

# 青藏高原高寒草原碳增贮潜力的初步研究

郭小伟<sup>1,2</sup>, 韩道瑞<sup>1,2</sup>, 张法伟<sup>1</sup>, 李以康<sup>1</sup>, 林 丽<sup>1</sup>, 李 婧<sup>1,2</sup>, 曹广民<sup>1\*</sup>

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

**摘要:** 青海省西部地区的高寒草原分为高寒草甸草原、高寒草原化草甸和高寒草原 3 种类型; 按照草地利用现状, 分为原生草地、退化草地和人工草地 3 种土地利用格局。以原生草地为参照, 通过比较不同草地类型和土地利用格局草地碳贮现状, 探索其碳的增贮潜力。结果表明: 原生高寒草原、退化高寒草原、高寒草原化草甸、退化草原化草甸、高寒草甸草原、退化草甸草原和人工草地的土壤-植物系统中总有机碳贮量分别为  $45.07 \pm 0.68$ ,  $30.41 \pm 0.5$ ,  $84.21 \pm 0.61$ ,  $66.11 \pm 0.62$ ,  $98.85 \pm 0.11$ ,  $80.02 \pm 0.22$ ,  $43.77 \pm 0.16$  t C · hm<sup>-2</sup>, 其中原生高寒草原与高寒草原化草甸、高寒草甸草原、退化高寒草原有机碳储量差异显著。对退化草地进行人工恢复, 具有显著的碳增贮潜力, 高寒草甸草原、高寒草原化草甸、高寒草原和人工草地的理论碳增贮潜力分别为  $18.82 \pm 0.51$ ,  $18.15 \pm 0.15$ ,  $14.65 \pm 0.78$ ,  $1.29 \pm 0.21$  t C · hm<sup>-2</sup>。气候变化导致的青藏高原干暖化, 对高寒草原有机碳贮量的影响主要体现在由高寒草甸草原和高寒草原化草甸向高寒草原的演替上。

**关键词:** 高寒草原; 土地利用格局; 土壤有机碳; 系统碳储; 增贮潜力

中图分类号: S812

文献标识码: A

文章编号: 1007-0435(2011)05-0740-06

## The Response of Potential Carbon Sequestration Capacity to Different Land Use Patterns in Alpine Rangeland

GUO Xiaowei<sup>1,2</sup>, HAN Daorui<sup>1,2</sup>, ZHANG Fawei<sup>1</sup>,  
LI Yikang<sup>1</sup>, LIN Li<sup>1</sup>, LI Jing<sup>1,2</sup>, CAO Guangmin<sup>1\*</sup>

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

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

**Abstract:** There are three steppe classifications of land use patterns in Qinghai province: native, degraded steppe and pastureland. Dynamic changes of organic soil carbon storage are analyzed to estimate the potentially increasing carbon sequestration of each land use type based on the natural alpine steppe. Result show that the carbon stock of native, degraded steppe, prata stepposa, degraded prata stepposa, meadow prata, degraded meadow prata and pastureland is  $45.07 \pm 0.68$ ,  $30.41 \pm 0.5$ ,  $84.21 \pm 0.61$ ,  $66.11 \pm 0.62$ ,  $98.85 \pm 0.11$ ,  $80.02 \pm 0.22$  and  $43.77 \pm 0.16$  t C · hm<sup>-2</sup>, respectively. Both plant organic carbon and soil organic carbon are remarkably influenced by land use. The degraded steppe after recovering could get a huge carbon sequestration. The content of carbon sequestration potential from high to low is degraded prata stepposa ( $18.82 \pm 0.51$  t C · hm<sup>-2</sup>), degraded meadow prata ( $18.15 \pm 0.15$  t C · hm<sup>-2</sup>), degraded steppe ( $14.65 \pm 0.78$  t C · hm<sup>-2</sup>) and pastureland ( $1.29 \pm 0.21$  t C · hm<sup>-2</sup>). The influence of climate change on organic carbon sequestration is mainly reflected in the succession from prata stepposa to meadow prata.

