

DOI: 10.11829/j.issn.1001-0629.2020-0235

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.

SONG S S, ZHANG J S, ZHENG T L, ZHANG F, ZHU J X. Effect of fencing on vegetation carbon storage in the Qinghai Haibei alpine meadows. Pratacultural Science, 2020, 37(12): 2414-2421.

围栏封育对青海海北高寒草甸植被碳储量的影响

宋珊珊¹, 张建胜¹, 郑天立², 张帆¹, 朱剑霄¹

(1. 兰州大学草地农业科技学院, 甘肃 兰州 730000; 2. 交通运输部天津水运工程科学研究所, 天津 300000)

摘要: 本研究以海北高寒草甸为研究对象, 比较了 2、4、9、11、20 年 5 个围栏封育处理与各自配对的放牧样地(对照)的生物量碳储量。结果表明: 短期(2 和 4 年)围栏对植被碳储量无显著影响($P > 0.05$), 但长期(9、11 和 20 年)围栏显著降低了植被碳储量($P < 0.05$)。围栏改变了不同功能群对地上生物量碳储量的相对贡献; 短期围栏增加了杂类草的地上生物量碳储量, 而长期围栏显著降低了禾草、豆科和莎草的地上生物量碳储量($P < 0.05$)。长期围栏主要通过降低地下生物量碳储量(根系, 0–50 cm 土壤深度), 进而降低植被碳储量。研究结果显示, 长期围栏不利于青藏高原高寒草甸植被碳储量的积累, 尤其不利于地下根系碳储量的固存。

关键词: 碳储量; 功能群; 根系; 群落结构; 青藏高原

文献标志码: A 文章编号: 1001-0629(2020)12-2414-08

Effect of fencing on vegetation carbon storage in the Qinghai Haibei alpine meadows

SONG Shanshan¹, ZHANG Jiansheng¹, ZHENG Tianli², ZHANG Fan¹, ZHU Jianxiao¹

(1. College of Pastoral Agriculture Science and Technology, Lanzhou University, Lanzhou 730000, Gansu, China;

2. Tianjin Research Institute for Water Transport Engineering, M.O.T., Tianjin 300000, China)

Abstract: This study was performed to compare differences in vegetation carbon storage between five fencing treatments (2, 4, 9, 11, and 20 years) and their corresponding grazing treatments (control) in alpine meadows of Haibei. Short-term fencing (2 and 4 years) had no significant effect on vegetation carbon storage ($P > 0.05$), whereas long-term fencing (9, 11, and 20 years) significantly reduced vegetation carbon storage ($P < 0.05$). Fencing changed the relative contribution of different functional groups to the above-ground biomass carbon storage. Short-term fencing significantly increased above-ground biomass carbon storage of forbs ($P < 0.05$), whereas long-term fencing significantly reduced above-ground biomass carbon storage of grasses, legumes, and sedges ($P < 0.05$). Long-term fencing decreased carbon vegetation storage mainly by reducing below-ground biomass (root system levels, 0–50 cm soil depth). These results suggest that long-term fencing was not conducive to the accumulation of biomass carbon storage in alpine meadows of Haibei on the Qinghai-Tibetan Plateau, especially to the stock of below-ground root carbon storage.

Keywords: carbon storage; functional groups; root system; community structure; Qinghai-Tibetan Plateau

Corresponding author: ZHU Jianxiao E-mail: jxzhulzu.edu.cn

收稿日期: 2020-04-30 接受日期: 2020-06-17

基金项目: 重点研发项目“青藏高原退化草地恢复的主要物源制约因子及其应用技术研发(2019YFC0507704)”

第一作者: 宋珊珊(1996-), 女, 河南新乡人, 在读硕士生, 主要从事草地生物多样性与碳循环研究。E-mail: songshsh18@lzu.edu.cn

通信作者: 朱剑霄(1986-), 男, 四川成都人, 青年研究员, 博士, 主要从事陆地生态系统碳循环方面研究。E-mail: jxzhulzu.edu.cn

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

草地是陆地生态系统的重要组成部分, 约占全球陆地总面积的 25%^[1-2]。青藏高原草地生态系统中植被碳储量远低于森林和灌丛等生态系统, 其碳库功能主要体现为土壤有机碳库^[3-4]。虽然植被对草地生态系统碳储量的贡献远低于土壤, 但却是维持土壤碳储量稳定乃至维持区域碳库稳定的关键^[5]。草地植被的退化(生物多样性丧失、群落结构改变、生产力降低等)将导致土壤的水土流失, 进而影响土壤有机碳的积累, 最终威胁该区域水资源和生态安全^[6-7]。

青藏高原具有极端的气候条件, 该区域草地是我国重要的天然牧场之一^[8], 过度放牧导致该区域草地出现一定程度的退化^[9-10]。为减缓过度放牧对草地生态系统的破坏, 我国自 2003 年以来施行了“退牧还草”、“围栏封育”等一系列政策保护草地, 并取得显著的成效^[11-13]。例如, 5 年的围封处理显著增加了青藏高原高寒草甸的植被生物量^[14]; 12 年的长期围封显著增加了内蒙古沙地牧场中的植被碳储量^[15]。然而, 不同研究区草地类型和环境条件存在差异^[16-17], 也有大量的研究认为, 围封活动的长期开展并不利于植被的生长^[18-20]。

