

ISSN 1000-0933

CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第33卷 第9期 Vol.33 No.9 2013

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 (SHENTAI XUEBAO)

第33卷 第9期 2013年5月 (半月刊)

目 次

前沿理论与学科综述

- 可持续发展研究的学科动向 茶 娜, 邬建国, 于润冰 (2637)
代谢异速生长理论及其在微生物生态学领域的应用 贺纪正, 曹 鹏, 郑袁明 (2645)
植物内生菌促进宿主氮吸收与代谢研究进展 杨 波, 陈 晏, 李 霞, 等 (2656)
中国园林生态学发展综述 于艺婧, 马锦义, 袁韵珏 (2665)

个体与基础生态

- 基于最小限制水分范围评价不同耕作方式对土壤有机碳的影响 陈学文, 王 农, 时秀焕, 等 (2676)
草原土壤有机碳含量的控制因素 陶 贞, 次旦朗杰, 张胜华, 等 (2684)
外源钙离子与南方菟丝子寄生对喜旱莲子草茎形态结构的影响 车秀霞, 陈惠萍, 严巧娣, 等 (2695)
毛竹出笋后快速生长期茎秆色素含量与反射光谱的相关性 刘 琳, 王玉魁, 王星星, 等 (2703)
巴郎山异型柳叶片功能性状及性状间关系对海拔的响应 冯秋红, 程瑞梅, 史作民, 等 (2712)
外源磷或有机质对板蓝根吸收转运砷的影响 高宁大, 耿丽平, 赵全利, 等 (2719)
不同猎物饲喂对南方小花蝽捕食量和喜好性的影响 张昌容, 郅军锐, 莫利锋 (2728)
捕食风险对东方田鼠功能反应格局的作用 陶双伦, 杨锡福, 姚小燕, 等 (2734)
基于线粒体细胞色素 c 氧化酶亚基 I 基因序列的帘蛤科贝类分子系统发育研究
..... 程汉良, 彭永兴, 董志国, 等 (2744)

不同实验生态环境对海刺猬遮蔽行为的影响

常亚青, 李云霞, 罗世滨, 等 (2754)

种群、群落和生态系统

- 基于 RS 与 GIS 的赣江上游流域生态系统服务价值变化 陈美球, 赵宝萍, 罗志军, 等 (2761)
长江口及邻近海域富营养化指标响应变量参照状态的确定 郑丙辉, 朱延忠, 刘录三, 等 (2768)
长江口及邻近海域富营养化指标原因变量参照状态的确定 郑丙辉, 周 娟, 刘录三, 等 (2780)
鸭绿江口及邻近海域生物群落的胁迫响应 宋 伦, 王年斌, 杨国军, 等 (2790)
杭州西溪湿地大型底栖动物群落特征及与环境因子的关系 陆 强, 陈慧丽, 邵晓阳, 等 (2803)
生物土壤结皮对荒漠土壤线虫群落的影响 刘艳梅, 李新荣, 赵 昕, 等 (2816)
大棚模拟条件下角倍蚜春季迁飞数量动态及其与气象因子的关系 李 杨, 杨子祥, 陈晓鸣, 等 (2825)
宁南山区植被恢复对土壤团聚体水稳定及有机碳粒径分布的影响 程 曼, 朱秋莲, 刘 雷, 等 (2835)
1958—2008 年太白山太白红杉林碳循环模拟 李 亮, 何晓军, 胡理乐, 等 (2845)
不同干扰对黄土区典型草原物种多样性和生物量的影响 陈芙蓉, 程积民, 刘 伟, 等 (2856)
乌拉山自然保护区白桦种群的年龄结构和点格局分析 胡尔查, 王晓江, 张文军, 等 (2867)
西南干旱对哀牢山常绿阔叶林凋落物及叶面积指数的影响 杞金华, 章永江, 张一平, 等 (2877)
阿尔泰山小东沟林区乔木物种丰富度空间分布规律 井学辉, 曹 磊, 藏润国 (2886)

景观、区域和全球生态

太湖流域生态风险评价 许 妍,高俊峰,郭建科 (2896)

基于 GIS 的关中-天水经济区土地生态系统固碳释氧价值评价 周自翔,李 璞,冯雪铭 (2907)

