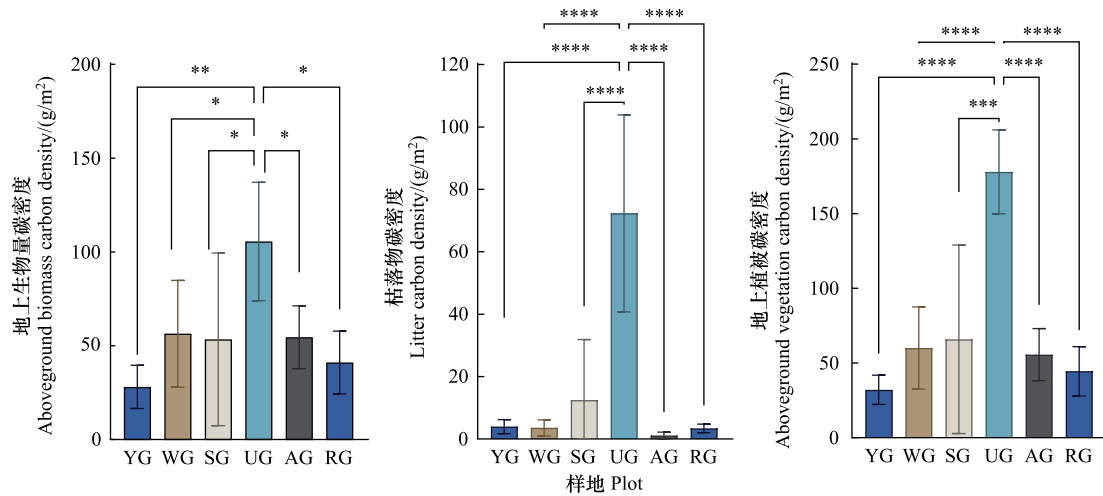


图 2 不同保护和利用措施下地上生物量碳密度

Fig.2 Characteristics of above-ground carbon density under different conservation and utilization measures

YG:全年放牧 Year-round Grazing; WG:冬季放牧 Winter Grazing; SG:夏季放牧 Summer Grazing; UG:围栏封育 Grazing Exclusion; AG:人工草地 Artificial Grassland; RG:补播 Reseeding Grassland, * $P<0.05$, ** $P<0.01$, *** $P<0.001$, **** $P<0.0001$,不同小写字母代表差异显著 ($P<0.05$),字母相同为不显著

