

春季休牧对内蒙古羊草草原有机碳储量的影响

李玉洁^{1,2}, 宋晓龙¹, 修伟明¹, 张贵龙¹, 刘红梅¹, 赵建宁¹, 杨殿林^{1,2*}

(1. 农业部环境保护科研监测所, 天津 300191; 2. 沈阳农业大学园艺学院, 沈阳 110866)

摘要:为了揭示休牧对羊草草原有机碳储量的影响,以休牧3年(RG3a)、6年(RG6a)和9年(RG9a)的羊草草原为对象,采用重铬酸-浓硫酸外加热法,研究了不同休牧年限草原植物群落和土壤的有机碳储量变化。结果表明,地上植被生物量、凋落物量和根系生物量随着休牧年限的延长而逐渐增加。与长期自由放牧草地相比,植物群落和土壤有机碳储量均随休牧年限的延长而增多。长期自由放牧草地(RG0)、休牧3年、休牧6年和休牧9年植物群落地上部有机碳储量为65.17~98.69 gC·m⁻²,地表凋落物有机碳储量为3.07~10.84 gC·m⁻²;植物群落0~100 cm地下根系有机碳储量为397.13~1 480.28 gC·m⁻²,0~100 cm土壤有机碳储量为28 306.39~38 372.46 gC·m⁻²。从固碳成本角度,总固碳成本随着休牧年限的延长而增加,最高为8 710.20元·hm⁻²,固碳成本分别为0.09、0.11、0.08元·kg⁻¹C。从现有数据显示,休牧9年的固碳量最高,固碳成本最低。春季休牧可以使草地植被得到有效的恢复与更新,有利于草地的可持续利用;随休牧年限的增加,草地有机碳储量增加,固碳成本基本呈现降低趋势。因此,综合现有指标的测定数据,春季休牧是一个非常好的草地利用措施,在休牧过程中草地是一个碳汇,应该鼓励持续进行。

关键词:休牧;羊草草原;有机碳密度;有机碳储量;固碳效益

中图分类号:S153.6 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2013)11-2221-10 doi:10.11654/jaes.2013.11.017

Effects of Spring Rest Grazing on Organic Carbon Storage in *Leymus Chinensis* Steppe in Inner Mongolia, China

LI Yu-jie^{1,2}, SONG Xiao-long¹, XIU Wei-ming¹, ZHANG Gui-long¹, LIU Hong-mei¹, ZHAO Jian-ning¹, YANG Dian-lin^{1,2*}

(1.Environmental Protection and Monitoring Institute, Ministry of Agriculture, Tianjing 300191, China; 2.College of Horticulture, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China)

Abstract: Rest grazing is an important means to maintain the sustainability of grassland ecosystems. To evaluate the potential effects of rest grazing on organic carbon storage in the *Leymus chinensis* Steppe, organic carbon storage in plant and soil was compared in the steppes with different rest grazing durations (3 years—RG3a, 6 years—RG6a, and 9 years—RG9a) using long-period free choice grazing (RG0) as the control. Compared with long-period free choice grazing, biomass of aboveground, litter and underground parts of plants, and organic carbon storages in plant communities and soils increased with increased rest grazing durations. Total cost of carbon sequestration increased as years of rest grazing increased, with up to 8 710.20 Yuan (RMB)·hm⁻², while the unit cost reduced. Considering the growth characteristics of grassland plants, the spring season should be free of grazing. Timely rest grazing could restore and renew grassland vegetation.

Keywords: rest grazing; *Leymus chinensis* Steppe; organic carbon density; organic carbon storage; carbon sequestration benefits

羊草(*Leymus chinensis*)草原是分布于欧亚温带草原区东部的一种典型草原,在我国集中分布于内蒙古东部和东北地区,总面积约为0.42×10⁸ hm²[1]。近年来,由于全球性的气候干旱、牧区人口增加、草原人为

活动破坏和长期不合理的利用制度,草原退化严重,休牧是草地生态系统平衡的重要手段,对修复草地生态系统,实现天然草地的可持续利用具有重要意义。

休牧是在一年内一定时期对草原实行短期禁止放牧利用的措施,是退化草地恢复的重要途径之一[2]。休牧主要有春季牧草返青期休牧和秋季牧草结实期休牧两种。在呼伦贝尔草原,主要指春季牧草返青期休牧,即每年3月20至6月20日草原禁止放牧,利用生态系统的自我修复能力,实现草原植被自然恢

收稿日期:2013-05-07

基金项目:国家自然科学基金项目(31170435和31000242);“十二五”农村领域国家科技计划课题(2012BAD13B07)

作者简介:李玉洁(1986—),在读硕士,研究方向为草地生态恢复建设与保护研究。E-mail:yjli86@163.com

*通信作者:杨殿林 E-mail:yangdianlin@caas.cn

复。其主要目的是使天然草场得到休养生息,实现草地资源的可持续利用。

我国政府于2003年始开展在牧区实施草地休牧制度。截至2011年^[3],全国草原禁牧休牧面积 $5.62 \times 10^7 \text{ hm}^2$,其中休牧面积 $2.85 \times 10^7 \text{ hm}^2$ 。2003年以来,呼伦贝尔草原休牧面积达到 $3.30 \times 10^6 \text{ hm}^2$ 。随着草原休牧工程的深入,国内外研究者从土壤养分、植物群落变化特征、水分特征、菌根(AM)真菌、土壤微生物、土壤理化性质及磷酸酶活性的动态变化等方面对休牧的响应进行了研究,获得了许多规律性的认识^[4-11],但关于休牧对草地土壤-植被系统有机碳储量的影响研究还不多见。本研究的目的主要是以长期自由放牧草地为对照,评价休牧对内蒙古羊草草原有机碳储量的影响,为制定草地补偿政策提供参考和依据。

土壤有机碳主要来源于枯落物和根系分解所产生的有机质^[12],地上枯落物、植物地上地下物质分配、根系深度和根生物量的变化会对土壤有机碳输入的模式、速度、质量和数量产生一定的影响^[13]。大量实验结果表明:长期过度放牧将显著降低土壤碳氮储量^[14-17],适度利用草原可提高草地土壤碳储量^[18-20],通过有效的草地管理可以增加草地生态系统有机碳储量^[21],且成本较低^[22-23]。从增加碳固持潜力角度而言,采取合理的草地恢复措施,退化草地具有更大的固碳潜力^[24-26]。

本试验通过对呼伦贝尔羊草草原放牧样地与不同年限休牧样地地上生物量、地表凋落物、0~100 cm根系和土壤的有机碳含量及土壤有机碳密度的对比分析,探讨休牧不同年限对羊草草原草地土壤-植被系统有机碳储量的影响,研究草原有机碳储量对休牧的响应,有助于了解草原生态系统碳过程,探索缓解气候变化的可行措施,为制定合理的草地管理对策提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

研究区域(119°39'~120°19' E, 48°48'~49°4' N)位于内蒙古呼伦贝尔市鄂温克旗境内,平均海拔高度800~1000 m。年平均气温在-2.4~-2.2℃之间,年平均

降水量为350 mm左右,年蒸发量1478.8 mm, $\geq 0^\circ\text{C}$ 年积温2567.5℃,年均风速 $4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,其中年 $\geq 8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 风速日数107.5 d,年大风日数24.4 d,全年无霜期平均100~120 d,属北中温带大陆性季风气候。土壤为暗栗钙土。植被类型为羊草典型草原。常见种有大针茅(*Stipa grandis*)、冰草(*Agropyron cristatum*)、斜茎黄芪(*Astragalus dsurgens*)、麻花头(*Serratula yamatsutanna*)和草地早熟禾(*Poa pratensis*)等。样地设置见表1。