资源与产业生态

淹水条件下控释氮肥对污染红壤中重金属有效性的影响 梁佩筠,许 超,吴启堂,等 (2919)

研究简报

高温强光对小麦叶绿体 Deg1 蛋白酶和 D1 蛋白的影响及水杨酸的调节作用 郑静静,赵会杰,胡巍巍,等 (2930)

不同 CO₂ 浓度变化下干旱对冬小麦叶面积指数的影响差异 李小涵,武建军,吕爱锋,等 (2936)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 308 * zh * P * ¥ 90.00 * 1510 * 32 * 2013-05



封面图说: 肥美的当雄草原——高寒草甸是在寒冷的环境条件下,发育在高原和高山的一种草地类型。其植被组成主要是多年生草本植物,冬季往往有冰雪覆盖,土壤主要为高山草甸土。当雄草原位于藏北高原,藏南与藏北的交界地带,海拔高度为 5200—4300m,受海洋性气候影响,呈现高原亚干旱气候,年平均降水量 293—430mm。主要有小嵩草草甸、藏北嵩草草甸和沼泽草甸等,覆盖度为 60%—90%,其中小嵩草草甸分布面积最大,连片分布于广阔的高原面上。高寒草甸草层低,草质良好,是畜牧业优良的夏季牧场。

彩图及图说提供: 陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201201150090

陶贞, 次旦朗杰, 张胜华, 解晨骥, 林培松, 廖强, 高全洲, 刘龙海. 草原土壤有机碳含量的控制因素. 生态学报, 2013, 33(9): 2684-2694.
Tao Z, Ci Dan L J, Zhang S H, Xie C J, Lin P S, Liao Q, Gao Q Z, Liu L H. Controls over soil organic carbon content in grasslands. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(9): 2684-2694.

草原土壤有机碳含量的控制因素

陶 贞^{1,*}, 次旦朗杰^{1,2}, 张胜华¹, 解晨骥¹, 林培松¹,
廖 强^{1,3}, 高全洲¹, 刘龙海¹

(1. 中山大学地理科学与规划学院、广东省城市化与地理环境空间模拟重点实验室, 广州 510275;
2. 西藏自治区达孜县工业和信息化局, 拉萨 850000; 3. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

摘要: 基于374个高寒草原和温带草原土壤样品的测试结果, 运用多元逐步回归分析模型定量评估了土壤环境因子对土壤有机碳(SOC)含量的影响。结果表明: 高寒草原土壤有机碳含量(20.18 kg C/m^2)高于温带草原(9.23 kg C/m^2)。土壤理化生物学因子对高寒草原和温带草原SOC含量(10 cm)变化的贡献分别是87.84%和75.00%。其中, 土壤总氮含量和根系对高寒草原SOC含量变化的贡献均大于对温带草原SOC含量变化的相应贡献。土壤水分是温带草原SOC含量变化的主要限制性因素, 其对SOC含量变化的贡献达33.27%。高寒草原土壤C/N比显著高于温带草原土壤的相应值, 揭示了青藏高原高寒草原较高的SOC含量是由于较低的土壤微生物活性所导致。

关键词: 土壤有机碳; C/N比; 土壤环境因子; 高寒草原; 温带草原

Controls over soil organic carbon content in grasslands

TAO Zhen^{1,*}, CI Dan Langjie^{1,2}, ZHANG Shenghua¹, XIE Chenji¹, LIN Peisong¹, LIAO Qiang^{1,3}, GAO Quanzhou¹, LIU Longhai¹

1 *Guangdong Key Laboratory for Urbanization and Geo-simulation, School of Geography and Planning, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China*