2.1.2 不同保护和利用措施下地下根系碳密度

由图 3 可知,不同保护和利用措施对地下根系碳密度差异显著 ($P<0.05$),依次为,冬季放牧>夏季放牧>

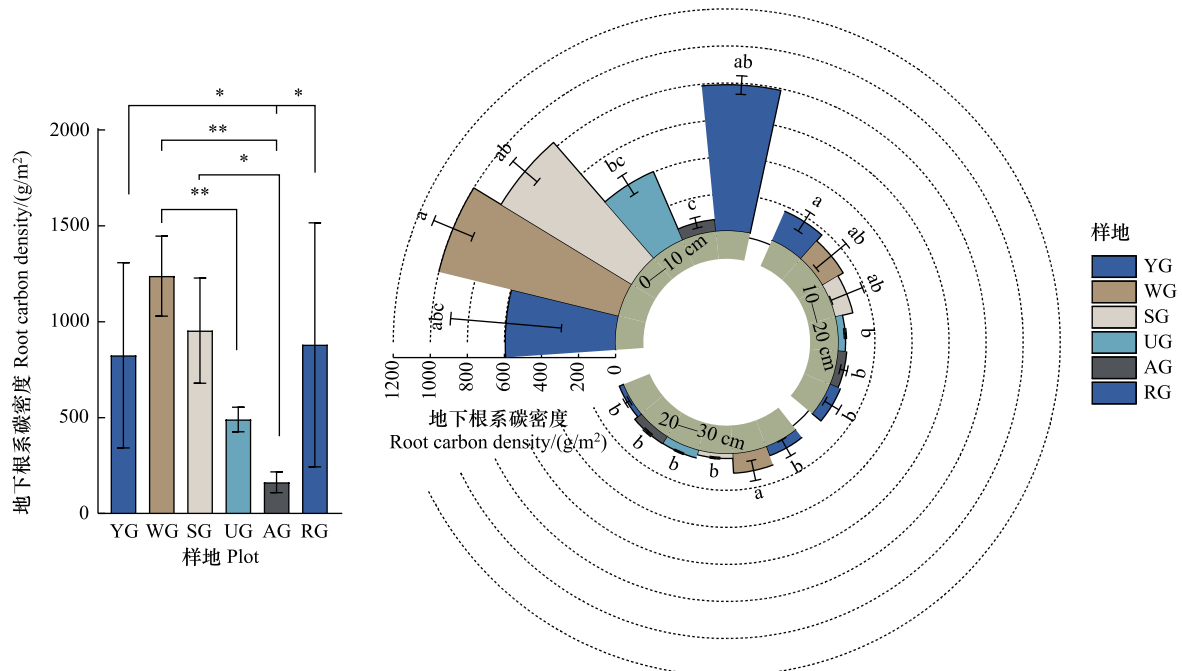


图 3 同保护和利用措施下植被地下根系碳密度

Fig.3 Carbon density of vegetation root systems under different conservation and utilization measures

* $P<0.05$, ** $P<0.01$, *** $P<0.001$, **** $P<0.0001$,不同小写字母代表差异显著 ($P<0.05$)

补播>围栏封育>全年放牧>人工草地。其中,冬季放牧地下根系碳密度显著高于其他保护利用措施($P<0.01$),为 $1238.22\text{g}/\text{m}^2$,人工草地地下根系碳密度显著低于其他措施($P<0.01$)。

地下根系碳密度集中分布在 0—10cm 土层中,并且随着土层深度的增加而递减。不同保护和利用措施对 0—10cm 土层、10—20cm 土层和 20—30cm 土层根系碳密度差异显著($P<0.05$);其中,0—10cm 土层中依次为,冬季放牧>夏季放牧>补播>全年放牧>围栏封育>人工草地,其中,人工草地下根系碳密度显著低于其他措施,冬季放牧下显著高于其他措施;0—20cm 土层中依次为,全年放牧>冬季放牧>夏季放牧>补播>人工草地>围栏封育,全年放牧下根系碳密度显著高于三种不同保护措施($P<0.05$),为 $173.87\text{g}/\text{m}^2$;20—30cm 土层中依次为,冬季放牧>全年放牧>人工草地>围栏封育>夏季放牧>补播,冬季放牧下地下根系碳密度显著高于其他保护利用措施($P<0.05$),为 $107.76\text{g}/\text{m}^2$ 。

2.1.3 不同保护和利用措施下植被碳密度

如图 4 所示,同时期下不同保护和利用措施对植被碳密度差异显著($P<0.01$),利用措施下依次为冬季放牧>夏季放牧>全年放牧,保护措施下依次为补播>围栏封育>人工草地;在不同利用措施中冬季放牧下植被碳密度显著最高($P<0.05$),为 $1305.63\text{g}/\text{m}^2$,在不同保护措施中补播下植被碳密度最高,为 $929.24\text{g}/\text{m}^2$,人工草地下植被碳密度显著低于冬季放牧($P<0.05$),为 $162.68\text{g}/\text{m}^2$ 。

2.2 不同保护和利用措施下土壤碳密度

由图 5 可知,不同保护和利用措施对总土壤碳密度有显著差异($P<0.05$),依次为人工草地>围栏封育>冬季放牧>补播>夏季放牧>全年放牧,人工草地下土壤碳密度显著最高($P<0.05$),为 $19409.25\text{g}/\text{m}^2$ 。土壤碳密度主要集中在 0—10cm 土层中,并随土层深度的增加而递减。不同保护和利用措施对 0—10cm 土层和 10—20cm 土层的土壤碳密度有显著性差异($P<0.05$)。0—10cm 土层土壤碳密度,依次为围栏封育>人工草地>冬季放牧>补播>全年放牧>夏季放牧,其中围栏封育下土壤碳密度显著高于全年放牧和夏季放牧($P<0.05$),为 $9931.58\text{g}/\text{m}^2$;10—20cm 土层土壤碳密度,依次为人工草地>围栏封育>夏季放牧>补播>冬季放牧>全年放牧,其中人工草地下土壤碳密度显著高于除围栏封育外的其他 4 种保护利用措施($P<0.05$),为 $6478.36\text{g}/\text{m}^2$,全年放牧下土壤碳密度显著低于人工草地和围栏封育措施($P<0.05$),为 $2758.09\text{g}/\text{m}^2$ 。不同保护和利用措施对 20—30cm 土层土壤碳密度无显著性差异($P>0.05$),依次为人工草地>夏季放牧>围栏封育>全年放牧>补播>冬季放牧。