**Key words:** Different land use; Soil organic carbon; Carbon stock; Carbon sequestration potential

全球约有 1500 Gt 碳是以有机质形态储存于地球土壤中<sup>[1]</sup>, 而青藏高原总面积为  $1.6027 \times 10^8$  hm<sup>2</sup>, 草地有机碳量达到  $335.1973 \times 10^8$  t C, 占全国土壤有机碳量的 23.44%, 其中以高寒草甸土壤和

高寒草原土壤有机碳积累量为主, 两者之和达到  $232.36 \times 10^8$  t C<sup>[2]</sup>。也有研究显示高寒草原 1 m 深度土壤碳储量为  $7.4$  Pg<sup>[3]</sup>。青藏高原地处北半球的高海拔地带, 年均气温都处于较低水平, 土壤有机

收稿日期: 2011-03-25; 修回日期: 2011-04-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(30970520); 中国科学院战略性先导科技专项(XDA05050304-3)资助

作者简介: 郭小伟(1985), 男, 山东潍坊人, 硕士研究生, 主要从事高寒草地碳增汇方面工作, E-mail: xwguo1206@163.com;

\* 通信作者 Author for correspondence, E-mail: Caogm@nwipb.cas.cn

质分解速率低, 加上植被丰富, 有机质逐年积累, 土壤碳储量巨大, 成为我国土壤碳密度最高的地区之一, 达到  $7.2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ <sup>[4,5]</sup>, 因此青藏高原土壤碳封存对于大气中的  $\text{CO}_2$  浓度有重要的影响<sup>[6]</sup>。

高寒草原是青藏高原广泛分布的一种植被类型, 不仅是亚洲中部高寒环境中典型的生态系统之一, 而且在世界高寒地区也极具代表性。由于长期超载过牧、鼠类危害和气候变暖等影响, 加快了高寒草原区域的退化。近30年来, 青藏高原土壤由于土地利用变化和草地退化所释放的  $\text{CO}_2$  约有  $30.23 \times 10^8 \text{ t C}$ <sup>[2]</sup>, 这也使得青藏高原高寒草原碳库有着较大的碳封存空间。关于青藏高原碳增汇的报道多是关于高寒草甸区, 李东等<sup>[7]</sup> 借助 Century 模型得出高寒草甸稳定状态下  $0 \sim 20 \text{ cm}$  土壤总有机碳库约  $7597.50 \sim 7694.10 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2}$ , 赵锦梅<sup>[8]</sup> 将高寒草甸划分为不同退化程度来研究其碳密度, 曹广民等<sup>[9]</sup> 根据不同土地利用格局的划分得出人工草地、天草草地、退化草地碳贮量分别为  $113.13, 111.61, 93.54 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。关于青藏高原高寒草原区碳贮量报道较少, 裴志永等<sup>[10]</sup> 根据遥感与生态模型计算高

寒草原净初生产力约为  $12.50 \times 10^{12} \text{ g} \cdot \text{a}^{-1}$ , 而有关青藏高原高寒草原土壤碳现状、其增贮的潜力有多大尚未见报道。目前国内外有关土壤碳储量研究一般采用土壤类型法、植被类型法、生态系统类型法和模型法及碳拟合法等。本研究通过选取不同草原利用格局, 分析其退化现状、碳库空间结构、碳库增汇前景, 以期为评估青藏高原高寒草原在地球碳过程中的作用以及为我国进行温室气体减排谈判提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域草地植被的分布与群落特征

高寒草原区主要分布于青藏高原中部 ( $E91^{\circ}40'35'' \sim 101^{\circ}20'02'', N32^{\circ}12'30'' \sim 35^{\circ}16'41''$ ), 研究区域遍布整个高寒草原区, 本区域除和田乡海拔为  $3600 \text{ m}$ , 其余海拔均在  $4000 \text{ m}$  以上, 降水稀少, 年均降水量大都在  $400 \text{ mm}$  以下, 气候寒冷、霜冻期长、生长期短。主要包括高寒草原、高寒草甸草原、高寒草原化草甸 3 种类型的草原。