1.2 试验设计与方法

在羊草草原的典型地段,选择连续休牧(Rest grazing, RG)3年(RG3a)、6年(RG6a)和9年(RG9a)的试验样地各3处,以围栏外的长年自由放牧草地作对照。放牧家畜为呼伦贝尔肉用羊。

2011年8月,在每一个监测样地中,沿等高线方向,选择植被典型、地势开阔平坦的地段,按100 m间隔,随机布设10个1 m×1 m的标准调查样方。用收获法测定地表群落植物和凋落物现存量,并留样品测定有机碳含量。采用25 cm×25 cm壕沟法,按0~10、10~20、20~30、30~40、40~100 cm取样,3次重复,测定群落地下生物量和有机碳含量。

选第1、5、10号已剪取植物地上部分的样方,挖1 m深的土壤剖面。用环刀法,由下至上,每10 cm一层,每层取3个容重样品,测定土壤容重。在每个样地,按“S”型布设10个土壤采样点,每个采样点采用5点混合法,用5 cm内径的土钻,每10 cm一层,取样深度为1 m,分层采集土壤样品。用“四分法”取土壤样品。室内将土样分为两份,一份风干备用,一份放入-20℃冰箱中保存。

1.3 测定及计算方法

土壤容重采用环刀法;经预处理的地上植物、凋落物、根系和土壤采用重铬酸钾氧化-浓硫酸外加热法测定有机碳的含量。

生物量有机碳储量计算公式为:

$$C_{Bi} = C_{ABi} \cdot B_{ABi} + C_{UBi} \cdot B_{UBi} \quad (1)$$

式中: C_{Bi} 为生物量碳储量, $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$; C_{ABi} 为植物群落地上生物量有机碳含量, $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$; B_{ABi} 为地上植被的生物量, $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$; C_{UBi} 为植物群落地下生物量有机碳含量, $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$;

表1 观测样地基本情况

Table 1 General information of plots investigated

植物群落 Vegetation community	休牧年限 Rest grazing	经度 Latitude	纬度 Longitude	海拔 Elevation/m
羊草+杂类 <i>Leymus chinensis</i> + <i>Perennial forbs</i>	2008—2011 年	120°19'E	49°4'N	732.9
羊草+杂类 <i>Leymus chinensis</i> + <i>Perennial forbs</i>	2005—2011 年	119°48'E	48°51'N	733.7
羊草+杂类 <i>Leymus chinensis</i> + <i>Perennial forbs</i>	2002—2011 年	119°39'E	48°48'N	728.9

B_{UBi} 为地下植被的生物量, $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$; i 表示休牧年限。

凋落物碳储量计算公式: $C_{Li}=M_i\cdot C_i$ (2)

式中: C_{Li} 是凋落物的有机碳储量, $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$; M_i 是凋落物质量, $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$; C_i 是凋落物有机碳含量, $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$; i 表示休牧年限。

土壤有机碳密度: 单位面积一定深度的土层中有有机碳的储量。本研究分别计算 0~10、10~20、20~30、30~40、40~50、50~60、60~70、70~80、80~90、90~100 cm 土层土壤有机碳密度, 加和后成为 0~100 cm 土层的土壤有机碳密度。某一土层 i 的有机碳密度($\text{SOC}_i/\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$)的计算公式为:

$\text{SOC}_{\text{density}}=C_j\cdot\theta_j\cdot D_j\cdot(1-\delta_j)/100$ (3)

式中: C_j 为第 j 层土壤有机碳含量, $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$; θ_j 为第 j 层土壤容重, $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$; D_j 为第 j 层土壤厚度, cm; δ_j 为第 j 层中直径大于 2 mm 石砾所占的体积百分比, %, 本文样地 δ_j 为零。

草地生态系统有机碳碳储量(C_T)计算公式:

$C_T=C_{Li}+C_{ABi}+C_{UBi}+C_{Si}$ (4)

式中: C_{Li} 是凋落物的碳储量, $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$; C_{ABi} 是植物群落地上生物量有机碳储量, $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$; C_{UBi} 是植物群落地下生物量有机碳储量, $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$; C_{Si} 是土壤 0~100 cm 有机碳储量, $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$; i 表示休牧年限, a。

草原休牧的总固碳成本主要包括家畜饲养饲料成本、休牧草原围栏成本以及相应的管理成本。休牧时间为 3 月 20 日—6 月 20 日, 共 92 d。休牧期间 1 只羊所需干草为 $2\text{ kg}\cdot\text{d}^{-1}$, 干草价格为 $0.70\text{ 元}\cdot\text{kg}^{-1}$; 围栏成本为 $150\text{ 元}\cdot\text{hm}^{-2}$, 分摊 10 年; 管理成本 1 只羊每月为 10 元; 放牧强度(R)为 $6.00\text{ 只}\cdot\text{hm}^{-2}$, 休牧区面积(S)为公顷; 休牧年限设为 i 年。休牧每公顷固碳成本(C_{ii})可以表达为:

$C_{ii}=(0.70\times 2\times R\times S\times 92+1\times 15+10\times R\times 3)\times i$ (5)

草原休牧的固碳成本: 基于项目的草地固碳成本可以表达为实施某一固碳措施的总成本与这一措施

实施后所能固定的碳量之比。根据草地固碳成本^[27]的含义, 得到以下计算公式:

$C_{sti}=C_{ti}/C_i$ (6)

式中: C_{sti} 为草地固碳成本, $\text{元}\cdot\text{kg}^{-1}\text{C}$; C_{ti} 为休牧总固碳成本, $\text{元}\cdot\text{hm}^{-2}$; C_i 为休牧固碳量, $\text{kgC}\cdot\text{hm}^{-2}$; i 为休牧年限, a。

1.4 数据分析

采用 SPSS 16.0 统计软件对数据进行方差分析。

2 结果与分析

2.1 不同休牧年限羊草草原植物群落有机碳含量的变化

2.1.1 植物群落地上生物量有机碳含量和凋落物有机碳含量的变化

随着休牧年限的延长, 植物群落地上现存量和凋落物量逐渐增加(表 2), 表现为 $\text{RG9a}>\text{RG6a}>\text{RG3a}>\text{RG0}$ 。植物群落地上现存量为 $133.16\sim 235.22\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$, 凋落物量为 $9.82\sim 31.52\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ 。植物群落地上现存量有机碳含量和凋落物有机碳含量随着休牧年限的延长而增加(图 1), 表现为 $\text{RG9a}>\text{RG6a}>\text{RG3a}>\text{RG0}$ 。植物群落地上现存量有机碳含量为 $368.47\sim 419.73\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 凋落物有机碳含量为 $312.98\sim 342.98\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。方差分析结果表明, RG6a 、 RG9a 植物群落地上现存量与 RG0 相比均差异显著($P<0.05$), 而 RG6a 和 RG9a 地上现存量之间差异不显著($P>0.05$); 不同休牧年限地上现存植物和凋落物有机碳含量均差异不显著($P>0.05$)。

由以上结果可知, 休牧可加速草地植被的更新和恢复, 植物群落生物量作为生态系统中积累的植物有机物总量, 是整个生态系统运行的能量基础和营养物质来源。地上植被的恢复可进一步影响土壤系统, 这有利于提高植被的碳汇能力减缓土壤风蚀, 有利于土壤有机碳的积累。