基于此, 本研究以青海省海北高寒草地生态系统国家野外科学观测研究站附近的高寒草甸为研究对象, 比较 2、4、9、11、20 年 5 个围栏封育处理与各自配对的放牧样地的地上、地下(根系)及植被的生物量碳储量, 探讨不同年限围封对草地生态系统群落组成、结构和生物量碳储量的影响。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区在青海海北高寒草地生态系统国家野外科学观测研究站(37°36'–37°37' N, 101°18'–101°19' E, 海拔 3 220 m)位于青藏高原东北部, 大陆性季风气候(表 1)。年均温和年均降水量分别为-1.08 °C 和 416.8 mm^[21]。约 80% 的降水集中在每年的植物生长季节(5 月–9 月)^[22-23]。研究区草地为天然冬季牧草, 放牧强度为每公顷 5~6 只羊, 放牧时间为每年 9 月底至次年 4 月底或 5 月初^[20]。该地区的优势物种主要为异针茅(*Stipa aliena*)、高山豆(*Tibetia himalaica*)、美丽风毛菊(*Saussurea pulchra*)等。

表 1 研究样地基本概况

Table 1 The basic conditions of the study area

围封年限 Fencing durations/a	纬度 Latitude	经度 Longitude	放牧强度 Grazing intensity/ [sheep·(hm ² ·a) ⁻¹]	放牧时间 Grazing time/ (MM-DD)	自由放牧样地优势物种 Dominant species in free grazing plots
2	37°36' N	101°18' E	6	09-04	异针茅(<i>Stipa aliena</i>)、高山豆(<i>Tibetia himalaica</i>)、蒲公英(<i>Taraxacum mongolicum</i>)、瑞苓草(<i>Saussurea nigrescens</i>)
4	37°37' N	101°19' E	5	09-05	异针茅(<i>Stipa aliena</i>)、高山豆(<i>Tibetia himalaica</i>)、蒲公英(<i>Taraxacum mongolicum</i>)、瑞苓草(<i>Saussurea nigrescens</i>)
9	37°37' N	101°19' E	5	09-05	异针茅(<i>Stipa aliena</i>)、美丽风毛菊(<i>Saussurea pulchra</i>)、麻花艸(<i>Gentiana straminea</i>)
11	37°36' N	101°18' E	6	09-04	异针茅(<i>Stipa aliena</i>)、美丽风毛菊(<i>Saussurea pulchra</i>)、麻花艸(<i>Gentiana straminea</i>)
20	37°36' N	101°18' E	6	09-04	异针茅(<i>Stipa aliena</i>)、美丽风毛菊(<i>Saussurea pulchra</i>)、重冠紫菀(<i>Aster diplostephioides</i>)

1.2 地上、地下生物量碳储量估算

于 2018 年 8 月, 选择研究区内 5 个不同围封年限(2、4、9、11、20 年)的样地进行植被碳储量的研究, 各围封样地(> 200 m²)均以铁丝围栏封育, 禁止放牧。围栏内和围栏外分别为围封处理和对照; 各处理设置 5 个 1 m × 1 m 的调查样方。各样方均设置在距离围栏 5~10 m 的区域内, 以避免围栏的边际

效应对结果的干扰。

于 2018 年 8 月中旬, 对所有调查样方进行群落调查和生物量碳储量的测定。首先, 将各处理调查样方划分为 16 个面积为 25 cm × 25 cm 的网格, 随机选择其中 4 个进行群落调查。然后, 齐地面剪取所有植物的地上部分, 并将各样方的植物样品分物种置于信封, 带回实验室, 于 65 °C 烘箱内烘干至恒重, 测定各物种地上生物量。使用直径 8 cm 的根钻

在植物样品收获的网格中分别在不同土壤深度(0-10、10-20、20-30、30-50 cm)取样,清水洗净后置于65℃烘箱内至恒重,测定各物种地下生物量。

使用球磨仪(F-P400H,湖南弗卡斯实验仪器有限公司,中国)将烘干的植物样品进行研磨,过80 mm筛后,使用元素分析仪(FLASHEA 112, Thermo Electron Corporation, 美国)测定植物碳含量。根据植物地上、根系的生物量和碳含量计算出各处理地上、地下生物量及总生物量(植被生物量)单位面积的碳储量。

为探究围封对群落组成和结构的影响,将地上生物量碳储量按照功能群及不同优势度进行分类。在功能群水平上,将物种分为禾草、莎草、豆科及杂草4种类型。另外,根据各物种地上生物量碳储量的相对贡献率,将物种分为优势物种(相对贡献率大于5%)、常见物种(相对贡献率介于1%~5%)及稀少物种(相对贡献率小于1%)3种类型。

1.3 统计分析

为分析围封对植物地上、地下及总碳储量的影响,首先使用SPSS 24.0进行配对*t*检验来分析围栏

内外上述碳储量的差异。另外,基于各物种地上生物量碳储量数据,使用R软件中vegan包和ggplot2包进行群落碳储量组成结构的非度量多纬尺度分析(NMDS),然后使用vegan包对围栏内外群落碳储量的组成结构进行相似性分析(ANOSIM);当统计值 $R^2 = 0$ 时,表示围栏内外群落碳储量的组成结构相似,当 $R^2 > 0$ 且 $P < 0.05$ 时,则表示围栏内外群落碳储量的组成结构差异显著。