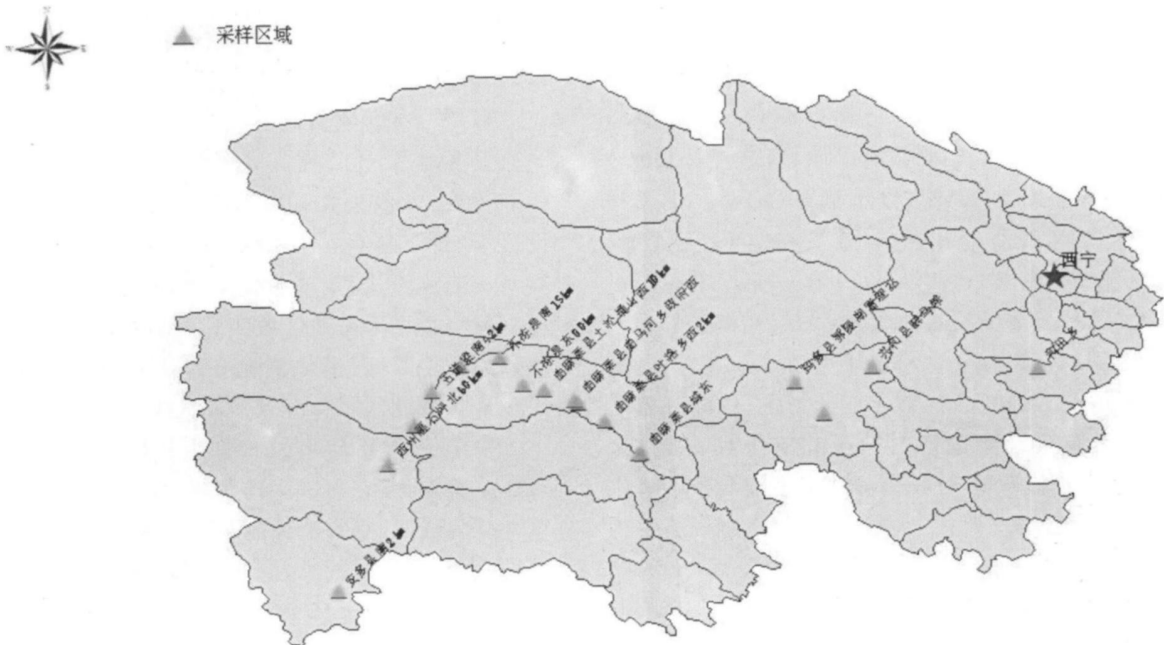


图1 野外调查区域

Fig. 1 Region of field investigation

#### 1.1.1 高寒草原

主要分布于玛多县 ( $E98^{\circ}22'44'', N34^{\circ}39'46''$ )、曲麻莱县曲麻河乡 ( $E95^{\circ}50'31'', N34^{\circ}07'37''$ ) 以西地区及其不冻泉 ( $E94^{\circ}12'59'', N35^{\circ}04'08''$ ) - 西藏

安多 ( $E91^{\circ}40'35'', N32^{\circ}12'28''$ ) 青藏公路沿线区域。其中玛多县和曲麻莱曲麻河乡东部地区以双叉细柄茅 (*Ptilagrostis dichotoma*) 为优势种, 原生高寒草原 (Native steppe, 以下缩写为 NS) 以紫花针茅

(*Stipa purpurea*)、双叉细柄茅等为主, 植被总盖度 60%~70%。退化高寒草原(Degraded steppe, 以下缩写为 DS)以细叶亚菊(*Ajania tenuifolia*)、火绒草(*Leontopodium hastioides*)、美丽风毛菊(*Saussurea superba*)等为主, 可见紫菀(*Aster flaccidus*)、鸢尾(*Iris tectorum*)、二裂委陵菜(*Potentilla bifurca*)、紫堇(*Corydalis edulis* Maxim), 植被盖度 30%~40%, 一般土表裸露处 2~3 cm 土层被风蚀, 在沙土母质地段, 亦有整体草皮剥蚀。曲麻河乡土松涌山大约为双叉细柄茅草原与紫花针茅草原的分界线, 该地区以西地段, 包括青藏公路沿线均以紫花针茅草原为优势群落, 伴生二裂委陵菜、披针叶黄华(*Thermopsis lanceolata*)、美丽风毛菊、火绒草、羽叶点地梅(*Pomatosace filicula*)、苔草(*Carex pachyrrhiza*)、灰灰菜(*Chenopodium album*)等, 盖度 60%~70%, 针茅高约 12 cm 左右。退化地段植被盖度 < 15%, 植被种类有龙胆(*Gentiana affusca*)、美丽风毛菊、细叶亚菊、蚤缀(*Arenaria longistyla* var. *pleurogynoides*), 地表裸露达 80%, 多石砾, 粒径 1~4 cm, 鼠类破坏十分严重, 每平方米 1~2 洞。原生植被在该区域已很难见到, 仅呈斑块状残留于部分区域。

### 1.1.2 高寒草甸草原

位于青海曲玛莱县约改滩一带( $E95^{\circ}50'31''$ ,  $N34^{\circ}07'37''$ )。原生高寒草甸草原(Native meadow prata, 以下缩写为 NMP)以小蒿草(*Kobresia parva*)为优势种, 伴有紫花针茅、双叉细柄茅、火绒草、二裂委陵菜、棘豆(*Oxytropis kansuensis* Bunge)、黄芪(*Astragalus membranaceus*)、兔儿草(*Lagotis brachystachya* Maxim)、早熟禾(*Poa* sp.)、雪白委陵菜(*Potentilla nivea*)、细叶亚菊为主, 植被总盖度 80%, 禾本科和莎草科植物分别占 20% 和 60%, 禾草高 7 cm, 小蒿草高 2~3 cm, 其中小蒿草种群斑块地表黑色生物结皮死亡, 火绒草斑块状分布于生物结皮死亡斑块中间。退化高寒草甸草原(Degraded meadow prata, 以下缩写为 DMP), 植物有美丽风毛菊、早熟禾、黄芪、棘豆、二裂委陵菜、蒲公英(*Herbataraxaci*)、紫羊茅、双叉细柄茅、恰草(*Koeleria cristata*), 植被盖度 20%。莎草科植物减少, 小蒿草斑块及草毡表层消失, 未见鼠类活动与草皮的剥蚀。