植物群落地上生物量有机碳储量随着休牧年限的延长而增加(表 2), 表现为 $\text{RG9a}>\text{RG6a}>\text{RG3a}>\text{RG0}$,

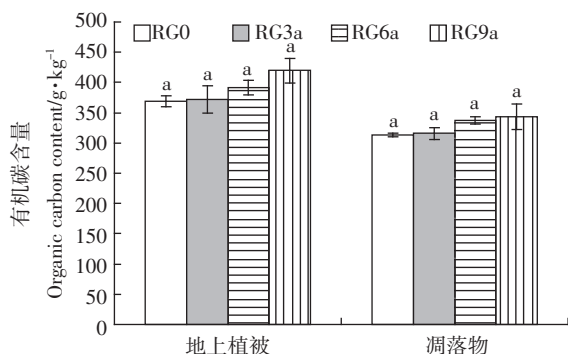
表 2 地上植被生物量及其有机碳储量

Table 2 Aboveground biomass and its carbon storage of grasses

处理 Treatment	地上生物量 Aboveground biomass/ $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$		有机碳储量 Organic carbon storage of aboveground biomass/ $\text{gC}\cdot\text{m}^{-2}$	
	地上现存量 Aboveground present biomass	凋落物 Litters	地上现存量 Aboveground present biomass	凋落物 Litters
RG0	133.16±10.48b	9.82±0.08d	65.17±5.52c	3.07±0.04d
RG3a	174.71±4.31b	17.92±0.58c	81.77±4.40b	5.65 ±0.07c
RG6a	217.90±8.92a	23.38±0.59b	85.27±3.38ab	7.90±0.32b
RG9a	235.22±1.17a	31.52±0.73a	98.69±4.47a	10.84±0.91a

注: 同列不同字母表示差异显著($P<0.05$)。

Note: Different letters within a column indicate significant difference($P<0.05$).



不同字母表示差异显著($P<0.05$)。下同

Different letters indicated significant difference($P<0.05$). The same below

图1 地上植物和凋落物有机碳含量

Figure 1 Organic carbon contents in aboveground parts and litter of grasses

有机碳储量为 $65.17\sim 98.69\text{ gC}\cdot\text{m}^{-2}$, RG9a 地上现存量有机碳储量与 RG0、RG3a 地上现存量有机碳储量有显著差异($P<0.05$)。凋落物有机碳储量为 $3.07\sim 10.84\text{ gC}\cdot\text{m}^{-2}$, 表现为 $\text{RG9a} > \text{RG6a} > \text{RG3a} > \text{RG0}$, 且 RG0–RG3a–RG6a–RG9a 凋落物有机碳储量两两之间差异显著($P<0.05$)。

可以认为,植物群落生物量表征了植被碳库的现实储存量,也是碳循环研究常用的重要参数。通过休牧,草地植被得到自然更新与恢复,可以有效增加植被的碳截留,恢复生态系统的本来面目,从而发挥草地生态系统的生态功能。凋落物碳储量在整个生态系统中占的比例虽少,但也是一个不容忽视的碳库,减缓凋落物的分解速度对于生态系统的碳截留也起到一定的作用。除生物量外,植物功能群的组成及群落结构特征也有可能对有机碳储量产生影响。

2.1.2 植物群落 0~100 cm 地下生物量有机碳含量的变化

植物群落 0~100 cm 地下生物量总量随休牧年限

的延长而增加(表3)。随着深度的增加,地下生物量逐渐减少。RG0–RG3a–RG6a–RG9a 4 块样地 0~40 cm 土层根系所占比例分别为 82.86%、83.08%、78.79%、81.58%,说明植被地下生物量主要集中在 0~40 cm 土层。0~10 cm 土层根系量表现为 $\text{RG9a} > \text{RG6a} > \text{RG3a} > \text{RG0}$, 占根系总量的比例分别为 65.97%、56.05%、55.78%、46.90%。40~100 cm 土层中, RG0 草地根系生物量最少,为 $230.00\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$, 约占整个剖面植被根系量的 17.14%。休牧后 40~100 cm 土层根系量有所增加, RG3a 为 $349.25\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$, RG6a 为 $600.67\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$, RG9a 为 $728.92\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$, 分别占整个剖面根系量的 16.92%、21.21%、18.42%。由此可见,休牧对植物根系生物量具有一定的影响。

对植物群落 0~100 cm 地下生物量有机碳含量测定结果表明(图2),地下生物量有机碳含量随休牧年限的延长而增加,各样地地下生物量碳含量随土壤深度的增加而降低;在各个土层深度上,地下生物量有机碳含量均表现为 $\text{RG9a} > \text{RG6a} > \text{RG3a} > \text{RG0}$ 。在 0~10 cm 深度上(图2), RG0–RG3a–RG6a–RG9a 地下生物量有机碳含量分别为 342.78、344.80、384.74、407.33 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 分别占整个剖面地下生物量有机碳的 27.71%、25.17%、23.35%、23.21%。对于地下生物量而言, 0~10 cm 土层根系是碳汇潜力的主要来源。在 0~40 cm 土层深度上, 地下生物量有机碳含量表现为 $\text{RG9a} > \text{RG6a} > \text{RG3a} > \text{RG0}$, 分别为 1 458.93、1 393.61、1 173.20、1 080.46 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 分别占整个剖面地下生物量有机碳含量的 87.35%、85.64%、84.59%、83.13%。在 40~100 cm 深度, RG0–RG3a–RG6a–RG9a 地下生物量有机碳比例分别为 12.65%、14.36%、15.41%、16.87%。

在休牧前提下,地下生物量有机碳储量随地下生

表3 植物群落 0~100 cm 地下生物量总量及其有机碳储量

Table 3 Underground biomass and its organic carbon storages of grasses

土层 Soil depth/ cm	地下生物量 Underground biomass/ $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$				地下生物量有机碳储量 Organic carbon storage of underground biomass/ $\text{gC}\cdot\text{m}^{-2}$			
	RG0	RG3a	RG6a	RG9a	RG0	RG3a	RG6a	RG9a
0~10	$885.00\pm 43.30\text{c}$	$1\ 166.00\pm 29.44\text{bc}$	$1\ 328.42\pm 184.82\text{b}$	$2\ 207.75\pm 43.30\text{a}$	$303.04\pm 41.93\text{c}$	$402.10\pm 22.49\text{bc}$	$521.67\pm 52.77\text{b}$	$900.66\pm 53.80\text{a}$
10~20	$100.00\pm 0.72\text{c}$	$273.67\pm 0.65\text{b}$	$451.75\pm 2.17\text{a}$	$468.00\pm 17.18\text{a}$	$27.84\pm 1.89\text{c}$	$86.92\pm 8.30\text{b}$	$173.30\pm 10.10\text{a}$	$181.26\pm 10.58\text{a}$
20~30	$67.25\pm 4.91\text{d}$	$142.67\pm 0.22\text{c}$	$269.75\pm 8.52\text{b}$	$302.00\pm 1.88\text{a}$	$17.77\pm 3.78\text{c}$	$42.65\pm 2.91\text{b}$	$85.04\pm 3.68\text{a}$	$105.18\pm 10.87\text{a}$
30~40	$59.25\pm 3.61\text{d}$	$132.17\pm 7.72\text{c}$	$182.00\pm 4.33\text{b}$	$251.25\pm 1.01\text{a}$	$11.75\pm 1.20\text{c}$	$27.83\pm 9.57\text{bc}$	$56.11\pm 2.32\text{ab}$	$79.40\pm 22.61\text{a}$
40~100	$230.00\pm 25.84\text{d}$	$349.25\pm 2.22\text{c}$	$600.67\pm 45.33\text{b}$	$728.92\pm 46.26\text{a}$	$36.73\pm 8.33\text{c}$	$68.59\pm 11.04\text{c}$	$152.25\pm 12.26\text{b}$	$213.78\pm 14.67\text{a}$
0~100	$1\ 341.50\pm 78.38\text{d}$	$2\ 063.75\pm 28.29\text{c}$	$2\ 832.58\pm 162.61\text{b}$	$3\ 957.92\pm 109.62\text{a}$	$397.13\pm 43.65\text{d}$	$628.10\pm 16.01\text{c}$	$988.36\pm 55.42\text{b}$	$1\ 480.28\pm 84.84\text{a}$

