

我国草地的固碳功能

高树琴, 赵霞, 方精云

(植被与环境变化国家重点实验室, 中国科学院植物研究所, 北京 100093)

摘要: 本文通过综述当前我国草地碳库的研究成果, 并利用 1982—2011 年的遥感影像, 估算出我国草地生态系统碳库约为 31.2 PgC, 其中 96 % 储存于土壤中。由于我国草地类型多样, 分布地域广阔, 造成草地植被碳密度分布的空间异质性很高。内蒙古是草地植被碳库最大的省份, 其次是西藏和青海, 六大牧区的植被碳库占全国草地植被碳库总量的 71 %。然而, 我国 90 % 的天然草地发生不同程度的退化, 采取有效的人工管理措施和实施重大的生态建设工程, 均对草地碳库的恢复具有明显的作用, 说明我国草地有很大的碳汇潜力。

关键词: 草地; 植被碳储量; 土壤碳储量; 草地退化; 固碳潜力

中图分类号: S812 **文献标识码:** A

Carbon Sequestration of Grassland in China

Gao Shuqin, Zhao Xia, Fang Jingyun

(State Key Laboratory of Vegetation and Environmental Change, Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093, China)

Abstract: Based on the research of the grassland carbon sink in China and the remote sensing data from 1982 to 2011, the total carbon storage of the grassland ecosystem in China is about 31.2 PgC, 96 % of which are stored in the soil. The vegetation carbon density of grassland is highly spatially heterogeneous due to various types of grassland and vast distribution in China. The largest grassland vegetation carbon sink in China is located in Inner Mongolia, followed by Tibet and Qinghai, while that of the six main pastoral areas accounts for 71 % of the national grassland vegetation carbon sink. However, 90 % of the natural grassland in China has degraded more or less. Effective managements and implementation of major ecological construction projects have played an important role in the recovery of grassland carbon storage, which indicates that the grassland in China has great potential for carbon sequestration.

Key words: grassland; vegetation carbon storage; soil organic carbon storage; grassland degradation; carbon sequestration potential

一、前言

陆地生态系统碳循环是全球碳循环中的核心部分, 在全球气候变化中扮演着关键角色^[1]。陆地生态系统碳库(包括植物和土壤两部分)约为大气碳库的 3 倍^[2]。研究陆地生态系统碳库的大小, 有助

于了解和预测全球的碳平衡, 可作为有效评价陆地生态系统可持续性的重要指标^[3]。相比于大气碳库和海洋碳库, 陆地生态系统碳库是受人类活动影响最显著的碳库, 其对大气中 CO₂ 浓度的年际变化影响很大^[4]。

草原是地球绿色植被的重要组成部分, 可分为

收稿日期: 2015-12-21; 修回日期: 2015-12-25

作者简介: 高树琴, 中国科学院植物研究所, 博士, 研究方向为植物生态学; E-mail: gaoshuqin943@ibcas.ac.cn

基金项目: 中国工程院重大咨询项目“中国草地生态保障与粮食安全战略研究”(2012-ZD-7)

本刊网址: www.engingsci.cn

热带草原、温带草原等多种类型，是地球上分布最广的植被类型之一，覆盖了全球 20 % 的陆地面积。但是，草原生态系统是当前受人类活动干扰最为严重的区域，导致其碳素行为非常活跃。草原生态系统有很强的碳蓄积能力，这些潜在的碳汇将在全球碳循环中发挥重要的作用。研究草原生态系统的碳循环，估算草原生态系统碳库的大小，对于系统分析草原在全球气候变化过程中的作用，以及全球碳平衡具有重要的意义^[5]。

草原生态系统贡献了陆地生态系统总生产力的 30 %，对于调节全球碳循环和气候具有重要的作用^[6, 7]。草地生态系统与森林等其他陆地生态系统不同，其碳库主要集中于地下，分布于土壤和植物根系当中，而地上植被的碳库则较小。准确评估草地生态系统碳库大小及其动态变化，一方面有利于预测全球变化与草地生态系统的反馈关系，另一方面有助于评估草地资源的可持续利用^[8, 9]。