2.3 植被-土壤系统碳密度分配

由表 2 可知,不同保护和利用措施对植被-土壤系统碳密度有显著差异($P<0.05$),人工草地下植被-土壤系统碳密度显著高于其他保护利用措施($P<0.05$),为 $19654.90\text{g}/\text{m}^2$,不同利用措施下依次为冬季放牧>夏季放牧>全年放牧,其中冬季放牧下最高,为 $15740.66\text{g}/\text{m}^2$;不同保护措施下依次为人工草地>围栏封育>补播;植被-土壤系统平均碳密度为 $16145.37\text{g}/\text{m}^2$ 。不同保护和利用措施下根冠碳密度比中,利用措施下根冠碳密

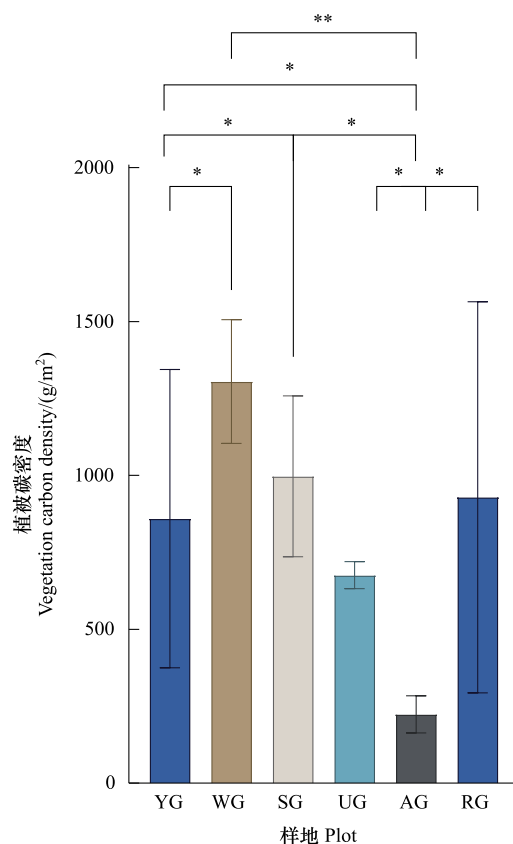


图 4 不同保护和利用措施下植被碳密度特征

Fig.4 Characteristics of vegetation carbon density under different conservation and utilization measures

