

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

闫宝龙 王忠武* 屈志强 王 静 韩国栋*

内蒙古农业大学草原与资源环境学院, 呼和浩特 010019

摘 要 草地生态系统是巨大的碳库, 在全球碳循环中起着重要的作用。该研究以内蒙古中温带草地区典型草原和荒漠草原为研究对象, 测定了两种草原类型围封与放牧后地上生物量碳密度、地下生物量碳密度和土壤碳密度, 探讨围封对两种草原类型植被-土壤系统碳密度的影响。结果表明: (1)围封显著地增加了典型草原地上和地下生物量的碳密度, 对荒漠草原地上生物量碳密度增加影响显著, 对地下生物量碳密度增加影响不显著; (2)围封显著地增加了典型草原土壤碳密度, 使荒漠草原土壤碳密度有增加的趋势, 但影响不显著; (3)典型草原围封样地地下生物量和土壤碳密度的垂直分布显著高于放牧样地, 而荒漠草原围封样地地下生物量和土壤碳密度的垂直分布与放牧样地的差异不显著; (4)围封分别提高了典型草原和荒漠草原植被-土壤系统碳密度的2.2倍和1.6倍, 典型草原和荒漠草原分别有超过65%和89%的碳储存在土壤中, 两种草原类型的地下生物量碳库均占总生物量碳库的90%以上。研究结果表明围封能够有效地增加草原生态系统的碳储量。

关键词 围封; 典型草原; 荒漠草原; 碳密度; 垂直分布

闫宝龙, 王忠武, 屈志强, 王静, 韩国栋 (2018). 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, 42, 327–336. DOI: 10.17521/cjpe.2017.0067

Effects of enclosure on carbon density of plant-soil system in typical steppe and desert steppe in Nei Mongol, China

YAN Bao-Long, WANG Zhong-Wu*, QU Zhi-Qiang, WANG Jing, and HAN Guo-Dong*

College of Grassland, Resources and Environment, Inner Mongolia Agricultural University, Huhhot 010019, China

Abstract

Aims As an immense carbon (C) stock, grassland ecosystem plays a crucial role in global C cycling. The objective of this research was to reveal the effects of enclosure on C density of the plant-soil system by comparing the aboveground biomass (AGB), belowground biomass (BGB) and soil C density in enclosure plots with those in grazing plots in the typical steppe (TS) and desert steppe (DS) in Nei Mongol, China.

Methods At each of the 19 study sites, we set up a 100 m × 100 m plot and 5 quadrats (1 m × 1 m) along the diagonal transect within each plot. At each quadrat, AGB was harvested first and then a soil core (0–100 cm depth, 7 cm inner diameter) was taken for BGB and soil C content measurement. Each soil core was divided into 7 depth increments (0–5 cm, 5–10 cm, 10–20 cm, 20–30 cm, 30–50 cm, 50–70 cm, 70–100 cm).

Important findings (1) Enclosure significantly increased C density of AGB and BGB in TS. In DS, enclosure significantly increased C density of AGB, but had no significant effect on the C density of BGB. (2) Enclosure significantly increased soil C density in TS, but had no significant impact in DS although there was an increasing trend. (3) For all increments along the soil profile, enclosure significantly increased BGB and soil C density compared to grazing plots in TS, but this effect was not found in DS. (4) Enclosure increased C density of the plant-soil system by 2.2 and 1.6 times in TS and DS, respectively. 65% and 89% C was stored in soil in TS and DS, respectively, and BGB C stock accounted for more than 90% of total biomass C in both TS and DS. Enclosure is an effective approach to improve C sequestration in grassland ecosystems.

收稿日期Received: 2017-03-19 接受日期Accepted: 2017-10-23

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(XDA05050402-6)、国家重点研发计划(2016YFC0500504)、内蒙古自治区重大科技专项和中国科学院西部之光项目。Supported by the Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences (XDA05050402-6), the National Key Research and Development Project of China (2016YFC0500504), the Science and Technology Projects in Inner Mongolia Autonomous Region and West Light Foundation of Chinese Academy of Sciences.

* 通信作者 Corresponding authors (Han GD, hanguodong@imau.edu.cn; Wang ZW, zhongwuwang1979@163.com)

Key words enclosure; typical steppe; desert steppe; carbon density; vertical distribution

Yan BL, Wang ZW, Qu ZQ, Wang J, Han GD (2018). 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*, 42, 327–336. DOI: 10.17521/cjpe.2017.0067

全球草地面积约占地球陆地表面面积的40% (Wang & Fang, 2009)。草地是地球上广泛分布的生态系统, 在全球碳循环中起着重要的作用(Scurlock *et al.*, 2002)。据估计, 草地生态系统碳库包含超过10%的陆地生态系统生物量碳和10%–30%的全球土壤有机碳(Scurlock & Hall, 1998), 并且以每年0.5 Pg C的速度向土壤中固定碳(Derner *et al.*, 2006)。放牧是草地最主要的利用方式, 放牧过程深刻地影响着植被格局(Bond, 2005)。植被格局的变化不仅改变了草地生态系统的物种组成和结构, 而且改变了碳储量(Grace, 2004)。过度放牧被认为是导致草地退化的一个主要原因(Wilcox, 2007; Zhang *et al.*, 2014), 全球约有35%的退化草地是过度放牧造成的, 在我国过度放牧造成的退化草地面积约占全部退化草地面积的20% (穆少杰等, 2014)。目前, 我国对退化的草地普遍采取围栏封育的植被恢复措施(方精云等, 2010)。

草地生态系统碳库主要包括植被生物量碳库和土壤有机碳库, 植被生物量碳库包括地上和地下生物量碳库(方精云等, 2010)。一般认为, 围栏封育的植被恢复措施有利于提高草地生态系统的生物量(桑永燕等, 2006; Wu *et al.*, 2009), 并增加土壤碳库储量(Welker *et al.*, 2004; Zhao *et al.*, 2005)。然而也有研究表明: 围栏封育降低了草地生态系统碳储量(Frank & Groffman, 1998), 并认为放牧能够促进土壤碳的积累和植物的补偿生长(Reeder & Schuman, 2002)。有的围栏封育实验还证实围封对草地生态系统碳库没有影响(Nosetto *et al.*, 2006; Raiesi & Asadi, 2006; Shrestha & Stahl, 2008)。草地生态系统碳库受到多种因素的影响, 气候条件、生物过程及利用方式等方面的耦合作用共同决定了草地碳储量的变化(穆少杰等, 2014)。降水对围栏封育草地碳库的影响存在阈值, 在600 mm及以下降水量的地区, 围栏封育增加了草地碳储量(Derner & Schuman, 2007)。不同植物群落组成的草地生态系统的碳储量对围栏封育的响应有明显差异(Bakker *et al.*, 2004), 围封后草地生态系统碳储量的变化表现出增加、减少或不变, 其范围在增加 $5.77 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 到减少 $1.65 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 之间(Tanentzap & Coomes, 2011)。因此, 在

