

DOI: 10.11829/j.issn.1001-0629.2015-0286

刘淑丽 林丽 张法伟 杜岩功 李以康 郭小伟 欧阳经政 曹广民. 放牧季节及退化程度对高寒草甸土壤有机碳的影响. 草业科学, 2016, 33(1): 11-18.

Liu S L, Liu L, Zhang F W, Du Y G, Li Y K, Guo X W, Ouyang J Z, Cao G M. Effects of grazing season and degradation degree on the soil organic carbon in alpine meadow. Pratacultural Science 2016, 33(1): 11-18.

放牧季节及退化程度对高寒草甸 土壤有机碳的影响

刘淑丽^{1,2} 林丽¹ 张法伟¹ 杜岩功¹ 李以康¹,
郭小伟^{1,2} 欧阳经政^{1,2} 曹广民¹

(1. 中国科学院西北高原生物研究所, 青海 西宁 810001; 2. 中国科学院大学, 北京 100039)

摘要: 高寒草甸是青藏高原的主要植被类型, 本研究以青海省高寒草甸为研究对象, 探讨不同放牧季节及退化程度下高寒草甸土壤有机碳含量及密度的分异特征。结果表明, 在0-30 cm土层内, 土壤有机碳含量随土层深度逐渐减小。土壤有机碳含量暖季放牧与冷季放牧之间无显著差异 ($P>0.05$), 且在不同土壤深度中一致。不同放牧季节下土壤理化性质及生物量各不相同。0-30 cm土层内, 除0-5 cm未退化阶段土壤有机碳含量最高, 其余各层土壤有机碳含量均在轻度退化阶段达到最大。土壤理化性质在不同退化阶段也变化各异, 地下生物量随草地退化呈先增加后减小的趋势, 而地上生物量随草地退化呈逐渐减小的趋势。冷季放牧高寒草甸土壤有机碳含量随草地退化呈逐渐减小的趋势, 而暖季放牧土壤有机碳含量随草地退化呈先增加后减小的趋势。0-30 cm土层冷季放牧不同阶段土壤有机碳储量均低于暖季放牧, 但未达到显著水平。可见, 放牧强度的不同会对土壤有机碳的影响比放牧季节更大。

关键词: 高寒草甸; 放牧季节; 退化阶段; 土壤有机碳

中图分类号: S812.2 文献标识码: A 文章编号: 1001-0629(2016)1-0011-08*

Effects of grazing season and degradation degree on the soil organic carbon in alpine meadow

Liu Shu-li^{1,2}, Lin Li¹, Zhang Fa-wei¹, Du Yan-gong¹, Li Yi-kang¹,
Guo Xiao-wei^{1,2}, Ouyang Jing-zheng^{1,2}, Cao Guang-min¹

(1. Northwest Institute of Plateau Biology, Chinese Academy of Sciences, Xining 810001, China;

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: Alpine meadow is the major vegetation type in the Qinghai-Tibet Plateau. This study investigated the differences in soil organic carbon content and storage under different grazing seasons and degradation degree alpine meadow of Qinghai Province. The result of this study showed that soil organic carbon content decreased with the decrease of soil depth from surface to 30 cm depth, and it was not significantly different between cold-season grazing meadow and warm-season grazing meadow at 0-30 cm soil layer. Soil physical properties and biomass at 0-30 cm soil layer varied with different grazing seasons. Soil organic carbon content was the biggest in non-degradation meadow at 0-5 cm layer and in the light-degradation meadow except for 0-5 cm layer. Soil physical properties varied with different degradation stages. The underground biomass increased at first and then decreased while the aboveground biomass decreased as the degradation degree of meadow increased. The soil organic carbon decreased within the cold-season grazing meadow while it in-

* 收稿日期: 2015-05-17 接受日期: 2015-10-09

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(41030105); 中国科学院战略性先导科技专项(固碳现状、速率、机制和潜力)(XDA05050404)

第一作者: 刘淑丽(1989-), 女, 陕西商洛人, 在读博士生, 主要从事土壤碳研究。E-mail: liushuli0203@163.com

通信作者: 曹广民(1963-), 男, 陕西渭南人, 研究员, 博士, 主要从事土壤生态方面的研究。E-mail: caogm@nwipb.ac.cn

<http://cykx.lzu.edu.cn>

creased at first and then decreased in the warm-season grazing meadow. The soil organic carbon density was lower in the cold-season grazing meadow than that in the warm-season grazing meadow but it was not significant. These results implied that the degradation degree played great impact on soil organic carbon.