注:同行不同字母表示差异显著($P<0.05$)。

Note: Different letters within a row indicate significant difference($P<0.05$).

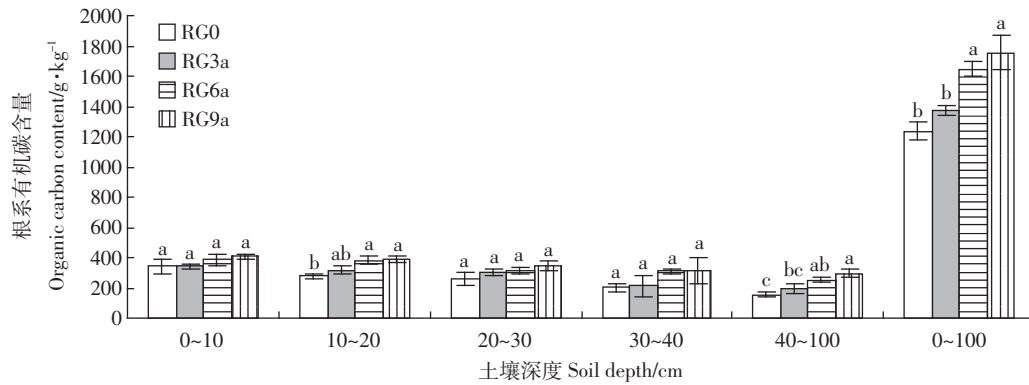


图2 植物群落 0~100 cm 地下生物量有机碳含量

Figure 2 Organic carbon contents in grass roots in 0~100 cm soil

物量的增加而增加(表3),在 0~100 cm 土层深度上,地下生物量有机碳储量表现为 $RG9a > RG6a > RG3a > RG0$, 分别为 1480.28、988.36、628.10、397.13 $gC \cdot m^{-2}$ 。在各土层, $RG9a$ 地下生物量有机碳储量均显著高于其他样地 ($P < 0.05$)。在 0~10 cm 深度, $RG0$ – $RG3a$ – $RG6a$ – $RG9a$ 地下生物量有机碳储量占植物群落 0~100 cm 地下生物量有机碳储量的比例分别为 76.31%、64.02%、52.78%、60.84%。0~40 cm 土层地下生物量有机碳所占比例分别为 90.75%、89.08%、84.60%、85.56%。说明植被根系主要集中在土体 0~40 cm 深度内,土深 40 cm 以上的土壤枯落物和根系分解所产生的有机质相对集中,尤其是在表层集中。因为表层土壤最具生物活性,表层土壤较下层土壤经历着更为剧烈的温度和湿度变化,而且更容易受到分解物和根系分泌物的影响,相应的有机碳含量明显高

于下层。

2.2 不同休牧年限羊草草原土壤容重及土壤有机碳含量的变化

随着休牧年限的延长,各样地之间的土壤容重表现出明显的差异(表4):在 0~100 cm 土层, $RG0 > RG3a > RG6a > RG9a$, $RG9a$ 、 $RG6a$ 与 $RG0$ 差异显著 ($P < 0.05$)。随着土层深度的增加,各样地土壤容重均呈现逐渐增大的趋势。

土壤有机碳含量随土壤层次的加深而呈现逐渐降低的趋势(图3)。草原实行休牧后,各土层有机碳含量均高于 $RG0$ 。 $RG9a$ 样地 10~20、20~30 cm 土层土壤有机碳与其他休牧年限差异均不显著 ($P > 0.05$)。在 0~100 cm 剖面尺度上,有机碳含量随着休牧年限的增加而增加(图3)。 $RG0$ – $RG3a$ – $RG6a$ – $RG9a$ 样地 0~100 cm 土壤有机碳含量分别为 202.89、226.28、246.38、

表4 土壤容重和土壤有机碳密度

Table 4 Soil bulk density and SOC density

土层 Soil depth/cm	容重 Bulk density/ $g \cdot cm^{-3}$				土壤有机碳密度 SOCd/ $kgC \cdot m^{-2}$			
	RG0	RG3a	RG6a	RG9a	RG0	RG3a	RG6a	RG9a
0~10	1.21±0.02a	1.17±0.01a	1.07±0.02b	1.01±0.01c	4.77±0.06a	4.89±0.06a	4.54±0.22a	4.52±0.01a
10~20	1.30±0.02a	1.30±0.01a	1.23±0.02b	1.21±0.02b	4.04±0.15a	4.11±0.55a	3.99±0.36a	4.44±0.02a
20~30	1.35±0.03a	1.33±0.01ab	1.33±0.00ab	1.28±0.02b	3.86±0.09a	3.86±0.46a	3.93±0.02a	4.36±0.00a
30~40	1.37±0.02a	1.37±0.02a	1.34±0.02a	1.31±0.04a	3.06±0.09c	3.49±0.33bc	3.82±0.23ab	4.24±0.02a
40~50	1.48±0.03a	1.40±0.01ab	1.39±0.04ab	1.37±0.01b	3.14±0.11a	3.04±0.24a	3.18±0.54a	4.06±0.07a
50~60	1.49±0.02a	1.45±0.01ab	1.43±0.02ab	1.38±0.03b	2.61±0.27b	2.71±0.17b	3.05±0.05b	3.60±0.07a
60~70	1.56±0.02a	1.50±0.01ab	1.45±0.01ab	1.42±0.06b	2.26±0.39b	2.45±0.24b	2.80±0.07ab	3.47±0.02a
70~80	1.57±0.02a	1.56±0.03a	1.50±0.04a	1.50±0.02a	2.25±0.03b	2.51±0.26b	2.57±0.16b	3.53±0.01a
80~90	1.64±0.02a	1.62±0.02a	1.59±0.00a	1.52±0.02b	1.45±0.21c	2.18±0.53bc	2.72±0.42ab	3.45±0.02a
90~100	1.69±0.01a	1.67±0.03ab	1.60±0.04bc	1.53±0.01c	0.87±0.19c	2.00±0.34b	2.47±0.12ab	2.71±0.02a
0~100	1.47±0.02a	1.44±0.01ab	1.39±0.01bc	1.35±0.02c	28.31±0.48c	31.25±0.98b	33.08±1.02b	38.37±0.21a

注:同行不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

Note: Different letters within a line indicate significant difference ($P < 0.05$).