二、草地植被碳库及空间分布

草地生态系统碳库主要包括植被碳库（地上和地下生物量碳库）和土壤有机碳库两部分^[10]。自 20 世纪 90 年代以来，不少专家学者利用不同方法，对我国草地的生物量碳库和碳密度进行了估算^[3, 11-17]。然而由于采用的方法不同，草地面积也有一定的差异，因此不同的研究给出的估算值之间存在着较大差异。我国草地植被碳库的估算值介于

0.56~3.32 PgC（见表 1），相差近 6 倍。

沈海花等^[17]通过综述我国草地生态系统碳库研究的进展，并利用 1982—2011 年的遥感影像和气候数据，估算得出我国草地生态系统植被碳库约为 1.18 PgC。我国不同地区草地植被碳库差异较大，根据 1:100 万植被图和遥感估算，我国各省、市、自治区草地植被碳库的变化范围在 0.11~282.1 TgC，最大的是内蒙古，其次是西藏和青海，数值分别为 282.1 TgC、186 TgC 和 175.1 TgC，占全国草地植被碳库的 21.6 %、14.2 % 和 13.4 %（见图 1a）。我国各省、市、自治区总生物量碳密度的变化范围在 2.49~10.52 tC·hm⁻²，碳密度最小的是西藏（2.49 tC·hm⁻²），其次是宁夏为 2.54 tC·hm⁻²（见图 1b）。新疆的草地面积虽然排名全国第三，约占全国草地总面积的 13 %，但由于该区主要分布着温性荒漠草原和温性草原化荒漠，因此其植被碳库仅占全国草地植被碳库的 11 %。综合计算得出，我国六大牧区（西藏、内蒙古、新疆、青海、四川、甘肃）的植被碳库占全国草地植被碳库的 71 %。

我国草地分布地域广阔，自然条件复杂多样，因此草地植被碳密度的空间分布高度异质。不同类型的草地由于所处自然环境不同，其植被碳密度也存在着差异。根据 1:100 万植被图资料，我国天然草地可划分为草原、草甸、草丛和草本沼泽 4 大类。结合不同气候、土壤或地形因子，进一步可将我国草地划分为 12 类^[17]。利用 1982—2011 年的遥感影像和气候数据，估算得出总生物量碳密度最大的是寒温带 / 温带沼泽，最小的是高寒草原，分别

表 1 不同研究得出的我国草地生物量密度及生物量碳库

草地面积 /10 ⁴ km ²	总生物量碳密度 /(gC·m ⁻²)	总生物量碳库 /TgC	数据来源与方法	参考文献
569.9	215.8	1 230	国家草地资源调查数据，根茎比	[3]
299.0	1 023.5	3 060	全球不同草地类型的平均生物量碳密度	[13]
331.4	346.0	1 150	国家草地资源清查数据	[12]
331.4	315.3	1 045	国家草地资源清查数据，根茎比；植被指数模型	[16]
167.0	340.0	562	植被-土壤-大气碳交换模型；植被指数模型	[18]
334.1	315.2	1 053	国家草地资源清查数据；植被指数模型	[14]
331.0	1 002.0	3 316	草地资源清查数据；实测生物量数据	[11]
331.4	320.5	1 000	文献综述结合实测数据	[19]
280	421.6	1 180	地上与地下生物量关系、遥感估算；1:100 万植被图	[17]