2 *Industry and information Bureau in Dazi County of Tibet, Lhasa 850000, China*

3 *Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China*

Abstract: The pedosphere, due to its larger organic carbon storage, higher respiration rate and shorter turnover time in the carbon exchange with the atmosphere, plays an important role in the processes of global carbon cycle. China's grasslands with various types constitute an important part of the global grassland ecological system, which provides ideal test fields for the study of soil organic carbon content and its variation. Soil organic carbon (SOC) content is controlled by many factors (such as climate, parent material, vegetation, and soil physicochemical-biological properties) that have complex interactions. Primary productivity controlled by the climate influences the formation of soil organic matter, while soil physicochemical-biological properties are responsible for the decomposition rate of soil organic matter. In this study, we collected soil samples ($n=374$) from alpine grassland in the Qinghai-Tibet Plateau and temperate grassland in the Inner Mongolia Plateau and measured the organic carbon contents, bulk density, texture, moisture, total nitrogen, pH and roots of these soil samples. Also, we applied stepwise multi-regression models to evaluate the combined effects of soil environmental factors on SOC content. The results showed that the SOC content in the alpine grassland (20.18 kg C/m^2) was higher than that in the temperate grassland (9.23 kg C/m^2), indicating that SOC contents probably were more

基金项目:国家自然科学基金资助项目(40871143, 41071054); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(11lgjc13, 11lgjc10)

收稿日期:2012-01-15; 修订日期:2013-02-21

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: taozhen@mail.sysu.edu.cn

dominated by soil physicochemical-biological factors. In the study region, there were different relationships between SOC contents and different soil factors. For example, SOC contents were significantly negatively correlated with soil bulk density, and significantly positively with moisture, silt contents, roots, total nitrogen and the C/N ratio, respectively. The correlations of the SOC contents with pH and clay contents were not significant. Total nitrogen, moisture and roots in the soils were key factors on SOC contents change (top 10 cm) of the grassland ecosystem. The combined contribution of total soil nitrogen and roots to the variation of SOC contents in the alpine grassland represented 87.84 %, while it was lower (75%) to the variation of SOC contents (top 10 cm) in the temperate grassland. The contribution of soil moisture to the SOC contents variation in the temperate grassland was up to 33.27%. Therefore, soil moisture was the most important factor for the SOC variation in the temperate grassland. The C/N ratio in the alpine grassland was significantly higher than that in the temperate grassland, indicating that slower decomposition of soil organic matter in the alpine grassland resulted from lower microbial activity.

Responding to the global environmental change, the variation of SOC reservoirs was determined by a combination of physical processes (weathering processes, water cycle processes, soil formation processes and biological processes) on the earth surface and anthropogenic activities. Therefore, it deserves efforts to investigate how the SOC reservoirs of grassland ecosystems in China, located in sensitively regions to climatic change, will respond to these changes.

Key Words: soil organic carbon; C/N ratio; soil environmental factors; alpine grassland; temperate grassland

土壤圈因其具有巨大的有机碳储量、较高的呼吸速率^[1]及较短的与大气间碳交换周期^[2]而在全球碳循环及控制大气 CO₂浓度变化过程中起着关键作用。土壤有机碳(soil organic carbon, SOC)储量主要受制于生物量C的输入与土壤有机质分解-迁移速率的对比^[3]。在全球尺度上, SOC的水平分布主要受气候影响, 即SOC含量随降水增加而增大; 随气温升高而降低^[4]。但是, 在区域尺度上SOC含量与气候因子的关系因地而异。在湿润气候区, 生物量和有机质分解均随温度升高而增加, 且有机质分解增加较快^[5-6], 从而导致SOC含量下降; 在干旱-半湿润生态系统降水限制植物产量和有机质分解^[7-8], 且生物量对降水变化有较大的响应^[4,9], 进而影响SOC含量。在局部范围内土壤理化和生物学特性(如土壤根系、质地、容重、含水量、pH值和营养元素氮的含量等)影响SOC含量的变化, 其中研究较多的是土壤质地与SOC蓄积的关系。一般认为土壤粘粒组分的增加通过加大对SOC的吸附效应而降低土壤有机质(SOM)分解速率、减少土壤C的输出进而影响SOC含量和土壤C/N比^[10-12]。Jobbágy 和 Jackson的研究发现气候因子对土壤浅层SOC含量的影响较大, 随土壤深度增加土壤粘粒含量对SOC含量的作用却逐渐增强^[4]。作为生物量地下部分的根系的垂直分布格局决定着SOC含量的垂直分布特征^[4,13]。可见, SOC含量及其变化受上述理化和生物因素的影响。关于影响SOC贮存过程的主导因素及其贡献的定量化一直是碳循环研究者关注的科学问题。但是目前这一问题仍悬而未决, 而这一科学问题的解决对预测全球环境变化背景下SOC的去向和周转速率非常重要。