Key words: alpine meadow; grazing season; degradation degree; soil organic carbon

Corresponding author: Cao Guang-min E-mail: caogm@nwipb.ac.cn

对陆地生态系统碳储量的准确估计是研究全球气候变化的关键问题^[1]。土壤作为陆地生态系统中最大的碳库,其所储存的碳是大气碳储量的两倍^[2-3]。土壤中 CO₂ 的排放被认为是全球碳循环中最大的 CO₂ 排放量之一^[4]。有研究表明,土壤碳储量的变化将会对大气 CO₂ 的浓度产生重要影响^[5]。因此,关于土壤碳的准确信息将对未来气候变化的预测有重要作用^[6]。土壤有机碳是土壤碳库的主要组成部分,也是大气 CO₂ 的主要源^[7],在调节气候变化中有重要作用^[8]。试验研究亦表明,从土壤有机碳中释放到大气中的 CO₂ 可能会对气候变化产生正反馈效应^[9]。因此,土壤有机碳的深入研究将会对气候变化的研究提供理论基础。

青藏高原是世界上海拔最高、面积最大的高原,由于其寒冷及相对湿润的气候环境,其土壤中储存了大量的碳^[10]。青藏高原生态系统十分脆弱和敏感,其土壤碳的变化可能对区域碳循环产生重大和长远的影响^[11]。高寒草甸是青藏高原的主要植被类型之一,约占青藏高原可利用草地面积的 35%^[12]。高寒草甸生态系统是具有生态、生产和生活功能的“三生”服务系统^[13]。在过去的几十年其已经发生了严重的退化^[14]。草地退化将会加剧土壤有机碳的消耗,导致 CO₂ 从土壤释放到大气中,从而减少土壤碳储量^[15],而且会直接影响当地居民的生计和当地经济的稳定发展^[12]。很多研究表明,中国草地发生了大面积的退化,然而关于草地碳储量如何随草地退化变化的研究却很少^[16]。

青海省是青藏高原的主要组成部分,其草地的严重退化主要归结于过度放牧^[17]。明确土壤有机碳对放牧干扰的响应是理解碳循环重要的一步。研究表明,在长期放牧的干扰下,土壤有机碳储量发生变化^[18]。过度放牧使土壤养分输出增加,土壤有机碳储量减小^[19]。然而有研究表明放牧时间比放牧强度对植物种类影响更大^[20],那么放牧时间和放牧强度对土壤有机碳的影响如何?在不同放牧时间和放牧强度下土壤有机碳会发生怎样的变化?不同放牧季节会对高寒草甸土壤有机碳产生不同影响,由于放牧干扰,高寒草甸出现了不同程度的退化,不同退化程度土壤有机

碳含量亦各不相同。因此,本研究以青海省高寒草甸为研究对象,采用野外调查的方法,研究放牧季节和退化程度对高寒草甸土壤有机碳的影响,以期深入了解高寒草甸对放牧干扰的响应过程,从而对探索天然草地的最佳利用方式提供理论指导。

1 材料与方法

1.1 研究区域

研究区域位于青藏高原东部的青海省,主要包括海南藏族自治州、黄南藏族自治州、玉树藏族自治州、果洛藏族自治州以及海北藏族自治州。野外调查与样品采集于 2011 和 2012 年 7-9 月进行。包括了青海省几乎所有的高寒草甸,共 80 个样地,分布于青海省的各个县。每个样地都进行了放牧季节和草地退化阶段的调查。依据青藏高原放牧季节(暖季 6-10 月,冷季 11-翌年 5 月)确定暖季放牧草地和冷季放牧草地。退化阶段的划分参考刘伟等^[21]和 Liu 等^[22]的划分标准(表 1)。

1.2 样品采集

采用样带调查法,在样地内选择能够代表整个样地草地植被、地形及土壤等特征的地段,按一定方向设置 100 m 样线,每隔 10 m 布设一个样方,样方面积为 0.5 m×0.5 m。在每个样地进行地理位置、海拔、土壤剖面、植被类型以及土地利用方式的调查。

土壤取样及分析:采用土钻法($\Phi=6$ cm),取样深度依次为 0-5、5-10、10-20、20-30、30-50 cm,每 5 钻混合为一个样品,每层 5 个重复。在实验室内进行自然风干并将草根移除,然后过 2 mm 筛。土壤全碳含量(Soil total carbon,STC)的分析使用元素分析仪(2400 IICHNS/O,Perkin-Elmer,USA)完成。土壤无机碳含量(Soil inorganic carbon,SIC)的测量使用气量法进行,所用仪器为 Calcimeter(荷兰 Eijkel Kamp)。有机碳含量(Soil organic carbon,SOC)采用全碳含量减去无机碳含量的方法。

生物量采样及分析:地上生物量(AGB)采用标准收获法,在群落调查样方内进行。地下生物量(UGB)采用土钻法,取样深度同土壤取样,然后将根洗出。生

表 1 高寒草甸退化程度划分标准
Table 1 Degraded standard for alpine meadow

%

退化程度 Degradation level	地上生物量 Above-ground biomass	盖度 Coverage	优良牧草生物量比例 Proportion of high quality grasses
未退化阶段 Non-degraded grassland (NDG)	100	>85	>70
轻度退化阶段 Lightly degraded grassland (LDG)	70-85	70-85	50-70
中度退化阶段 Moderately degraded grassland (MDG)	50-69.9	50-69.9	30-49.9
重度退化阶段 Heavily degraded grassland (HDG)	<50	<50	<30

