

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

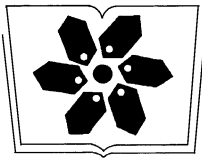
Acta Ecologica Sinica



第 31 卷 第 24 期 Vol.31 No.24 **2011**

中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 31 卷 第 24 期

2011 年 12 月 (半月刊)

目 次

柑橘黄龙病株不同部位内生细菌群落结构的多样性·····	刘 波,郑雪芳,孙大光,等 (7325)
小兴安岭红松径向生长对未来气候变化的响应·····	尹 红,王 靖,刘洪滨,等 (7343)
污水地下渗透系统脱氮效果及动力学过程·····	李海波,李英华,孙铁珩,等 (7351)
基于生态系统服务的海南岛自然保护区体系规划·····	肖 燚,陈圣宾,张 路,等 (7357)
羌塘地区草食性野生动物的生态服务价值评估——以藏羚羊为例·····	鲁春霞,刘 铭,冯 跃,等 (7370)
湖北省潜江市生态系统服务功能价值空间特征·····	许倍慎,周 勇,徐 理,等 (7379)
滇西北纳帕海湿地景观格局变化及其对土壤碳库的影响·····	李宁云,袁 华,田 昆,等 (7388)
基于连接性考虑的湿地生态系统保护多预案分析——以黄淮海地区为例·····	宋晓龙,李晓文,张明祥,等 (7397)
青藏高原高寒草甸生态系统碳增汇潜力·····	韩道瑞,曹广民,郭小伟,等 (7408)
影响黄土高原地物光谱反射率的非均匀因子及反照率参数化研究·····	张 杰,张 强 (7418)
基于 GIS 的下辽河平原地下水生态敏感性评价·····	孙才志,杨 磊,胡冬玲 (7428)
厦门市土地利用变化下的生态敏感性·····	黄 静,崔胜辉,李方一,等 (7441)
我国保护地生态旅游发展现状调查分析·····	钟林生,王 婧 (7450)
黄腹山鹧鸪稳定的配偶关系限制雄性欺骗者·····	褚福印,唐思贤,潘虎君,等 (7458)
食物蛋白含量和限食对雌性东方田鼠生理特性的影响·····	朱俊霞,王 勇,张美文,等 (7464)
具有捕食正效应的捕食-食饵系统·····	祁 君,苏志勇 (7471)
桑科中 4 种桑天牛寄主植物的挥发物成分研究·····	张 琳,WANG Baode,许志春 (7479)
栗山天牛成虫羽化与温湿度的关系·····	杨忠岐,王小艺,王 宝,等 (7486)
人工巢箱条件下杂色山雀的巢位选择及其对繁殖成功率的影响·····	李 乐,万冬梅,刘 鹤,等 (7492)
鸭绿江口湿地鸕鹚类停歇地的生物生态研究·····	宋 伦,杨国军,李 爱,等 (7500)
锡林郭勒草原区气温的时空变化特征·····	王海梅,李政海,乌 兰,等 (7511)
UV-B 辐射胁迫对杨桐幼苗生长及光合生理的影响·····	兰春剑,江 洪,黄梅玲,等 (7516)
小麦和玉米叶片光合-蒸腾日变化耦合机理·····	赵风华,王秋凤,王建林,等 (7526)
利用稳定氢氧同位素定量区分白刺水分来源的方法比较·····	巩国丽,陈 辉,段德玉 (7533)
2010 年冬季寒冷天气对闽江口 3 种红树植物幼苗的影响·····	雍石泉,仝 川,庄晨辉,等 (7542)
人参皂苷与生态因子的相关性·····	谢彩香,索风梅,贾光林,等 (7551)
苈对黑麦草根系几种低分子量有机分泌物的影响·····	谢晓梅,廖 敏,杨 静 (7564)
盐碱地柠条根围土中黑曲霉的分离鉴定及解磷能力测定·····	张丽珍,樊晶晶,牛 伟,等 (7571)
不同近地表土壤水文条件下雨滴打击对黑土坡面养分流失的影响·····	安 娟,郑粉莉,李桂芳,等 (7579)
煤电生产系统的能值分析及新指标体系的构建·····	楼 波,徐 毅,林振冠 (7591)
专论与综述	
东南亚高山森林植被变化对流域产水量的影响·····	张远东,刘世荣,顾峰雪 (7601)
干旱荒漠区斑块状植被空间格局及其防沙效应研究进展·····	胡广录,赵文智,王 岗 (7609)
利用农业生物多样性持续控制有害生物·····	高 东,何霞红,朱书生 (7617)
研究简报	
洪湖湿地生态系统土壤有机碳及养分含量特征·····	刘 刚,沈守云,闫文德,等 (7625)
氯氰菊酯和溴氰菊酯对萼花臂尾轮虫生殖的影响·····	黄 林,刘昌利,韦传宝,等 (7632)
学术信息与动态	
SCOPE-ZHONGYU 环境论坛(2011)暨环境科学与可持续发展国际会议成功举办·····	(7639)
《生态学报》3 篇文章入选 2010 年中国百篇最具影响国内学术论文 等·····	(I)
期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 316 * zh * P * ¥70.00 * 1510 * 36 * 2011-12	



封面图说: 泥炭藓大多生长在多水、寒冷和贫营养的生境,同时有少数的草本、矮小灌木也生长在其中,但优势植物仍然是泥炭藓属植物。泥炭藓植物植株死后逐渐堆积形成泥炭。经过若干年的生长演变,形成了大片的泥炭藓沼泽。这种沼泽地有黑黑的泥炭,绿绿的草甸和亮晶晶的斑块状水面相间相衬,远远看去就像大地铺上了锦绣地毯一样美丽壮观。

彩图提供: 陈建伟教授 国家林业局 E-mail: cites.chenjw@163.com

韩道瑞, 曹广民, 郭小伟, 张法伟, 李以康, 林丽, 李婧, 唐艳鸿, 古松. 青藏高原高寒草甸生态系统碳增汇潜力. 生态学报, 2011, 31 (24): 7408-7417.

Han D R, Cao G M, Guo X W, Zhang F W, Li Y K, Lin L, Li J, Tang Y H, Gu S. The potential of carbon sink in alpine meadow ecosystem on the Qinghai-Tibetan Plateau. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31 (24): 7408-7417.

青藏高原高寒草甸生态系统碳增汇潜力

韩道瑞^{1,2}, 曹广民¹, 郭小伟^{1,2}, 张法伟¹, 李以康¹, 林 丽¹,
李 婧^{1,2}, 唐艳鸿³, 古 松^{1,4,*}

(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;
3. 日本国立环境研究所, 日本筑波 305-8506; 4. 南开大学 生命科学学院, 天津 300071)

摘要:为了揭示青藏高原高寒草甸生态系统植被变化对碳储量的影响,以原生矮嵩草草甸、退化草甸、人工草地以及农田为研究对象,对比分析了该 4 种不同土地格局下生态系统的有机碳现状。以原生矮嵩草草甸土壤碳储量为基准对不同生态系统的碳增汇潜力进行了估算。结果表明:不同类型生态系统的碳储量和碳增汇潜力有很大差异,在 0—40 cm 土层中, (1) 原生草甸碳储量最高,达到 17098 g C/m²,退化草甸、人工草地和农田的有机碳汇增加潜力分别为:5637、3823、1567 g C/m²。(2) 对于退化草甸和人工草地,土壤有机碳含量和密度明显低于原生草甸和农田。(3) 地下生物量碳储量主要集中在 0—20 cm,且原生草甸地下生物量的碳储量比其他 3 个植被类型高 3.6—5 倍。总体上,青藏高原草地生态系统存在巨大的碳增汇潜力。