* $P<0.05$, ** $P<0.01$, *** $P<0.001$, **** $P<0.0001$

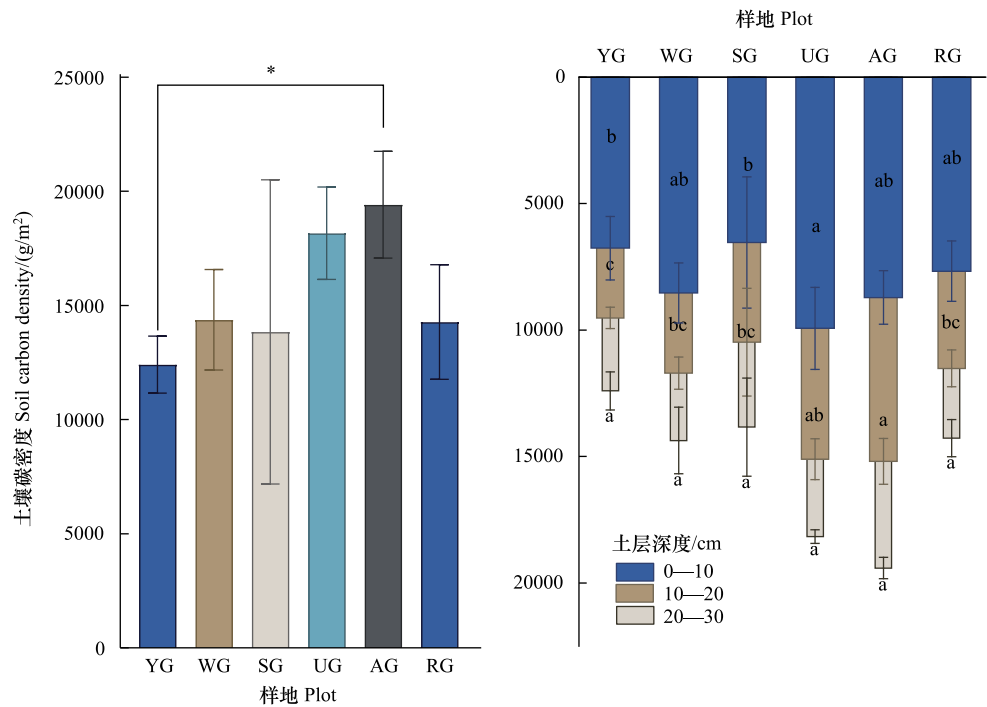


图5 不同保护和利用措施下土壤分层碳密度特征

Fig.5 Characteristics of soil layered carbon content under different conservation and utilization measures

* $P<0.05$, ** $P<0.01$, *** $P<0.001$, **** $P<0.0001$,不同小写字母代表差异显著($P<0.05$),字母相同为不显著

度比高于保护措施,不同利用措施中其中冬季放牧和夏季放牧下根冠碳密度比相近,分别为 27.14:1、27.21:1,不同保护措施中人工草地下根冠碳密度比最低,为 2.71:1,不同保护和利用措施下高寒草甸平均根冠碳密度比为 15.78:1。土壤碳密度/植被-土壤系统碳密均达到 90% 以上,其中人工草地下土壤碳密度占比最高,为 99%,冬季放牧下占比最低,为 91%,平均土壤碳密度占比为 95%。

表 2 不同保护和利用措施下碳密度分配

Table 2 Carbon density distribution under different conservation and utilization measures				
样地 Plot	植被-土壤系统碳 密度/(g/m ²) Vegetation-soil system carbon density	根冠碳密度比值 Root crown carbon density ratio	土壤碳密度/植被- 土壤系统碳密度/% Soil carbon density/vegetation- soil system carbon density	植被碳密度/植被- 土壤碳密度/% Vegetation carbon density/ vegetation-soil carbon density
全年放牧 YG	13021.99b	24.53 : 1	95	5
冬季放牧 WG	15740.66b	27.14 : 1	91	9
夏季放牧 SG	14719.13b	27.21 : 1	93	7
围栏封育 UG	18844.32b	3.1 : 1	96	4
人工草地 AG	19654.90a	2.71 : 1	99	1
补播 RG	14891.24b	9.97 : 1	96	4
平均 Average	16145.37	15.78 : 1	95	5

YG:全年放牧 Year-round Grazing;WG:冬季放牧 Winter Grazing;SG:夏季放牧 Summer Grazing;UG:围栏封育 Grazing Exclusion;AG:人工草地 Artificial Grassland;RG:补播 Reseeding Grassland;不同小写字母代表差异显著($P<0.05$),字母相同为不显著

3 讨论

3.1 不同保护和利用措施对草原生态系统植被碳密度的影响

本研究中不同保护和利用措施下围栏封育地上植被碳密度显著高于其他保护利用措施($P<0.01$),这与

朱牛^[18]和刘岩^[19]的研究结果相同,围栏封育对地上植被碳密度有积极作用。可能的原因有以下:(1)围栏封育是一种有效的草地保护方式,通过屏蔽放牧活动、消除家畜的采食、践踏和排泄等影响,从而有助于天然草地生产力的逐步恢复^[20]。(2)围栏封育是退化草地植被恢复和植物固碳的有效途径,围封处理增加了群落生产力^[21]有助于恢复和维护生态系统的自然平衡,随着生态系统功能的恢复,植被覆盖和生产力增加,从而促进了有机碳的积累。(3)围栏封育导致群落间隙随之减小,加之枯落物覆盖的影响,使得对光资源竞争较弱的物种逐渐消失^[22]。植物之间的自然竞争可能促使适应环境的物种占据优势,这些物种往往能更有效地利用资源,生长更快,从而积累更多的生物量和有机碳^[23]。