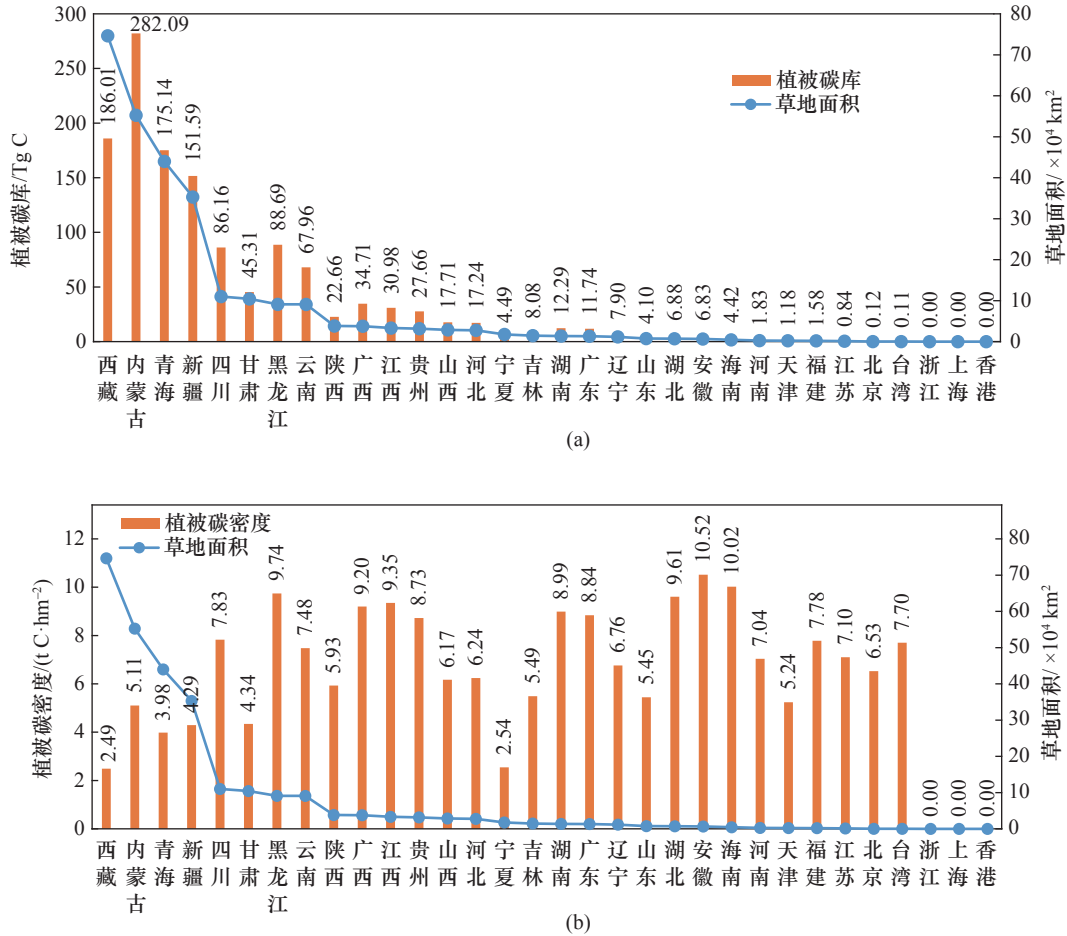


图1 1982—2011年我国部分省、自治区、直辖市与香港特别行政区天然草地的平均植被碳库(a)和植被碳密度(b)

是 $1\ 012\ \text{gC}\cdot\text{m}^{-2}$ 和 $203\ \text{gC}\cdot\text{m}^{-2}$ (见表2)。但由于不同类型草地的面积大小不同,总生物量碳库数值最大的是高寒草甸,其次是亚热带/热带草丛和温性草原,对应的总生物碳库数值分别是 $267.6\ \text{TgC}$ 、 $206.7\ \text{TgC}$ 和 $161.9\ \text{TgC}$ 。总生物碳库数值最小的是温带草丛为 $19\ \text{TgC}$ 。

三、草地土壤有机碳库及空间分布

草地生态系统的碳库主要集中在土壤层中,约占生态系统碳库总量的90%,而在高寒草甸中这一比例甚至高达95%^[20]。全球陆地生态系统中,储量最大的碳库是土壤圈。土壤碳库是大气碳库的2倍,是植被碳库的3倍^[21-23]。因此,可以说土壤碳库是大气 CO_2 的重要源和汇^[24],土壤碳库的变化在很大程度上将会改变大气 CO_2 的浓度,从而影响全球的碳平衡^[24]。

草地生态系统土壤中的碳主要以有机碳的形式存在,而且主要集中于表层0~20 cm的土壤中^[25]。土壤的呼吸作用向大气释放的 CO_2 约占全球 CO_2 交换量的25%^[26]。除植被冠层的光合作用以外,土壤呼吸作用是陆地生态系统碳收支中最大的通量^[27]。部分专家学者对我国草地的土壤有机碳库进行了估算,但不同估算结果之间存在一定的差异,估算值在 $16.7\sim 41\ \text{PgC}$,平均值约为 $30\ \text{PgC}$ (见表3)。