关键词:人工草地;退化草甸;碳增汇潜力;土壤有机碳

The potential of carbon sink in alpine meadow ecosystem on the Qinghai-Tibetan Plateau

HAN Daorui^{1,2}, CAO Guangmin¹, GUO Xiaowei^{1,2}, ZHANG Fawei¹, LI Yikang¹, LIN Li¹, LI Jing^{1,2}, TANG Yanhong³, GU Song^{1,4,*}

1 Northwest Institute of Plateau Biology, Chinese Academy of Sciences. Xining 810001, China

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

3 National Institute for Environmental Studies, Tsukuba, Ibaraki, 305-8506, Japan

4 College of Life Sciences, Nankai University, Tianjin 300071, China

Abstract: To evaluate the potential effects of vegetation change on soil carbon storage on the Qinghai-Tibetan Plateau. We examined the soil organic carbon content of natural alpine meadow, degraded meadow, artificial pasture and farmland, and estimated the potential of carbon sequestration of the latter three types based on former natural alpine meadow. The results showed that the four vegetation types have a great difference in potential of carbon storage of 0—40 cm soil layer: (1) the carbon storage in natural alpine meadow was the highest with 17098 g C/m², and were 5637, 3823 and 1567 g C/m² for degraded meadow, artificial pasture and farmland, respectively; (2) soil organic carbon content and density in degraded meadow and artificial pasture were significant lower than those in natural meadow and farmland; (3) root carbon storage mainly concentrated in the 0—20 cm topsoil, and the natural alpine meadow was 3.6—5 times higher than other three vegetation types. The results suggested that, there is a huge potential of carbon sink in alpine ecosystem on the Qinghai-Tibetan Plateau.

基金项目:国家自然科学基金重点项目(30970520);国家自然科学基金项目(31070433,30970520);中日合作项目(2010DFA31290)

收稿日期:2011-03-15; **修订日期:**2011-11-03

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: songgu@nankai.edu.cn

Key Words: artificial pasture; degraded meadow; potential of carbon sinks; SOC

全球变化是迄今为止最大的环境问题,也是目前人类面临最复杂的挑战之一^[1],这一问题已经引起世界各国政府的高度重视。哥本哈根气候大会的召开,要求各签约国确定国家级水平的温室气体排放清单,履行各自减排义务^[2]。我国土地幅员辽阔,自然生态系统多样,探索通过自然生态系统增加固碳潜力与方法,以抵减工业生产排放的温室气体数量,为温室气体减排国际谈判提供有力证据,已成为我国科学界工作的重要内容之一。

青藏高原植被类型丰富,由于年均温较低、极大地减缓了土壤有机质的分解速率,有机质逐年积累,使土壤碳储量巨大,成为我国土壤碳密度最高的地区之一^[2-3]。虽然高原面积只占地球陆地表面面积的 1.69%,碳储量却占全球总碳库的 2.4%—2.6%^[4-5]。土地利用方式的变化已经成为改变生物圈碳平衡的重要因素^[6-7]。20 世纪 70 年代以来,由于持续的超载放牧、天然草地的开垦和利用以及气候变化等原因,极大地改变了青藏高原生态系统的植被现状,尤其是对高寒草甸生态系统原有的碳源/汇功能带来了巨大影响。研究指出,近 30a 来,由于土地利用方式的变化和草地退化而导致青藏高原生态系统土壤的 CO₂ 释放量约为 $30.23 \times 10^8 \text{ tC}^{[4]}$ 。

高寒草甸是青藏高原主要草地类型,约占青藏高原总面积的 35%,在高原草地畜牧业中占有十分重要的地位。其 1m 深度土壤碳储量约为 $7.4 \text{ Pg C}^{[8]}$,而总储量达到 $18.37 \text{ Pg C}^{[3]}$,平均碳储量比相应深度的热带森林、灌丛和草地土壤的有机碳储量高 1—5 倍^[9]。因此,在全球陆地生态系统碳估算研究中,青藏高原高寒草甸的有机碳库不可忽视^[9-10]。然而,高寒草甸生态系统碳增汇潜力究竟有多大?如何评价其在温室气体减排中的作用?目前尚未见有研究报道。本文以青藏高原高寒草甸不同土地利用格局原生草甸、退化草甸、人工草地以及农田为研究对象,分析了各土地利用格局下碳的储存现状,并以原生草甸碳储量为基准,探讨了不同植被类型其生态系统的碳增汇潜力,以期为深入研究高原生态系统由于土地利用方式的改变引起的碳源/汇效应提供基础数据和理论依据。

1 材料与方法

1.1 样地概况

青藏高原东部、南部及其周围高山上部是我国高寒草甸最大分布区,大致处于 $27\text{--}39^\circ\text{N}$, $82\text{--}103^\circ\text{E}$ 范围内,呈弧状分布^[11]。本研究根据青藏高原高寒草甸的分布特征^[11]、演替阶段^[12]及其土地利用状况,对西藏自治区的那曲地区、青海省三江源地区的果洛州、玉树州和祁连山地区的海北州高寒草甸分布区进行了采样点布置(图 1)。由于人类活动和气候变化的原因,分布有原生草甸、退化草甸、人工草地和农田 4 种主要植被类型,其中:

(1)原生高寒草甸其植被垂直结构可分为两层,上层主要以垂穗披碱草、羊茅等禾本科植物为主,下层以小嵩草、矮嵩草等莎草科植物为主,植被盖度在 85% 以上,这种草地目前在祁连山区才可看到。而果洛州和那曲地区的原生高寒草甸由于长期重度放牧作用,上层禾草层而缺失,成为以小嵩草、矮嵩草、火绒草等为优势建群种^[13],植被盖度一般在 35%—40% 左右。

(2)退化高寒草甸是原生高寒草甸在长期超载放牧作用下,原生植被禾本科和莎草属植物高度退化,形成以甘肃马先蒿、矮火绒草、铁线莲、白苞筋骨草等为优势群落的杂类草草地,呈斑块状分布,俗称为“黑土滩”,植被覆盖度低,一般在 15%—40% 以下,土壤具有石质化或沙化特征,风蚀与水蚀作用加强。



图 1 调查采样点分布图

Fig. 1 The distribution of sampling points

(3) 人工草地是在黑土型退化高寒草地上,通过人工措施建植人工草地,以进行退化草地的恢复或尽力和草基地建设,进行冬季牧草补给,牧草品种主要为垂穗披碱草、老芒麦和草地早熟禾等,因围封年限而异,植被覆盖度多在 40% 以上。

(4) 农田是通过人工措施,将原生高寒草甸开垦为农田,而种植油菜、青稞等,其种植面积受国家政策影响,植被覆盖度在 70% 左右,杂类草主要有香薷、微孔草。主要分布在青海省的东北部的门源县和祁连县(表 1)。

1.2 方法

在研究区域内,分别选择气候条件基本一致、不同土地利用格局发育地形基本相似且相毗邻、地势相对平坦、植被状况相对均一的地段作为实验样地,每个样地选取 6 个采样点。对每个采样点植被特征和土壤状况进行调查。根土法进行样品采集:直径为 6cm 的土钻分别对 0—10、10—20、20—40 cm 深度的土壤取样,用孔径 2 mm 土壤筛分出根系和土壤,对植物根系样品烘干保存,土壤样品风干保存。土壤碳素和植物碳素利用 TOC-5000A 有机碳分析仪进行测定;土壤容重用环刀法进行测定;气象资料来自国家气象局公布各地气象数据。

土壤有机碳密度(SOC_d)决定于土壤有机碳含量、土壤容重和土壤砾石的含量,可真实地反映土壤有机碳的大小,由下式计算得出^[14-15]:

$$\text{土壤有机碳密度}(SOC_d) = \frac{C \times H \times B \times (1 - Di)}{100} \quad (1)$$

式中, C 为有机碳含量(%), H 为土层厚度(cm), B 为土壤容重(g/m^3), D 为粒径>2mm 的砾石的含量(%).