物量样品在 75 °C 烘干 称重。

在每一个样地,为了进行土壤剖面的调查,并进行土壤容重的取样,一个 1 m³ 的土壤剖面被挖出。容重的取样采用环刀法(100 cm³) ,采样深度与土壤取样深度相同。

1.3 土壤有机碳含量的计算

土壤有机碳密度(SOC density) 采用分层累计求和计算方法:

$$SOC = \sum_{i=1}^n SOC_C \times P_i \times D_i \times (1 - C_i) / 100.$$

式中, SOC 为土壤有机碳储量(kg · m⁻²); i 为第 i 层土壤; n 为土层数目; SOC_C 为第 i 层土壤有机碳含量(g · kg⁻¹); P_i 为第 i 层土壤容重(g · cm⁻³); D_i 为第 i 层土层厚度(cm); C_i 为第 i 层土壤砾石含量(%)。

1.4 数据处理

采用 Excel 2010 进行土壤无机碳数据的整理, SPSS 13.0(One-Way ANOVA) 进行差异显著性检验。制图采用 SigmaPlot 12.5。

2 结果与分析

2.1 放牧季节对高寒草甸土壤有机碳含量及土壤理化性质的影响

在 0-30 cm 土层内,土壤有机碳含量随土层深度逐渐减小。除 0-5 cm 土层暖季放牧土壤有机碳含量高于冷季放牧,其余各层暖季放牧有机碳含量均低于冷季放牧,但均未达到显著差异(P>0.05) (图 1)。

不同放牧季节下 0-30 cm 土壤理化性质及生物量各不相同。冷季放牧土壤容重、砾石含量和地上生物量均低于暖季放牧,土壤 pH 和地下生物量高于暖季放牧,但均未达到显著差异(P>0.05) 。冷季放牧地下生物量可达 979.76 g · m⁻² (表 2)。

2.2 退化程度对高寒草甸土壤有机碳及理化性质的影响

不同退化阶段土壤有机碳含量均随土层深度递减,0-5 cm 未退化阶段土壤有机碳含量最高,达到

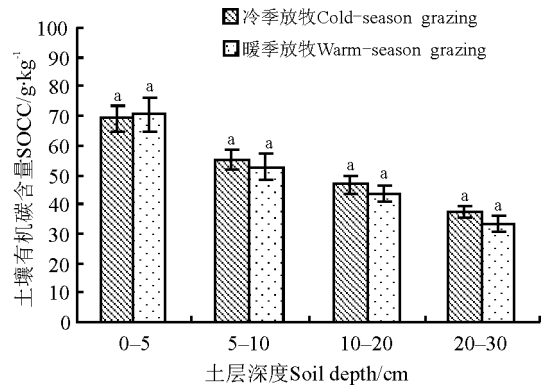


图 1 不同放牧季节土壤有机碳含量分异特征

Fig. 1 Variation of soil organic carbon content in different grazing seasons

注:不同小写字母表示相同土层不同放牧季节间差异显著(P<0.05) 。表 2、5 同。

Note: Different lower case letters within the same soil depth indicate significant difference between different grazing seasons at 0.05 level. The same in Table 2 and 5.

82.6 g · kg⁻¹。随着退化的加剧,土壤有机碳含量依次减小,到重度退化阶段急剧下降,显著低于其它 3 个阶段(P<0.05) 。5-10 cm 土壤有机碳在轻度退化阶段达到最大,未退、轻度退化和中度退化阶段土壤有机碳含量显著高于重度退化阶段(P<0.05) 。10-30 cm 土壤有机碳含量在轻度退化阶段达到最大,重度退化阶段最小,但各退化阶段均未达到显著差异(P>0.05) (图 2)。

土壤容重随草地的退化而逐渐增大,其中重度退化阶段显著高于未退化和轻度退化阶段(P<0.05) 。土壤砾石含量随草地的退化先增加后减小再增加,到重度退化阶段达到最大,但 4 个阶段无显著差异(P>0.05) 。土壤 pH 随草地退化先增加后减小,在中度退化阶段达到最大,中度退化阶段显著大于重度退化。地上生物量在前 3 个退化阶段无显著变化,到重度退化阶段显著减小。地上生物量随着草地退化而减小,在未退化阶段最大,且显著高于后面 3 个退化阶段(表 3)。

表2 不同放牧季节对土壤理化性质及生物量的影响

Table 2 Effects of different grazing seasons on soil characteristics and biomass

放牧季节 Grazing season	容重 Bulk density/ g · cm ⁻³	砾石含量 Gravel content / %	pH	地下生物量 Underground biomass / g · m ⁻²	地上生物量 Aboveground biomass / g · m ⁻²
冷季放牧 Cold-season grazing	1.03±0.02a	3.58±0.34a	7.81±0.06a	979.76±90.83a	98.59±14.32a
暖季放牧 Warm-season grazing	1.07±0.02a	4.92±0.46a	7.74±0.07a	928.73±147.63a	99.59±15.29a