不同气候条件和群落组成的环境下, 围栏封育对草地碳库的影响尚有争议。另外, 基于大尺度草原碳储量的估算较多(马文红等, 2006; Piao *et al.*, 2007; Fan *et al.*, 2008; 王建林等, 2009), 而小尺度的固碳机理需进一步阐明(李学斌等, 2014)。

内蒙古草原地处欧亚草原区中部, 是我国北方温带草原的主体, 主要草原类型有草甸草原、典型草原和荒漠草原, 其植被-土壤系统碳储量在我国草地碳平衡中占有重要的地位(朴世龙等, 2004)。侯向阳和丁勇(2014)对内蒙古草原固碳潜力的研究表明, 多年围封有利于草甸草原生态系统的碳固持, 而典型草原和荒漠草原应采取适度的放牧利用措施。因此, 本研究选择锡林郭勒西部草原生态系统的典型草原和荒漠草原为研究对象, 分析两种草原类型在围栏封育和自由放牧的利用方式下, 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, 拟解决两个问题: (1)在不同气候条件和群落组成的环境下, 围封如何影响草地碳库? 是否有一致的规律? (2)围栏恢复过程中, 土壤碳库的分布是如何变化的? 进而探讨典型草原和荒漠草原不同利用方式对草原碳平衡的影响, 为估计不同类型草原生态系统在全球碳收支中源或汇的作用, 确定适合当地的管理措施, 促进草原增汇减排和实现草原生态系统可持续利用提供依据。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

本研究在锡林郭勒西部草原生态系统进行, 包括苏尼特左旗(SZ)、苏尼特右旗(SY)、镶黄旗(XH)和正镶白旗(ZB) 4个行政区域。锡林郭勒西部草原南接阴山北麓, 西临乌兰察布高原, 兼具高原、平原、丘陵和低山等多种地形地貌, 属于大陆性干旱半干旱气候, 具有风大、干旱、寒冷的特点, 年平均气温 $2.4-5.1 \text{ }^{\circ}\text{C}$, 7月份气温最高, 1月份气温最低, 年降水量 $179-353 \text{ mm}$, 降水集中在6–8月份(图1)。

本研究分别选择典型草原与荒漠草原围封和放牧草原为研究对象, 放牧利用属于过度放牧, 禁牧样地围封于2008年, 围封后自然恢复。样地概况见表1。

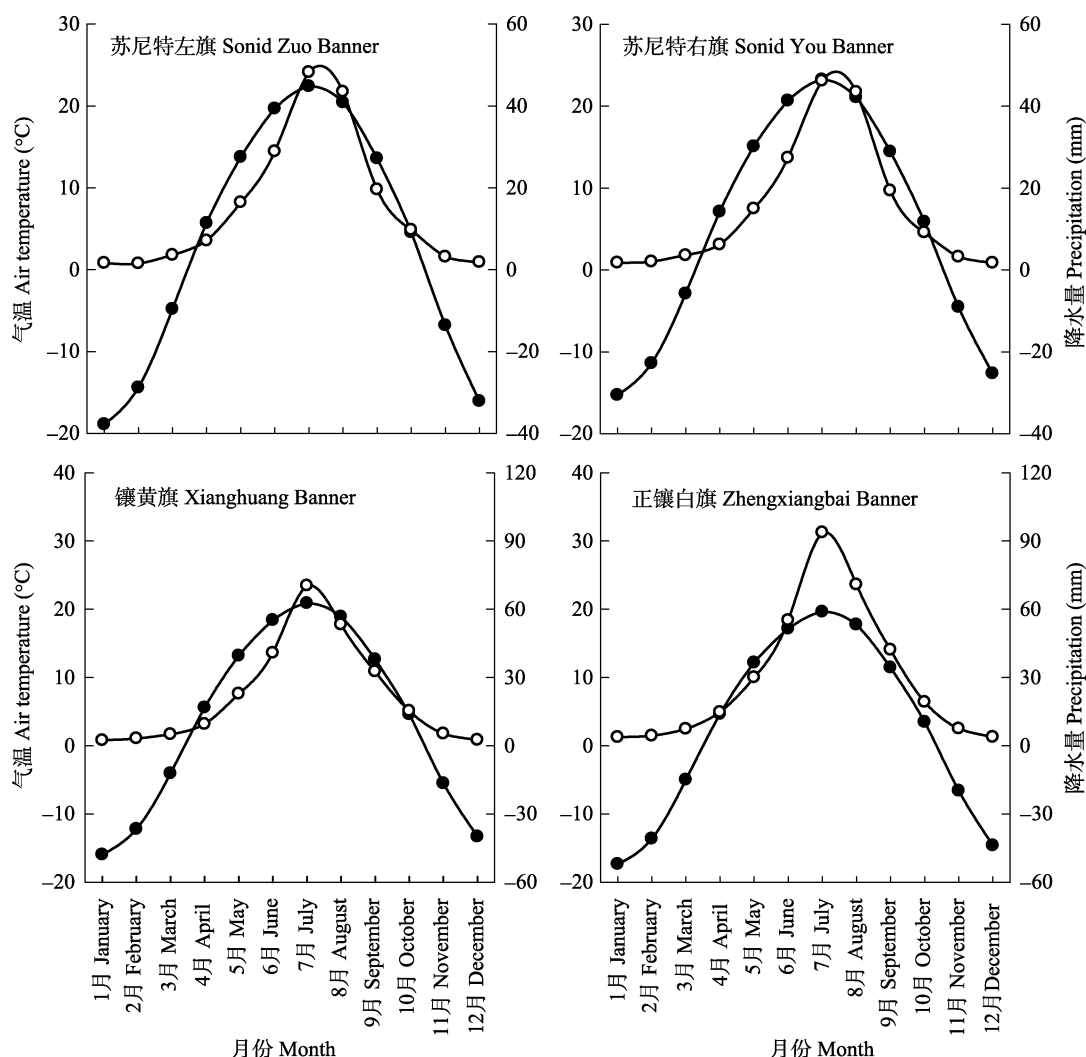


图1 2001–2012年各研究区域平均降水量和平均气温。实点代表气温，空点代表降水量。

Fig. 1 Mean precipitation and air temperature of each study site from 2001 to 2012. Solid dots indicate air temperature, and the empty ones indicate precipitation.