### 1.1.3 高寒草原化草甸

分布于曲麻莱县叶格乡一带( $E95^{\circ}20'51''$ ,  $N34^{\circ}33'41''$ ), 原生高寒草原化草甸(Native prata stepposa, 以下缩写为 NPS)中植物有双叉细柄茅、

早熟禾、羊茅(*Festuca ovina*)、线叶嵩草(*K. capillifolia*)、小蒿草、黄芪、多裂委陵菜(*P. multifida*)、细叶亚菊、棘豆等, 植被盖度 70%, 禾本科约占 60%~65%。小蒿草呈斑块状分布, 丛径 20~30 cm, 盖度不足 3%。退化高寒草原化草甸(Degraded prata stepposa, 以下缩写为 DPS)演化成双叉细柄茅草原, 原生禾草呈小丛状, 丛径 5~7 cm, 盖度不足 5%, 草高 4~6 cm, 植物种类有棘豆、火绒草、蒲公英、细叶亚菊、黄芪、多裂委陵菜、龙胆, 总盖度 15%~20%, 可见鼠洞挖掘痕迹, 地表覆砾石, 粒径多为 0.8 cm, 亦有 5 cm 黑色片石。

### 1.1.4 人工草地

玛多县鄂陵湖区域( $E97^{\circ}59'52''$ ,  $N34^{\circ}33'41''$ )分布有垂穗披碱草人工草地(Pastureland, 以下缩写为 PA), 于 2008 年种植。人工植被盖度 80%, 生殖枝高 25~30 cm, 营养枝高 5 cm。原生植被斑块区植被盖度 40~50 cm, 植被呈小岛状分布, 以早熟禾、紫羊茅、苔草、针茅、紫菀、棘豆、兔儿草、西北利亚蓼(*Polygonum sibiricum*)、蒲公英为主, 植被盖度 40%~50%。未见鼠类活动, 地表砾石极少, 为细砂质。

## 1.2 采样方法

野外考察区域覆盖了青海省三江源地区和藏北高原安多地区, 重点研究区域设置在青海省玛多县、曲麻莱县、青藏公路沿线至西藏安多地区(图 1)。设置了 16 个典型采样区域, 将研究区高寒草原分为高寒草甸草原、高寒草原化草甸和高寒草原 3 种类型。每种类型下按照区域实际土地利用现状进一步划分为原生草地、退化草地 2 种土地利用格局。在玛多县鄂陵湖区域亦有较多的人工草地。

采样于 2008 年 8 月植物生长盛期进行。采用对比试验设计, 在每一采样区内, 以原生草地-退化草地(鄂陵湖样点亦有原生草地-人工草地)为对比处理, 选择 6 个采样点, 同一对比类型的采样点之间距离至少为 1 km。在每一个采样点, 一种对比类型的 2 种处理各确定 3 个一一对应的样方(1 m × 1 m); 处理间的对应样方应处于同一坡向和海拔高度, 间距应小于 30 m, 以避免由于地形或土壤本身的空间差异掩盖了处理效果; 同一处理内的 3 个样方间距至少为 5 m, 用这 3 个样方的数据计算平均值和标准误。其中: 植物群落特征与地表状况调查采用 1 m × 1 m 的样方法<sup>[11, 12]</sup>重复 3 次; 土壤样品及地下生物量采用  $\Phi 6$  cm 根钻法<sup>[13, 14]</sup>, 深度分别为

0~ 10 cm, 10~ 20 cm 和 20~ 40 cm, 重复 18 次将根系筛出, 洗净, 105 °C 杀青后, 65 °C 烘干至恒重, 称重, 粉碎后过 0.25 mm 筛, 作为土壤分析样品; 分层土壤容重采用容量法<sup>[15]</sup>, 重复 6 次; 土壤碳素采用重铬酸钾氧化- 外加加热法(GB7857- 87) 进行测定。