地下生物量碳储量(UGBC)依据下式(2)分层累计而得:

$$UGBC = 0.45 \times \sum_{i=1}^n BBi \quad (2)$$

式中, BBi 为第 i 层土壤地下生物量干重, 0.45 为高寒植被根系碳素含量系数^[16]。

参数间差异显著性比较采用单因素方差分析法,主效应的多重比较采用最小显著差数法(LSD);运用 Pearson 相关分析法对数据间的相关性进行统计分析,利用 SAS 9.1 软件计算。

2 结果分析

2.1 土壤有机碳(SOC)含量变化

4 种植被类型 0—40cm 土壤深度的 SOC 含量表现出明显差异,按其大小排列顺序为:原生草甸>农田>人工草地>退化草甸,分别为 3.4%、3.3%、2.8% 和 1.9% (表 2)。退化草甸 SOC 含量显著低于其它 3 种植被类型,与原生草甸相比降低约 44%。不同植被类型的 SOC 含量均随深度增加而降低,从 0—10cm 到 20—40cm 深度,农田降低的幅度最小,约为 18%,而其他 3 种类型草地 SOC 含量的降幅均在 50% 左右。

2.2 地下生物量碳储量(UGBC)变化

由 4 种不同植被类型地下生物量的观测结果可知,0—10cm 土层中原生草甸的生物量最高,达 2488.6 g/m^2 ,显著高于其他 3 种类型草地($P<0.05$) (表 3)。由于地下生物量碳储量由生物量计算得出,因此,原生草甸地下生物量碳储量显著高于其它 3 种类型。地下生物量碳储量主要集中于表层土壤,由原生草甸—退化草甸—人工草地到农田,0—10cm 的碳储量占 0—40cm 的比重依次为:84%、79%、63% 和 60%;且随深度增加(0—10cm 到 10—20cm)降幅显著($P<0.05$),分别达到:86%、89%、58% 和 49%。

2.3 土壤容重及其有机碳密度(SOC_d)变化

4 种植被类型的土壤容重表现出明显的差异(表 4):0—10cm 土层,退化草甸>人工草地>农田和原生草甸($P<0.05$);然而,20—40cm 土层,原生草甸虽小于退化草甸,但却超过了人工草地和农田,从 0—40cm 平均状况看,变化趋势与 0—10cm 相同:退化草甸>人工草地>原生草甸>农田。随土层深度的增加,四种植被类型的土壤容重均呈现逐渐增大的趋势(表 4),以原生草甸的增加幅度为最大,从 0—10cm 的 0.76 g/cm^3 增加至 20—40cm 的 1.44 g/cm^3 ,而人工草地和农田的增幅相对较小。将容重和地下生物量、SOC 含量分别做相关性分析,都达到极显著负相关(地下生物量, $R=-0.79$, $P<0.01$; SOC 含量, $R=-0.91$, $P<0.01$)。

表 1 采样区的基本情况
Table 1 Basic information of sampling regions

主要样区 Main sample regions	年均温/℃ Annual mean temperature	年降水量/mm Annual precipitation	采样点 Sampling points	海拔/m Altitude	主要植被类型及盖度 Main plant types and its coverage							
					原生草甸 Natural meadow	盖度 /%	退化草甸 Degraded meadow	盖度 /%	人工草地 Artificial pasture	盖度 /%	农田 Farmland	盖度 /%
果洛州达日县	-1.3	569.0	窝塞南 10km	4072	紫花针茅、小、矮嵩草等	80	忍冬、细叶亚菊等	<30	垂穗披碱草	37		
果洛州甘德县	-2	550.0	上贡麻西	4191	小嵩草、火绒草、棘豆等	75	马先蒿、火绒草等	30				
果洛州玛多县	-4.1	303.9	次坝东山	4191	小嵩草、藏忍冬、风毛菊等	60	马先蒿、火绒草等	10—15				
			小野马岭	4250	高寒小嵩草、棘豆等	>95	火绒草、棘豆等	30				
果洛州玛沁县	-1.3	569.0	大武军委会	3740	垂穗披碱草、苔草等	100			垂穗披碱草	80		
海北州门源县	0.8	520.0	大武军牧场	3934	矮嵩草、小嵩草、龙胆等	35	细叶亚菊、马先蒿	35				
			昌马河南 5km	4318	小嵩草、矮嵩草、棘豆等	40	风毛菊、火绒草	30				
海北州祁连县	1.0	270—600	门源马场	3344	垂穗披碱草、野青茅等	92	鹅绒委陵菜、细叶亚菊	40	香薷、鹅绒委陵菜	95	香薷	70
西藏那曲地区	-2.1	100—200	阿柔乡	3170	紫花针茅、小、矮嵩草等	50			垂穗披碱草	85	油菜	75
			那曲南 40km	4701	紫花针茅、早熟禾等	75	基本无	5—10				
玉树州称多县	3.8	600.0	西藏班戈	4555	紫羊毛、小嵩草等	35	火绒草等	15				
			西藏扎仁	4643	小嵩草、紫花针茅等	50	火绒草、金露梅等	10				
玉树州曲麻莱县	-3.3	380—470	珍秦乡	4255	小嵩草、棘豆等	95	细叶亚菊、马先蒿等	45				
			莱阳村口	4507	小嵩草、雪白委陵菜等	85	火绒草、细叶亚菊等	20				
玉树州治多县	-1.8	421	曲麻河西 20km	4531	小嵩草、兔儿草等	85	细叶亚菊、风毛菊等	40				
			治多县 392km	4370	小嵩草、双叉细柄茅	95	恰草、兔儿草、米口袋等	<30				
			立新乡	4503	小嵩草、高山唐蒿草	90			垂穗披碱草棘豆	50		
			治多南 5km	4251	小嵩草、矮火绒草	85	风毛菊、狼毒等	<5				

* 表中植物拉丁名称:小嵩草 (*Kobresia parva*);矮嵩草 (*Kobresia himilis*);火绒草 (*Leontopodium leontopodioides*);棘豆 (*Oxytropis*);忍冬 (*Lonicera japonica*);风毛菊 (*Saussurea japonica*);垂穗披碱草 (*Elymus nutans*);龙胆 (*Gentiana scabra*);紫羊茅 (*Festuca rubra*);雪白委陵菜 (*Potentilla nivea*);双叉细柄茅 (*Philagrostis dichotoma*);高山唐蒿草 (*Thalictrum alpinum*);矮火绒 (*Leontopodium nanum*);马先蒿 (*Pedicularis*);金露梅 (*Potentilla fruticosa*);细叶亚菊 (*Ajania tenuifolia*);恰草 (*Koeleria cristata*);兔儿草 (*Lagotis brachystachya Maxim.*);米口袋 (*Gueldenstaedtia verna (Georgi) Boriss*);狼毒 (*Stellera chamaejasme*);香薷 (*Elsholtzia ciliata*)

表 2 4种植被类型0—40cm土壤有机碳含量

Table 2 Soil organic carbon content in the 0—40cm layer for four vegetation types

植被类型 Vegetation types	土壤有机碳含量 SOC of the soil/%			
	0—10cm	10—20cm	20—40cm	0—40cm
原生草甸 Natural meadow	5.14±0.15 a	3.55±0.12 a	2.50±0.09 a	3.42±0.11a
退化草甸 Degraded meadow	2.82±0.15 c	2.12±0.11 b	1.34±0.08 c	1.91±0.11b
人工草地 Artificial pasture	4.16±0.33ab	3.01±0.15a	2.04±0.10 b	2.81±0.17a
农田 Farmland	3.62±0.11bc	3.67±0.09a	2.96±0.17 a	3.30±0.14a