1.2 实验设计

2012年7–9月以草地型为基本单元, 以各草地型的分布面积为依据, 选择具有广泛代表性、地带性的草原类型, 并根据草原利用方式、利用强度、退化沙化程度等设置样地。在每个样地选择100 m × 100 m的区域进行取样调查, 在其对角线上设置一条100 m样线, 在样线上设置5个1 m × 1 m的草本样方。地上生物量采用收获法全部剪取样方植物, 带回实验室65 °C烘干并称质量。

在5个取过地上生物量的样方内将样方土壤表层的残留物和杂质清理干净, 在其四角和中心共5点用内径7 cm的土钻分0–5、5–10、10–20、20–30、30–50、50–70和70–100 cm共7层依次取样。取好的样品按层分装在网袋中并记录样方号, 带回实验室,

用水将植物根系冲洗干净后, 65 °C烘干至恒质量, 称质量并计算单位面积的地下生物量($\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$)。土壤样品取样点设置在地下生物量取样点附近, 取样点数和层次与地下生物量相同, 将样品分层装入自封袋, 带回实验室晾干后, 过2 mm土壤筛并剔除植物残体和根系, 取部分土壤样品用球磨仪全部研磨后, 用元素分析仪测定土壤全碳含量($\text{g} \cdot \text{kg}^{-2}$)。采用环刀法按土壤深度分层取样, 在每个样地设置一个大小为1.5 m × 0.5 m × 1 m (长×宽×深)的取样坑, 清理土壤表面的植物残留物和杂质, 用环刀按照0–5、5–10、10–20、20–30、30–50、50–70和70–100 cm的深度自上而下取样, 每层取5个重复, 做好样方标记带回室内, 105 °C烘干至恒质量, 称质量并计算土壤容重($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)。环刀规格为高度5 cm, 体积100 cm^3 。

表1 研究地点和生态系统特征
Table 1 Study locations and ecosystem characteristics

草原类型 Steppe type	利用方式 Utilization pattern	经度 Longitude (° E)	纬度 Latitude (° N)	海拔 Altitude (m)	行政区域 Administrative division	土壤类型 Soil type	植物群落 Plant community
典型草原 Typical steppe	全年放牧 Year-round grazing	112.43	43.10	1 081	SY	草原风沙土 Grassland sand soil	冷蒿 <i>Artemisia frigida</i>
		113.16	42.12	1 362	SY	淡栗钙土 Light chestnut soil	羊草 <i>Leymus chinensis</i>
		113.84	43.83	1 135	SZ	淡栗钙土 Light chestnut soil	西北针茅+冷蒿 <i>Stipa sareptana</i> var. <i>krylovii</i> + <i>Artemisia frigida</i>
		114.00	42.54	1 196	XH	栗钙土 Chestnut soil	小叶锦鸡儿+大针茅 <i>Caragana microphylla</i> + <i>Stipa grandis</i>
		114.40	42.43	1 258	XH	栗褐土 Cinnamon soil	西北针茅+糙隐子草 <i>Stipa sareptana</i> var. <i>krylovii</i> + <i>Cleistogenes squarrosa</i>
	禁牧 Ungrazing	114.43	42.47	1 216	XH	栗钙土 Chestnut soil	冷蒿 <i>Artemisia frigida</i>
		115.04	42.26	1 397	ZB	栗钙土 Chestnut soil	西北针茅 <i>Stipa sareptana</i> var. <i>krylovii</i>
		115.10	42.60	1 266	ZB	栗褐土 Chestnut soil	西北针茅+冰草 <i>Stipa sareptana</i> var. <i>krylovii</i> + <i>Agropyron cristatum</i>
		115.14	42.31	1 334	ZB	栗钙土 Chestnut soil	西北针茅+小叶锦鸡儿 <i>Stipa sareptana</i> var. <i>krylovii</i> + <i>Caragana microphylla</i>
		115.27	42.38	1 285	ZB	栗钙土 Chestnut soil	西北针茅+冷蒿 <i>Stipa sareptana</i> var. <i>krylovii</i> + <i>Artemisia frigida</i>
		111.35	43.39	1 050	SY	淡栗钙土 Light chestnut soil	小针茅+画眉草 <i>Stipa klemenziei</i> + <i>Eragrostis pilosa</i>
		112.34	43.27	1 016	SY	棕钙土 Brown soil	小针茅+多根葱 <i>Stipa klemenziei</i> + <i>Allium polyrhizum</i>
		112.58	42.95	1 094	SY	淡栗钙土 Light chestnut soil	小针茅+无芒隐子草 <i>Stipa klemenziei</i> + <i>Cleistogenes songorica</i>
		113.37	43.41	1 060	SY	淡栗钙土 Light chestnut soil	小针茅 <i>Stipa klemenziei</i>
		112.66	44.57	1 193	SZ	棕钙土 Brown soil	西北针茅 <i>Stipa sareptana</i> var. <i>krylovii</i>
		113.34	43.95	949	SZ	棕钙土 Brown soil	西北针茅+小叶锦鸡儿 <i>Stipa sareptana</i> var. <i>krylovii</i> + <i>Caragana microphylla</i>
		113.63	43.62	1 096	SZ	淡栗钙土 Light chestnut soil	西北针茅 <i>Stipa sareptana</i> var. <i>krylovii</i>
		113.83	43.50	1 036	SZ	淡栗钙土 Light chestnut soil	西北针茅+狭叶锦鸡儿 <i>Stipa sareptana</i> var. <i>krylovii</i> + <i>Caragana microphylla</i>
	禁牧 Ungrazing	112.74	42.77	1 097	SY	淡栗钙土 Light chestnut soil	西北针茅 <i>Stipa sareptana</i> var. <i>krylovii</i>

SY, 苏尼特右旗; SZ, 苏尼特左旗; XH, 镶黄旗; ZB, 正镶白旗。
SY, Sonid You Banner; SZ, Sonid Zuo Banner; XH, Xianghuang Banner; ZB, Zhengxiangbai Banner.

1.3 碳密度的估算

植被含碳量采用生物量乘以0.45转化为生物量含碳量(Piao *et al.*, 2007)。某土层*i*的土壤碳密度(*SC_i*) ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$)的计算公式(萨茹拉等, 2013)如下:

$$SC_i = C_i \times B_i \times H_i \times 0.1$$

式中, *C_i*为全碳含量($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$), *H_i*为土层厚度(cm), *B_i*为土壤容重($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)。由于5–10 cm土壤深度的土壤碳密度较小, 在计算时将0–5 cm与5–10 cm的土壤碳密度合并为0–10 cm碳密度, 土层厚度大于10 cm时, 取10 cm土层厚度的平均值。

1.4 统计分析

用单因素非平衡实验设计方差分析(GLM)分别

对比典型草原和荒漠草原围封和放牧两种草原利用方式植被-土壤系统的碳密度。运用SAS 9.4统计软件进行数据分析, 并用Duncan检验法进行多重比较 ($p < 0.05$)。用SigmaPlot 12.5软件作图。