草地土壤碳库的空间变异主要与气候、土壤质地等因素密切相关。我国草地生态系统土壤碳库同样存在较大的空间变异,这主要是受降水引起的土壤含水量不同的影响,土壤质地不同也是导致土壤有机碳产生空间变异的重要因素。Yang等^[8]采集我国北方草地327个样点、981个土壤剖面的实测数据,并对其进行了系统分析,结果表明表层0~30 cm土壤的有机碳密度介于 $4.1\ \text{kgC}\cdot\text{m}^{-2}$ (内蒙古地区)与 $7.2\ \text{kgC}\cdot\text{m}^{-2}$ (新疆地区)之间;土壤有机

表 2 1982—2011 年我国不同类型草地面积和生物量碳密度

草地类型	草地面积比例 /%	地上生物量碳密度 /($\text{gC}\cdot\text{m}^{-2}$)	地下生物量碳密度 /($\text{gC}\cdot\text{m}^{-2}$)	总生物量碳密度 /($\text{gC}\cdot\text{m}^{-2}$)
草甸草原	3.3	126.495	498.78	625.275
温性草原	16.2	62.415	294.615	357.03
荒漠草原	8.1	35.055	191.745	226.8
高寒草原	22.9	30.465	172.665	203.13
山地草甸	4.4	179.955	648.765	828.72
沼泽化草甸	2.3	182.61	655.785	838.395
盐生草甸	5.6	53.235	261.765	315
高寒草甸	24.4	70.155	321.57	391.725
温带草丛	1	140.715	539.64	680.355
亚热带 / 热带草丛	8.7	185.4	663.075	848.475
寒温带 / 温带沼泽	2.1	231.075	781.38	1 012.455
高寒沼泽	1	162.81	601.785	764.595

表 3 不同研究得出的我国草地土壤有机碳密度及土壤有机碳库

研究区域	面积/ $\times 10^4 \text{ km}^2$	土壤深度 /cm	土壤碳密度 /($\text{kgC}\cdot\text{m}^{-2}$)	土壤碳库 /PgC	数据来源与方法	参考文献
北方草地	168.9	102.7	16.6	28.1	第一次全国土壤普查数据及其他	[3]
北方草地	196.3	100	8.5	16.7	2001—2005 年实测数据	[8]
我国草地	278.5	103	15.1	37.7	第二次全国土壤普查数据	[28]
我国草地	167.0	100	10.0	16.7	植被-土壤-大气碳交换模型	[18]
我国草地	311.8	100	13.2	41.0	全球土壤数据库	[13]
我国草地	331.4	100	8.5	28.2	文献综述结合实测数据	[19]

碳库在不同地区也具有明显的差异，数值最大的是青藏高原达到 6.8 PgC，而数值最小的是内蒙古草原，仅为 1.8 PgC。

草地生态系统土壤有机碳密度与年平均降水量呈正相关，具有明显的垂直分布特征，表层 0~20 cm 的土壤中有有机碳含量相对较高^[8]。何念鹏等^[29]在内蒙古温带草地的实验也得出相同的结果，随着土层深度的增加，土壤碳密度明显降低。

四、草地退化造成的碳损失

我国草地植物资源丰富，但由于气候变化再加上近些年来超载过牧、乱挖滥采等人类活动破坏，致使草地生态系统发生大面积受损，草地退化、沙化和盐碱化的问题十分突出^[30]。草地一旦发生退化、沙化和盐碱化，不仅会造成草地植被的覆盖率下降，加速草地生态系统土壤中碳的释放，增加大气 CO₂ 浓度，还会降低草地生态系统的固碳能力，减弱草地的碳汇作用（见表 4）。有研究表明，高寒草地