2 结果与分析

2.1 禁牧对高寒草甸地上群落碳储量组成结构的影响

对各围封年限围栏内外的地上生物量碳储量进行配对*t*检验(表2),结果显示:2年围封处理的地上生物量碳储量显著增加(19%, $P < 0.01$) (图1),9年的围封处理导致地上生物量碳储量显著降低(34%, $P < 0.05$),其他年限围封处理的地上生物量碳储量在围栏内外差异不显著($P > 0.05$) (图1)。不同年限围封处理改变了群落地上生物量碳储量在不

表2 高寒草甸5个围封年限生物量碳储量的*t*检验

Table 2 T-test results of biomass carbon storage of five fencing durations in alpine meadows

指标 Parameter	围封年限 Fencing durations/a									
	2		4		9		11		20	
	<i>t</i>	<i>P</i>	<i>t</i>	<i>P</i>	<i>t</i>	<i>P</i>	<i>t</i>	<i>P</i>	<i>t</i>	<i>P</i>
禾草 Grasses	1.67	0.17	-0.60	0.58	3.79	<0.05	0.77	0.49	-3.58	0.49
莎草 Sedges	3.06	<0.05	6.76	<0.01	4.01	<0.05	2.32	0.08	0.32	0.08
豆科 Legumes	-0.43	0.69	-1.24	0.28	0.36	<0.05	5.07	<0.01	5.43	<0.01
杂草 Forbs	-16.84	<0.01	-2.65	0.06	-0.71	0.52	-3.48	<0.05	3.48	<0.05
优势物种 Dominant species	0.94	0.40	0.18	0.87	2.37	0.08	1.30	0.26	0.44	0.68
常见物种 Common species	-0.39	0.72	1.01	0.37	2.18	0.09	0.68	0.54	1.46	0.22
稀少物种 Rare species	-5.19	<0.01	-2.37	0.08	-2.33	0.08	-3.24	<0.05	-0.17	0.16
地上生物量碳储量 Aboveground biomass carbon storage	-4.86	<0.01	-1.36	0.24	3.05	<0.05	-0.84	0.45	0.84	0.45
0-10 cm 土层 Soil depth	1.84	0.14	0.72	0.51	4.19	<0.05	4.43	<0.05	2.82	<0.05
10-20 cm 土层 Soil depth	-0.37	0.73	2.47	0.07	0.49	0.65	-0.99	0.37	0.71	<0.05
20-30 cm 土层 Soil depth	1.60	0.18	-7.01	<0.01	-4.14	<0.05	-0.86	0.44	2.20	0.09
30-50 cm 土层 Soil depth	-0.22	0.84	4.58	<0.05	7.96	<0.01	2.96	<0.05	-9.67	<0.01
地下生物量碳储量 Belowground biomass carbon storage	0.94	0.40	0.80	0.47	4.05	<0.05	4.71	<0.01	12.08	<0.001
地上地下生物量碳储量 Aboveground and belowground biomass carbon storage	0.13	0.90	0.65	0.55	4.10	<0.05	3.22	<0.05	6.98	<0.01

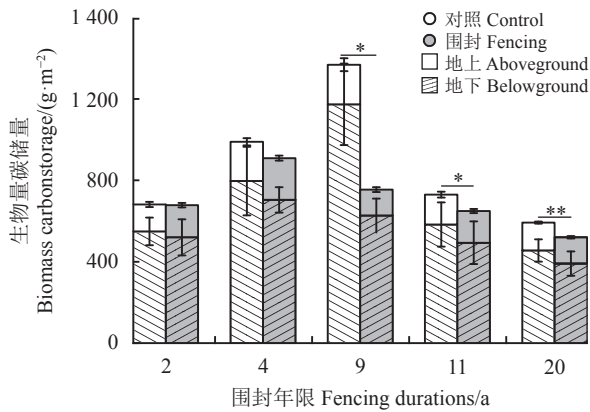


图 1 不同围封年限对地上、地下生物量碳储量的影响

Figure 1 Responses of aboveground and belowground biomass carbon storage to different fencing durations

星号表示对照与围封之间差异显著: *, $P < 0.05$; **, $P < 0.01$, ***, $P < 0.001$; 图 2、3、5 同。

Asterisks indicate significant differences between control and fencing treatments; *, $P < 0.05$; **, $P < 0.01$; ***, $P < 0.001$; this is applicable for Figure 2, Figure 3 and Figure 5 as well.

同功能群中的分配。围封 9 年显著降低禾草地上生物量碳储量 (38%, $P < 0.05$); 莎草地上生物量碳储量在围封 2、4 和 9 年的样地内分别降低了 44% ($P < 0.05$)、81% ($P < 0.01$)和 40% ($P < 0.05$); 长期围封 (9、11 和

20 年) 显著降低了豆科地上生物量碳储量 ($> 90%$, $P < 0.05$); 围封 2 年使杂草地上生物量碳储量显著增加了 68% ($P < 0.05$), 围封 11 年后杂草的地上生物量碳储量从 $27.8 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ 增加到 $56.0 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ ($P < 0.05$); 而围封 20 年则显著降低了杂草的地上生物量碳储量 ($P < 0.05$) (图 2)。

不同年限围封并未显著改变群落优势物种及常见物种地上生物量碳储量; 围封 2 年后稀少物种的地上生物量碳储量从 $5.7 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ 增加到 $40.4 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ ($P < 0.01$), 围封 11 年后稀少物种的地上生物量碳储量从 $6.8 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ 增加到 $41.6 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ ($P < 0.05$) (图 3)。