### 1.3 数据处理分析

植物地下部有机碳分层储量:  $Cb = \sum_{i=1}^n (O_i \times S_i)$

式中,  $Cb$  为植物地下部分有机碳储量 ( $g C \cdot m^{-2}$ ),  $O_i$  为第  $i$  个样方地下植物根系混合样有机碳含量 ( $g C \cdot m^{-2}$ ),  $S_i$  为第  $i$  层在整个样方土壤层数中所占的比例 ( $1/n$ )。

土壤有机碳分层储量<sup>[16]</sup>:

$$Cs = S \times H_i \times Ci$$

式中,  $Cs$  为土壤有机碳储量 ( $g C \cdot m^{-2}$ ),  $S$  为面积 ( $m^2$ ),  $H_i$  为土壤深度 ( $m$ ),  $i=1$  代表 0~ 0.1 m,  $i=2$  代表 0.2 m, ...,  $i=4$  代表 0.3~ 0.4 cm,  $Ci$  为该层次中有机碳的含量 ( $g C \cdot m^{-2}$ )。

不同草地碳增汇潜力:

$$Ci = (Cb_i + Cs_i) - Cd_g$$

式中,  $Ci$  为不同类型草地碳增汇潜力 ( $g C \cdot m^{-2}$ ),  $Cb_i$  和  $Cs_i$  为对应草地类型的植物根系和土壤有机碳储量 ( $g C \cdot m^{-2}$ ),  $Cd_g$  为对应的原生草地系统碳储量 ( $g C \cdot m^{-2}$ )。

应用 SUS 9.1 软件分析 7 种对比类型根系、土壤、植物- 土壤总有机碳储量差异显著程度。

## 2 结果与分析

### 2.1 植物根系碳贮量特征

不同类型高寒草原植物根系碳贮量 (0~ 40 cm) 具有明显的差异 ( $P < 0.05$ ), 表现为高寒草甸草原 ( $896.30 \pm 22.1 g C \cdot m^{-2}$ ) > 高寒草原化草甸 ( $388.81 \pm 29.5 g C \cdot m^{-2}$ ) > 高寒草原 ( $335.25 \pm 31.7 g C \cdot m^{-2}$ ), 其对应的退化型草地也表现出了相同的规律; 退化草地植物根系碳贮量明显低于原生草地, 退化高寒草甸草原、高寒草原化草甸和高寒草原根系碳贮量的下降量分别为 59.9%, 32.3% 和 57.4% (图 1)。种植人工草地后, 虽然产草量可显著提高, 但其植物根系碳贮量下降更为剧烈, 与原生草地和退化草原相比, 人工草地根系碳贮量分别下降 86.2% 和 67.7%。

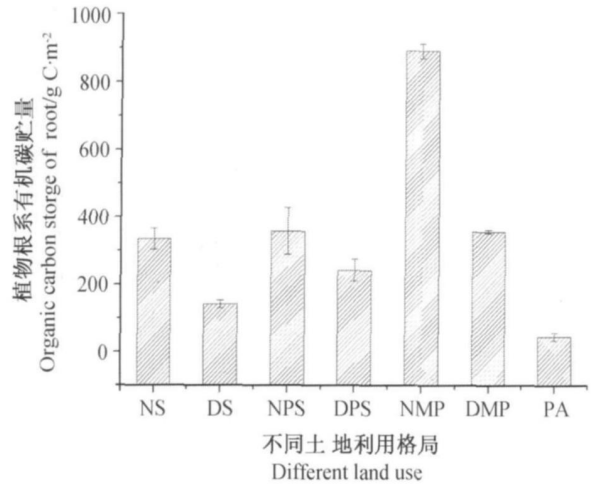


图 1 不同草原亚类型植物根系有机碳储量

Fig. 1 Plant root organic content in different used land

注: NS 代表原生高寒草原, DS 代表退化高寒草原, NPS 代表原生草原化草甸, DPS 代表退化草原化草甸, NMP 代表原生草甸草原, DMP 代表退化草甸草原, PA 代表人工草地; 下同

Note: NS: native steppe, DS: degraded steppe, NPS: native prata stepposa, DPS: degraded prata stepposa, NMP: native meadow prata, DMP: degraded meadow prata, PA: pastureland; the same as below