我国草原构成全球草原生态系统的重要组成部分^[14]且草原类型较多, 为研究不同类型草原SOC含量变化提供了理想试验场。关于我国草原SOC储量及其空间分布研究成果较多, 但是由于研究方法和选取土壤剖面深度的不一致, 不同研究结果之间存在较大差异^[15-19]。系统地量化土壤环境因子对草原SOC含量及变化的影响研究更少^[20]。

本研究在我国温带草原和高寒草原选取23个不同群落并采集374个土壤样品, 测试其理化参数, 据此估算、比较我国不同草原SOC的含量, 探讨草原SOC含量变化的关键控制因子, 为全球碳循环研究和我国草原生态系统可持续开发提供基础数据。

1 材料与方法

依据中国植被分类系统^[21], 于2009年8—9月在我国内蒙古高原的温带草原(包括荒漠草原、典型草原和草甸草原)和青藏高原的高寒草原(包括高寒草原和高寒草甸)选取23个群落为样地(表1), 在每个样地

布设3个呈“V”字形分布的土壤剖面。采用垂直连续薄层采样方式，即在0—30(20)cm、30—80cm和80—100cm间的采样间隔分别为2cm、10cm和20cm。采样深度为1m或者到母质层。总计采集土样374个，每个样品的重量为1.5—2.0kg。

将土壤样品风干分成4份。取其中1份样品过2mm筛，移去根系和大于2mm的砾石，用10%稀盐酸充分反应，除去碳酸盐，然后用Vario EL型号的元素分析仪(德国Elementar公司生产)测量SOC和土壤总氮(STN)含量(分析精度≤0.3%)；将土壤样品除去碳酸盐和有机质后，用Mastersizer 2000型粒度分析仪(英国Malvern公司生产)分析土壤的粒度组成(分析精度为±1%)；用酸度计测量土壤pH值；用于测量土壤根系的样品用自来水浸泡并搅拌待土块全部散开后，过1mm筛滤出根系，剔出凋落物和其它有机质，在65℃烘干至恒重，计算土壤根系含量(干根系与风干样品的重量百分比)。用土壤环刀(100cm³)采集的样品在105℃烘干至恒重，用电子天平($d=0.0000g$)反复称3次，计算土壤容重和土壤含水量^[22]。

数据处理与分析

研究区SOC含量采用分层法根据公式(1)^[23]计算：

$$TSOC = \sum_{i=1}^n BD_i \times C_i \times T_i \times \frac{1 - C_{2mm}}{10} \quad (1)$$

式中，TSOC、 BD_i 、 C_i 、 T_i 和 C_{2mm} 分别代表研究区SOC含量(kg C/m²)、土壤容重(g/cm³)、有机碳百分含量(%)、土壤厚度(cm)和2mm以上组分的体积百分含量。

应用Pearson相关分析探讨SOC分布的影响因子；用T检验识别不同群落SOC含量的差异显著性；考虑到土壤理化生物环境因子(土壤水分、质地、根系、总氮和pH值等)间存在共线性，应用多元逐步回归分析探讨草原SOC含量空间分布的控制变量。

所有分析计算均由SPSS17.0软件完成。

2 结果

2.1 草原土壤有机碳含量的剖面分布及其差异

高寒草原和温带草原SOC含量的剖面分布均表现出土壤剖面上层SOC含量显著高于下层。高寒草原SOC含量的最大值出现在6—10cm深度，然后随深度增加SOC含量逐渐减小，20cm以下SOC含量随深度变化不明显。温带草原SOC含量的最大值出现在表层(2cm深度，剖面12最大值出现在4cm深度)，然后随深度增加SOC含量逐渐减小，30—40cm以下SOC含量随深度变化不明显。研究区SOC含量的剖面分布与根系的垂直分布一致^[13]。

高寒草原与温带草原SOC含量存在区间、区内差异。高寒草原平均SOC含量(20.18 kg C/m²)是温带草原平均SOC含量(9.23 kg C/m²)的2倍左右(图1)。