基于群落内各物种地上生物量碳储量数据的相似性分析结果表明, 不同年限围封均显著改变了基于生物量碳储量计算的群落结构 ($R > 0$, $P < 0.05$), 并且随围封年限的增加, 围封与对照之间群落碳储量的结构差异性也逐渐增大 (图 4)。

2.2 禁牧对高寒草甸地下生物量碳储量的影响

地下生物量碳储量在围封 9、11 和 20 年的样地内分别降低了 47%、15% 和 14% ($P < 0.05$), 围封 2 和 4 年后围栏内外的地下生物量碳储量无显著差异 ($P >$

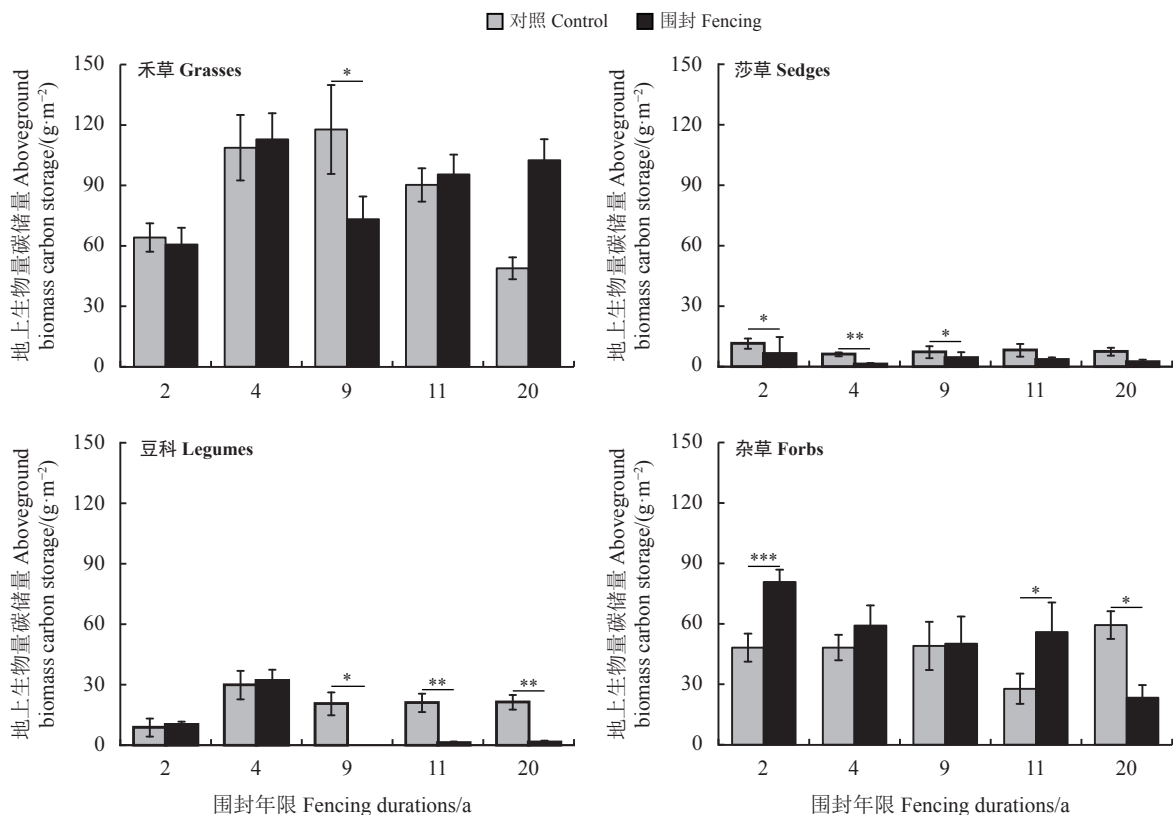


图 2 不同围封年限对各功能群地上生物量碳储量的影响

Figure 2 Responses of aboveground biomass carbon storage of each functional group to different fencing durations

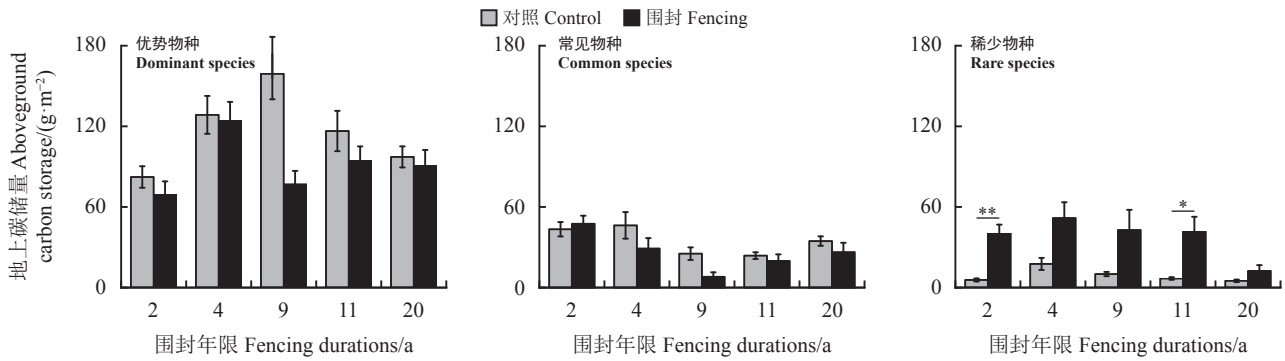


图 3 不同围封年限对各优势度群落地上生物量碳储量的影响

Figure 3 Responses of aboveground biomass carbon storage of each dominance community to different fencing durations