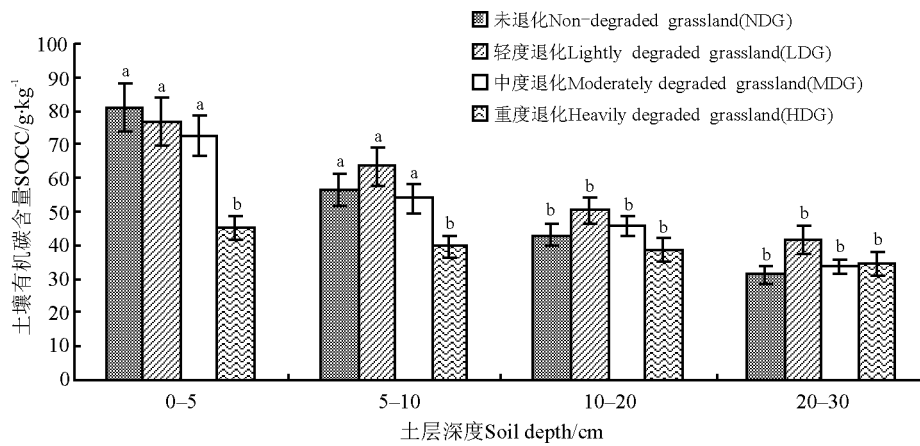


图2 不同退化阶段土壤有机碳含量分异特征

Fig.2 Variation of soil organic carbon content in different successional stages

注: 不同字母表示不同退化阶段间差异显著 ($P < 0.05$)。表3、图3同。

Note: Different lower case letters indicate significant difference among different degradation stages at 0.05 level. The same in Table 3 and Fig. 3.

表3 不同退化阶段对土壤理化性质及生物量的影响

Table 3 Effects of different degradation stages on soil characteristics and biomass

退化阶段 Degradation degree	容重 Bulk density/ g · cm ⁻³	砾石含量 Gravel content / %	pH	地下生物量 Belowground biomass / g · m ⁻²	地上生物量 Aboveground biomass / g · m ⁻²
未退化 Non-degraded grassland(NDG)	1.00±0.03b	3.07±0.74a	7.73±0.21ab	1 265.43±238.68a	168.50±20.75a
轻度退化 Lightly degraded grassland(LDG)	0.99±0.04b	4.66±0.93a	7.77±0.21ab	1 438.34±351.13a	95.78±26.33b
中度退化 Moderately degraded grassland(MDG)	1.04±0.03ab	3.58±0.41a	7.93±0.61a	1 480.17±159.89a	87.41±12.71b
重度退化 Heavily degraded grassland(HDG)	1.13±0.03a	4.91±1.09a	7.35±0.21b	277.62±63.27b	70.18±17.53b

2.3 放牧季节和退化程度对土壤有机碳含量和储量的影响

如表4所示,放牧季节对高寒草甸土壤有机碳含量无显著影响 ($P > 0.05$),退化程度对土壤有机碳含量有显著影响 ($P < 0.05$)。放牧季节和退化程度的交互

作用不显著 ($P > 0.05$)。

冷季放牧土壤有机碳含量在前3个阶段基本无明显变化,到重度退化阶段显著减小 ($P < 0.05$)。而暖季放牧土壤有机碳含量随退化阶段的变化趋势与冷季放牧不同,暖季放牧土壤有机碳含量在轻度退化阶段最

大,且显著高于中度和重度退化阶段 ($P < 0.05$) (图 3)。

如表 5 所示,冷季放牧不同阶段土壤有机碳密度除中度退化外,其余均低于暖季放牧,但都无显著

差异 ($P > 0.05$)。冷季放牧和暖季放牧土壤有机碳密度均随退化阶段先增加后减小,在轻度退化阶段达到最大,重度退化阶段最小。暖季放牧轻度退化阶段土壤碳密度最大。

表 4 放牧季节和退化阶段对土壤有机碳影响的两因素方差分析结果

Table 4 Result of the general linear model on the effect of grazing season and degradation stage

类项 Item	df	F	P
放牧季节 Grazing season	1	0.666	0.415
退化程度 Degradation degree	3	31.998	0.000
放牧季节×退化程度 Grazing season×degradation degree	3	0.212	0.888