2 结果

2.1 围封对植被生物量碳密度的影响

受到水热分配和植物群落组成的影响, 典型草原围封样地和放牧样地的地上生物量碳密度分别高于荒漠草原围封样地和放牧样地的31%和61% (图2A); 典型草原围封样地地上生物量碳密度是放牧样地的3.0倍, 而荒漠草原围封样地地上生物量碳密

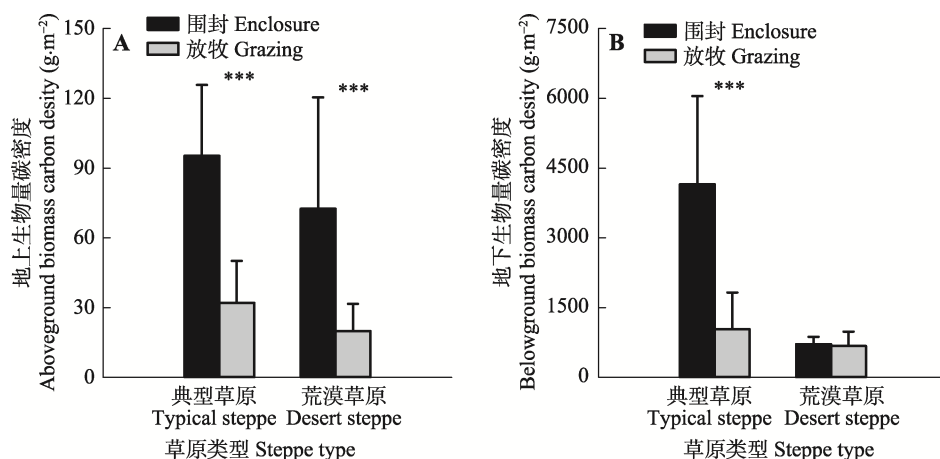


图2 围封与放牧对生物量碳密度的影响(平均值±标准偏差)。A, 地上。B, 地下。***, $p < 0.0001$ 。

Fig. 2 The effects of enclosure and grazing on the carbon density of biomass (mean ± SD). A, Aboveground. B, Belowground. ***, $p < 0.0001$.

度是放牧样地的3.6倍。围封恢复有利于典型草原地下生物量碳积累(图2B), 典型草原围封样地地下生物量碳密度分别是典型草原自由放牧样地和荒漠草原围封样地地下生物量碳密度的4.0倍和5.8倍; 荒漠草原围封恢复与自由放牧相比, 对地下生物量碳密度的提高较低(约6%)。围封恢复对典型草原和荒漠草原生物量分配的影响不同, 在典型草原围封与放牧样地的根冠比分别为43:1和32:1, 围封恢复同时增加了地上和地下的生物量碳储量; 相反, 在荒漠草原(围封样地根冠比10:1、放牧样地根冠比34:1)放牧增加了地下生物量碳储量。

2.2 围封对土壤碳密度的影响

由图3可知, 典型草原围封样地的土壤碳密度($7.9 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$)高于荒漠草原($6.6 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$)约20%, 而放牧样地的土壤碳密度($4.4 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$)却低于荒漠草原(约 $6 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$)约27%; 典型草原围封样地的土壤碳密度显著高于放牧样地(80%), 荒漠草原围封样地的土壤碳密度稍高于放牧样地(1%), 并未达到显著水平。

2.3 围封对地下生物量碳分布的影响

典型草原围封样地1 m内各层地下生物量碳密度($164\text{--}1596 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$)均高于放牧样地($79\text{--}272 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$, $p < 0.05$, 图4A), 并均呈现出逐层递减的趋势, 土壤0–50 cm的地下植被生物量碳储量占总地下生物量碳储量的85%以上。放牧和土层深度及其交互作用均显著地影响典型草原地下植被碳密度(表2)。荒漠草原围封样地1 m内各层地下生物量碳密度为 $36\text{--}183 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$, 放牧样地为 $33\text{--}160 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ (图4B), 没有显著差异($p > 0.05$), 0–50 cm地下生物量碳储量占总地下生物量碳储量的87%, 放牧对荒漠草原地下

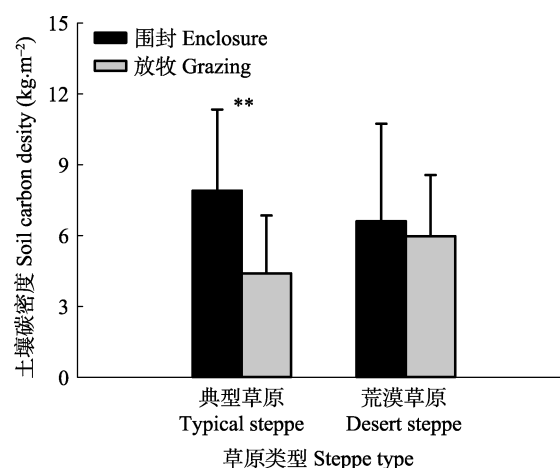


图3 围封与放牧对典型草原和荒漠草原土壤碳密度的影响(平均值±标准偏差)。**, $p < 0.01$ 。

Fig. 3 The effects of enclosure and grazing on soil carbon density in the typical and desert steppes (mean ± SD). **, $p < 0.01$.

生物量碳密度有显著影响(表2)。

2.4 围封对土壤碳分布的影响

典型草原围封样地1 m内各层土壤碳密度均高于放牧样地($p < 0.05$, 图5A), 放牧样地土壤碳密度随土壤深度逐层增加, 而围封样地表层0–10 cm土壤碳密度最低($0.44 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$), 10–100 cm碳密度逐层递减。放牧和土层深度对土壤碳密度影响显著, 但二者的交互作用对碳密度没有显著影响(表2)。荒漠草原围封样地和放牧样地各土层土壤碳密度无显著差异($p > 0.05$, 图5B), 放牧样地土壤碳密度逐层增加, 而围封样地土壤碳密度在70–100 cm土壤深层下降。土层深度显著地影响荒漠草原土壤碳密度, 而放牧、放牧与土层深度的交互作用对土壤碳密度没有显著影响(表2)。