* 碳密度均为平均值±标准误,同一土层不同字母(a,b,c)代表其间差异显著($P<0.05$)

表 3 4种植被类型0—40cm地下生物量及其碳储量

Table 3 Underground biomass and root carbon storage in the 0—40cm layer for four vegetation types

植被类型 Vegetation types	地下生物量/(g/m ²) Underground biomass				地下生物量碳储量/(g C/m ²) Carbon density of underground biomass			
	0—10cm	10—20cm	20—40cm	0—40cm	0—10cm	10—20cm	20—40cm	0—40cm
原生草甸 Natural meadow	2488.58± 342.90a	339.17± 88.48 a	126.44± 57.73 a	2954.19± 136.71a	1119.86± 154.31	152.63± 39.82	56.9± 26.0	1329.39± 220.1
退化草甸 Degraded meadow	466.41± 72.71 b	53.42± 14.61 b	71.28± 11.52 a	591.11± 27.59b	209.89± 32.72	24.04± 6.57	32.076± 5.18	266.0± 44.48
人工草地 Artificial pasture	518.72± 62.43 b	220.18± 74.28 b	85.70± 4.99 a	824.60± 36.67b	233.42± 28.09	99.08± 5.08	38.57± 2.25	371.07± 35.42
农田 Farmland	374.50± 75.17b	189.28± 3.16b	63.90± 20.24 a	627.68± 29.70b	168.52± 33.87	85.17± 1.42	28.75± 9.11	282.46± 15.97

由于研究区域土层较浅薄,大都为40cm左右,所以在计算土壤有机碳密度(SOC_d)时是以40cm深土壤作为标准。SOC_d不仅是碳储量估算的一个重要参数,其本身也是反映生态系统有机碳蓄积特征的一项重要指标^[17]。不同植被类型0—10cm和10—20cm层,退化草甸土壤密度显著低于其它3种类型($P<0.05$),在20—40cm层四者无显著差异(表4)。0—40cm土层SOC_d总量不尽相同:原生草甸((15768.9±1170.2g C/m²)显著高于退化草甸((11195.3±836.1)gC/m²),但与人工草地((12903.7±844.16)gC/m²)和农田系统((15248.6±713.9)gC/m²)差异不显著($P<0.05$)。

表 4 四种植被类型土壤容重和碳密度

Table 4 Bulk density and SOC density for four vegetation types

植被类型 Vegetation types	容重/(g/cm ³) Bulk density				有机碳密度/(gC/m ²) SOC _d			
	0—10cm	10—20cm	20—40cm	0—40cm	0—10cm	10—20cm	20—40cm	0—40cm
原生草甸 Natural meadow	0.76± 0.09c	1.15± 0.09b	1.44± 0.08 a	1.20± 0.09c	3973.17± 221.54a	4247.47± 345.93a	7548.26± 602.7a	15768.9± 443.22a
退化草甸 Degraded meadow	1.31± 0.08a	1.40± 0.05a	1.57± 0.05 a	1.46± 0.06a	3290.44± 151.92b	2819.51± 174.38b	5085.33± 509.82b	11195.28± 336.49b
人工草地 Artificial pasture	1.21± 0.07ab	1.28± 0.05ab	1.29± 0.06 a	1.27± 0.06b	4448.14± 226.74a	3493.77± 171.5a	4961.83± 445.92b	12903.74± 322.52a
农田 Farmland	1.07± 0.06b	1.17± 0.03b	1.17± 0.02 a	1.14± 0.03c	3900.46± 110.41a	4306.3± 93.16a	7041.85± 510.29a	15248.61± 306.04a

不同植被类型SOC_d随深度的增加总体呈现下降趋势。虽然从0—10cm到10—20cm层,原生草甸与农田、退化草甸和人工草地的变化趋势相反,但从原生草甸到农田0—20cm到20—40cm土层碳储量分别降低了8.2%、16.8%、37.5%和14.2%。

2.4 土壤-植被系统碳增汇潜力

由以上结果可知,对于0—40cm土层来说,原生草甸无论是土壤有机碳还是地下生物量碳储量都是最高

的。以原生草甸土壤-植被系统碳储量(土壤碳储量与地下生物量碳储量之和)为基准,从退化草甸、人工草地和农田系统恢复到原生草甸状态所增加的有机碳的量分别为:5637.0、3823.5 和 1567.7 g C/m²(表 5)。退化草甸-人工草地-农田,来自土壤碳增汇量分别占系统总增汇量的 81.1%、74.9% 和 33.2%;来自地下生物量碳增汇贡献量依次占 18.9%、25.1% 和 66.8%。可见,对于退化草甸和人工草地,土壤是其生态系统碳增汇的主要来源,而农田碳增汇的主要来源则是其地下生物量。

各植被类型不同深度土壤-植被系统碳增汇量所占比例各异(表 5),退化草甸各土层碳增汇潜力都比较明显,0—10cm 到 20—40cm 层增汇量所占 0—40cm 增汇比例依次为 28.3%、27.6% 和 44.1%;人工草地碳增汇潜力主要集中在 20—40cm 层,占 0—40cm 增汇量的 68.1%;农田恰好与人工草地相反,增汇潜力主要集中在 0—10cm 层,所占比例为 65.3%。

表 5 4 种植被类型生态系统碳增汇潜力及其主要来源
Table 5 The potential of SOC increasing and its main sources for four vegetation types

植被类型 Vegetation types	总碳储量/(g C/m ²) total SOC storage	总增量 Total addition/(g C/m ²)				土壤部分 /(g C/m ²) Soil	地下生物量部分 /(g C/m ²) UGB
		0—10cm	10—20cm	20—40cm	0—40cm		
原生草甸 Natural meadow	17098.29±579.93	—	—	—	—	—	—
退化草甸 Degraded meadow	11461.28±364.08	1592.71	1556.55	2487.75	5637.01	4573.62	1063.386
人工草地 Artificial pasture	13274.81±359.19	411.467	807.25	2604.76	3823.48	2865.16	958.32
农田 Farmland	15531.07±335.74	1024.05	8.62	534.55	1567.22	520.29	1046.93

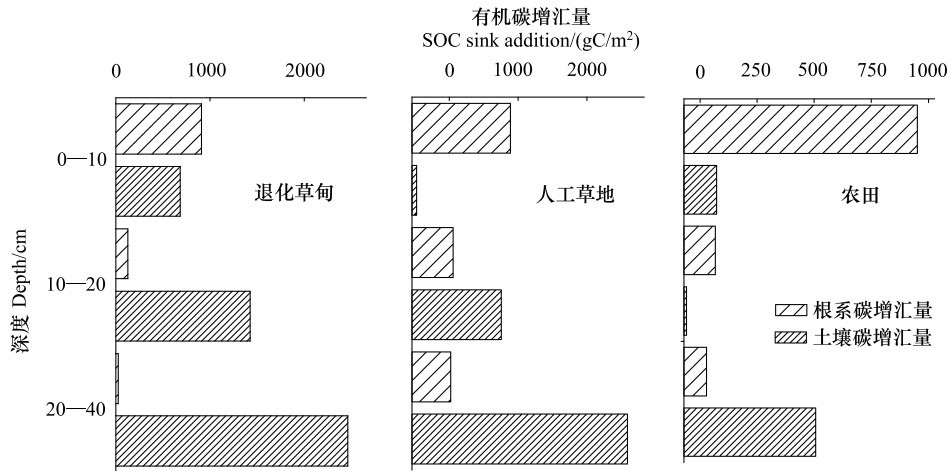


图 2 4 种植被类型土壤和根系各层有机碳的增汇量

Fig. 2 Carbon sequestrations increasing of different layer of soil and root for four vegetation types