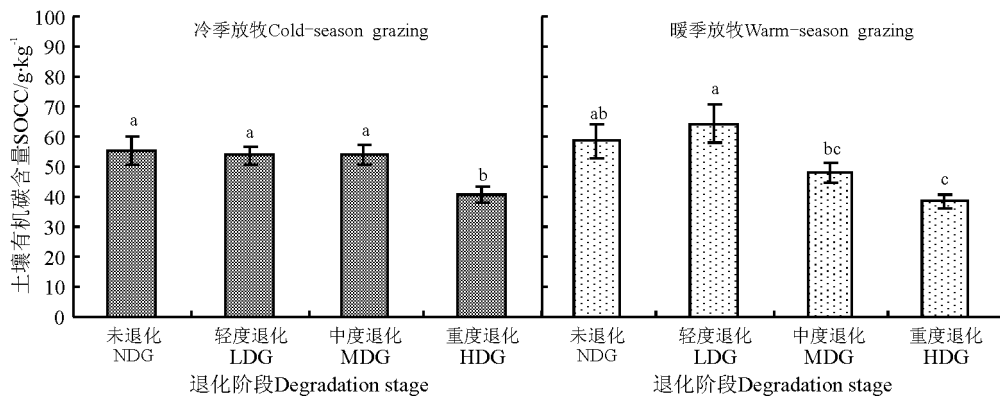


图 3 不同放牧季节和退化阶段 0-30 cm 土壤有机碳含量异分特征

Fig. 3 Variation of soil organic carbon content in different grazing seasons and successional stages

表 5 不同放牧季节和退化阶段对土壤有机碳密度 ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$) 的影响

Table 5 Effects of different grazing seasons and degradation stage on soil organic carbon density ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$)

放牧季节 Grazing season	退化阶段 Degradation degree			
	未退化 NDG	轻度退化 LDG	中度退化 MDG	重度退化 HDG
冷季放牧 Cold-season grazing	13.23±1.11a	14.45±0.94a	13.85±1.01a	11.81±0.97a
暖季放牧 Warm-season grazing	14.45±1.65a	15.36±2.48a	13.46±0.82a	12.00±1.17a

3 讨论

3.1 青海省高寒草甸土壤有机碳储量估算

青海省高寒草甸 0-30 cm 土壤有机碳密度为 $13.59 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$, 远远高于中国北部 0-30 cm 土壤有机碳密度 ($5.3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$) [23]。高寒草甸作为青海省的主要植被类型,在保持水分涵养、生态服务和生态屏障等功能中发挥着积极的作用 [24],其主要分布于海南藏族自治州、黄南藏族自治州、玉树藏族自治州、果洛藏族自治州以及海北藏族自治州,是青海省面积最大的草地类型,面积为 2 400 万 hm^2 ,占全省总面积的 63.81%。青海省高寒草甸 0-30 cm 储存的有机碳达

3.26 Pg ,占青藏高原土壤有机碳 (7.4 Pg) 的 44.1% [25],占全国土壤总有机碳 (32.9 Pg) 的 9.9% [26],是全国总有机碳库的重要组成部分。因此,这个地区土壤碳储量对区域乃至整个国家碳储量和循环都有重要贡献。

3.2 土壤有机碳的影响因子

土壤碳的输入主要是通过植物的输入,因此植物可以很大程度上影响土壤有机碳 [27],土壤有机碳的垂直分布由根系的分布决定,因为根系生长是将碳引入土壤中的最有效的方法 [28-29]。本研究表明,除 0-5 cm 土壤有机碳与地上生物量随放牧季节和退化程度的变化规律一致,其余各层皆不一致,而土壤有机碳与地下

生物量呈相同的变化趋势。草地的退化将会导致地上生物量和地下生物量的变化,地上生物量会随草地退化减小,而地下生物量会出现先升高后减小的趋势,因此土壤有机碳含量在不同退化阶段各不相同,在轻度退化阶段达到最大,之后随退化程度加剧出现先增加后减小的趋势。研究表明,随着人类活动干扰强度的增加,土壤有机碳呈单峰曲线变化^[30],本研究结果与之相符。现有研究表明,青海省高寒草甸的退化主要由超载放牧引起^[11]。因此,可以通过控制放牧来控制草地退化。适度放牧可以增加土壤碳储量,但过度放牧会造成生物量的锐减,土壤有机碳的急剧减小,到重度退化时很难再恢复^[31]。放牧季节和放牧强度都会对土壤有机碳含量产生影响。有研究表明,青海省高寒草甸暖季土壤有机碳密度大于冷季有机碳密度,这可能是由于我国西部天然草地放牧一般对冬季放牧场干扰强度较大,而对夏季放牧场干扰强度较小^[20]。

研究表明,土壤碳库很小的变化将会对大气 CO₂ 浓度产生重要的影响^[32]。加之青海省高寒草甸在全球气候变化中的重要作用^[33],因此高寒草甸土壤碳储量的变化应该被重视。

许多研究表明,土壤可以封存大气中的碳,从而减缓全球变化^[34]。近几十年来,由于自然气候变化和人类不合理的经济活动,使高寒草甸生态系统的结构和功能过程发生了不可逆转的变化,草地严重退化、沙化,“黑土滩”型退化草地逐渐扩大^[35,41]。草地的退化将导致土壤有机碳的变化,进而对全球碳的预算有很大影响^[36]。研究表明,草地的退化将导致 CO₂ 从土壤中释放到大气,从而导致土壤有机碳的减小和土壤质