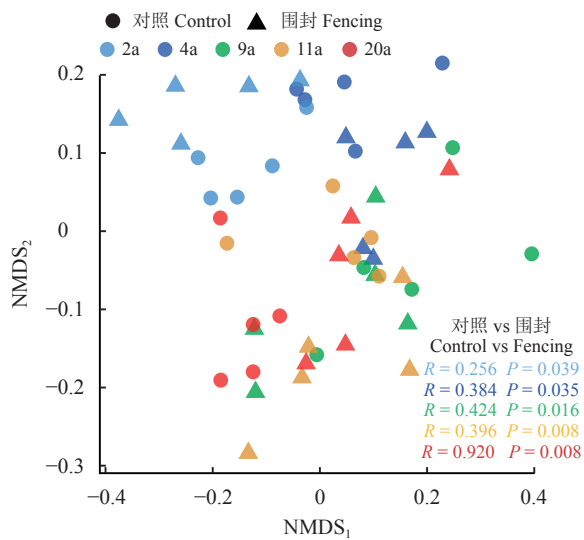


图 4 不同围封年限对植物群落结构的影响

Figure 4 Responses of plant community structures to different fencing durations

NMDS: 非度量多维尺度 Nonmetric multidimensional scaling.

0.05) (图 1)。围封改变了地下生物量碳储量在不同深度土壤中的分配。围封 9、11 和 20 年导致 0–10 cm 深度土壤中的地下生物量碳储量分别显著降低了 54%、17% 和 16% ($P < 0.05$)，而 2 和 4 年的围封对 0–10 cm 土层中的地下生物量碳储量无显著影响 ($P > 0.05$)；围封 20 年的 10–20 cm 土层中地下生物量碳储量显著降低了 8% ($P < 0.05$)，其他年限的围封处理中 10–20 cm 土层中的地下生物量碳储量在围栏内外无显著差异 ($P > 0.05$)；围封 4 和 9 年后 20–30 cm 土层中地下生物量碳储量分别显著增加了 57% ($P < 0.01$) 和 44% ($P < 0.05$)，其他年限的围封对 20–30 cm 土层中的地下生物量碳储量无显著影响 ($P > 0.05$)；围封 4、9 和 11 年的 30–50 cm 土层中地下生物量碳储量分别显著降低了 21%、36% 和 23% ($P < 0.05$)，

围封 20 年导致 30–50 cm 土层中的地下生物量碳储量显著增加了 8% ($P < 0.01$)，而围封 2 年对 30–50 cm 土层中的地下生物量碳储量无显著影响 ($P > 0.05$) (图 5)。9、11 和 20 年的长期围封使植被碳储量分别降低了 45% ($P < 0.05$)、11% ($P < 0.05$) 和 12% ($P < 0.01$) (图 1)。

3 讨论与结论

围栏封育是青藏高原高寒草地生态系统恢复的主要方式^[24-25]，可以改变草地植被群落的组成、结构和生态系统功能^[14, 19]。尽管围封管理是阻碍牲畜践踏以及采食行为、恢复退化植被的常用手段^[25-26]，但这种恢复措施阻碍草地动物地交流，改变了凋落物的积累方式，最终导致植物群落组成和结构的彻底改变^[14, 27]。围栏封育对植物生长的促进作用受限于围封持续的时间长短^[28]；长期的围封管理会导致群落中凋落物的大量累积，阻碍植物在生长季对光资源的获取，进而减少地上生物量碳储量的积累^[29]。本研究中短期围封显著增加地上生物量碳储量，围封 9 年后，地上生物量碳储量显著降低，而长期的围封 (11、20 年) 则对地上生物量碳储量的影响不显著。这表明青藏高原高寒草甸的地上生物量碳储量随围封年限的增加可能表现为先增加后降低的趋势，最终重新达到碳循环相对平衡。

本研究发现，围栏封育显著改变了基于碳储量计算的群落组成和结构，并且改变了地上生物量碳储量在各功能群及优势度类型中的分配。短期围封 (2 年) 显著增加了地上生物量碳储量在杂草中的分配，而长期围封 (9 年) 显著减少了地上生物量碳储量在禾草、莎草以及豆科中的分配。已有研究认