研究区高寒草原SOC接近于Fang等^[16](21.4 kg C/m²)和王根绪等^[24](20.9 kg C/m²)的估算值，是Yang等^[25](6.5 kg C/m²)估算值的3倍多。温带草原SOC含量接近于陈庆美等^[26]的估算值(10.2 kg C/m²)，高于Yang等^[15](6.63 kg C/m²)估算值。

青藏高原东北部草甸草原的SOC含量较高原腹地的相应值高3倍多。温带草原不同群落之间SOC含量从高到低依次是(图1)：草甸草原(14.30 kg C/m²)>典型草原(11.92 kg C/m²)>疏林草原(5.72 kg C/m²)>荒漠草原(4.77 kg C/m²)。

2.2 土壤有机碳含量与理化生物环境因子的关系

测量374个土壤样品的SOC含量和理化生物参数，发现研究区SOC含量与土壤理化生物因子相关性密切。

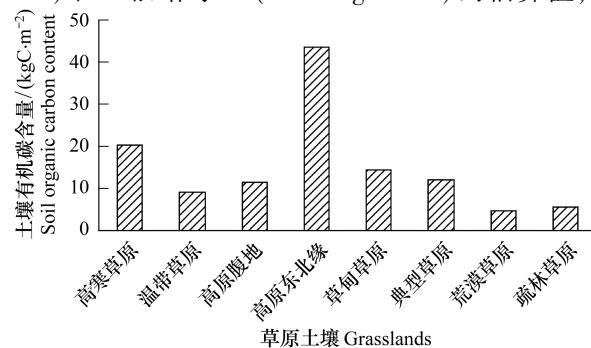


图1 不同草原土壤有机碳含量的差异

Fig. 1 The content differences of soil organic carbon during different grasslands

表1 样地地理位置和环境特征

Table 1 The location and environmental characters of the sampling sites

草原类型 Grassland types	编号 Number	深度/cm Depth	位置 Location	地貌部位 Geomorphologic location	海拔 Altitude/m	植被类型 Vegetation types	建群种 Constructive species	覆盖度 Percentage of coverage/%		土壤类型 Soil types	母质 Parent material	样品种数 Sample numbers
								覆盖度 Percentage of coverage/%	土壤类型 Soil types			
高寒草原	1	2.5	31°23'25.7"N 90°01'22.2"E	丘陵山地山坡	4720	草原	紫花针茅	40	高山草原土	花岗岩残坡积物	11	
Alpine grassland	2	40	31°25'39.1"N 90°00'37.2"E	宽谷坡麓明坡	4730	草原	嵩草、苔草	60	高山草原草甸土	花岗岩残坡积物	13	
	3	70	31°17'45.9"N 90°01'51.8"E	丘陵山地坡麓	4918	草原	嵩草	80	高山草甸土	花岗岩残坡积物	15	
	4	30	31°07'45.9"N 90°01'51.8"E	丘陵山地山坡	4935	草原	小嵩草、藏嵩草、矮嵩草、苔草	70	高山草甸土	花岗岩残坡积物	12	
	5	30	31°34'22.8"N 91°53'47.1"E	宽谷地	4636	草甸	高山柳、金露梅	90	高山湿草甸土	冲洪积物	6	
	6	20	30°47'49.4"N 91°30'01.8"E	丘陵山地山坡	4873	灌丛	高山柳、金露梅	80	高山灌丛草甸土	花岗岩残坡积物	11	
	7	30	31°17'32.7"N 91°47'11.9"E	宽谷滨湖盆地外缘	4546	草甸	高山嵩草	80	高山草甸土	冲积物	12	
	8	40	31°38'45.8"N 92°19'13.2"E	高原缓丘中部	4480	草甸	藏嵩草、矮嵩草、苔草	90	高山湿草甸土	泥质页岩残坡积物	13	
	9	100	37°39'39.5"N 101°19'57.9"E	滩地	3320	灌丛	金露梅	90	高山草甸土	冲洪积物	20	
	10	100	37°36'46.8"N 101°18'53.0"E	缓坡地	3202	草地	人工燕麦草	90	高山草甸土	冲洪积物	20	
	11	90	37°36'46.8"N 101°18'53.0"E	缓坡地	3202	草甸	矮嵩草	95	高山草甸土	冲洪积物	20	
温带草原	12	30	43°50'44.9"N 113°45'41.8"E	缓坡地	1178	荒漠化草原	小针茅	淡栗钙土	花岗岩残积物	18		
Temperate grassland	13	40	43°59'45.4"N 115°06'14.2"E	平地	1169	典型草原	羊草、针茅、糙隐子草	70	栗钙土	粉砂土	16	
	14	30	43°53'52.3"N 115°18'48.8"E	平地	1191	典型草原	羊草、针茅、冷蒿	70	栗钙土	粉砂土	15	
	15	100	43°33'09.2"N 116°40'30.8"E	缓坡地	1255	围封典型草原	羊草	95	栗钙土	粉砂土	13	
	16	100	43°33'09.2"N 116°40'23.9"E	缓坡地	1259	围封典型草原	羊草	95	栗钙土	粉砂土	21	
	17	70	43°32'23.5"N 116°33'10.2"E	台地	1178	典型草原	大针茅	90	栗钙土	粉砂土	19	
	18	100	43°33'57.4"N 116°39'32.5"E	缓坡地	1229	典型草原	羊草、针茅、星毛委陵菜	90	栗钙土	粉砂土	22	
	19	100	43°29'57.6"N 116°48'34.8"E	玄武岩台地	1382	草甸草原	大籽蒿	90	暗栗钙土	粉砂土	22	
	20	100	43°30'56.0"N 116°48'16.3"E	玄武岩台地	1383	农田	小麦	暗栗钙土	粉砂土	20		
	21	100	43°39'55.8"N 116°49'34.5"E	丘间低地	1358	阔叶林	杨树林	暗栗钙土	砂土	22		
	22	30	43°40'40.5"N 116°30'59.5"E	缓坡地	1322	阔叶林	榆树疏林	暗栗钙土	砂土	15		
	23	60	45°10'44.5"N 116°38'29.6"E	平地	864	典型草原	针茅、羊草、冷蒿、糙隐子草	70	栗钙土	砂土	18	