图 2 可看出,对于地下生物量来说,0—10cm 层是其碳增储潜力的主要来源,在不同格局下所占增汇比例均达到 85% 以上,随着深度的增加其增汇潜力明显降低,20—40cm 层所占比例均不到 3%。对于土壤来说,随深度增加表现出与地下生物量碳增汇相反趋势,20—40cm 层土壤碳增汇贡献量占其总增汇量 53.9%、90.3% 和 97.3%。可见,土壤碳增汇量主要来自底层(20—40cm),地下生物量碳增汇量主要来自表层(0—20cm)。

3 讨论

3.1 青藏高原高寒草甸碳储现状

根据本研究结果,青藏高原不同植被类型生态系统碳储量差异较大。原生高寒草甸 SOC_d 为 17.1 kg/m²

(表5),比陶贞等^[7]测得的青海省海北地区高寒草甸 SOC_d $26.9\text{kg}/\text{m}^2$ (1m 深) 要低,比田玉强等^[3]按土壤亚类所计算的青藏高原平均 SOC_d $7.2\text{kg}/\text{m}^2$ 高得多,且介于全国 SOC_d $8.0\text{—}19.1\text{kg}/\text{m}^2$ 的平均范围内^[5,10,15,18-20],也属于较高水平。说明青藏高原高寒草甸有着巨大的碳固持能力,加上其独特的地理环境和气候条件,使其对我国有机碳储量和碳汇研究意义重大^[9]。

3.2 不同植被类型对 SOC 含量、容重及地下生物量的影响

对于原生草甸和退化草甸而言,虽然土壤结构都没有受到人为干扰,但由于植被作用导致二者 SOC 含量、土壤容重和地下生物量上差异很大。SOC 主要是凋落物、植物根系等经微生物分解形成,大小主要受枯枝落叶层输入量和分解速率决定^[21]。原生草甸演替为退化草甸后,虽然土壤容重升高,但 SOC 含量、地下生物量都显著降低,进而导致土壤有机碳储量降低,这与蔡晓布等^[22]报道的结果相似。

SOC 含量和地下生物量总体都随土壤深度的增加而下降,这与王丽丽等^[23]研究结果相似。但不同植被类型降低幅度表现出差异很大,对于 SOC 含量,农田随深度变化最小(表2),这主要是由于开垦后土壤经常受翻耕作用,使上、下土层混合的较为均一^[23-24];对于地下生物量,原生草甸含量最高,但随深度增加降低幅度最大,从 0—10cm 的 $2488\text{g}/\text{m}^2$ 降至 20—40cm 的 $126\text{g}/\text{m}^2$ (大致降低了 19.7 倍),而农田从 0—10cm 的 374 降至 20—40cm 的 $64\text{g}/\text{m}^2$ (约 5.8 倍),其他两种类型植被降幅介于二者之间。因此其他三种植被类型根系碳储量在土层中的递减速率要低于原生草甸,根系碳储量在深度上差别的减小,说明从枯落物和植物根系向浅层土壤转移碳储量的功能在减弱^[25]。其直接的原因是,开垦、放牧破坏了地上植被,使得草原根系生物量以及枯落物的积累量都明显减少,最终导致根系碳储量的下降^[26],与深层土壤相比,植被的改善对表层生物量碳储的影响更加明显。土壤容重随深度的变化趋势正好与二者相反,大量研究表明容重与 SOC 含量、地下生物量有显著的负相关关系^[27-29],在本研究结果中得到了进一步证实。

3.3 不同植被类型土壤碳储量的垂直分布

4 种植被类型不同层深碳储能力不同。从碳储量来看,原生草甸、退化草甸和人工草地 0—10cm 层的 SOC_d 分别占 0—40cm 剖面总碳密度的 30% 左右(表4),这与陶贞^[9]等的研究结果一致。从有机碳增汇来源看,0—20cm 层是系统碳增量的主要贡献者^[9],增汇比例达 55% (退化草甸) 和 65% (农田) 以上。人工草地是在退化草甸的基础上通过种植人工植被建立起来的,人为管理的实施改变了土壤碳储量的垂直分布状况:0—10cm 和 10—20cm 土层 SOC 含量和 SOC_d 已与原生草甸无异 ($P < 0.05$),但对 20—40cm 土壤影响并不显著,碳储量与退化草甸的水平相当。这都表明表层(0—20cm)土壤-植被对土地利用变化的敏感性更大一些,这与许中旗等^[25]研究结果相似。对于高寒矮蒿草草甸来说,人类活动加剧引起的草地退化亦反映在草地表层的 0—20cm,高寒矮蒿草草甸退化主要表现为草毡表层的剥蚀,其结果不仅造成草毡层植物根系有机碳的损失,同时也造成了土壤水、风蚀作用和土壤有机碳的降低^[30]。有研究表明降水和土壤粘粒对表层 SOC 含量的影响较大,并且表层土壤最易受到侵蚀^[31],高寒草甸退化演替过程及人类活动的干扰,更易引起其土壤轻组有机碳的损失,它的分解导致土壤有机质含量缓慢上升,土壤总有机碳含量降低^[32],表层土壤有机碳储量对于理解在不同植被类型土壤碳动态和土壤固碳来吸收大气 CO_2 的潜力至关重要^[33]。

天然森林、人工林地、湿地-沼泽以及草甸,在开垦为农田后,土壤中的有机碳素都会显著降低^[23,31-32,34-37],开垦释放的碳是大气中 CO_2 的主要贡献者^[38]。本研究结果显示农田有机碳储量与原生草甸并无差异(表4),这可能是因为分布在青海省海北地区的农田与原生草甸相间分布,加上施肥、秸秆还田等人为管理措施,使其碳储量并无显著降低。农田系统碳增汇潜力主要来源于 0—10cm 层(表5),尽管这层 SOC 含量农田显著低于原生草甸(表2),但来自土壤部分的增汇潜力只占到 33%。这主要是因为土地利用变化对土壤有机碳含量和有机碳密度的影响程度存在一定差异,这种差异主要由土地利用变化对土壤容重的影响造成^[23]。原生草甸开垦为农田后,0—10cm 层地下生物量显著降低(表3),地下根土体积比下降,导致这一层农田土壤容重高于原生草甸(表4),计算后,土壤部分碳储量并不显著。农田在恢复为原生草甸过程中由于根系增加对表层土有抬升作用,因此在估算原生草甸和农田间的碳增储关系时,需要根据容重对二者的土层厚度进行

校正^[13]。

3.4 空间差异对土壤碳储量的影响

青藏高原高寒草甸面积巨大,在人为活动和环境因素的交互影响下,使得不同区域草甸所处的退化演替阶段不同,进而导致不同地区、不同植被类型的有机碳储现状及增汇潜力存在较大空间异质性^[39-41]。在野外调查和采样过程中,要将整个区域内各草地类型的碳储空间分布格局调查清楚并采样是不可能的。因此本文结合已有研究^[13],对各采样点碳储量平均值进行讨论,采样点较多且都是选择各地区典型草甸,所以在宏观尺度基本能反映出本研究区内高寒草甸碳储现状和增汇潜力的平均水平,前人很多研究都采用此种方法^[22-23,25]。以后对于不同地区碳储量的差异尚有待于进一步深入研究。关于人工草地和农田,由于分布面积较小,无法获取更多不同地区的数据,对本研究结果可能会带来一些不确定因素,但作为对比研究,可为不同植被类型的碳储量研究具有一定的参考价值。随着高原上人工草地和农田的开展,今后还需加强相关研究。