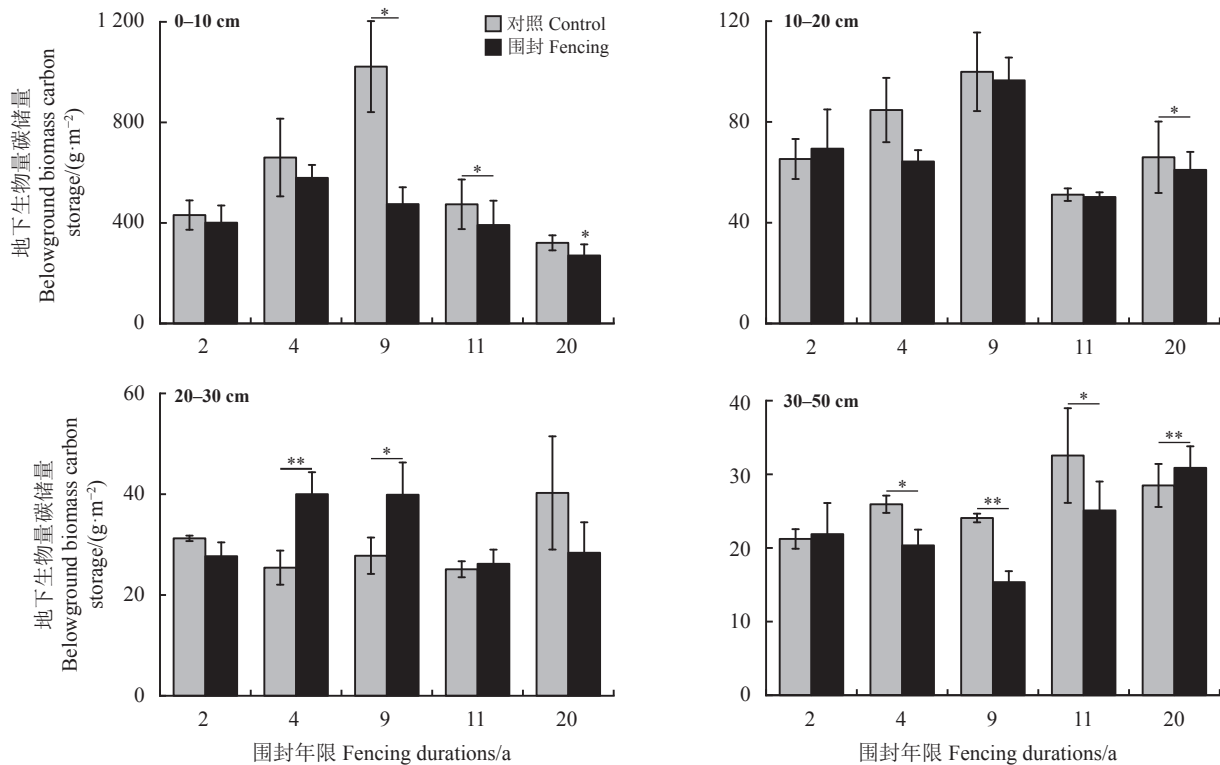


图 5 不同围封年限对不同土壤深度根系碳储量的影响

Figure 5 Responses of root carbon storage at each soil depth to different fencing durations

为围栏封育可以改变群落的组成与结构^[18,30],但草地类型的差异导致群落结构变化的方向并不相同。如 Xiong 等^[31]对西藏地区高寒草甸围封 6 年后发现,莎草的生物量显著增加而杂草生物量显著降低,与本研究两种功能群地上生物量碳储量的变化方向相反。产生这一现象的原因可能是群落中优势物种的不同。本研究涉及高寒草甸,禾草是主要的功能群,而 Xiong 等^[31]的研究区以莎草为主要功能群。群落中物种的优势度决定物种对生态系统各项功能贡献的能力^[32]。优势功能群在围封后地上生物量碳储量下降,是导致植被碳储量分配格局发生变化,进而导致群落结构变化的重要原因。本研究中围封 11 年显著增加而围封 20 年显著降低杂草的地上生物量碳储量;产生这一现象的原因可能与本研究调查样方的面积(4 个 25 cm × 25 cm 的小样方)较小有关;另外,各围封年限并没有设置重复的样地,这可能导致对不同功能群甚至植被地上生物量碳储量的研究存在一定的不确定性。

围封改变了植被地上、地下生物量碳储量分配格局^[25,33]。短期(2、4 年)围封对植被碳储量的影响不显著,而长期(9、11、20 年)围封显著降低了植被

碳储量。长期(9、11、20 年)围封后植被碳储量的变化主要是由于地下生物量碳储量的显著降低,这表明长期围封不利于地下生物量碳储量的积累。长期围封导致地下生物量碳储量下降与已有研究结果相似^[25,34]。Shi 等^[33]在青藏高原开展了 8 年的围封研究表明,围封改变了植物的群落组成,进而显著降低了根系的生物量。长期(9、11、20 年)围封后豆科的减少可能是导致植物碳储量降低的关键因素。围封也改变了各深度土壤中地下生物量碳储量的分配。长期(9、11、20 年)围封显著降低了地下 0–10 cm 根系生物量碳储量;围封后群落中豆科的显著降低可能是导致表层土壤中根系减少的主要原因。另外,4、9 和 11 年的围封显著降低了 30–50 cm 深度土层中的地下生物量碳储量,而围封 20 年后分布在 30–50 cm 土层中的地下生物量碳储量的增加可能与群落内的杂草生物量在地上和地下的分配有关,具有主根系的杂草在围封后可能将生物量逐渐从地上部分转移至地下根系。

综上,该研究证实了长期围封并不利于青藏高原高寒草甸生物量碳储量的积累,尤其不利于地下根系碳储量的固存。围封不仅改变了群落生物量碳

储量在不同功能群中的分配,也影响着地下生物量碳储量的积累。作为土壤碳库有机碳输入最主要的来源,地上和地下生物量碳储量的降低,将会导致土壤有机碳输入的下降,导致土壤有机碳库的流