量的下降^[37]。通过适宜性管理的方法来增加土壤碳储量已经得到了很大的重视^[38-39]。通过适宜的管理方式和土壤的恢复可以增加土壤有机碳含量,提高草地的生产力,并且能一定程度上缓解温室效应^[40]。青海省大面积退化草甸的恢复具有巨大的增储潜力^[41]。其土壤仍然有很大的潜力去进一步封存更多的碳,这在不久的将来将有助于减缓气候变化^[42]。因此,青海省高寒草甸的适宜性管理,即充分的利用草地且尽量减小冬季放牧对草地的干扰,可以增加土壤有机碳;而且有助于保持高寒草甸可持续生产性能,进行高寒草地可持续利用。

4 结论

高寒草甸是青藏高原的主要植被类型,其土壤中储存了大量的碳,主要以土壤有机碳为主。近几十年来,由于人类活动的影响,主要为放牧,高寒草甸发生了严重的退化,从而导致其土壤有机碳的变化。本研究表明,暖季放牧 0-5 cm 土壤有机碳含量高于冷季放牧 5-30 cm 低于冷季放牧。土壤有机碳含量均随退化阶段呈先增加后减小的趋势,在轻度退化阶段达到最大,且均在重度退化阶段急剧减小。冷季放牧土壤有机碳含量在未退化、轻度退化和中度退化 3 个阶段基本无变化,但在重度退化阶段显著减小,暖季放牧土壤有机碳含量随退化阶段呈现增加后减小的趋势,在轻度退化阶段达到最大。暖季放牧土壤有机碳密度大于冷季放牧,但两者间差异不显著。本研究为青海省高寒草甸的合理利用提供了依据,并对草地适宜性管理提供了数据基础。

参考文献(References)

- [1] Fang J Y, Guo Z D, Piao S L, Chen A P. Terrestrial vegetation carbon sinks in China, 1981-2000. *Science in China Series D: Earth Sciences* 2007, 50(9): 1341-1350.
- [2] Post W, Kwon K C. Soil carbon sequestration and land-use change: Processes and potential. *Global Change Biology* 2000, 6(3): 317-327.
- [3] Smith P, Fang C. Carbon cycle: A warm response by soils. *Nature* 2010, 464: 499-500.
- [4] Schlesinger W H, Andrews J A. Soil respiration and the global carbon cycle. *Biogeochemistry* 2000, 48(1): 7-20.
- [5] Álvaro-Fuentes J, Easter M, Paustian K. Climate change effects on organic carbon storage in agricultural soils of northeastern Spain. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 2012, 155: 87-94.
- [6] 高洋, 王根绪, 高永恒. 长江源区高寒草地土壤有机质和氮磷含量的分布特征. *草业科学* 2015, 32(10): 1548-1554.
Gao Y, Wang G X, Gao Y H. Distribution characteristics of soil organic matter and nitrogen phosphorus content in alpine grassland ecosystem in upper Yangtze River. *Pratacultural Science* 2015, 32(10): 1548-1554. (in Chinese)
- [7] Song X Z, Peng C H, Zhou G M, Jiang H, Wang W F. Chinese Grain for Green Program led to highly increased soil organic carbon levels: A meta-analysis. *Scientific Reports* 2014(4): 1-7.
- [8] Van Groenigen K J, Qi X, Osenberg C W, Luo Y Q, Hungate B A. Faster decomposition under increased atmospheric CO₂ limits soil