重度退化草地的碳含量与原生植被封育处理草地相比，表层（0~20 cm 土层）土壤有机碳的损失量为 3.80 kgC·m⁻²，流失 50.9 %；此外，通过草地植物组织流失的碳含量达到 2.65 kgC·m⁻²，损失量为 86.5 %^[31]。在四川次生亚高山草甸以及青海高山草甸的研究都发现退化导致土壤有机碳大量流失，且随着退化程度的加重，流失量也有不同程度的增加。例如，轻度、中度、重度和严重退化草地的土壤有机碳分别比未退化的草地减少了 27 %、49 %、55 % 和 56 %^[32-34]。赵哈林等^[35]在科尔沁沙地的研究表明，与非荒漠化草地相比，轻度、中度、重度和严重沙化草地的生物量碳密度依次下降 26.5 %、53.5 %、79.5 % 和 90.3 %；土壤有机碳密度（0~100 cm 土层）分别下降了 56.1 %、78.4 %、89 % 和 91.6 %。

五、草地管理措施有利于草地碳的积累

人类采取草地管理措施，将从植被地上生物量

表 4 草地退化、沙化、盐碱化造成的碳损失

退化类型	研究区域	土壤深度/cm	退化程度	植被碳损失/(gC·m ⁻²)	土壤碳损失/(gC·m ⁻²)	数据来源与方法	参考文献
草原沙化	科尔沁沙化草地	0~100	轻度	102.7	2 544.7	实测数据	[35, 36]
			中度	197.1	3 700.5		
			重度	306.5	4 244.3		
			严重	353	4 396.1		
草原沙化	北方沙漠化土地	0~50	轻度	—	858.3	文献剖面数据、各地土壤调查数据、实测数据	[37]
			中度	—	2 464.7		
			重度	—	3 208.5		
草原退化	松嫩草原	0~40	轻度	-13.92	174	实测数据	[38]
			中度	3.99	368		
			重度	27.16	572		
			严重	43.78	845		
草原盐碱化	临泽盐渍化草地	0~30	中度	—	1 460	实测数据	[39]
			重度	—	2 970		
			严重	—	3 390		

和土壤质量两方面改变草地生态系统碳库的积累。人工种草、退耕还草和草场围栏封育是目前采取的 3 种基本的草地管理措施，也是当前提高草地生态系统碳储量，实现草地生态系统增汇的最经济、最具操作性的途径之一^[10, 40, 41]。草地补播、围栏封育和禁牧休牧减少了牲畜对土壤的践踏和人类活动的干扰，草地的土壤肥力得以恢复，植被地上生物量也得到了提高^[42, 43]，从而有利于各种草地类型的碳积累。但是，各种草地管理措施的影响过程和影响程度各不相同（见表 5）。何念鹏等^[29]基于 4 个封育长达 21~30 年的草地与自由放牧草地的对比研究，发现围栏封育草地碳储量显著高于相对应的自由放牧草地。随着围栏封育年限的增加，土壤有机碳密度不断增大，草地生态系统的碳汇功能也显著增强。

六、总结

通过综述当前我国草地碳库的研究成果，结合 1:100 万植被图和遥感影像，估算我国草地植被碳储量约为 1.18 PgC，草地土壤碳库约为 30 PgC，即草地生态系统 96 % 的碳储存于土壤中。据统计，我国约有 90 % 的天然草地发生了不同程度的退化，其中，中度和重度退化草地的面积达 2.3×10^9 亩（1 亩 $\approx 666.67 \text{ m}^2$ ），内蒙古、西藏、新疆、青海、四川和甘肃等主要牧区退化草地比例甚至高达 80 %~97 %^[44]。所谓退化草地的固碳潜力，就是退化草地恢复到退化前水平时所能固定的有机碳总量。禁牧、休牧等国家出台的草原保护制度和围栏封育等草地管理措施能够有效改善和恢复草地的固碳能力。近年来国家实施的草原重大生态建设工程对草地生态

表 5 不同草地类型在各种管理措施下土壤有机碳的增加量

(gC·m⁻²·a⁻¹)

草地类型	补播	轻牧	中牧	重牧	过牧	围封	禁牧	数据来源	参考文献
高寒草甸	126	-135	-300	-375	-562	—	46	获取近 500 篇已发表的文献，采用整合分析	[45]
温性草原	107	-41	-73	-126	-240	37	12		
高寒草原	—	-176	-85	-362	-236	—	4		
山地草甸	—	—	—	—	-516	223	—		
温性草甸草原	—	-139	-292	-374	-230	68	18		
温性荒漠草原	—	4	-42	-52	-85	28	68		
暖性灌草丛	64	-194	-136	-150	—	—	—		