失,最终威胁到该区域土壤碳库安全。因此,建议以围栏封育为手段修复草地时年限不宜过长,并且在围栏封育过程中应多加关注植被群落组成结构的变化,以免牧草品质发生改变。

参考文献 References:

- [1] SCHIMEL D S. Terrestrial ecosystems and the carbon-cycle. *Global Change Biology*, 1995, 1: 77-91.
- [2] SCURLOCK J M O, JOHNSON K, OLSON R J. Estimating net primary productivity from grassland biomass dynamics measurements. *Global Change Biology*, 2002, 8: 736-753.
- [3] YANG Y H, FANG J, TANG Y, JI C J, ZHANG 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): 1592-1599.
- [4] YANG Y H, FANG J Y, JI C J, MA W H, SU S S, TANG Z Y. Soil inorganic carbon stock in the Tibetan alpine grasslands. *Global Biogeochemical Cycles*, 2010, 24(4): GB4022.
- [5] GONG L, LIU G H, WANG M, YE X, WANG H, LI Z S. Effects of vegetation restoration on soil organic carbon in China: A meta-analysis. *Chinese Geographical Science*, 2017, 27(2): 188-200.
- [6] 许茜,李奇,陈懂懂,罗彩云,赵新全,赵亮.近40 a三江源地区土地利用变化动态分析及预测. *干旱区研究*, 2018, 35(3): 695-704.
XU Q, LI Q, CHEN D D, LUO C Y, ZHAO X Q, ZHAO L. Land use change in the Three-River Headwaters in recent 40 years. *Arid Zone Research*, 2018, 35(3): 695-704.
- [7] 马维伟,李广,宋捷,闫丽娟,武利玉.植被退化对尕斯库勒湿地土壤有机碳库及碳库管理指数的影响. *草地学报*, 2019, 27(3): 687-694.
MA W W, LI G, SONG J, YAN L J, WU L Y. Effect of vegetation degradation on soil organic carbon pool and carbon pool management index in the Gahai wetland, China. *Acta Agrestia Sinica*, 2019, 27(3): 687-694.
- [8] 张道光.青藏高原畜牧气候. *资源科学*, 1985, 7(3): 60-67.
ZHANG Y G. Animal husbandry climate on the Qinghai-Tibet Plateau. *Resources Science*, 1985, 7(3): 60-67.
- [9] 曹旭娟,干珠扎布,胡国铮,高清竹.基于NDVI3g数据反演的青藏高原草地退化特征. *中国农业气象*, 2019, 40(2): 86-95.
CAO X J, Ganzhuzhabu, HU G Z, GAO Q Z. Characteristics of grassland degradation in the Qinghai Tibetan Plateau, based on NDVI3g data. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2019, 40(2): 86-95.
- [10] 边多,李春,杨秀海,边巴次仁,李林.藏西北高寒牧区草地退化现状与机理分析. *自然资源学报*, 2008, 23(2): 80-88.
Bianduo, LI C, YANG S H, Bianbaciren, LI L. Analysis of the situation of grassland degradation and its mechanism of the alpine pastoral area in Northwestern Tibet. *Journal of Natural Resources*, 2008, 23(2): 80-88.
- [11] 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.
YAN B L, WANG Z W, QU Z Q, WANG J, HAN G D. Effects of enclosure on carbon density of plant-soil system in typical steppe and desert steppe in Nei Mongol, China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2018, 42(3): 327-336.
- [12] 乔荣,崔向新,吕新丰,王博,张琪,王颖.围封禁牧对退化草原土壤性状的影响. *水土保持通报*, 2014, 34(5): 162-165.
QIAO R, CUI X X, LYU X F, WANG B, ZHANG Q, WANG Y. Effect of enclosure and grazing prohibition on soil properties of degraded grassland. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2014, 34(5): 162-165.
- [13] 贾志锋,马祥,徐成体,刘文辉,魏小星,雷生春.短期封育对贵南县轻度退化高寒草甸植被特征的影响. *草业科学*, 2019, 36(11): 2766-2774.
JIA Z F, MA X, XU C T, LIU W H, WEI X X, LEI S C. Effects of short-term enclosure on the vegetation characteristics of a lightly degraded alpine meadow in Guinan County. *Pratacultural Science*, 2019, 36(11): 2766-2774.
- [14] 苏淑兰,李洋,王立亚,郭丁,康海军,李旭东,傅华.围封与放牧对青藏高原草地生物量与功能群结构的影响. *西北植物学报*, 2014, 34(8): 1652-1657.
SU S L, LI Y, WANG L Y, GUO D, KANG H J, LI X D, FU H. Effect of fencing on plant biomass and functional group structure of different types of degraded grassland in Qinghai-Tibet Plateau. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2014, 34(8): 1652-1657.
- [15] CHEN Y P, LI Y Q, ZHAO X Y, AWADA T, SHANG W, HAN J J. Effects of grazing exclusion on soil properties and on