- carbon storage. *Science* 2014 ,344: 508-509.
- [9] Jones C ,McConnell C ,Coleman K ,Cox P ,Fallon P ,Jenkinson D ,Powlson D. Global climate change and soil carbon stocks: predictions from two contrasting models for the turnover of organic carbon in soil. *Global Change Biology* 2005(11) : 154-166.
- [10] Yang Y H ,Fang J Y ,Smith P ,Tang Y H ,Chen A P ,Ji C J ,Hu H F ,Rao S ,Tan K ,He J S. Changes in topsoil carbon stock in the Tibetan grasslands between the 1980s and 2004. *Global Change Biology* 2009 ,15: 2723-2729.
- [11] Cao G M ,Tang Y H ,Mo W H ,Wang Y S ,Li Y N ,Zhao X Q. Grazing intensity alters soil respiration in an alpine meadow on the Tibetan Plateau. *Soil Biology and Biochemistry* 2004 ,36: 237-243.
- [12] 曹广民 ,林丽 ,张法伟 ,李以康 ,韩道瑞 ,龙瑞军. 青藏高原高寒矮嵩草草甸稳定性的维持 ,丧失与恢复. *草业科学* ,2010 ,27(8) : 34-38.
Cao G M ,Lin L ,Zhang F W ,Li Y K ,Han D R ,Long R J. A review of maintenance ,loss and recovery of stability of alpine *Kobresia humil* meadow on Tibetan Plateau. *Pratacultural Science* 2010 ,27(8) : 34-38. (in Chinese)
- [13] 曹广民 ,杜岩功 ,梁东营 ,王启兰 ,王长庭. 高寒嵩草草甸的被动与主动退化分异特征及其发生机理. *山地学报* 2007 ,25(6) : 641-648.
Cao G M ,Du Y G ,Liang D Y ,Wang Q L ,Wang C T. Character of passive-active degradation process and its mechanism in aAlpine *Kobresia* meadow. *Journal of Mountain Science*. 2007 ,25(6) : 641-648. (in Chinese)
- [14] Chen H ,Zhu Q ,Wu N ,Wang Y F ,Peng C H. Delayed spring phenology on the Tibetan Plateau may also be attributable to other factors than winter and spring warming. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 2011 ,108(19) : E93.
- [15] Ni J. Carbon storage in grasslands of China. *Journal of Arid Environments* 2002 ,50: 205-218.
- [16] 周华坤 ,赵新全 ,周立 ,刘伟 ,李英年 ,唐艳鸿. 青藏高原高寒草甸的植被退化与土壤退化特征研究. *草业学报* 2005 ,14(3) : 31-40.
Zhou H K ,Zhao X Q ,Zhou L ,Liu W ,Li Y N ,Tang Y H. A study on correlations between vegetation degradation and soil degradation in the 'Alpine Meadow' of the Qinghai-Tibetan Plateau. *Acta Prataculturae Sinica* 2005 ,14(3) : 31-40. (in Chinese)
- [17] Feng J M ,Wang T ,Qi S Z ,Xie C W. Land degradation in the source region of the Yellow River ,northeast Qinghai-Xizang Plateau: Classification and evaluation. *Environmental Geology* 2005 ,47: 459-466.
- [18] 王长庭 ,龙瑞军 ,王启兰 ,景增春 ,施建军 ,杜岩功 ,曹广民. 三江源区高寒草甸不同退化演替阶段土壤有机碳和微生物量碳的变化. *应用与环境生物学报* 2008 ,14(2) : 225-230.
Wang C T ,Long R J ,Wang Q L ,Jing Z C ,Shi J J ,Du Y G ,Cao G M. Changes in soil organic carbon and microbial biomass carbon at different degradation successional stages of alpine meadows in the headwater region of Three Rivers in China. *Chinese Journal of Applied & Environmental Biology*. 2008 ,14(2) : 225-230. (in Chinese)
- [19] 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.
Gao Y Z ,Han X G ,Wang S P. The effects of grazing on grassland soils. *Acta Ecologica Sinica* 2004 ,24(4) : 790-797. (in Chinese)
- [20] 袁建立 ,汪小蕾 ,黄文冰 ,王刚. 放牧季节及放牧强度对高寒草地植物多样性的影响. *草业学报* 2004 ,13(3) : 16-21.
Yuan J L ,Wang X L ,Huang W B ,Wang G. Effects of grazing intensity and grazing season on plant species diversity in alpine meadow. *Acta Prataculturae Sinica* 2004 ,13(3) : 16-21. (in Chinese)
- [21] 刘伟 ,王溪 ,周立 ,周华坤. 高原鼠兔对小嵩草草甸的破坏及其防治. *兽类学报* 2003 ,23(3) : 214-219.
Liu W ,Wang X ,Zhou L ,Zhou H K. Studies on destruction ,prevention and control of plateau pikas in *Kobresia pygmaea* meadow. *Acta Theriologica Sinica* 2003 ,23(3) : 214-219. (in Chinese)
- [22] Liu Y ,Zha Y ,Gao J ,Ni S. Assessment of grassland degradation near Lake Qinghai ,West China using Landsat TM and in situ reflectance spectra data. *International Journal of Remote Sensing* 2004 ,25(20) : 4177-4189.
- [23] Yang Y H ,Fang J Y ,Ma W H ,Smith P ,Mohammad A ,Wang S P ,Wang W. Soil carbon stock and its changes in northern China 's grasslands from 1980s to 2000s. *Global Change Biology* 2010 ,16(11) : 3036-3047.
- [24] 李英年 ,徐世晓 ,赵亮 ,张法伟. 青南退化高寒草甸植被土壤固碳潜力. *冰川冻土* 2012 ,34(5) : 1157-1164.
Li Y N ,Xu S X ,Zhao L ,Zhang F W. Carbon sequestration potential of vegetation and soil of degenerative alpine meadow in Southern Qinghai Province. *Journal of Glaciology and Geocryology* 2012 ,34(5) : 1157-1164. (in Chinese)
- [25] Yang Y H ,Fang J Y ,Tang Y H ,Ji C J ,Zheng C Y ,He J S ,Zhu B. Storage patterns and controls of soil organic carbon in the Tibetan grasslands. *Global Change Biology* 2008 ,14(7) : 1529-1599.
- [26] Yang Y H ,Mohammad A ,Feng J M ,Zhou R ,Fang J Y. Storage patterns and environmental controls of soil organic carbon in China. *Biogeochemistry* 2007 ,84: 131-141.