系统碳库的恢复具有明显的作用^[46],可以预见我国草地生态系统的碳储量将会逐渐增加,形成一个重要的碳汇。

参考文献

- [1] Schindler D W. Carbon cycling: The mysterious missing sink [J]. *Nature*, 1999, 398 (6723): 105–107.
- [2] The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Climate change 2001: the third assessment report of the IPCC [R]. New York: New York Cambridge University Press, 2002.
- [3] 方精云, 刘国华, 徐嵩龄. 中国陆地生态系统的碳库 [M]. 温室气体浓度和排放监测及相关过程. 北京: 中国环境科学出版社, 1996.
Fang J Y, Liu G H, Xu S L. The Carbon Pool of Terrestrial Ecosystems in China. Greenhouse Gas Concentration and its Emission Monitoring and Related Processes [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1996.
- [4] Watson R T. Land use, Land-use Change, and Forestry: A Special Report of the IPCC [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2000.
- [5] 钟华平, 樊江文, 于贵瑞, 等. 草地生态系统碳循环研究进展 [J]. 草地学报, 2005, 13 (S1): 67–73.
Zhong H P, Fan J W, Yu G R, et al. Progress of carbon cycle research in grassland ecosystem [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2005, 13(S1): 67–73.
- [6] Scurlock J M O, Hall D O. The global carbon sink: A grassland perspective [J]. *Global Change Biology*, 1998, 4 (2): 229–233.
- [7] Scurlock J M O, Johnson K, Olson R J. Estimating net primary productivity from grassland biomass dynamics measurements [J]. *Global Change Biology*, 2002, 8 (8): 736–753.
- [8] Yang Y H, Fang J Y, Ma W H, et al. Soil carbon stock and its changes in northern China's grasslands from 1980s to 2000s [J]. *Global Change Biology*, 2010, 16 (11): 3036–3047.
- [9] Yang Y H, Fang J Y, Tang Y H, et al. Storage, patterns and controls of soil organic carbon in the Tibetan grasslands [J]. *Global Change Biology*, 2008, 14 (7): 1592–1599.
- [10] Fang J Y, Yang Y H, Ma W H, et al. Ecosystem carbon stocks and their changes in China's grasslands [J]. *Science China-Life Sciences*, 2010, 53 (7): 757–765.
- [11] Fan J W, Zhong H P, Harris W, et al. Carbon storage in the grasslands of China based on field measurements of above- and below-ground biomass [J]. *Climatic Change*, 2008, 86 (3–4): 375–396.
- [12] Fang J Y, Guo Z D, Piao S L, et al. Terrestrial vegetation carbon sinks in China, 1981—2000 [J]. *Science in China Series D-Earth Sciences*, 2007, 50 (9): 1341–1350.
- [13] Ni J. Carbon storage in grasslands of China [J]. *Journal of Arid Environments*, 2002, 50 (2): 205–218.
- [14] Piao S L, Fang J Y, Zhou L M, et al. Changes in biomass carbon stocks in China's grasslands between 1982 and 1999 [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2007, 21(2): 1–10.
- [15] 马文红, 方精云, 杨元合, 等. 中国北方草地生物量动态及其与气候因子的关系 [J]. *中国科学: 生命科学*, 2010, 40 (7): 632–641.
Ma W H, Fang J Y, Yang Y H, et al. Biomass carbon stocks and their changes in northern China's grasslands [J]. *Science China Life Sciences*, 2010, 40(7):632–641.