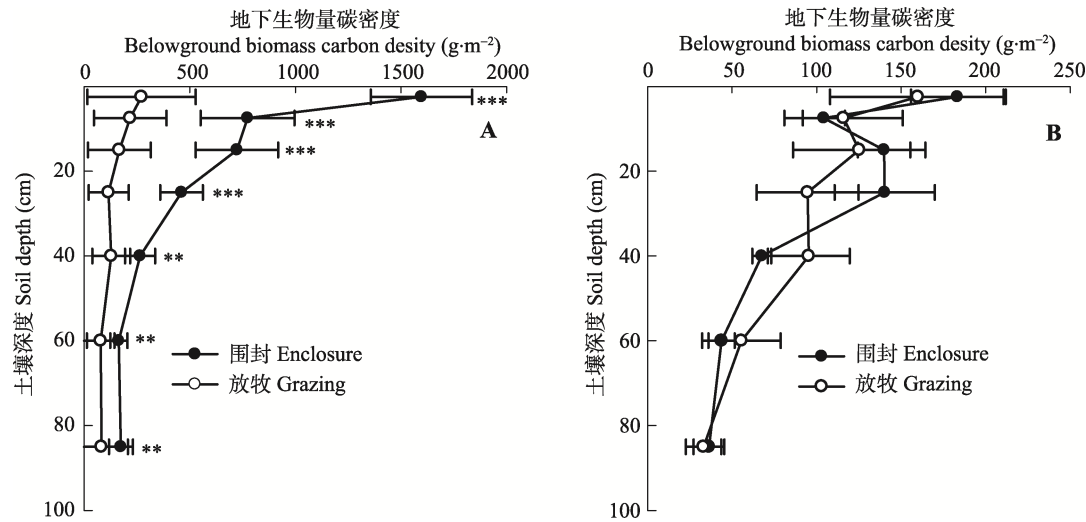


图4 围封与放牧对地下生物量碳密度垂直分布的影响(平均值±标准偏差)。A, 典型草原。B, 荒漠草原。***, $p < 0.000\ 1$; **, $p < 0.01$ 。

Fig. 4 The effects of enclosure and grazing on the vertical distribution of belowground biomass carbon density (mean \pm SD). A, Typical steppe. B, Desert steppe. ***, $p < 0.000\ 1$; **, $p < 0.01$.

表2 放牧与土壤深度的交互作用对地下碳密度的影响

Table 2 The effects of interaction between grazing and soil depth on belowground carbon density

影响因子 Impact factor	典型草原 Typical steppe				荒漠草原 Desert steppe			
	地下生物量碳密度 Belowground biomass carbon density ($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$)		土壤碳密度 Soil carbon density ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$)		地下生物量碳密度 Belowground biomass carbon density ($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$)		土壤碳密度 Soil carbon density ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$)	
	<i>F</i>	<i>p</i>	<i>F</i>	<i>p</i>	<i>F</i>	<i>p</i>	<i>F</i>	<i>p</i>
放牧利用 Grazing	164.48	<0.000 1	126.39	<0.000 1	33.82	<0.000 1	0.04	0.832 7
土层深度 Soil depth	40.31	<0.000 1	6.88	<0.000 1	0.20	0.655 6	9.86	<0.000 1
放牧利用×土层深度 Grazing \times Soil depth	22.41	<0.000 1	1.95	0.086 1	1.05	0.393 4	0.59	0.711 2

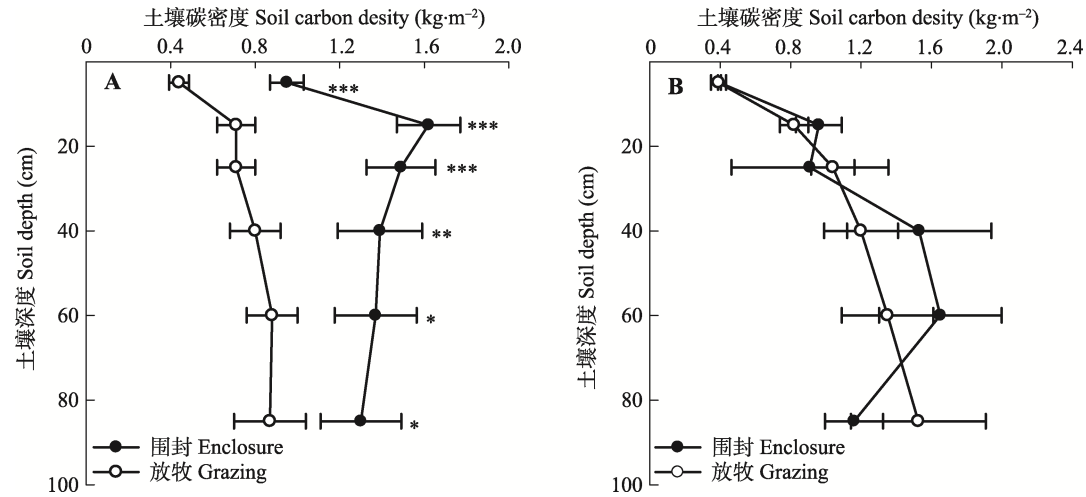


图5 围封与放牧对土壤碳密度垂直分布的影响(平均值±标准偏差)。A, 典型草原。B, 荒漠草原。***, $p < 0.000\ 1$; **, $p < 0.01$; *, $p < 0.05$ 。

Fig. 5 The effects of enclosure and grazing on the vertical distribution of soil carbon density (mean \pm SD). A, Typical steppe. B, Desert steppe. ***, $p < 0.000\ 1$; **, $p < 0.01$; *, $p < 0.05$.

2.5 围封对生态系统碳密度的影响

典型草原生态系统围封样地的碳密度($12\ 152\ \text{g}\cdot\text{m}^{-2}$)是荒漠草原围封样地($7\ 398\ \text{g}\cdot\text{m}^{-2}$)的1.6倍,

是典型草原放牧样地($5\ 475\ \text{g}\cdot\text{m}^{-2}$)的2.2倍(图2, 图3), 荒漠草原围封样地碳密度是放牧样地($6\ 673\ \text{g}\cdot\text{m}^{-2}$)的1.8倍。草原生态系统碳库中土壤碳库所占

比例最大, 典型草原围封和放牧样地土壤碳库占其生态系统碳库的65%和80%, 荒漠草原围封和放牧样地土壤碳库占其生态系统碳库的89%和90%。典型草原和荒漠草原地下生物量碳分别占总植被生物量碳的97%–98%和90%–97% (图2, 图3)。

3 讨论

3.1 围封对草原生态系统生物量碳库的影响

在典型草原和荒漠草原, 围封禁止家畜对草本植物的采食, 增加了地上生物量碳储量。同时, 土壤湿度的改善有利于植物生产力的提高(Wu *et al.*, 2010)。围封还增加了植被的盖度并降低了风的侵蚀, 有利于有机物的存留(Zhou *et al.*, 2011)。典型草原围封样地地上生物量碳密度($95 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$)介于围封恢复11–14年之间(敖伊敏等, 2011), 而荒漠草原围封样地地上生物量碳密度($73 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$)高于刘朋涛等(2014)的研究结果($< 35 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$), 这说明地上生物量碳库的变化可能与围封时间有关。本研究典型草原放牧样地地上生物量碳密度为 $32 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$, 低于萨茹拉等(2013)典型草原重度放牧的 $43 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 及闫玉春和唐海萍(2008)持续放牧的 $85 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 。这可能是由于两方面原因导致了研究结果的差异: (1)降水是影响草原植被生产力的最主要的气候因子(Bai *et al.*, 2004), 本研究区域地处锡林郭勒草原西部典型草原与荒漠草原的过渡地带, 降水量是典型草原分布的下限, 从而导致地上生物量与其他研究相比较低, 也可能是不同研究年份间降水波动对地上生物量的影响而导致的差异; (2)家畜通过采食地上植物而改变地上生物量(阿穆拉等, 2011), 不同研究区域的载畜率水平可能导致了地上生物量的差异。荒漠草原放牧样地地上生物量碳密度约为 $20 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$, 与该区域同类型草原的研究结果(胡向敏等, 2014; 刘朋涛等, 2014)相近。