- [27] Jobbágy E G ,Jackson R B. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation. *Ecological applications* 2000 ,10(2) : 423-436.
- [28] Schenk H J ,Jackson R B. Rooting depths ,lateral root spreads and below-ground/above-ground allometries of plants in water-limited ecosystems. *Journal of Ecology* 2002 ,90: 480-494.
- [29] 洪江涛,吴建波,王小丹. 放牧和围封对藏北高寒草原紫花针茅群落生物量分配及碳、氮、磷储量的影响. *草业科学* 2015 , 32(11) : 1878-1886.
Hong J T ,Wu J B ,Wang X D. Effects of grazing and fencing on *Stipa purpurea* community biomass allocation and carbon ,nitrogen and phosphorus pools on the northern Tibet Plateau alpine. *Pratacultural Science* 2015 ,32(11) :1878-1886. (in Chinese)
- [30] 林丽,曹广民,李以康,张法伟,郭小伟,韩道瑞. 人类活动对青藏高原高寒矮嵩草草甸碳过程的影响. *生态学报* ,2010 , 30(15) : 4012-4018.
Lin L ,Cao G M ,Li Y K ,Zhang F W ,Guo X W ,Han D R. Effects of human activities on organic carbon storage in the *Kobresia humilis* meadow ecosystem on the Tibetan Plateau. *Acta Ecologica Sinica*. 2010 ,30(15) : 4012-4018. (in Chinese)
- [31] 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.
Wang X T ,Zhang S H ,Chen D D ,Tan Y R ,Sun D S ,Du G Z. The Effects of natural grazing intensity on plant community and soil nutrients in alpine meadow. *Acta Agrestia Sinica* 2010 ,18(4) : 510-516. (in Chinese)
- [32] Lal R. Global potential of soil carbon sequestration to mitigate the greenhouse effect. *Critical Reviews in Plant Sciences* ,2003 ,22: 151-184.
- [33] Wang G X ,Qian J ,Cheng G D ,Lai Y M. Soil organic carbon pool of grassland soils on the Qinghai-Tibetan Plateau and its global implication. *Science of the Total Environment* 2002 ,291: 207-217.
- [34] Fontaine S ,Bardoux G ,Abbadie L ,Mariotti A. Carbon input to soil may decrease soil carbon content. *Ecology Letters* 2004 ,7: 314-320.
- [35] 杜岩功,曹广民,王启兰,王长庭. 放牧对高寒草甸地表特征和土壤物理性状的影响. *山地学报* 2007 ,25(3) : 338-343.
Du Y G ,Cao G M ,Wang Q L ,Wang C T. Effect of grazing on surface character and soil physical property in alpine meadow. *Journal of Mountain Science* 2007 ,25(3) : 338-343. (in Chinese)
- [36] Wu H B ,Guo Z T ,Gao Q ,Peng C H. Distribution of soil inorganic carbon storage and its changes due to agricultural land use activity in China. *Agriculture ,Ecosystems & Environment* 2009 ,129: 413-421.
- [37] Lal R. Soil carbon sequestration to mitigate climate change. *Geoderma* 2004 ,123: 1-22.
- [38] Sarkhot D V ,Grunwald S ,Ge Y ,Morgan C S. Total and available soil carbon fractions under the perennial grass *Cynodon dactylon* (L.) Pers and the bioenergy crop *Arundo donax* L. *Biomass and Bioenergy* 2012 ,41: 122-130.
- [39] 邹婧汝,赵新全. 围栏禁牧与放牧对草地生态系统固碳能力的影响. *草业科学* 2015 ,32(11) : 1748-1756.
Zou J R ,Zhao X Q. Effects of livestock enclosure and grazing on carbon sequestration in grassland ecosystem. *Pratacultural Science* , 2015 ,32(11) : 1748-1756. (in Chinese)
- [40] Lal R ,Bruce J. The potential of world cropland soils to sequester C and mitigate the greenhouse effect. *Environmental Science & Policy* ,1999 ,2: 177-185.
- [41] 曹广民,龙瑞军,张法伟,李以康,林丽,郭小伟,韩道瑞,李婧. 青藏高原高寒矮嵩草草甸碳增汇潜力估测方法. *生态学报* , 2010 ,30(23) : 6591-6597.
Cao G M ,Long R J ,Zhang F W ,Li Y K ,Lin L ,Guo X W ,Han D R ,Li J. A method to estimate carbon storage potential in alpine *Kobresia* meadow on the Qinghai-Tibetan Plateau. *Acta Ecologica Sinica* 2010 ,30(23) : 6591-6597. (in Chinese)
- [42] Yang Y H ,Fang J Y ,Ma W H ,Smith P ,Mohammad A ,Wang S P ,Wang W. Soil carbon stock and its changes in northern China ' s grasslands from 1980s to 2000s. *Global Change Biology* 2010 ,16(11) : 3036-3047.

(责任编辑 王芳)