不同保护和利用措施下冬季放牧地下根系碳密度显著最高,这与陈锦等^[24]和宋姗姗^[25]的研究结果相同,这可能是因为植物的根系生长受到气候条件、放牧强度、放牧时间和土壤状况等多种因素的影响。不合理的放牧方式会抑制地上部分的生长并减少从地上部分到地下部分的物质分配,从而在一定程度上减少地下生物量^[26]。相反,适度放牧可以促进根系的生长^[27]。在冬季放牧下,植物通过增强根系生长来适应地上部分的被啃食以及寒冷季节的生长条件,这可能导致当年新增根系的增加。

本研究在植被碳密度比较中,不同保护措施下补播下植被碳密度最高,这与张光茹等^[28]的研究结果相同,人工补播有助于促进植物多样性、生产力、土壤肥力以及土壤碳和氮封存的提高,改善多种生态系统功能,包括植被碳密度。而围栏封育植被碳密度低于补播,这可能是因为长期围栏封育降低了地下生物量碳储量(根系,0—50 cm 土壤深度),从而降低植被碳储量^[25]。不同利用措施下冬季放牧植被碳密度最高,这与陈锦等^[24]的研究结果相同,植物可能通过补偿生长机制,将更多的光合产物转移到地下部分,以维持其生命活动和为来年的生长储备营养,这可能增加了地下根系的碳密度。

3.2 不同保护和利用措施对草原生态系统土壤碳库的影响

不同保护和利用措施下人工草地土壤碳密度最高^[29]。这与韩道瑞^[30]的人工草地在提高土壤有机碳储量方面具有潜力这一研究结果一致。可能是因为(1)适当的土壤管理和耕作措施,如松耙而不翻耕,能够减少对土壤结构的破坏,有利于土壤有机碳的积累^[31];(2)植被恢复增加了土壤中根系分泌物的输入,为土壤微生物提供了更多的碳源,从而可能提高土壤微生物生物量碳和加速有机碳的循环^[29]。

土壤有机碳主要分布在土壤表层(0—10cm)中,并且随土层深度的增加呈下降趋势。这与黄莎琳等^[32]和陶贞等^[33]的研究结果一致。可能的原因有以下:(1)高寒草甸的植被残体和根系主要集中在土壤表层,这些有机物质在死亡和分解后,转化为土壤有机碳,因此表层土壤有机碳含量较高^[33];(2)土壤表层的微生物活性通常高于深层土壤,微生物的分解作用会优先影响表层土壤中的有机物质,导致有机碳在表层土壤的积累^[34];(3)高寒草甸地区土壤表层的水分和温度条件更适宜有机物质的分解,而深层土壤由于较低的温度和水分,分解速率较慢,导致有机碳向下运输和沉积的速度减慢^[35]。

3.3 不同保护和利用措施下植被-土壤碳密度分配

植被-土壤碳密度比较中不同利用措施下依次为冬季放牧>夏季放牧>全年放牧,不同保护措施下依次为人工草地>围栏封育>补播,这与张光茹等^[28]的研究结果相同。

不同保护和利用措施下高寒草甸植被-土壤系统根冠含碳量比为 15.78:1,这个结果符合根冠比随着温度的降低而增加的规律^[34]。

不同保护和利用措施下根冠碳密度比中,利用措施下根冠碳密度比高于保护措施,这一结果符合放牧导致青藏高原高寒草甸根冠比增加的结论^[36],可能是因为放牧影响下,植物可能从注重地上生物量的积累转变为注重根系的生长,将更多的资源分配到根系生长上,以支持其生存和繁殖,这种转变有助于植物在放牧压力下保持其生态功能和生产力^[36]。人工草地根冠碳密度比最低,为 2.71:1,这是因为人工草地地下根系为当年新增根系为主,根系生物量积累少。

4 结论

(1)在三种不同保护措施中,补播处理植被碳密度($619.08\text{g}/\text{m}^2$)显著高于其他保护措施($P<0.05$),人工

草地下土壤碳密度(19409.25g/m^2)、植被-土壤系统碳密度(19654.90g/m^2)、土壤碳密度/植被-土壤系统碳密度(99%)均高于其他保护措施,根冠碳密度比(2.71:1)低于其他保护措施。