典型草原围封样地地下生物量碳密度显著高于放牧样地, 而荒漠草原围封对地下生物量碳密度的影响较小。这与Derner等(2006)在北美草原的研究结果一致, Derner等(2006)认为植物种类组成、细根比例和生物量以及根冠比等是引起不同草地类型地下生物量碳库对放牧响应差异的原因。本研究典型草原地下生物量碳密度的垂直分布在不同土层深度中围封样地均大于放牧样地, 说明放牧中家畜的过度采食导致植物光合器官比例下降, 影响了植物的正

常生长(李怡和韩国栋, 2011), 改变了植物群落资源分配策略(任海彦等, 2009)。荒漠草原地下生物量碳密度垂直分布对围封和放牧的响应比较复杂, 但是围封样地的根冠比小于放牧样地说明在水分是限制因子的环境中放牧促进了根系的生长(Burke *et al.*, 1998)。

3.2 围封对草原生态系统土壤碳库的影响

在两种草原类型中, 围封均增加了土壤碳储量, 这与多数研究结果(Mekuria *et al.*, 2007; 许中旗等, 2009)一致。Hu等(2015)认为有3个机制可以解释此结果: (1)植被的覆盖物增加了有机物的积累; (2)植物高度和盖度的增加与土壤湿度形成正反馈调节; (3)稠密的冠层和凋落物减少了碳的流失。典型草原围封样地各土层深度土壤碳密度均显著高于放牧样地, 这可能是受围封样地较高的凋落物量的影响(图6)。荒漠草原围封样地与放牧样地的土壤碳密度没有表现出明显的差异($p > 0.05$), 并且在两种利用方式的样地中均未收集到凋落物, 可能是荒漠草原草层低矮、稀疏、种类组成匮乏的植被特征(韩国栋等, 2007)导致凋落物的积累缓慢。此外, 历史的放牧效应也可能对荒漠草原土壤碳库的影响具有滞后作用(Steffens *et al.*, 2008)。

土壤碳库由土壤有机碳库和土壤无机碳库两部分组成(余健等, 2014)。本研究利用土壤全碳计算土壤碳储量的结果表明: 两种草原类型土壤表层(0–10 cm)的土壤碳密度均最低, 放牧样地均表现出逐层递增的趋势。本研究结果与以有机碳计算碳储量随土层深度递减的研究(刘楠和张英俊, 2010)结

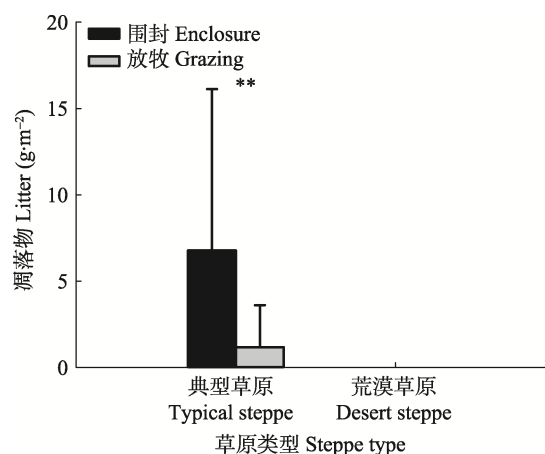


图6 围封与放牧对典型草原和荒漠草原凋落物的影响(平均值±标准偏差)。**, $p < 0.01$ 。

Fig. 6 The effects of enclosure and grazing on litter mass in the typical and desert steppes (mean \pm SD). **, $p < 0.01$.

论相反,可能是因为土壤无机碳含量随着土层深度增加而递增,并且在干旱、半干旱地区土壤无机碳库高出有机碳库的2–10倍(余健等, 2014)。刘淑丽等(2014)的研究表明:温性草原50–100 cm土层深度的无机碳储量占0–100 cm土层深度的土壤碳总储量的60.2%,并且与地下生物量呈显著负相关关系。土壤无机碳的垂直分布受到水分迁移的影响,土壤溶液在向下淋溶迁移无机碳的过程中,CO₂溶解度随温度的下降而逐渐降低,使得溶液中无机碳析出形成发生性碳酸盐,并不断在深层土壤中富集(张蓓蓓等, 2016)。

4 结论

围封对典型草原生态系统碳库的增加高于荒漠草原。围封后典型草原和荒漠草原的地上生物量碳密度均比放牧提高3倍以上。与放牧样地相比,典型草原围封样地地下生物量碳密度和土壤碳密度分别提高了208%和80%,围封对荒漠草原地下生物量碳库影响不明显,土壤碳密度仅提高1%。从土壤碳库的垂直分布来看,典型草原围封样地1 m以内各层土壤碳密度均高于放牧样地,放牧使典型草原和荒漠草原土壤碳库随着土壤深度的加深呈增加的趋势。综上所述,围封是一种增加草原生态系统碳库的有效方式,并且湿润的气候比干旱的气候更有利于碳的积累。

致谢 内蒙古农业大学优秀青年科学基金(2014-XYQ-7)支持,特此致谢。

参考文献

- Amula, Zhao ML, Han GD, Jia L, Dong T (2011). Influences of grazing intensity on carbon and nitrogen contents in desert steppe. *Chinese Journal of Grassland*, 33, 115–118. [阿穆拉, 赵萌莉, 韩国栋, 贾乐, 董亭 (2011). 放牧强度对荒漠草原地区土壤有机碳及全氮含量的影响. 中国草地学报, 33, 115–118.]
- Ao YM, Jiao Y, Xu Z (2011). The changes of carbon and nitrogen storage of plant-soil system of enclosure years in typical steppe. *Ecology and Environmental Sciences*, 20, 1403–1410. [敖伊敏, 焦燕, 徐柱 (2011). 典型草原不同围封年限植被-土壤系统碳氮贮量的变化. 生态环境学报, 20, 1403–1410.]
- Bai Y, Han X, Wu J, Chen Z, Li L (2004). Ecosystem stability and compensatory effects in the Inner Mongolia grassland. *Nature*, 431, 181–184.
- Bakker ES, Olff H, Boekhoff M, Gleichman JM, Berendse F