4 结论

青藏高原高寒草甸不仅是我国碳密度最高的地区,拥有巨大的碳储量,0—40cm 原生草甸碳密度达到 $17.2\text{kg}/\text{m}^2$,而且其不同植被类型碳增汇潜力也很可观,从退化草甸、人工草地和农田恢复到原生草甸状态,碳密度增加量分别为 5637.01 、 3823.48 和 $1567.42\text{ g C}/\text{m}^2$ 。

植被类型的改变引起土壤碳储量的变化主要集中在 0—20cm 层,因此估测表层土壤有机碳储量对于理解在不同土地利用方式下土壤碳动态和土壤固碳来吸收大气 CO_2 的潜力至关重要。

高寒草甸虽然碳增汇潜力巨大,但由于不同地区草地退化演替阶段和土层深度的不同,其碳增汇潜力存在明显的空间差异性,因此在制定和实施草地恢复政策时应充分考虑这一点,有针对性的加强重点地区的恢复。目前而言,牧区人、畜、草之间的矛盾日益突出,再加上后续产业滞后,牧民增收困难,使得退牧还草、禁牧政策难以快速全面的开展。因此要达到上述有机碳理论增汇量,还需一个长期的过程。

References:

- [1] Wei Y M, Fan Y, Wang Y, Liu L C, Liang Q M, Wu G, Cao M K, Huang Y, Wang S Q. Suggestions and solutions to carbon emissions in China. *Advances in Climate Change Research*, 2006, 2(1): 15-20.
- [2] Shao Y H, Pan J J, Xu X W, Mi G Q. Discussion on the methods for estimating soil organic carbon density and storage. *Chinese Journal of Soil Science*, 2006, 37(5): 1007-1011.
- [3] Tian Y Q, Ouyang H, Xu X L, Song M H, Zhou C P. Distribution characteristics of soil organic carbon storage and density on the Qinghai-Tibet plateau. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(5): 933-942.
- [4] Wang G X, Cheng G D, Shen Y P. Soil organic carbon pool of grasslands on the Tibetan Plateau and its global implication. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2002, 24(6): 693-700.
- [5] Fang J Y, Liu G H, Xu S L. Soil carbon reservoir of terrestrial ecosystem in China. Beijing: China Environmental Science Press, 1996: 109-128.
- [6] Scott N A, Tate K R, Ford-Robertson J, Giltrap D J, Smith C T. Soil carbon storage in plantation forests and pastures: land-use change implications. *Tellus Series B-Chemical and Physical Meteorology*, 1999, 51(2): 326-335.
- [7] Zhou Z Y, Sun O J, Huang J H, Li L H, Liu P, Han X G. Soil carbon and nitrogen stores and storage potential as affected by land-use in an agro-pastoral ecotone of northern China. *Biogeochemistry*, 2007, 82(2): 127-138.
- [8] Yang Y H, Fang J Y, Tang Y H, Ji C J, Zheng C Y, He J S, Zhu B A. Storage, patterns and controls of soil organic carbon in the Tibetan grasslands. *Global Change Biology*, 2008, 14(7): 1592-1599.
- [9] Tao Z, Shen C D, Gao Q Z, Sun Y M, Yi W X, Li Y N. Soil organic carbon storage and vertical distribution of alpine meadow on the Tibetan Plateau. *Acta Geographica Sinica*, 2006, 61(7): 720-728.
- [10] Li K R, Wang S Q, Cao M K. Carbon storage of Chinese soil and vegetation. *Science in China Series D (Earth Sciences)*, 2003, 33(1): 72-80.
- [11] Zhou X M. Chinese Kobresia Meadow. Beijing: Science Press, 2001: 1-5.
- [12] Cao G M, Du Y G, Liang D Y, Wang Q L, Wang C T. Character of passive-active degradation process and its mechanism in alpine Kobresia meadow. *Journal of Mountain Science*, 2007, 25(5): 641-648.
- [13] Cao G M, Zhang F W, Li Y K, Lin L, Guo X W, Han D R, Li J. A method to estimate carbon storage potential in alpine Kobresia meadows on the Qinghai-Tibetan Plateau. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(23): 6591-6597.
- [14] Xu Y, Zhang F R, Duan Z Q, Zhang L, Kong X B. Calculation method for density and storage of soil organic carbon. *Chinese Journal of Soil Science*, 2005, 36(6): 836-839.

- [15] Wu H B, Guo Z T, Peng C H. Distribution and storage of soil organic carbon in China. *Global Biogeochemical Cycles*, 2003, 17(2): 1-11.
- [16] Zhang J X, Cao G M, Zhou D W, Hu Q W, Zhao X Q. The carbon storage and carbon cycle among the atmosphere, soil, vegetation and a nimal in the Kobresia humilis alpine meadow ecosystem. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(4): 627-634.
- [17] Wu G L, Du G Z. Discussion on ecological construction and sustainable development of degraded alpine grassland ecosystem of the Qinghai-Tibetan Plateau. *Chinese Journal of Nature*, 2007, 29(3): 159-164.
- [18] Yu D S, Shi X Z, Sun W X, Wang H J, Liu Q H, Zhao Y C. Estimation of China soil organic carbon storage and density based on 1:1000000 soil database. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(12): 2279-2283.
- [19] Wang S Q, Zhou C H, Luo C W. Studying carbon storage spatial distribution of terrestrial natural vegetation in China. *Progress in Geography*, 1999, 18(3): 238-244.
- [20] Pan G X. Study on carbon reservoir in soils of China. *Bulletin of Science and Technology*, 1999, 15(5): 330-332.
- [21] Zhang Q Y. Content, Affecting Factors of Soil Organic Carbon in the Plain of Chengdu in Sichuan Province [D]. Ya'an: Sichuan Agricultural University, 2008.
- [22] Cai X B, Zhou J. Spatial-temporal variation of soil organic carbon and its relations to soil physical properties in degraded alpine grasslands. *Chinese Journal of applied Ecology*, 2009, 20(11): 2639-2645.
- [23] Wang L L, Song C C, Ge R J, Song Y Y, Liu D Y. Soil organic carbon storage under different land-use types in Sanjiang Plain. *China Environmental Science*, 2009, 29(6): 656-660.
- [24] Chen F S, Zeng D H, Chen G S, Fan Z P. Effects of reclamation on soil organic carbon of some meadow soils. *Chinese Journal of Soil Science*, 2004, 35(4): 413-419.
- [25] Xu Z Q, Li W H, Xu Q, Min Q W, Wang Y S, Wu X B. The impacts of human disturbances on soil carbon desity and ecosystem storage of carbon of typical steppes. *Journal of Natural Resources*, 2009, 24(4): 621-629.
- [26] Li Y H. Study on Grassland Ecosystem, Vol 4. Beijing: Science Press, 1992: 112-154.
- [27] Wang C T, Long R J, Liu W, Wang Q L, Zhang L, Wu P F. Relationships between soil carbon distribution and species diversity and community biomass at different alpine meadows. *Resources Science*, 2010, 32(10): 2022-2029.
- [28] Zhao J M, Gao C, Zhang D G. Study on the soil organic carbon density of alpine meadow with different degradation degrees in eastern Qilian Mountains. *Acta Agrestia Sinica*, 2010, 18(1): 21-25.
- [29] Feng R Z, Zhou W H, Long R J, Ma Y S. Characteristics of soil physical, chemical and biological properties on degraded alpine meadows in the headwater areas of the Yangtze and Yellow Rivers, Qinghai-Tibetan Plateau. *Chinese Journal of Soil Science*, 2010, 41(2): 263-269.
- [30] Lin L, Cao G M, Li Y K, Zhang F W, Guo X W, Han D R. Effects of human activities on organic carbon storage in the Kobresia humilis meadow ecosystem on the Tibetan Plateau. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(15): 4012-4018.
- [31] Tian Y Q, Ouyang H, Song M H, Niu H S, Hu Q W. Distribution characteristics and influencing factors of soil organic carbon in alpine ecosystems on Tibetan Plateau transect. *Journal of Zhejiang University (Agriculture and Life Sciences)*, 2007, 33(4): 443-449.
- [32] Li Y M, Cao G M, Xu R H. Effects of different land use modes on organic carbon and its component in alpine meadow soil. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2008, 36(14): 5951-5953, 6010-6010.
- [33] Song G H, Li L Q, Pan G X, Zhang Q. Topsoil organic carbon storage of China and its loss by cultivation. *Biogeochemistry*, 2005, 74(1): 47-62.
- [34] Zhang L Q, Zhang M K. Changes of organic C, N and P pools in red soil in transformation between agricultural land and forestry land. *Journal of Zhejiang Forestry College*, 2006, 23(1): 75-79.
- [35] Wu J G, Zhang X Q, Xu D Y. Impact of land-use change on soil carbon storage. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(4): 593-599.
- [36] Chen Z, Shi K. Characteristics of soil organic carbon content under various land-usages. *Journal of Dalian Jiaotong University*, 2008, 29(3): 58-60.
- [37] Wang Y F, Chen Z Z. Distribution of soil organic carbon in the major grasslands of Xilinguole, Inner Mongolia, China. *Acta Phytocologica Sinica*, 1998, 22(6): 545-551.
- [38] Grönzweig J M, Sparrow S D, Yakir D, Chapin F S III. Impact of agricultural land-use change on carbon storage in boreal Alaska. *Global Change Biology*, 2004, 10(4): 452-472.
- [39] Cao G M, Long R J. The bottleneck and its resolutions to the natural recovery of Black Soil type degraded grassland in the Three River Source Region. *Acta Agrestia Sinica*, 2009, 17(1): 4-9.
- [40] Fan Y, Liu S Q, Zhang S R, Deng L J. Background organic carbon storage of topsoil and whole profile of soils from Tibet District and their spatial distribution. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(9): 2834-2846.
- [41] Li Y S, Zhang R H, Wang G X, Zhao L, Ding Y J, Wang Y B. Spatial variability characteristics of soil organic carbon and nitrogen reveal typiacl alpine meadow degradation on Qinghai-Tibetan Plateau. *Environmental Science*, 2009, 30(6): 1826-1831.