- [16] 朴世龙, 方精云, 贺金生, 等. 中国草地植被生物量及其空间分布格局 [J]. *植物生态学报*, 2004, 28 (4): 491–498.
Piao S L, Fang J Y, He J S H, et al. Spatial distribution of grassland biomass in China [J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 2004, 28(4): 491–498.
- [17] 沈海花, 朱言坤, 赵霞, 等. 中国草地资源的现状分析 [J]. *科学通报*, 2015, doi: 10.1360/N972015-00732.
Shen H H, Zhu Y K, Zhao X, et al. Analysis of current grassland resources in China [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2015, doi:10.1360/N972015-00732.
- [18] Li K R, Wang S Q, Cao M K. Vegetation and soil carbon storage in China [J]. *Science in China (Series D)*, 2004, 47(1): 49–57.
- [19] 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 J Y, Yang Y H, Ma W H, et al. Ecosystem carbon stocks and their changes in China's grasslands [J]. *Science China Life Sciences*, 2010, 40(7): 566–576.
- [20] 钟华平, 樊江文, 于贵瑞, 等. 草地生态系统碳蓄积的研究进展 [J]. *草业科学*, 2005, 22 (1): 4–11.
Zhong H P, Fan J W, Yu G R, et al. The research progress of carbon storage in grassland ecosystem [J]. *Pratacultural Science*, 2005, 22(1): 4–11.
- [21] Kimble L R J, Stewart B. World Soils as a Source or Sink for Radiatively-active Gases. Soils and Global Change [M]. In Lal R, Kimble J and Levin E, eds. Florida: CRC Press, 1995: 1–8.
- [22] Schlesinger W H. Evidence from chronosequence studies for a low carbon-storage potential of soils [J]. *Nature*, 1990, 348(6298): 232–234.
- [23] Schlesinger W H. An Overview of the C Cycle. Soils and Global Change [M]. In Lai R, Kimble J and Levin E, eds. Florida: CRC Press, 1995.
- [24] Trumbore S E, Chadwick O A, Amundson R. Rapid exchange between soil carbon and atmospheric carbon dioxide driven by temperature change [J]. *Science*, 1996, 272(5260): 393–396.
- [25] 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 H L, Wang J, Xu Z, et al. Research progress and trend of the carbon cycle in grassland agroecosystem [J]. *Pratacultural Science*, 2005, 22(4):59–62.
- [26] Bouwman A F, Germon J C. Special issue-soils and climate change-introduction [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 1998, 27(3): 219–219.
- [27] Raich J W, Schlesinger W H. The global carbon-dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate [J]. *Tellus Series B-Chemical and Physical Meteorology*, 1992, 44 (2): 81–99.
- [28] Xie Z B, Zhu J G, Liu G, et al. Soil organic carbon stocks in China and changes from 1980s to 2000s [J]. *Global Change Biology*, 2007, 13(9): 1989–2007.
- [29] 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 N P, Han X G, Yu G R. Carbon and nitrogen sequestration rate in long-term fenced grasslands in inner mongolia, China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(15): 4270–4276.
- [30] 刘佳, 刘靖敏, 周建华. 碳汇与我国草地治理 [J]. *安徽农业科学*,