- (2004). Impact of herbivores on nitrogen cycling: Contrasting effects of small and large species. *Oecologia*, 138, 91–101.
- Bond WJ (2005). Large parts of the world are brown or black: A different view on the “Green World” hypothesis. *Journal of Vegetation Science*, 16, 261–266.
- Burke IC, Lauenroth WK, Vinton MA, Hook PB, Kelly RH, Epstein HE, Aguiar MR, Robles MD, Aguilera MO, Murphy KL (1998). Plant-soil interactions in temperate grasslands. *Biogeochemistry*, 42, 121–143.
- Derner JD, Boutton TW, Briske DD (2006). Grazing and ecosystem carbon storage in the North American Great Plains. *Plant and Soil*, 280, 77–90.
- Derner JD, Schuman GE (2007). Carbon sequestration and rangelands: A synthesis of land management and precipitation effects. *Journal of Soil & Water Conservation*, 62, 77–85.
- Fan J, Zhong H, Harris W, Yu G, Wang S, Hu Z, Yue Y (2008). Carbon storage in the grasslands of China based on field measurements of above- and below-ground biomass. *Climatic Change*, 86, 375–396.
- Fang JY, Yang YH, Ma WH, Mohhamot A, Shen HH (2010). Carbon pool and its variation of grassland ecosystem in China. *Chinese Science: Life Sciences*, 40, 566–576. (in Chinese) [方精云, 杨元合, 马文红, 安尼瓦尔·买买提, 沈海花 (2010). 中国草地生态系统碳库及其变化. 中国科学: 生命科学, 40, 566–576.]
- Frank DA, Groffman PM (1998). Ungulate vs. landscape control of soil C and N processes in grasslands of Yellowstone National Park. *Ecology*, 79, 2229–2241.
- Grace J (2004). Presidential address: Understanding and managing the global carbon cycle. *Journal of Ecology*, 92, 189–202.
- Han GD, Jiao SY, Biligetu, Aodenggaowa (2007). Effects of plant species diversity and productivity under different stocking rates in the *Stipa breviflora* Griseb. desert steppe. *Acta Ecologica Sinica*, 27, 182–188. [韩国栋, 焦树英, 毕力格图, 敖登高娃 (2007). 短花针茅草原不同载畜率对植物多样性和草地生产力的影响. 生态学报, 27, 182–188.]
- Hu Z, Li S, Guo Q, Niu S, He N, Li L, Yu G (2015). A synthesis of the effect of grazing exclusion on carbon dynamics in grasslands in China. *Global Change Biology*, 22, 1385.
- Hu XM, Hou XY, Ding Y, Chen HJ, Yun XJ, Wu ZN (2014). Dynamics of organic carbon storage in *Stipa breviflora* desert steppe ecosystem under different grazing systems. *Chinese Journal of Grassland*, 36, 13–17. [胡向敏, 侯向阳, 丁勇, 陈海军, 运向军, 武自念 (2014). 不同放牧制度下短花针茅荒漠草原生态系统碳储量动态. 中国草地学报, 36, 13–17.]
- Hou XY, Ding Y (2014). *Carbon Sequestration Potential of Different Protection and Construction Technology in the*

- Main Types of Grasslands in Inner Mongolia*. Science Press, Beijing. (in Chinese) [侯向阳, 丁勇 (2014). 内蒙古主要草原类型区保护建设技术固碳潜力研究. 科学出版社, 北京.]
- Li XB, Fan RX, Liu XD (2014). Advance in studies on carbon storage and carbon process in grassland ecosystem of China. *Ecology and Environmental Sciences*, 11, 1845–1851. [李学斌, 樊瑞霞, 刘学东 (2014). 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, 11, 1845–1851.]
- Li Y, Han GD (2011). Effects of different grazing intensities on the under ground biomass and its vertical distribution of the typical *Stipa grandis* steppe. *Journal of Inner Mongolia Agricultural University*, 32, 89–92. [李怡, 韩国栋 (2011). 放牧强度对内蒙古大针茅典型草原地下生物量及其垂直分布的影响. 内蒙古农业大学学报(自然科学版), 32, 89–92.]
- Liu N, Zhang YJ (2010). Effects of grazing on soil organic carbon and total nitrogen in typical steppe. *Pratacultural Science*, 27(4), 11–14. [刘楠, 张英俊 (2010). 放牧对典型草原土壤有机碳及全氮的影响. 草业科学, 27(4), 11–14.]
- Liu PT, Yang TT, Yao GZ, Li P, Wu H, He J (2014). Change of carbon density in desert steppe under different grazing intensities. *Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition)*, 42, 157–162. [刘朋涛, 杨婷婷, 姚国征, 李鹏, 吴昊, 贺晶 (2014). 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(自然科学版), 42, 157–162.]
- Liu SL, Lin L, Guo XW, Li J, Ouyang JZ, Du YG, Zhang FW, Li YK, Cao GM (2014). The variation feature of soil inorganic carbon storage in alpine grassland in Qinghai Province. *Acta Ecologica Sinica*, 34, 5953–5961. [刘淑丽, 林丽, 郭小伟, 李婧, 欧阳经政, 杜岩功, 张法伟, 李以康, 曹广民 (2014). 青海省高寒草地土壤无机碳储量空间分异特征. 生态学报, 34, 5953–5961.]
- Ma WH, Han M, Lin X, Ren YL, Wang ZH, Fang JY (2006). Carbon storage in vegetation of grasslands in Inner Mongolia. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 20, 192–195. [马文红, 韩梅, 林鑫, 任艳林, 王志恒, 方精云 (2006). 内蒙古温带草地植被的碳储量. 干旱区资源与环境, 20, 192–195.]
- Mekuria W, Veldkamp E, Haile M, Nyssen J, Muys B, Gebrehiwot K (2007). Effectiveness of exclosures to restore degraded soils as a result of overgrazing in Tigray, Ethiopia. *Journal of Arid Environments*, 69, 270–284.
- Mu SJ, Zhou KX, Chen YZ, Sun JM, Li JL (2014). Research progress on the carbon cycle and impact factors of grassland ecosystem. *Acta Agrestia Sinica*, 22, 439–447. [穆少杰, 周可新, 陈奕兆, 孙成明, 李建龙 (2014). 草地生态系统碳循环及其影响因素研究进展. 草地学报, 22, 439–447.]
- Nosetto MD, Jobbagy EG, Paruelo JM (2006). Carbon sequestration in semi-arid rangelands: Comparison of *Pinus ponderosa* plantations and grazing exclusion in NW Patagonia. *Journal of Arid Environments*, 67, 142–156.
- Piao SL, Fang JY, He JS, Xiao Y (2004). Spatial distribution of grassland biomass in China. *Acta Phytocologica Sinica*, 28, 491–498. [朴世龙, 方精云, 贺金生, 肖玉 (2004). 中国草地植被生物量及其空间分布格局. 植物生态学报, 28, 491–498.]
- Piao S, Fang J, Zhou L, Tan K, Tao S (2007). Changes in biomass carbon stocks in China's grasslands between 1982 and 1999. *Global Biogeochemical Cycles*, 21, 1–10.
- Raiesi F, Asadi E (2006). Soil microbial activity and litter turnover in native grazed and ungrazed rangelands in a semiarid ecosystem. *Biology and Fertility of Soils*, 43, 76–82.
- Reeder JD, Schuman GE (2002). Influence of livestock grazing on C sequestration in semi-arid mixed-grass and short-grass rangelands. *Environmental Pollution*, 116, 457–463.
- Ren HY, Zheng SX, Bai YF (2009). Effects of grazing on foliage biomass allocation of grassland communities in Xilin River Basin, Inner Mongolia. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 33, 1065–1074. [任海彦, 郑淑霞, 白永飞 (2009). 放牧对内蒙古锡林河流域草地群落植物茎叶生物量资源分配的影响. 植物生态学报, 33, 1065–1074.]
- Sarula, Hou XY, Li JX, Ding Y, Wu XY, Yun XJ (2013). Organic carbon storage in vegetation-soil systems of typical grazing degraded steppe. *Acta Agrestia Sinica*, 22(5), 18–26. [萨茹拉, 侯向阳, 李金祥, 丁勇, 吴新宏, 运向军 (2013). 不同放牧退化程度典型草原植被—土壤系统的有机碳储量. 草业学报, 22(5), 18–26.]
- Sang YY, Ni HC, Qu HL (2006). Surveying biomass of degraded grassland for forbidden grazing and enclosing after three years. *Qinghai Prataculture*, 15(3), 7–9. [桑永燕, 宁洪才, 屈海林 (2006). 禁牧封育3年后退化草地生物量测定. 青海草业, 15(3), 7–9.]
- Scurlock JMO, Hall DO (1998). The global carbon sink: A grassland perspective. *Global Change Biology*, 4, 229–233.
- Scurlock JMO, Johnson K, Olson RJ (2002). Estimating net primary productivity from grassland biomass dynamics measurements. *Global Change Biology*, 8, 736–753.
- Shrestha G, Stahl P (2008). Carbon accumulation and storage in semi-arid sagebrush steppe: Effects of long-term grazing exclusion. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 125, 173–181.
- Steffens M, Kölbl A, Kai UT, Kögel-Knabner I (2008). Grazing effects on soil chemical and physical properties in a semi-arid steppe of Inner Mongolia (P. R. China). *Geoderma*, 143, 63–72.
- Tanentzap AJ, Coomes DA (2011). Carbon storage in terrestrial ecosystems: Do browsing and grazing herbivores matter?