参考文献:

- [1] 魏一鸣, 范英, 王毅, 刘兰翠, 梁巧梅, 吴刚, 曹明奎, 黄耀, 王绍强. 关于我国碳排放问题的若干对策与建议. *气候变化研究进展*, 2006, 2(1): 15-20.

- [2] 邵月红, 潘剑君, 许信旺, 米高奇. 浅谈土壤有机碳密度及储量的估算方法. 土壤通报, 2006, 37(5): 1007-1011.
- [3] 田玉强, 欧阳华, 徐兴良, 宋明华, 周才平. 青藏高原土壤有机碳储量与密度分布. 土壤学报, 2008, 45(5): 933-942.
- [4] 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. 冰川冻土, 2002, 24(6): 693-700.
- [5] 方精云, 刘国华, 徐嵩龄. 中国陆地生态系统的碳库. 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: 109-128.
- [9] 陶贞, 沈承德, 高全洲, 孙彦敏, 易惟熙, 李英年. 高寒草甸土壤有机碳储量及其垂直分布特征. 地理学报, 2006, 61(7): 720-728.
- [10] 李克让, 王绍强, 曹明奎. 中国植被和土壤碳贮量. 中国科学 D 辑(地球科学), 2003, 33(1): 72-80.
- [11] 周兴民. 中国嵩草草甸. 北京: 科学出版社, 2001: 1-5.
- [12] 曹广民, 杜岩功, 梁东营, 王启兰, 王长庭. 高寒嵩草草甸的被动与主动退化分异特征及其发生机理. 山地学报, 2007, 25(6): 641-648.
- [13] 曹广民, 龙瑞军, 张法伟, 李以康, 林丽, 郭小伟, 韩道瑞, 李婧. 青藏高原高寒矮嵩草草甸碳增汇潜力估测方法. 生态学报, 2010, 30(23): 6591-6597.
- [14] 徐艳, 张凤荣, 段增强, 张琳, 孔祥斌. 区域土壤有机碳密度及碳储量计算方法探讨. 土壤通报, 2005, 36(6): 836-839.
- [16] 张金霞, 曹广民, 周党卫, 胡启武, 赵新全. 高寒矮嵩草草甸大气-土壤-植被-动物系统碳素储量及碳素循环. 生态学报, 2003, 23(4): 627-634.
- [17] 武高林, 杜国祯. 青藏高原退化高寒草地生态系统恢复和可持续发展探讨. 自然杂志, 2007, 29(3): 159-164.
- [18] 于东升, 史学正, 孙维侠, 王洪杰, 刘庆花, 赵永存. 基于 1:100 万土壤数据库的中国土壤有机碳密度及储量研究. 应用生态学报, 2005, 16(12): 2279-2283.
- [19] 王绍强, 周成虎, 罗承文. 中国陆地自然植被碳量空间分布特征探讨. 地理科学进展, 1999, 18(3): 238-244.
- [20] 潘根兴. 中国土壤有机碳和无机碳库量研究. 科技通报, 1999, 15(5): 330-332.
- [21] 张启义. 成都平原土壤有机碳含量特征及影响因素研究 [D]. 雅安: 四川农业大学, 2008.
- [22] 蔡晓布, 周进. 退化高寒草原土壤有机碳时空变化及其与土壤物理性质的关系. 应用生态学报, 2009, 20(11): 2639-2645.
- [23] 王丽丽, 宋长春, 葛瑞娟, 宋艳宇, 刘德燕. 三江平原湿地不同土地利用方式下土壤有机碳储量研究. 中国环境科学, 2009, 29(6): 656-660.
- [24] 陈伏生, 曾德慧, 陈广生, 范志平. 开垦对草甸土有机碳的影响. 土壤通报, 2004, 35(4): 413-419.
- [25] 许中旗, 李文华, 许晴, 闵庆文, 王英舜, 吴雪宾. 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, 2009, 24(4): 621-629.
- [26] 李永宏. 草原生态系统研究第四集. 北京: 科学出版社, 1992: 112-154.
- [27] 王长庭, 龙瑞军, 刘伟, 王启兰, 张莉, 吴鹏飞. 高寒草甸不同群落类型土壤碳分布与物种多样性、生物量关系. 资源科学, 2010, 32(10): 2022-2029.
- [28] 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. 草地学报, 2010, 18(1): 21-25.
- [29] 冯瑞章, 周万海, 龙瑞军, 马玉寿. 江河源区不同退化程度高寒草地土壤物理、化学及生物学特征研究. 土壤通报, 2010, 41(2): 263-269.
- [30] 林丽, 曹广民, 李以康, 张法伟, 郭小伟, 韩道瑞. 人类活动对青藏高原高寒矮嵩草草甸碳过程的影响. 生态学报, 2010, 30(15): 4012-4018.
- [31] 田玉强, 欧阳华, 宋明华, 牛海山, 胡启武. 青藏高原样带高寒生态系统土壤有机碳分布及其影响因子. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2007, 33(4): 443-449.
- [32] 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. 安徽农业科学, 2008, 36(14): 5951-5953, 6010-6010.
- [34] 张履勤, 章明奎. 林地与农地转换过程中红壤有机碳、氮和磷库的演变. 浙江林学院学报, 2006, 23(1): 75-79.
- [35] 吴建国, 张小全, 徐德应. 土地利用变化对土壤有机碳贮量的影响. 应用生态学报, 2004, 15(4): 593-599.
- [36] 陈卓, 史锟. 两种土地利用方式下土壤有机碳含量特征. 大连交通大学学报, 2008, 29(3): 58-60.
- [37] 王艳芬, 陈佐忠. 人类活动对锡林郭勒地区主要草原土壤有机碳分布的影响. 植物生态学报, 1998, 22(6): 545-551.
- [39] 曹广民, 龙瑞军. 三江源区“黑土滩”型退化草地自然恢复的瓶颈及解决途径. 草地学报, 2009, 17(1): 4-9.
- [40] 范宇, 刘世全, 张世熔, 邓良基. 西藏地区土壤表层和全剖面背景有机碳库及其空间分布. 生态学报, 2006, 26(9): 2834-2846.
- [41] 李元寿, 张人禾, 王根绪, 赵林, 丁永健, 王一博. 青藏高原典型高寒草甸区土壤有机碳氮的变异特性. 环境科学, 2009, 30(6): 1826-1831.