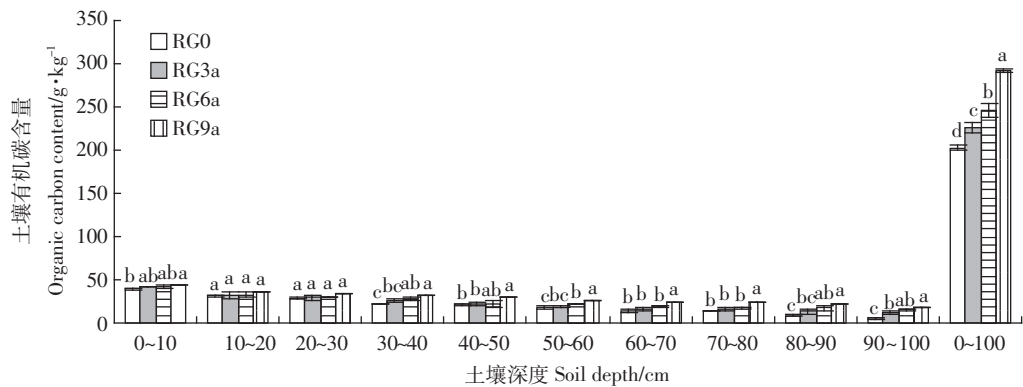


图 3 不同休牧年限羊草原土壤有机碳含量的变化

Figure 3 Organic carbon contents in soil at different layers under different years of rest grazing

291.93 g·kg⁻¹,且RG0-RG3a-RG6a-RG9a 之间均差异显著($P<0.05$)。0~10 cm 土层,RG0-RG3a-RG6a-RG9a 土壤有机碳所占整个剖面有机碳含量的比例分别为 19.41%、18.48%、17.21%、15.34%。其他土层所占比例均低于表层。说明土壤有机碳有向表层积聚而向深层减少的趋势。

不同样地土壤有机碳密度(Soil organic carbon density, SOCd)随深度的增加总体呈现下降趋势(表 4)。在 0~30、40~50 cm 深度,RG0-RG3a-RG6a-RG9a 土壤有机碳密度差异均不显著($P>0.05$)。在 0~100 cm 土壤剖面尺度上,RG3a-RG6a-RG9a 土壤有机碳密度显著高于 RG0($P<0.05$),说明休牧对土壤碳密度的影响比较大。

2.3 土壤-植被系统碳储量

植物群落生物量有机碳储量和土壤有机碳含量都是 RG9a 样地的最高(表 5)。在 RG0-RG3a-RG6a-RG9a 样地中,土壤有机碳储量占土壤-植被系统碳储量的比例分别为 98.38%、97.76%、96.83%、96.02%。

以 RG0 草地土壤-植被系统碳储量为基准,实施不同年限的休牧后,RG3a-RG6a-RG9a 样地所增加的有机碳储量分别为 3 197.10、5 392.58、11 190.51

gC·m⁻²。其中,来自土壤碳增汇量分别占系统总增汇的 92.18%、88.57%、89.95%,生物量碳增汇量所占比例最大为 11.43%,最小为 7.82%。由此可见,土壤是草原生态系统碳增汇的主要来源,减少土壤碳排放可以使整个草地生态系统固定更多的碳。

2.4 草原休牧的固碳成本

草地固碳成本的估算对退化草地的恢复重建和应对全球变化策略的制定都具有重要意义。总固碳成本随休牧年限的延长而增加,固碳成本则随着休牧年限的增加而降低(表 6)。RG3a 固碳量最低,固碳成本为 0.09 元·kg⁻¹C;RG9a 后草地的固碳量最高,固碳成本为 0.08 元·kg⁻¹C。

表 6 休牧不同年限羊草原固碳量、总固碳成本与固碳成本
Table 6 Amount and cost of carbon sequestration in different years of rest grazing

处理 Treatment	固碳量(ΔC) Amount of carbon/ kgC·hm ⁻²	总固碳成本(C _a) Total cost/ 元·hm ⁻²	固碳单价(C _u) Cost/元·kg ⁻¹ C
RG3a	31 971.00	2 903.40	0.09
RG6a	53 925.79	5 806.80	0.11
RG9a	111 905.07	8 710.20	0.08

表 5 休牧不同年限羊草原生态系统碳储量及其主要来源

Table 5 Total organic carbon storage and its major sources in different years of rest grazing

处理 Treatment	总碳储量/gC·m ⁻² Total organic carbon storage	主要来源 Main sources			
		地上植物 AGB/gC·m ⁻²	凋落物 Litters/gC·m ⁻²	地下根系 UGB/gC·m ⁻²	土壤 Soil/gC·m ⁻²
RG0	28 771.77±431.53c	65.17±5.52c	3.07±0.04d	397.13±43.65d	28 306.39±478.39c
RG3a	31 968.87±962.15b	81.77±4.40b	5.65 ±0.07c	628.10±16.01c	31 253.34±978.56b
RG6a	34 164.35±1 013.23b	85.27±3.38ab	7.90±0.32b	988.36±55.42b	33 082.82±1015.47b
RG9a	39 962.27±203.40a	98.69±4.47a	10.84±0.91a	1 480.28±84.84a	38 372.46±205.86a

注:同列不同字母表示差异显著($P<0.05$)。
Note: Different letters within a column indicate significant difference($P<0.05$).

3 讨论

3.1 休牧年限对羊草草原植物群落生物量和植物群落生物量有机碳含量的影响

草原作为一个碳库,由土壤、植物地上部分、地下根系和枯落物 4 个分室组成。生物量碳作为生态系统中积累的植物有机物总量,是整个生态系统运行的能量基础和营养物质来源^[28]。

植被对土壤有机碳的影响主要是改变凋落物的数量和质量及其环境条件的改变,从而影响有机碳储量、组成和稳定性。休牧促进了草地营养循环和植被更新^[29],植被的恢复可进一步影响土壤系统,最终实现土壤-植被系统生态功能的全面恢复。不仅土壤总有机碳的积累速率得到改善,而且土壤的固碳潜力也会得到大幅度的提升^[30]。凋落物层是草原生态系统的一个重要碳“库”,减缓凋落物的分解速度对于生态系统的碳截留也有一定的作用^[28]。凋落物的形成与分解通常与植物碳库碳贮量的减少和土壤碳贮量的增加过程相伴随^[31]。草地生态系统地表凋落物层有减缓土壤向大气排放 CO₂ 的作用,同时凋落物的蓄积会导致由土壤呼吸释放的 CO₂ 量增加,这也应引起人们的关注^[32]。凋落物作为土壤有机质输入的主要来源,对土壤的温度、湿度也会产生影响,影响土壤呼吸^[33],进而影响草地生态系统的碳储存。植物群落地下(根系)生物量是其(地下、地上)总生产量的重要组成部分,是联系地上和地下生物过程的重要纽带^[34],也是土壤中碳及养分的主要来源^[35]。根系的组分对休牧的响应可能不一致。根茎或者粗根生物量的增长可能提高植被的碳储量,加强草地生态系统的碳汇功能^[36]。因此,在今后的研究中有必要进一步区分根系的组分,考察根系的各组分对于休牧的响应。