- Biological Reviews of the Cambridge Philosophical Society*, 87, 72–94.
- Wang JL, Chang TY, Li P, Cheng HH, Fang HL (2009). The vegetation carbon reserve and its spatial distribution configuration of grassland ecosystem in Tibet. *Acta Ecologica Sinica*, 29, 931–938. [王建林, 常天军, 李鹏, 成海宏, 方华丽 (2009). 西藏草地生态系统植被碳贮量及其空间分布格局. 生态学报, 29, 931–938.]
- Wang W, Fang JY (2009). Soil respiration and human effects on global grasslands. *Global & Planetary Change*, 67, 20–28.
- Welker JM, Fahnestock JT, Povirk KL, Bilbrough CJ, Piper RE (2004). Alpine Grassland CO₂ exchange and nitrogen cycling: Grazing history effects, medicine bow range, Wyoming, U.S.A. *Arctic Antarctic & Alpine Research*, 36, 11–20.
- Wilcox BP (2007). Does rangeland degradation have implications for global streamflow? *Hydrological Processes*, 21, 2961–2964.
- Wu GL, Du GZ, Liu ZH, Thirgood S (2009). Effect of fencing and grazing on a *Kobresia*-dominated meadow in the Qinghai-Tibetan Plateau. *Plant and Soil*, 319, 115–126.
- Wu GL, Liu ZH, Zhang L, Chen JM, Hu TM (2010). Long-term fencing improved soil properties and soil organic carbon storage in an alpine swamp meadow of western China. *Plant and Soil*, 332, 331–337.
- Xu ZQ, Li WH, Xu Q, Min QW, Wang YS, Wu XB (2009). The impacts of human disturbances on soil carbon density and ecosystem storage of carbon of typical steppe. *Journal of Natural Resources*, 2, 621–629. [许中旗, 李文华, 许晴, 闵庆文, 王英舜, 吴雪宾 (2009). 人为干扰对典型草原土壤碳密度及生态系统碳贮量的影响. 自然资源学报, 2, 621–629.]
- Yan YC, Tang HP (2008). Restoration of degraded grassland communities and its contribution to carbon sequestration under enclosure in typical steppe of Inner Mongolia. *Progress in Natural Science*, 18, 546–551. (in Chinese) [闫玉春, 唐海萍 (2008). 围封下内蒙古典型草原区退化草原群落的恢复及其对碳截存的贡献. 自然科学进展, 18, 546–551.]
- Yu J, Fang L, Bian ZF, Wang Q, Yu YC (2014). A review of the composition of soil carbon pool. *Acta Ecologica Sinica*, 34, 4829–4838. [余健, 房莉, 卞正富, 汪青, 俞元春 (2014). 土壤碳库构成研究进展. 生态学报, 34, 4829–4838.]
- Zhang BB, Liu F, Ding JZ, Fang K, Yang GB, Liu L, Chen YL, Li F, Yang YH (2016). Soil inorganic carbon stock in alpine grasslands on the Qinghai-Xizang Plateau: An updated evaluation using deep cores. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 40, 93–101. [张蓓蓓, 刘芳, 丁金枝, 房凯, 杨贵彪, 刘莉, 陈永亮, 李飞, 杨元合 (2016). 青藏高原高寒草地3米深度土壤无机碳库及分布特征. 植物生态学报, 40, 93–101.]
- Zhang J, Zhang L, Liu W, Yue QI, Xiao WO (2014). Live-stock-carrying capacity and overgrazing status of alpine grassland in the Three-River Headwaters region, China. *Journal of Geographical Sciences*, 24, 303–312.
- Zhao HL, Zhao XY, Zhou RL, Zhang TH, Drake S (2005). Desertification processes due to heavy grazing in sandy rangeland, Inner Mongolia. *Journal of Arid Environments*, 62, 309–319.
- Zhou ZY, Li FR, Chen SK, Zhang HR, Li G (2011). Dynamics of vegetation and soil carbon and nitrogen accumulation over 26 years under controlled grazing in a desert shrubland. *Plant and Soil*, 341, 257–268.

责任编委: 黄建辉 责任编辑: 王 葳



扫码加入读者圈
听语音, 看问答