CONTENTS

The community structure of endophytic bacteria in different parts of huanglongbing-affected citrus plants	LIU Bo, ZHENG Xuefang, SUN Daguang, et al (7325)
A research on the response of the radial growth of <i>Pinus koraiensis</i> to future climate change in the XiaoXing'AnLing	YIN Hong, WANG Jing, LIU Hongbin, et al (7343)
Efficiency and kinetic process of nitrogen removal in a subsurface wastewater infiltration system (SWIS)	LI Haibo, LI Yinghua, SUN Tieheng, et al (7351)
Designing nature reserve systems based on ecosystem services in Hainan Island	XIAO Yi, CHEN Shengbin, ZHANG Lu, et al (7357)
Assessing ecological services value of herbivorous wild animals in Changtang grassland: a case study of Tibetan antelope	LU Chunxia, LIU Ming, FENG Yue, et al (7370)
Spatial characteristics analysis of ecological system service value in QianJiang City of Hubei Province	XU Beishen, ZHOU Yong, XU Li, et al (7379)
Landscape pattern change and its influence on soil carbon pool in Napahai wetland of Northwestern Yunnan	LI Ningyun, YUAN Hua, TIAN Kun, et al (7388)
Multi-scenarios analysis for wetlands ecosystem conservation based on connectivity: a case study on HuangHuaiHai Region, China ...	SONG Xiaolong, LI Xiaowen, ZHANG Mingxiang, et al (7397)
The potential of carbon sink in alpine meadow ecosystem on the Qinghai-Tibetan Plateau	HAN Daorui, CAO Guangmin, GUO Xiaowei, et al (7408)
The relations of spectrum reflectance with inhomogeneous factors and albedo parameterization ...	ZHANG Jie, ZHANG Qiang (7418)
Groundwater ecological sensitivity assessment in the lower Liaohe River Plain based on GIS technique	SUN Caizhi, YANG Lei, HU Dongling (7428)
Ecological sensitivity of Xiamen City to land use changes	HUANG Jing, CUI Shenghui, LI Fangyi, et al (7441)
Investigation and analysis on situation of ecotourism development in protected areas of China	ZHONG Linsheng, WANG Jing (7450)
Handicapping male-cheaters by stable mate relationship in yellow-bellied prinia, <i>Prinia flaviiventris</i>	CHU Fuyin, TANG Sixian, PAN Hujun, et al (7458)
Effects of dietary protein content and food restriction on the physiological characteristics of female <i>Microtus fortis</i>	ZHU Junxia, WANG Yong, ZHANG Meiwen, et al (7464)
Predator-prey system with positive effect for prey	QI Jun, SU Zhiyong (7471)
Volatile constituents of four moraceous host plants of <i>Apriona germari</i>	ZHANG Lin, WANG Baode, XU Zhichun (7479)
Relationship between adult emergence of <i>Massicus raddei</i> (Coleoptera: Cerambycidae) and temperature and relative humidity	YANG Zhongqi, WANG Xiaoyi, WANG Bao, et al (7486)
Nest site selection and reproductive success of <i>Parus varius</i> in man-made nest boxes	LI Le, WAN Dongmei, LIU He, et al (7492)
A study on bio-ecology of the stopover site of waders within China's Yalu River estuary wetlands	SONG Lun, YANG Guojun, LI Ai, et al (7500)
The spatial-temporal change variations of temperature in Xilinguole steppe zone	WANG Haimei, LI Zhenghai, WU Lan, et al (7511)
The growth and photosynthetic responses of <i>Cleyera japonica</i> Thunb. seedlings to UV-B radiation stress	LAN Chunjian, JIANG Hong, HUANG Meiling, et al (7516)
Photosynthesis-transpiration coupling mechanism of wheat and maize during daily variation	ZHAO Fenghua, WANG Qiufeng, WANG Jianlin, et al (7526)
Comparison of the methods using stable hydrogen and oxygen isotope to distinguish the water source of <i>Nitratia Tangutorum</i>	GONG Guoli, CHEN Hui, DUAN Deyu (7533)
Effects of cold weather on seedlings of three mangrove species planted in the Min River estuary during the 2010 winter	YONG Shiquan, TONG Chuan, ZHUANG Chenhui, et al (7542)
Correlation between ecological factors and ginsenosides	XIE Caixiang, SUO Fengmei, JIA Guanglin, et al (7551)
Effects of pyrene on low molecule weight organic compounds in the root exudates of ryegrass (<i>Lolium perenne</i> L.)	XIE Xiaomei, LIAO Min, YANG Jing (7564)
Isolation of phosphate solubilizing fungus (<i>Aspergillus niger</i>) from <i>Caragana</i> rhizosphere and its potential for phosphate solubili- zation	ZHANG Lizhen, FAN Jingjing, NIU Wei, et al (7571)
Effect of raindrop impact on nutrient losses under different near -surface soil hydraulic conditions on black soil slope	AN Juan, ZHENG Fenli, LI Guifang, et al (7579)
Emergy analysis of coal-fired power generation system and construction of new emergy indices	LOU Bo, XU Yi, LIN Zhenguan (7591)
Review and Monograph	
The impact of forest vegetation change on water yield in the subalpine region of southwestern China	ZHANG Yuandong, LIU Shirong, et al (7601)
Reviews on spatial pattern and sand-binding effect of patch vegetation in arid desert area	HU Guanglu, ZHAO Wenzhi, WANG Gang (7609)
Sustainable management on pests by agro-biodiversity	GAO Dong, HE Xiahong, ZHU Shusheng (7617)
Scientific Note	
Characteristics of organic carbon and nutrient content in five soil types in Honghu wetland ecosystems	LIU Gang, SHEN Shouyun, YAN Wende, et al (7625)
Effects of cypermethrin and deltamethrin on reproduction of <i>Brachionus calyciflorus</i>	HUANG Lin, LIU Changli, WEI Chuanbao, et al (7632)

《生态学报》2012 年征订启事

《生态学报》是中国生态学学会主办的自然科学高级学术期刊,创刊于 1981 年。主要报道生态学研究原始创新性科研成果,特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评介和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,280 页,国内定价 70 元/册,全年定价 1680 元。

国内邮发代号:82-7 国外邮发代号:M670 标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

编辑部主任 孔红梅 执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报
(SHENGTAI XUEBAO)
(半月刊 1981 年 3 月创刊)
第 31 卷 第 24 期 (2011 年 12 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA
(Semimonthly, Started in 1981)
Vol. 31 No. 24 2011

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel:(010)62941099 www.ecologica.cn Shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	冯宗炜	Editor-in-chief	FENG Zong-Wei
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717	Published by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net	Distributed by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 70.00 元