本研究发现,草原休牧后地上植被的生产能力显著提高,利于草地干物质生产、营养循环和碳贮存。随着休牧年限的延长,羊草草原地上植被、凋落物、根系生物量均表现为 RG9a>RG6a>RG3a>RG0,植物群落地上生物量有机碳含量、凋落物有机碳含量、地下根系有机碳储量随休牧年限的延长而逐渐增加。分析原因认为,通过休牧,草地植被得到自然更新与恢复,可以有效增加植被的碳截留,植物群落生物量作为生态系统中积累的植物有机物总量,是整个生态系统运行的能量基础和营养物质来源,有利于土壤有机碳的积累。休牧减少了牲畜对土壤团聚体和地表结皮的破坏作用,在一定程度上降低了土壤有机质的

分解速率,也使土壤易于抵抗水蚀和风蚀。这些均有利于提高植被的碳汇能力,减缓土壤风蚀,有利于土壤有机碳的积累^[15,37]。

3.2 休牧年限对羊草草原土壤有机碳含量的影响

土壤有机碳储量随土壤剖面深度的增加而降低,土壤有机碳含量的差异主要集中在 0~40 cm 土层,40 cm 以上土层有机碳受地上植被的影响比较明显。这与张兴锐等^[38]的研究结果比较接近。草地群落碳循环的主要过程是在土壤中,草地植被地上生物量中的碳贮量与土壤中贮存的碳量相比是非常少的,在所研究的草地生态系统中,草地土壤碳贮量约占草地总碳贮量的比例超过 96%,生物量有机碳含量不足 4%。这与李凌浩^[39]的研究结果类似。

陆地生态系统的碳收支受众多不确定性因子的影响,对于影响土壤有机碳含量的主要因子,大体包括气候、植物种类组成、土壤微生物的多样性、开垦以及放牧等^[40-41]。土壤有机碳主要来源于枯落物和根系分解所产生的有机质,地上枯落物、植物地上地下物质分配、根系深度和根生物量对土壤有机碳在剖面上的分布格局影响至关重要,它们的变化会对土壤有机碳输入的模式、速度、质量和数量产生一定的影响^[13]。本实验研究表明:在草原生态系统中,枯落物集中在土壤表层,植被根系也主要集中在土体 0~40 cm 深度内,所以 40 cm 土层以上的土壤枯落物和根系分解所产生的有机质相对集中,尤其是集中在表层,而表层土壤经历着更为剧烈的温度和湿度变化,且更容易受到分解物和根系分泌物的影响,其有机碳含量明显高于下层。因此,有机碳含量随土层深度的增加而递减,这与前人大部分研究结果一致^[42-45]。

以往有研究显示,有机碳变化趋势不同除与植物地上部和地下部的生物量有关外,与土壤含水量可能也有关。草地休牧后,植被盖度提高,大量积累立枯和凋落物,使得冬季积雪厚度增加,从而有效地增加了植物生长季的土壤水分含量和保水能力^[46]。生物量越大,形成的有机碳越多,而含水量高,会抑制有机碳的分解,利于有机碳的累积^[47-48]。

3.3 休牧年限对羊草草原土壤有机碳密度的影响

土壤有机碳密度已成为国际通用的有机碳单位,是评价和衡量土壤中有机碳储量的一个极其重要的指标^[45]。RG3a-RG6a-RG9a 羊草草原的典型地段 1 m 深度土壤有机碳密度随土层深度的增加而减少,与大多研究结果一致^[25-26,47]。本研究中,RG0-RG3a-RG6a-RG9a 样地 1 m 深土层土壤有机碳密度分别为 28.31、

31.25、33.08、38.37 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$, 介于 1.19~176.46 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 之间^[45], 其值高于草地平均土壤有机碳密度(8.5 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$)^[49], 也高于青藏高原的平均土壤有机碳密度(约 7.2 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$)^[50], 高于黄土高原中部草地典型草原(4.98 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$)、森林草原(4.69 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$)、荒漠草原(1.50 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$)以及黄土高原中部草地高寒草甸草原(18.30 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$)的平均土壤有机碳密度^[26]。

3.4 羊草草原休牧的固碳效益

从植被恢复角度, 休牧在一定程度上促进了植被的更新和恢复。草地围封时间过长, 凋落物增多, 造成生长冗繁, 不利于草地的营养循环和草场的有效利用, 有研究显示, 典型草原围封 7 年后, 已经达到或接近其生产潜力的峰值^[51]。实施休牧后, 草场恢复其自身弹性, 地上植被得到了有效保护和恢复, 可以进行有效利用, 削减生长冗余, 有效消除枯草, 发挥草场的放牧价值。从碳储量角度, 休牧有利于有机质的输入和有机碳的累积, 有利于提高土壤-植被系统碳储量; 从固碳成本角度, RG3a、RG6a 和 RG9a 的总固碳成本分别为 2903.40、5806.80、8710.20 元· hm^{-2} , 随着休牧年限的延长而增加, 固碳成本分别为 0.09、0.11、0.08 元· kg^{-1}C 。

4 结论

春季休牧可以使草地植被得到有效的恢复与更新, 有利于草地的可持续利用。随着草地休牧时间的延长, 草原有机碳密度表现为显著的增加趋势, 表明在休牧过程中草地系统是一个碳汇。

休牧对草地固碳过程和机理研究尚有待深入。不同区域、不同退化程度的草地, 会因休牧季节、休牧年限影响系统有机碳的累积, 因此需要开展长期、系统的联网试验研究, 为国家制定区域有针对性的休牧政策提供科学依据。

参考文献:

- [1] 吴征镒. 中国植被[M]. 北京: 科学出版社, 1980: 519-521.
WU Zheng-yi. Vegetation of China[M]. Beijing: Science Press, 1980: 519-521.
- [2] 汪诗平. 天然草原持续利用理论和实践的困惑: 兼论中国草业发展战略[J]. 草地学报, 2006, 14(2): 188-192.
WANG Shi-ping. Theory and practice on sustainable use of China's natural grassland: A study on the development strategy of grassland-livestock and grassland-agriculture[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2006, 14(2): 188-192.
- [3] 中华人民共和国农业部. 全国草原监测报告[R]. 2011.
China Ministry of Agriculture. The national supervision report of steppes [R]. 2011.
- [4] 刘忠宽, 汪诗平, 陈佐忠, 等. 不同放牧强度草原休牧后土壤养分和植物群落变化特征[J]. 生态学报, 2006, 26(6): 2049-2056.
LIU Zhong-kuan, WANG Shi-ping, CHEN Zuo-zhong, et al. Properties of soil nutrients and plant community after rest grazing in Inner Mongolia steppe, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(6): 2049-2056.
- [5] 朱立博, 曾昭海, 赵宝平, 等. 春季休牧对草地植被的影响[J]. 草地学报, 2008, 16(3): 278-282.
ZHU Li-bo, ZENG Zhao-hai, ZHAO Bao-ping, et al. Effect of spring rest-grazing on steppe vegetation[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2008, 16(3): 278-282.
- [6] 王岩春, 干友民, 费道平, 等. 川西北退牧还草工程区围栏草地植被恢复效果的研究[J]. 草业科学, 2008, 25(10): 15-19.
WANG Yan-chun, GAN You-min, FEI Dao-ping, et al. Study on restoration effects of enclosed pasture in pastureland rehabilitation areas in Northwestern Sichuan Province[J]. *Pratacultural Science*, 2008, 25(10): 15-19.
- [7] 曹文侠, 徐长林, 张德罡, 等. 杜鹃灌丛草地土壤容重与水分特征对不同休牧模式的响应[J]. 草业学报, 2011, 20(3): 28-35.
CAO Wen-xia, XU Chang-lin, ZHANG De-gang, et al. Ecological responses of soil bulk density and water content to different non-grazing patterns in alpine rhododendron shrubland[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2011, 20(3): 28-35.
- [8] 格根宝乐尔, 包玉英. 休牧对荒漠草原 AM 真菌及土壤成分的影响 [C]//中国菌物学会第五届会员代表大会暨 2011 年学术年会论文摘要集. 2011-08-15.
GE Gen-bao-le-er, BAO Yu-ying. Effect of delaying grazing on arbuscular mycorrhizal fungi and soil composition in desert steppe [C]//The 5th Assembly of Mycological Society of China and 2011 Annual Academic Paper Collection. 2011-08-15.
- [9] Rahlao S J, Hoffman M T, Todd S W, et al. Long-term vegetation change in the Succulent Karoo, South Africa following 67 years of rest from grazing[J]. *Arid Environments*, 2008, 72: 808-819.
- [10] 殷振华, 毕玉芬, 李世玉. 休牧对云南退化山地草甸草群结构的影响[J]. 草地学报, 2008, 16(6): 630-635.
YIN Zhen-hua, BI Yu-fen, LI Shi-yu. Effects of grazing prohibition on grass population structure of deteriorated upland meadow in Yunnan Province[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2008, 16(6): 630-635.
- [11] 曹文侠, 张德罡, 徐长林, 等. 杜鹃灌丛草地响应休牧的植被特征变化[J]. 中国草地学报, 2008, 30(6): 94-98.
CAO Wen-xia, ZHANG De-gang, XU Chang-lin, et al. Changes of vegetation characteristics of azalea shrubland after no grazing [J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2008, 30(6): 94-98.
- [12] Fynn A J, Alvarez P, Brown J R, et al. Soil carbon sequestration in US rangelands: Issues paper for protocol development[M]. New York, USA: Environmental Defense Fund, 2009.
- [13] IGBP Terrestrial Carbon Working Group. The terrestrial carbon cycle: Implications for the Kyoto Protocol[J]. *Science*, 1998, 280: 1393-1394.
- [14] 王 玮, 郭建国, 韩兴国. 内蒙古典型草原土壤固碳潜力及其不确定性的估算[J]. 应用生态学报, 2012, 23(1): 29-37.
WANG Wei, GUO Jian-guo, HAN Xing-guo. Estimation of soil carbon sequestration potential in typical steppe of Inner Mongolia and associ-

- ated uncertainty[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, 23(1): 29–37.
- [15] Han G D, Hao X Y, Zhao M L, et al. Effect of grazing intensity on carbon and nitrogen in soil and vegetation in a meadow steppe in Inner Mongolia[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2008, 125(1/4): 21–32.
- [16] Steffens M, Kebl A, Giese M, et al. Spatial variability of topsoils and vegetation in a grazed steppe ecosystem in Inner Mongolia[J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2009, 172(1): 78–90.
- [17] Elmore A J, Asner G P. Effects of grazing intensity on soil carbon stocks following deforestation of a Hawaiian dry tropical forest[J]. *Global Change Biology*, 2006, 12(9): 1761–1772.
- [18] 何念鹏, 韩兴国, 于贵瑞. 内蒙古放牧草地土壤碳固持速率和潜力[J]. 生态学报, 2012, 32(3): 844–851.
- HE Nian-peng, HAN Xing-guo, YU Gui-rui. Soil carbon sequestration rates and potential in the grazing grasslands of Inner Mongolia[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(3): 844–851.
- [19] 何念鹏, 韩兴国, 于贵瑞. 长期封育对不同类型草地碳贮量及其固持速率的影响[J]. 生态学报, 2011, 31(15): 4270–4276.
- HE Nian-peng, HAN Xing-guo, YU Gui-rui. Carbon and nitrogen sequestration rate in long-term fenced grasslands in Inner Mongolia, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(15): 4270–4276.
- [20] Derner J D, Boutton T W, Briske D D. Grazing and ecosystem carbon storage in the North American great plains[J]. *Plant and Soil*, 2006, 280(1/2): 77–90.
- [21] 韩道瑞, 曹广民, 郭小伟, 等. 青藏高原高寒草甸生态系统碳增汇潜力[J]. 生态学报, 2011, 31(24): 7408–7417.
- HAN Dao-rui, CAO Guang-min, GUO Xiao-wei, et al. The potential of carbon sink in alpine meadow ecosystem on the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(24): 7408–7417.
- [22] IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change). A special report of IPCC: Land use, land-use change and forestry[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2000: 182–208.
- [23] IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change). Fourth assessment report of working group III: Summary for policymakers, 2007. <http://www.ipcc.ch/ipccreports/ar4-wg3.htm>. Cited 20 November 2007.
- [24] Jones M B, Donnelly A. Carbon sequestration in temperate grassland ecosystems and the influence of management, climate and elevated CO₂ [J]. *New Phytologist*, 2004, 164(3): 423–439.
- [25] 边维勇, 马力, 洪秀伟, 等. 辽河流域表层土壤碳密度与碳储量浅析[J]. 岩矿测试, 2011, 30(1): 49–52.
- BIAN Wei-yong, MA Li, HONG Xiu-wei, et al. Preliminary analysis of carbon density and carbon storage of surface soils in Liaoh River Basin[J]. *Rock And Mineral Analysis*, 2011, 30(1): 49–52.
- [26] 刘伟, 程积民, 陈芙蓉, 等. 黄土高原中部草地土壤有机碳密度特征及碳储量[J]. 草地学报, 2011, 19(3): 424–431.
- LIU Wei, CHENG Ji-min, CHEN Fu-rong, et al. Characteristic of organic carbon density and organic carbon storage in the natural grassland of Center Loess Plateau[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2011, 19(3): 424–431.
- [27] 常瑞英, 唐海萍. 草原固碳量估算方法及其敏感性分析[J]. 植物生态学报, 2008, 32(4): 810–814.
- CHANG Rui-ying, TANG Hai-ping. Sensitivity analysis on methods of estimating carbon sequestration in grassland ecosystem of Inner Mongolia, China[J]. *Plant Ecology (Chinese Version)*, 2008, 32(4): 810–814.
- [28] 王春梅, 邵彬, 王汝南. 东北地区两种主要造林树种生态系统固碳潜力[J]. 生态学报, 2010, 30(7): 1764–1772.
- WANG Chun-mei, SHAO Bin, WANG Ru-nan. Carbon sequestration potential of ecosystem of two main tree species in Northeast China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(7): 1764–1772.
- [29] Uytvanck J V, Maes D, Vandenhaute D. Restoration of wood pasture on former agricultural land: The importance of safe sites and time gaps before grazing for tree seedlings[J]. *Biological Conservation*, 2008, 141: 78–88.
- [30] 郭曼, 郑粉莉, 安韶山, 等. 植被自然恢复过程中土壤有机碳密度与微生物量碳动态变化[J]. 水土保持学报, 2010, 24(1): 229–238.
- GUO Man, ZHEN Fen-li, AN Shao-shan, et al. Dynamic change of soil organic carbon density and microbial biomass carbon during natural revegetation[J]. *Soil and Water Conservation*, 2010, 24(1): 229–238.
- [31] 林慧龙, 王军, 徐震, 等. 草地农业生态系统中的碳循环研究动态[J]. 草业科学, 2005, 22(4): 59–62.
- LIN Hui-long, WANG Jun, XU Zhen, et al. Research progress and trend of the carbon cycle in grassland agroecosystem[J]. *Pratacultural Science*, 2005, 22(4): 59–62.
- [32] 韩大勇, 杨允菲, 李建东. 1998—2005年松嫩平原羊草草地植被生态对比分析[J]. 草业学报, 2007, 16(3): 9–14.
- HAN Da-yong, YANG Yun-fei, LI Jian-dong. Temporal changes of a community of *Leymus chinensis* meadow in the Songnen Plain[J]. *Acta Pratacultural Sinica*, 2007, 16(3): 9–14.
- [33] 周萍, 刘国彬, 薛蕙. 草地生态系统土壤呼吸及其影响因素研究进展[J]. 草业学报, 2009, 18(2): 184–193.
- ZHOU Ping, LIU Guo-bin, XUE Sha. Review of soil respiration and the impact factors on grassland ecosystem[J]. *Acta Pratacultural Sinica*, 2009, 18(2): 184–193.
- [34] Trumbore S E, Grandinski J B. The secret lives of roots[J]. *Science*, 2003, 302(5649): 1344–1345.
- [35] 吴伊波, 崔骁勇. 草地植物根系碳储量和碳流转对CO₂浓度升高的响应[J]. 生态学报, 2009, 29(1): 378–388.
- WU Yi-bo, CUI Xiao-yong. Response of root carbon reserves and root turnover to experimental CO₂ enrichment in grasslands[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(1): 378–388.
- [36] Jastrow J D, Miller R M, Owensby C E. Long-term effects of elevated atmospheric CO₂ on below-ground biomass and transformations to soil organic matter in grassland[J]. *Plant and Soil*, 2000, 224(1): 85–87.
- [37] Wan J L. The studies of effects of artificial fencing restoration of vegetation and plants diversity in Duolun County[D]. Inner Mongolia Agricultural University, 2008.
- [38] 张兴锐, 许中旗, 纪晓林, 等. 燕山北部山地典型植物群落土壤有机碳贮量及其分布特征[J]. 水土保持学报, 2010, 24(1): 186–190.
- ZHANG Xing-rui, XU Zhong-qi, JI Xiao-lin, et al. Soil organic carbon storage and its distribution of the typical communities in the north region of Yanshan Mountain[J]. *Soil and Water Conservation*, 2010, 24(1):