### 2.2 土壤碳贮量特征

不同草地类型 0~ 40 cm 土层内的土壤有机碳贮量具有明显差异 ( $P < 0.05$ ), 高寒草甸草原 ( $8965.25 \pm 31.9 g C \cdot m^{-2}$ ) > 高寒草原化草甸 ( $8328.17 \pm 53.2 g C \cdot m^{-2}$ ) > 退化高寒草甸草原 ( $7883.89 \pm 51.3 g C \cdot m^{-2}$ ) > 退化草原化草甸 ( $7346.48 \pm 21.5 g C \cdot m^{-2}$ ) > 高寒草原 ( $4368.35 \pm 42.3 g C \cdot m^{-2}$ ) > 人工草地 ( $4371.78 \pm 11.5 g C \cdot m^{-2}$ ) > 退化高寒草原 ( $2890.62 \pm 71.2 g C \cdot m^{-2}$ ), 原生高寒草原与原生高寒草甸草原、原生高寒草原化草甸差异达到显著水平 ( $P < 0.05$ ), 原生高寒草原、人工草地与退化高寒草原相比差异显著 ( $P < 0.05$ ), 但原生高寒草原与人工草地差异不显著; 随着草地的退化其土壤碳贮量与各自原生型草地相比呈现明显的降低趋势, 高寒草甸草原、高原草原化草甸、高寒草原下降量分别为 12.1%, 11.8% 和 33.8%, 相比植物根系下降程度有所减轻 (图 2)。

### 2.3 不同类型草地碳增汇潜力

植物- 土壤系统碳贮量是植物根系碳贮和土壤碳贮的叠加效应。3 类高寒草原的总碳贮表现为高寒草甸草原 ( $9885.21 \pm 11.3 g C \cdot m^{-2}$ ) > 高寒草原化草甸 ( $8421.55 \pm 61.2 g C \cdot m^{-2}$ ) > 高寒草原 ( $4507.31 \pm 68.12 g C \cdot m^{-2}$ )。以 3 类原生型高寒草

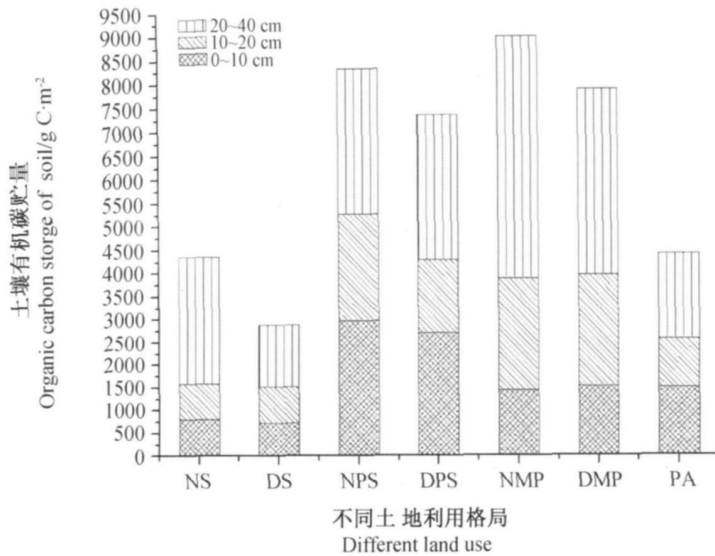


图2 土壤有机碳储量

Fig. 2 Soil organic storage.

原生态系统为标准, 将退化和人工草地生态系统作为高寒草原碳增汇的基础, 计算各种退化草地类型的理论碳汇潜力, 其潜力大小分别为退化高寒草甸草原 ( $18.82 \pm 0.51 \text{ t C} \cdot \text{hm}^{-2}$ )、退化高寒草原化草甸 ( $18.15 \pm 0.15 \text{ t C} \cdot \text{hm}^{-2}$ )、退化高寒草原 ( $14.65 \pm 0.78 \text{ t C} \cdot \text{hm}^{-2}$ )、人工草地 ( $1.29 \pm 0.21 \text{ t C} \cdot \text{hm}^{-2}$ )。退化草地增汇潜力最大可达 48.17%, 人工草地恢复到原生高寒草地增汇作用不明显 (表 1)

表 1 不同土地利用格局下高寒草原碳储量 and 理论增汇潜力  
Table 1 Carbon storage and potential carbon sequestration capacity under different land use patterns

土地利用格局 Different land use	生态系统碳储量 Organic carbon storage / $\text{t C} \cdot \text{hm}^{-2}$	理论增汇潜力 Carbon sequestration potential / $\text{t C} \cdot \text{hm}^{-2}$
NMP	$98.85 \pm 0.11^*$	$18.82 \pm 0.51$
NPS	$84.21 \pm 0.61^*$	$18.15 \pm 0.15$
NS	$45.07 \pm 0.68$	$14.65 \pm 0.78$
PA	$43.77 \pm 0.16$	$1.29 \pm 0.21$

注: 表中\* 号表示各土地利用类型的总碳储量与原生草地的总碳储量有显著差异 ( $P < 0.05$ )