表中植物的拉丁文: 紫花针茅 (*Stipa purpurea*)、嵩草 (*Kobresia*)、苔草 (*Carex moorei*)、嵩草 (*Kobresia bellardii*)、矮嵩草 (*Kobresia tibetica*)、矮嵩草 (*Kobresia humilis*)、金露梅 (*Dasyphora fruticosa*)、高山柳 (*Salicaceae*)、燕麦草 (*Arenatherum elatius*)、小针茅 (*Stipa klemenzii* Roshev.)、针茅 (*Leymus chinensis*)、针茅 (*Artemisia frigida*)、大针茅 (*Artemisia sieversiana*)、星毛委陵菜 (*Potentilla aculeata*)、榆树 (*Ulmus pumila*, *U. macrocarpa*)、小麦 (*Triticum aestivum*)、大籽蒿 (*Potentilla aculeata*)、山杨 (*Populus davidiana*)

2.2.1 土壤理化性质与 SOC 含量的关系

土壤水分与 SOC 的关系 研究区温带草原平均土壤水分含量显著小于高寒草原的相应值($P=0.000$)。SOC 含量与土壤水分含量显著正相关($P<0.001$)(图 2), 相关系数(r)分别是 0.83(高寒草原)和 0.64(温带草原)。

容重与 SOC 的关系 研究区土壤容重与 SOC 含量显著负相关(图 2)($P<0.001$), 相关系数分别是 -0.87(高寒草原)和 -0.59(温带草原), 一致于我国其他地区土壤容重与 SOC 含量的关系^[20,27-28]。

土壤质地与 SOC 的关系 研究区温带草原土壤粉砂平均含量显著高于高寒草原($P=0.000$), 二者粘粒含量差异不明显($P>0.05$)。温带草原 SOC 含量与土壤质地极显著正相关(相关系数分别是 $r_{\text{粉沙}}=0.535$, $r_{\text{粘粒}}=0.614$, $P\leq 0.001$); 高寒草原粉砂含量与 SOC 极显著相关($r=0.725$, $P=0.000$), 然而 SOC 与粘粒组分相关性不显著($r=0.296$, $P=0.075$, 图 2)。