(2)在三种不同利用措施中,冬季放牧下植被碳密度(1305.63g/m^2)、土壤碳密度(14369.58g/m^2)和植被-土壤碳密度(15740.66g/m^2)、根冠碳密度比(27.14:1)均高于其他利用措施,土壤碳密度/植被-土壤系统碳密度(91%)低于其他利用措施。

研究结果可为高寒草甸草地生态系统科学管理提供理论依据,同时还为高寒草甸不同保护和利用措施下地下碳密度估算提供数据依据。为更加准确地评估不同保护利用措施对高寒草甸生态系统碳储量的影响极其机制,可通过开展高寒草甸光合速率和土壤呼吸速率的监测,进一步了解不同保护利用措施下高寒草甸二氧化碳吸收与排放的动态变化。

参考文献(References):

- [1] 张利,周广胜,汲玉河,白永飞. 中国草地碳储量时空动态模拟研究. 中国科学: 地球科学,2016,46(10): 1392-1405.
- [2] 方精云,白永飞,李凌浩,蒋高明,黄建辉,黄振英,张文浩,高树琴. 我国草原牧区可持续发展的科学基础与实践. 科学通报,2016,61(2): 155-164.
- [3] 张扬建,朱军涛,沈若楠,王荔. 放牧对草地生态系统影响的研究进展. 植物生态学报,2020,44(5): 553-564.
- [4] 方精云,杨元合,马文红,安尼瓦尔·买买提,沈海花. 中国草地生态系统碳库及其变化. 中国科学 C 辑,2010,40(7): 566-576.
- [5] 王穗子,樊江文,刘帅. 中国草地碳库估算差异性综合分析. 草地学报,2017,25(5): 905-913.
- [6] Zhang M, Ma Y, Chen P, Shi F, Wei J. Growing-season carbon budget of alpine meadow ecosystem in the Qinghai Lake Basin: a continued carbon sink through this century according to the Biome-BGC model, Carbon Balance Manage,2023;18-25.
- [7] 朴世龙,方精云,贺金生,肖玉. 中国草地植被生物量及其空间分布格局. 植物生态学报,2004,28(4): 491-498.
- [8] 张东杰. 青藏高原高寒草甸植被与土壤特征. 草业科学,2015,32(2): 269-273.
- [9] 高英志,韩兴国,汪诗平. 放牧对草原土壤的影响. 生态学报,2004,24(4): 790-797.
- [10] 李学斌,樊瑞霞,刘学东. 中国草地生态系统碳储量及碳过程研究进展. 生态环境学报,2014,23(11): 1845-1851.
- [11] Xu G, Kang X, Li W, Li Y, Chai Y, Wu S, Zhang X, Yan Z, Kang E, Yang A, Niu Y, Wang X, Yan L. Different grassland managements significantly change carbon fluxes in an alpine meadow. Frontiers in Plant Science. 2022,13:1000558.
- [12] Wang S, Wilkes A, Zhang Z, Chang X, Lang R, Wang Y, Niu H. Management and land use change effects on soil carbon in northern China's grassland: A synthesis. Agriculture, Ecosystems and Environment,2011,142: 329-340.
- [13] 黄政. 甘肃陇南山地人工植被土壤有机碳密度及固碳潜力研究[D]. 兰州: 兰州大学,2018.
- [14] 刘朋涛,杨婷婷,姚国征,李鹏,吴昊,贺晶. 不同放牧强度下荒漠草原碳密度的变化. 西北农林科技大学学报,2014,42(7): 157-162,168.
- [15] 闫宝龙,王忠武,屈志强,王静,韩国栋. 围封对内蒙古典型草原与荒漠草原植被-土壤系统碳密度的影响. 植物生态学报,2018,42(3): 327-336.
- [16] 王合云,董智,郭建英,李红丽,李锦荣,韩国栋,陈新闻. 不同放牧强度下短花针茅荒漠草原植被-土壤系统有机碳组分储量特征. 生态学报,2016,36(15): 4617-4625.
- [17] 张倩,王志成,蒲强胜,侯齐琪,蔡志远,杨晶,姚宝辉,王缠,孙小妹,苏军虎. 不同管理模式对甘南高寒草甸碳储量的影响. 草地学报,2020,28(2): 529-537.
- [18] 朱牛,孙建,石凝,王金牛,张林,罗栋梁,申承,盖艾鸿. 短期围封对高寒草甸植物群落及土壤理化性质的影响. 草地学报,2023,31(3): 834-843.
- [19] 刘岩,李宝林,袁烨城,祁佳丽,李影,李睿. 基于三江源高寒草甸群落结构变化评估围封对草地恢复的影响. 生态学报,2021,41(18): 7125-7137.
- [20] 都耀庭,张东杰. 禁牧封育措施改良高寒地区退化草地的效果. 草业科学,2007,24(7): 22-24.
- [21] 秦瑞敏,程思佳,马丽,张中华,魏晶晶,苏洪烨,史正晨,常涛,胡雪,阿的哈则,袁访,李珊,周华坤. 围封和施肥对高寒草甸群落特征和植被碳氮库的影响. 草业学报,2024,33(4): 1-11.
- [22] 赵维,蚌绍豪,周小龙,张世挺,任正炜. 短期施肥和围封对高寒草甸生物量和物种丰富度的影响. 生态学杂志,2023,42(11): 2630-2637.