Note: \* means significant difference between different land use patterns at the 0.05 level

### 3 讨论

随着大气  $\text{CO}_2$  浓度的升高和全球变暖的加剧, 温室气体的减排工作得到越来越多的关注, 如何利用陆地生态系统进行固碳活动也成了全球所关心的话题。北半球中高纬度陆地生态系统是一个巨大的碳汇, 固定了全球范围内来自人为排放的大部分  $\text{CO}_2$  [17, 18]。地处青藏高原的高寒草地正是一个巨大

的天然有机碳储存库 [19]。以往关于青藏高原高寒草原碳汇的报道较少, 利用 CASA 模型和 MODIS 遥感数据, 根据五道梁地区净初生产力得出青藏高原年固碳量达  $12.5 \times 10^{12} \text{ g} \cdot \text{a}^{-1}$  [10], 根据青藏高原不同土质的有机碳含量与各种土质的面积计算青藏高原土壤碳库为  $335.1973 \times 10^8 \text{ t C}$  [2]。现有的研究报道着重于自然生态系统碳的现储量、草地生态系统的年收支量, 年收支这部分实际上多为地上生产所获得, 在放牧作用和自然分解作用下会很快返回大气, 因此真正的碳增汇是以可长期能存贮的碳为主。

人类活动和气候变化造成了高寒草原的退化, 其面积占到草原的 40%~50%, 人类活动是草原退化的主要原因, 在高寒草甸所做的放牧强度试验中也得出了放牧强度增大引起草地退化的结论 [20]。目前草原管理存在很多问题, 草地使用权不明晰、不落实, 继续沿用家畜头数指标等是造成草原不断退化和草地畜牧业生产效率低的根本原因 [21], 退化草地的治理恢复和合理的草场管理模式的建立, 是未来增汇的主要基础。确定各地的最宜载畜量和畜群结构, 并通过育种改良、发展季节畜牧业、育肥、饲草料生产基地建设, 增强草地生态的稳定性和畜牧业产业化水平 [22]。对于退化草地的恢复, 可采取封育、建植人工草地等措施, 尽可能依靠自然力恢复轻度退化草场的生态服务功能。人工草地与退化高寒草原相比可显著增加系统有机碳储量大约 45.47%, 退化高寒草原人工种植草地是一种速效、可控性好的草原恢复方法, 但是人工草地仅使土壤表层 (0~

10 cm) 有机碳短时间内有较大提升, 若人工草地不合理利用, 地表植物遭到破坏后, 土壤表层封存的有机碳也会很快释放, 对人工草地应加强管理, 人工草地抗干扰能力较差, 不合理利用将会导致草地退化、草原沙漠化的严重生态后果。

高寒草甸草原和高寒草原化草甸是典型的高寒草甸向高寒草原的过度带, 随着气候暖干化和人类活动的加剧, 其典型草原化、草原退化过程极为严重, 会对该区域的草地碳贮产生深刻的影响。目前青藏高原草地自东南向西北表现为高寒草甸、高寒草原、荒漠区各草原类型的带状分布, 这种自东南向西北的变化与青藏高原水热梯度条件表现一致, 全球气候变化将导致青藏高原干暖化, 显著影响本地区水热条件的变化, 这就会使得不同草原类型之间的演替, 即草原化草甸和草甸草原直接出现于高寒草原与高寒草甸的带状区域, 多年的野外考察发现这一区域逐渐向高寒草原演替, 高寒草甸草原和高寒草原化草甸向高寒草原演替系统的碳贮量将减少 46.3%。全球气候变化对于青藏高原的影响还有很多不确定性, 因此其对于高原碳库的影响还需要进一步的研究。

## 4 结论

4.1 人类活动和水热差异使得不同类型的高寒草原有机碳贮量差异显著, 原生高寒草原、退化高寒草原、高寒草原化草甸、退化草原化草甸、高寒草甸草原、退化草甸草原和人工草地土壤-植物系统中总有机碳贮量分别为  $45.07 \pm 0.68$ ,  $30.41 \pm 0.5$ ,  $84.21 \pm 0.61$ ,  $66.11 \pm 0.62$ ,  $98.85 \pm 0.11$ ,  $80.02 \pm 0.22$ ,  $43.77 \pm 0.16 \text{ t C} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

4.2 人工草地系统有机碳贮量已接近原生高寒草地, 因此在重度退化草地建植人工草地是一种快速、高效的固碳方法。但短时间内人工草地的碳汇是通过土壤表层(0~10 cm) 增加实现的, 人工草地抗干扰能力差, 人工草地的不合理利用很容易使其再次退化。