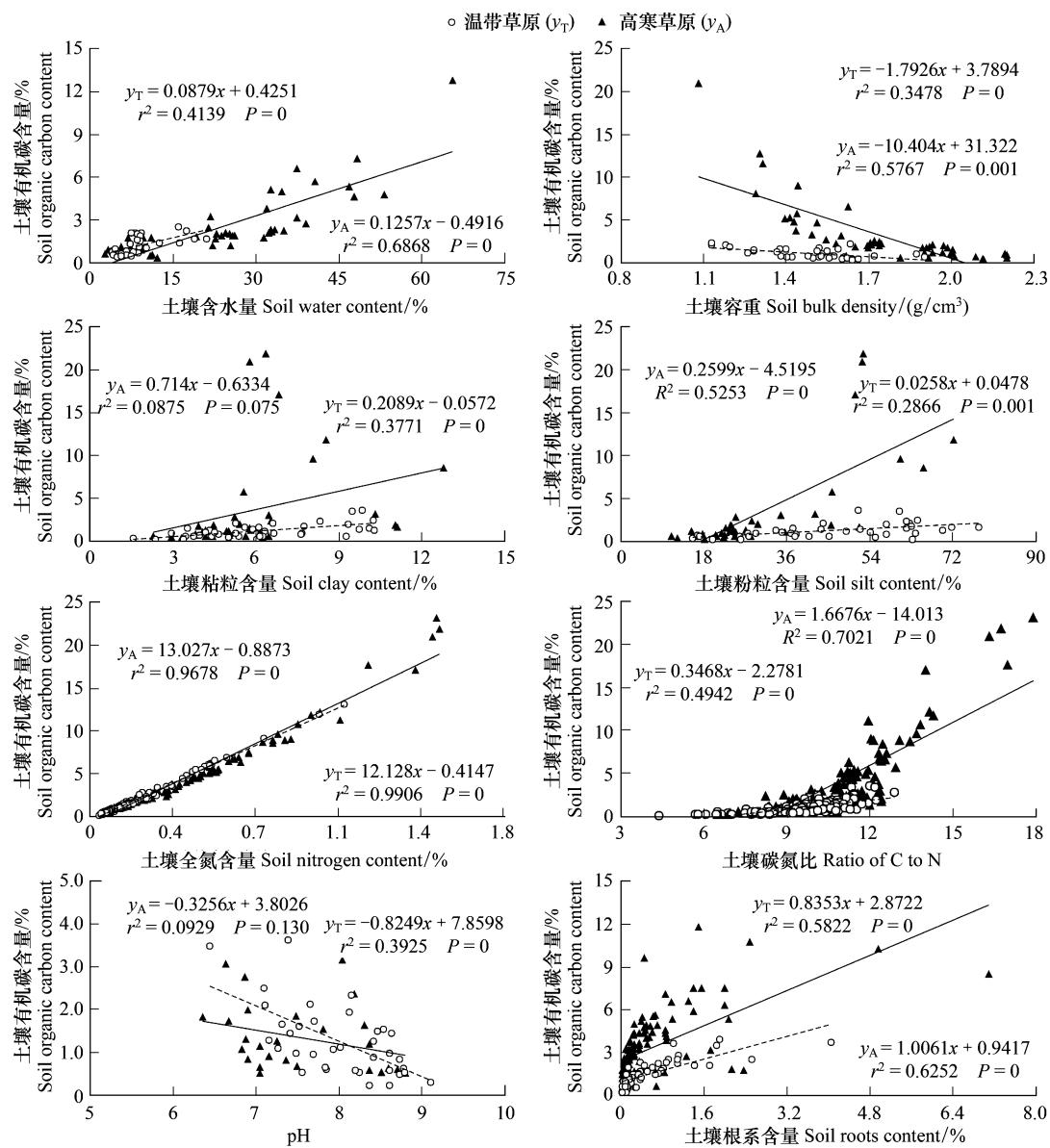


图 2 土壤环境因子与土壤有机碳含量之间的关系

Fig. 2 Relationships between soil environmental factors and soil organic carbon content