- [23] Liu J K, Bian Z, Zhang K B, Ahmad B, Khan A. Effects of different fencing regimes on community structure of degraded desert grasslands on Mu Us desert, China. *Ecology and Evolution*, 2019, 9(6): 3367-3377.
- [24] 陈锦, 宋明华, 李以康. ^{13}C 脉冲标记揭示放牧对高寒草甸同化碳分配的影响. *植物生态学报*, 2019, 43(7): 576-584.
- [25] 宋珊珊, 张建胜, 郑天立, 张帆, 朱剑霄. 围栏封育对青海海北高寒草甸植被碳储量的影响. *草业科学*, 2020, 37(12): 2414-2421.
- [26] 胡俊奇, 陈先江, 侯扶江. 高寒草原群落特征对甘肃马鹿冬季放牧的响应. *草业科学*, 2016, 33(6): 1028-1034.
- [27] 詹天宇, 孙建, 张振超, 刘某承. 基于 meta 分析的放牧压力对内蒙古高原草地生态系统的影响. *中国生态农业学报: 中英文*, 2020, 28(12): 1847-1858.
- [28] 张光茹, 李文清, 张法伟, 崔晓勇, 贺慧丹, 杨永胜, 祝景彬, 王春雨, 罗方林, 李英年. 退化高寒草甸关键生态属性对多途径恢复措施的响应特征. *生态学报*, 2020, 40(18): 6293-6303.
- [29] Li W, Wang J L, Zhang X J, Shi S L, Cao W X. Effect of degradation and rebuilding of artificial grasslands on soil respiration and carbon and nitrogen pools on an alpine meadow of the Qinghai-Tibetan Plateau. *Ecological Engineering*, 2018, 111: 134-142.
- [30] 韩道瑞, 曹广民, 郭小伟, 张法伟, 李以康, 林丽, 李婧, 唐艳鸿, 古松. 青藏高原高寒草甸生态系统碳增汇潜力. *生态学报*, 2011, 31(24): 7408-7417.
- [31] 王文颖, 王启基, 王刚. 高寒草甸土地退化及其恢复重建对土壤碳氮含量的影响. *生态环境*, 2006, 15(2): 362-366.
- [32] 黄莎琳, 李晶, 杨文姬, 林田苗, 喻武. 海拔对藏东南山地土壤有机碳垂直分布格局的影响分析. *广东农业科学*, 2022, 49(1): 62-69.
- [33] 陶贞, 沈承德, 高全洲, 孙彦敏, 易惟熙, 李英年. 高寒草甸土壤有机碳储量及其垂直分布特征. *地理学报*, 2006, 61(7): 720-728.
- [34] 董利军, 李金花, 陈珊, 张瑞, 孙建, 马妙君. 若尔盖湿地高寒草甸退化过程中土壤有机碳含量变化及成因分析. *植物生态学报*, 2021, 45(5): 507-515.
- [35] 张秀, 赵永存, 谢恩泽, 彭雨璇, 陆访仪. 土壤有机碳时空变化研究进展与展望. *农业环境科学学报*, 2020, 39(4): 673-679.
- [36] Wang D B, Ding W Q. Grazing led to an increase in the root: shoot ratio and a shallow root system in an alpine meadow of the Tibetan Plateau. *Frontiers in Environmental Science*, 2024, 12: 1348220.