4.3 进行退化草地的恢复, 具有显著的碳增贮潜力, 高寒草甸草原、高寒草原化草甸、高寒草原和人工草地的理论碳增贮潜力分别为  $18.82 \pm 0.51$ ,  $18.15 \pm 0.15$ ,  $14.65 \pm 0.78$ ,  $1.29 \pm 0.21 \text{ t C} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

4.4 气候变化对于高寒草原的影响有很大的不确定性, 总的来看, 气候变化导致的高原干暖化使青藏高原朝着碳流失的方向演变。根据野外调查情况, 目前气候变化的影响主要体现在高寒草甸化草原和

草原草甸向高寒草原的演变, 这将使得草原化草甸和草甸草原损失 46.3% 的有机碳。

## 参考文献

- [1] Jin F, Yang H, Zhao Q. Progress in the research on soil organic carbon storage and its influencing factors [J]. *Soils*, 2000, 32(1): 11-7
- [2] 王根绪, 程国栋, 沈永平. 青藏高原草地土壤有机碳库及其全球意义[J]. *冰川冻土*, 2002, 24(6): 693-700
- [3] Yang Y, Fang J, Tang Y, *et al.* Storage patterns and controls of soil organic carbon in the Tibetan grasslands [J]. *Global Change Biology*, 2008, 14(7): 1592-1599
- [4] 邵月红, 潘剑君, 许信旺, 等. 浅谈土壤有机碳密度及储量的估算方法[J]. *土壤通报*, 2006, 37(5): 1007-1011
- [5] 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
- [6] Schipper L, Baisden W, Parfitt R, *et al.* Large losses of soil C and N from soil profiles under pasture in New Zealand during the past 20 years [J]. *Global Change Biology*, 2007, 13(6): 1138-1144
- [7] 李东, 黄耀, 吴琴, 等. 青藏高原高寒草甸生态系统土壤有机碳动态模拟研究[J]. *草业学报*, 2010, 19(2): 160-168
- [8] 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): 21-25
- [9] 李月梅, 曹广民, 徐仁海. 土地利用方式对高寒草甸土壤有机碳及其组分的影响[J]. *安徽农业科学*, 2008, 36(14): 5951-5953
- [10] 裴志永, 周才平, 欧阳华, 等. 青藏高原高寒草原区域碳估测[J]. *地理研究*, 2010, 29(1): 102-110
- [11] 杜岩功, 曹广民, 王启兰, 等. 放牧对高寒草甸地表特征和土壤物理性状的影响[J]. *山地学报*, 2007, 25(3): 338-343
- [12] 刘光崧, 蒋能慧, 张连第. 土壤理化分析与剖面描述[M]. 北京: 中国标准出版社, 1996
- [13] 任继周. 草业科学研究方法[M]. 北京: 中国农业出版社, 1996
- [14] 林丽, 曹广民, 李益康, 等. 人类活动对青藏高原高寒矮嵩草草甸谈过程的影响[J]. *生态学报*, 2010, 30(15): 4012-4018
- [15] 曹广民, 龙瑞军, 张法伟, 等. 青藏高原高寒矮嵩草草甸碳增汇潜力估测方法[J]. *生态学报*, 2010, 30(23): 6591-6597
- [16] 黄昌勇. 土壤学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2005: 67
- [17] Ciais P, Tans P, Trolier M, *et al.* A large northern hemisphere terrestrial CO<sub>2</sub> sink indicated by the <sup>13</sup>C/<sup>12</sup>C ratio of atmospheric CO<sub>2</sub> [J]. *Science*, 1995, 269(5227): 1098-1102
- [18] Schimel D, House J, Hibbard K, *et al.* Recent patterns and mechanisms of carbon exchange by terrestrial ecosystems [J]. *Nature*, 2001, 414(6860): 169-72
- [19] 刘敏超, 李迪强, 温琰茂. 三江源区植被固定 CO<sub>2</sub> 释放 O<sub>2</sub> 功能评价[J]. *生态环境*, 2006, 15(3): 594-597
- [20] 王文颖, 王启基. 高寒高草草甸退化生态系统植物群落结构特征及物种多样性分析[J]. *草业学报*, 2001, 10(3): 8-14
- [21] 张自和. 西藏高寒草地畜牧业的意义、问题与发展建议[J]. *草业科学*, 2001, 18(6): 49-51
- [22] 魏兴琥, 杨萍, 王亚军, 等. 西藏那曲现行草场管理方式与草地退化的关系[J]. *草业科学*, 2003, 20(9): 49-53

(责任编辑 李美娟)