- 2011, 39 (10): 6050–6052.
- Liu J, Liu J M, Zhou J H. Carbon sequestration and grassland restoration in China [J]. *Journal of Anhui Agri. Sci.*, 2011, 39(10): 6050–6052.
- [31] 王文颖, 王启基, 王刚. 高寒草甸土地退化及恢复重建对土壤碳氮含量的影响 [J]. *生态环境*, 2006, 15 (2): 362–366.
- Wang W Y, Wang Q J, Wang G. Effects of land degradation and rehabilitation on soil carbon and nitrogen content on alpine Kobersia Meadow [J]. *Ecology and Environment*, 2006, 15(2): 362–366.
- [32] 邱丹. 青南地区“黑土滩”退化草地植被演替规律的研究 [J]. *中国农学通报*, 2005, 21 (9): 284–285, 293.
- Qiu D. The study on vegetation succession law of degraded grassland of “black soil type” on southern qinghai province [J]. *Chinese Agriculture Science Bulletin*, 2005, 21(9): 284–285, 293.
- [33] 王长庭, 龙瑞军, 王启兰, 等. 三江源区高寒草甸不同退化演替阶段土壤有机碳和微生物量碳的变化 [J]. *应用与环境生物学报*, 2008, 14 (2): 225–230.
- Wang C T, Long R J, Wang Q L, et al. Changes in soil organic carbon and microbial biomass carbon at different degradation successional stages of alpine meadows in the headwater region of three rivers in China [J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2008, 14(2): 225–230.
- [34] 周万海, 冯瑞章, 满元荣. 黄河源区不同退化程度高寒草地土壤特征研究 [J]. *草原与草坪*, 2008, 129 (4): 24–28.
- Zhou W H, Feng R Z, Man Y R. Characteristics of soil in different degraded pasture in the headwaters of the Yellow Rivers [J]. *Grassland and Turf*, 2008, 129(4): 24–28.
- [35] 赵哈林, 李玉强, 周瑞莲. 沙漠化对科尔沁沙质草地生态系统碳氮储量的影响 [J]. *应用生态学报*, 2007, 18 (11): 2412–2417.
- Zhao H L, Li Y Q, Zhou R L. Effects of desertification on C and N storages in grassland ecosystem on horqin sandy land [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(11): 2412–2417.
- [36] Li Y Q, Zhao H L, Zhao X Y, et al. Biomass energy, carbon and nitrogen stores in different habitats along a desertification gradient in the semiarid Horqin sandy land [J]. *Arid Land Research and Management*, 2006, 20 (1): 43–60.
- [37] Duan Z H, Xiao H L, Dong Z B, et al. Estimate of total CO₂ output from desertified sandy land in China [J]. *Atmospheric Environment*, 2001, 35 (34): 5915–5921.
- [38] 韩维崢, 汤洁, 李昭阳, 等. 吉林西部草地生态系统不同退化演替阶段表层土壤有机碳变化 [J]. *科技导报*, 2011, 29 (13): 40–43.
- Han W Z, Tang J, Li Z Y, et al. Changes of surface soil organic carbon in different degradation succession stages of grassland ecosystem in the western part of Jilin Province [J]. *Science & Technology Review*, 2011, 29(13): 40–43.
- [39] Pan C C, Zhao H L, Zhao X Y, et al. Biophysical properties as determinants for soil organic carbon and total nitrogen in grassland salinization [J]. *PloS ONE*, 2013, 8 (1): e54827.
- [40] Steffens M, Kölbl A, Giese M, et al. Spatial variability of topsoils and vegetation in a grazed steppe ecosystem in Inner Mongolia (PR China) [J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2009, 172(1): 78–90.
- [41] He N P, Zhang Y H, Yu Q, et al. Grazing intensity impacts soil carbon and nitrogen storage of continental steppe [J]. *Ecosphere*, 2011, 2 (1): art8. doi:10.1890/ES1810-00017.00011.
- [42] 康慕谊, 刘肖骢, 董世魁, 等. 内蒙古扎鲁特旗土地利用方式及强度对草原群落的影响 [J]. *地球科学进展*, 2002, 17 (2): 229–234.
- Kang M Y, Liu X C, Dong S K, et al. Impacts of land use change and intensity on the grassland in zhalute banner, inner mongolia [J]. *Advance in Earth Sciences*, 2002, 17(2): 229–234.
- [43] 都耀庭, 张东杰. 禁牧封育措施改良高寒地区退化草地的效果 [J]. *草业科学*, 2007, 24 (7): 22–24.
- Du Y T, Zhang D J. Study on the spatial heterogeneity and distribution patterns of wild licorice in Ninfxia [J]. *Pratacultural Science*, 2007, 24(7): 22–24.
- [44] 韩俊. 中国草原生态问题调查 [M]. 上海: 上海远东出版社, 2011.
- Han J. Investigation of Grassland Ecological Problems in China [M]. Shanghai: Shanghai Far East Publishers, 2011.
- [45] 石锋, 李玉娥, 高清竹, 等. 管理措施对我国草地土壤有机碳的影响 [J]. *草业科学*, 2009, 26 (3): 9–15.
- Shi F, Li Y E, Gao Q Z, et al. Effects of managements on soil organic carbon of grassland in China [J]. *Pratacultural Science*, 2009, 26(3): 9–15.
- [46] 高亚琴. 黄土高原农田退耕还草对土壤碳、氮库及CO₂、N₂O排放通量的影响 [D]. 兰州: 甘肃农业大学硕士学位论文, 2009.
- Gao Y Q. Effects of returning farmland to grassland on soil carbon and nitrogen pool, N₂O and CO₂ emission flux from farmland in the loess plateau (Master’s thesis)[D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2009.