186–190.

- [39] 李凌浩, 陈佐忠. 草地生态系统碳循环及其对全球变化的响应, I 碳循环的分室模型、碳输入与贮存[J]. 植物学通报, 1998, 15(2):14–22.
- LI Ling-hao, CHEN Zou-zhong. The global carbon cycle in grassland ecosystem and its responses to global change I. Carbon flow compartment model, inputs and storage[J]. *Chinese Bulletin of Botany*, 1998, 15(2):14–22.
- [40] King A W, Dilling L, Zimmerman G P, et al. Executive summary, The first state of the carbon cycle report (SOCCR): The North American carbon budget and implications for the global carbon cycle. A report by the U. S. Climate Change Science Program and the Subcommittee on global change research. National Oceanic and Atmospheric Administration, National Climatic Data Center, Asheville, NC, USA, 2007:1–14.
- [41] 戴雅婷, 那日苏, 吴洪新, 等. 我国北方温带草原碳循环研究进展[J]. 草业科学, 2009, 26(9):43–48.
- DAI Ya-ting, NA Ri-su, WU Hong-xin, et al. The research progress of carbon cycle in temperate grassland of North China[J]. *Pratacultural Science*, 2009, 26(9):43–48.
- [42] 解宪丽, 孙波, 周慧珍, 等. 中国土壤有机碳密度和储量的估算与空间分布分析[J]. 土壤学报, 2004, 41(1):35–43.
- XIE Xian-li, SUN Bo, ZHOU Hui-zhen, et al. Organic carbon density and storage in soils of China and spatial analysis[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2004, 41(1):35–43.
- [43] 方运霆, 莫江明, Brown S, 等. 鼎湖山自然保护区土壤有机碳贮量和分配特征[J]. 生态学报, 2004, 24(1):135–142.
- FANG Yun-ting, MO Jiang-ming, Brown S, et al. Storage and distribution of soil organic carbon in Dinghushan Biosphere Reserve[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(1):135–142.
- [44] 赵锦梅, 高超, 张德罡. 祁连山东段不同退化高寒草甸土壤有机碳密度研究[J]. 草地学报, 2010, 18(1):21–26.
- ZHAO Jin-mei, GAO Chao, ZHANG De-gang. Study on the soil organic carbon density of Alpine Meadow with different degradation degrees in eastern Qilian Mountains[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2010, 18(1):21–26.
- [45] 李泽, 郭胜利, 张芳, 等. 退耕还果对黄土高原沟壑区坡地土壤和植被碳、氮储量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(4):919–924.
- LI Ze, GUO Sheng-li, ZHANG Fang, et al. Effects of apple orchard converted from cropland on C and N storages in terrestrial system of slopping cultivated land in the Loess Gully Regions[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2011, 17(4):919–924.
- [46] 杨浩, 白永飞, 李永宏, 等. 内蒙古典型草原物种组成和群落结构对长期放牧的响应[J]. 植物生态学报, 2009, 33(3):499–507.
- YANG Hao, BAI Yong-fei, LI Yong-hong, et al. Response of plant species composition and community structure to long-term grazing in typical steppe of Inner Mongolia[J]. *Plant Ecology*, 2009, 33(3):499–507.
- [47] 王华静, 宁龙梅, 徐留兴, 等. 川西北高寒地区土壤有机碳含量垂直分布特征[J]. 土壤通报, 2012, 43(1):76–80.
- WANG Hua-jing, NING Long-mei, XU Liu-xing, et al. Vertical distribution characteristics of soil organic carbon content in an alpine-cold zone of Northwest Sichuan[J]. *Chinese Soil Science*, 2012, 43(1):76–80.
- [48] 张文菊, 吴金水, 肖和艾, 等. 平原典型湿地剖面有机碳分布特征与积累现状[J]. 地球科学进展, 2004, 19(4):558–563.
- ZHANG Wen-ju, WU Jin-shui, XIAO He-ai, et al. Profile distribution characteristics and accumulation of organic carbon in typical wetlands in Sanjiang Plain[J]. *Advances in Earth Science*, 2004, 19(4):558–563.
- [49] 方精云, 杨元合, 马文红, 等. 中国草地生态系统碳库及其变化[J]. 中国科学:生命科学, 2010, 40(7):566–576.
- FANG Jing-yun, YANG Yuan-he, MA Wen-hong, et al. Ecosystem carbon stocks and their changes in China's grasslands[J]. *Science: China Life Science*, 2010, 40(7):566–576.
- [50] 田玉强, 欧阳华, 徐兴良, 等. 青藏高原土壤有机碳储量与密度分布[J]. 土壤学报, 2008, 45(5):933–942.
- TIAN Yu-qiang, OUYANG Hua, XU Xing-liang, et al. Distribution characteristics of soil organic carbon storage and density on the Qing-Hai-Tibet Plateau[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(5):933–942.
- [51] 呼格吉勒图, 杨劼, 宝音陶格涛, 等. 不同干扰对典型草原群落物种多样性和生物量的影响[J]. 草业学报, 2009, 18(3):6–11.
- HU Ge-ji-le-tu, YANG Jie, BAO Yin-tao-ge-tao, et al. Effects of different disturbances on species diversity and biomass of community in the typical steppe[J]. *Acta Pratacultural Sinica*, 2009, 18(3):6–11.