- ecosystem carbon and nitrogen storage in a sandy rangeland of Inner Mongolia, Northern China. *Environmental Management*, 2012, 50(4): 622-632.
- [16] LUAN J W, CUI L J, XIANG C H. Different grazing removal enclosures effects on soil C stocks among alpine ecosystems in east Qinghai-Tibet Plateau. *Ecological Engineering*, 2014, 64: 262-268.
- [17] RAIESI F, RIAHI M. The influence of grazing enclosure on soil C stocks and dynamics, and ecological indicators in upland arid and semi-arid rangelands. *Ecological Indicators*, 2014, 41: 145-154.
- [18] LIU X, ZHANG K, AHMAD B. Influence of fencing time on vegetation community structure and species diversity in sandy grassland of Ningxia in China. *Nature Environment and Pollution Technology*, 2015, 14(3): 703-708.
- [19] 郑伟,董全民,李世雄,施建军,刘玉,侯宪宽,宋磊. 禁牧后环青海湖高寒草原植物群落特征动态. *草业科学*, 2014, 31(6): 1126-1130. ZHENG W, DONG Q M, LI S X, SHI J J, LIU Y, HOU X K, SONG L. Dynamics of plant community characteristics of alpine steppe under enclosure around Qinghai lake. *Pratacultural Science*, 2014, 31(6): 1126-1130.
- [20] SONG S S, ZHU J L, ZHENG T L, TANG Z Y, ZHANG F, JI C J, SHEN Z H, ZHU J X. Long-term grazing exclusion reduces species diversity but increases community heterogeneity in an alpine grassland. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 2020, 8: 66.
- [21] WANG Y, SONG C, YU L F, MI Z R, WANG S P, ZENG H, FANG C M, LI J Y, HE J S. Convergence in temperature sensitivity of soil respiration: Evidence from the Tibetan alpine grasslands. *Soil Biology and Biochemistry*, 2018, 122: 50-59.
- [22] LIU H Y, MI Z R, LIN L, WANG Y H, ZHANG Z H, ZHANG F W, WANG H, LIU L L, ZHU B, CAO G M, ZHAO X Q, SANDERS N J, CLASSEN A T, REICH P B, HE J S. Shifting plant species composition in response to climate change stabilizes grassland primary production. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2018, 115(16): 4051-4056.
- [23] MA Z Y, LIU H Y, MI Z R, ZHANG Z H, WANG Y H, XU W, JIANG L, HE J S. Climate warming reduces the temporal stability of plant community biomass production. *Nature Communications*, 2017, 8(1): 1-7.
- [24] 关振寰, 刘国华, 贺金生. 草地保护技术研究现状及发展趋势的文献分析. *草业科学*, 2020, 37(4): 1-15. GUAN Z H, LIU G H, HE J S. Literature analysis on the research status and development of grassland conservation technology. *Pratacultural Science*, 2020, 37(4): 1-15.
- [25] WU X, WANG Y, SUN S. Long-term fencing decreases plant diversity and soil organic carbon concentration of the Zoige alpine meadows on the eastern Tibetan plateau. *Plant and Soil*, 2019: 1-10.
- [26] 马玉寿, 郎百宁, 李青云, 施建军, 董全民. 江河源区高寒草甸退化草地恢复与重建技术研究. *草业科学*, 2002, 19(9): 1-5. MA Y S, LANG B N, LI Q Y, SHI J J, DONG Q M. Study on rehabilitating and rebuilding technologies for degenerated alpine meadow in the Changjiang and Yellow River source region. *Pratacultural Science*, 2002, 19(9): 1-5.
- [27] 郑翠玲, 曹子龙, 王贤, 赵廷宁, 丁国栋. 围栏封育在呼伦贝尔沙化草地植被恢复中的作用. *中国水土保持科学*, 2005, 3(3): 78-81. ZHENG C L, CAO Z L, WANG X, ZHAO T N, DING G D. Effects of enclosure on vegetations recovery in desertified grassland in Hulunbeir. *Science of Soil and Water Conservation*, 2005, 3(3): 78-81.
- [28] GAO Y, ZENG X Y, SCHUMANN M, CHEN H. Effectiveness of enclosures on restoration of degraded alpine meadow in the eastern Tibetan plateau. *Arid Land Research and Management*, 2011, 25(2): 164-175.
- [29] 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. ZHOU J R, ZHAO X Q. Effects of livestock enclosure and grazing on carbon sequestration in grassland ecosystem. *Pratacultural Science*, 2015, 32(11): 1748-1756.
- [30] 韩丛丛. 围封年限对荒漠草原植物、土壤及微生物化学计量特征的影响. 银川: 宁夏大学硕士学位论文, 2016. HAN C C. Effects of stoichiometry of enclosing life on plant, soil and microorganism in desert steppe. Master Thesis. Yinchuan: Ningxia University, 2016.
- [31] XIONG D P, SHI P L, SUN Y L, WU J H, ZHANG X Z. Effects of grazing exclusion on plant productivity and soil carbon, nitrogen storage in alpine meadows in northern Tibet, China. *Chinese Geographical Science*, 2014, 24(4): 488-498.
- [32] HILLEBRAND H, BENNETT D M, CADOTTE M W. Consequences of dominance: a review of evenness effects on local and regional ecosystem processes. *Ecology*, 2008, 89: 1510-1520.
- [33] SHI X M, LI X G, LI C T, ZHAO Y, SHANG Z H, MA Q F. Grazing exclusion decreases soil organic C storage at an alpine grassland of the Qinghai-Tibetan Plateau. *Ecological Engineering*, 2013, 57: 183-187.
- [34] WANG K B, DENG L, REN Z P, LI J P, SHANGGUAN Z P. Grazing exclusion significantly improves grassland ecosystem C and N pools in a desert steppe of Northwest China. *Catena*, 2016, 137: 441-448.

(责任编辑 王芳)