STN 与 SOC 的关系 高寒草原和温带草原 SOC 与 STN 极显著相关($r > 0.98$, $P=0.000$, 图 2), 一致于

其他研究结果^[27-28]。研究区 SOC 与 C/N 比显著相关($r=0.838, P=0.000$, 图 2), 而且高寒草原土壤平均 C/N 比(10.12 ± 1.62)与温带草原的相应值(9.62 ± 1.23)差异显著($P=0.000$)。

pH 值与 SOC 的关系 高寒草原土壤 pH 值对 SOC 的影响不明显($P=0.13$); 温带草原 SOC 含量与土壤 pH 值显著负相关($r=-0.626, P=0.000$, 图 2)。这与其他研究结果^[28-29]一致。而且土壤 pH 值的垂直分布随深度而增加, 至 30—40 cm 达到最大值, 指示草原土壤无机碳的淋溶、淀积深度。

2.2.2 地下生物量与 SOC

研究区 SOC 含量与土壤根系含量呈极显著正相关($r>0.8, P=0.000$, 图 2), 而且高寒草原和温带草原 SOC 随土壤根系垂直变化的模式相近。

2.2.3 土壤理化生物环境因子与 SOC 含量的定量计算

由于研究区不同植被类型下土壤层厚度不一, 为了便于分析和比较, 选择 10 cm 和 20 cm 深度的 SOC 含量分析其控制变量。根据回归模型(2)和(3)分别计算高寒草原和温带草原 SOC 含量变化的控制因素及其贡献。

高寒草原

$$SOC = 0.263 + 5.852TN + 0.505R \quad (2)$$

调整的 $r^2 = 0.994, P=0.000$

温带草原

$$SOC = -0.789 + 9.16TN + 0.097M - 0.573R \quad (3)$$

调整的 $r^2 = 0.854, P=0.002$

式中, SOC、TN、M 和 R 分别代表 SOC 含量(%)、土壤总氮含量(%)、土壤含水量(%)和根系含量(%)。

从模型(2)和(3)可以看出: 土壤总氮含量和根系均是高寒草原和温带草原 SOC 含量变化的主要控制因素; 土壤含水量是温带草原 SOC 含量变化的主要控制因素。

比较计算的 SOC 含量与实测 SOC 含量发现, 高寒草原二者非常接近, 而温带草原二者存在偏差(图 3)。

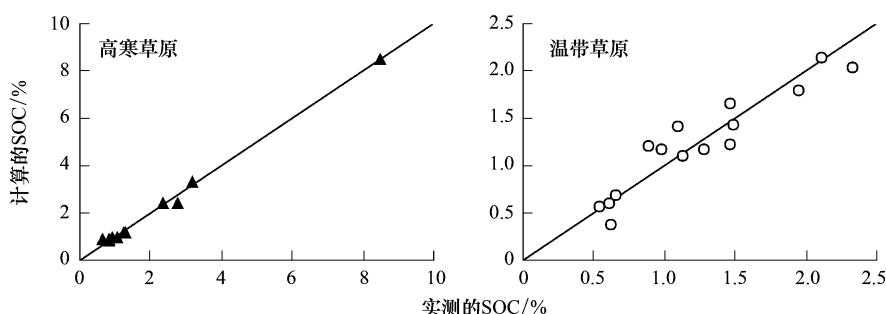


图 3 实测的土壤有机碳含量与计算土壤有机碳含量的关系

Fig. 3 Relationships between measured soil organic carbon content and calculated soil organic carbon content within study area

假设不考虑其他因子对 SOC 含量变化的影响, 将模型(2)和(3)中各项计算值的绝对值除以计算的 SOC 含量, 即得出模型中相应的土壤环境因子对 SOC 含量变化的贡献, 如高寒草原土壤环境因子对 SOC 含量(10 cm)变化的贡献是 87.84%; 温带草原土壤环境因子对 SOC 含量(10 cm)变化的贡献是 75.00%。揭示温带草原 SOC 含量变化受未知因子(常数项的贡献)的控制较大(25.00%)。上述各控制因子对 SOC 含量(10 cm)变化的贡献存在区域差异(图 4): 例如 STN 对 SOC 含量变化的贡献最大, 分别是 63.59% (高寒草原) 和 34.12% (温带草原); 土壤水分是温带草原 SOC 含量变化的第二控制者, 其对 SOC 含量变化的贡献为 33.27%。根系对高寒草原 SOC 含量的贡献(24.25%)是温带草原(7.62%)的 3 倍多, 而且随深度增加根系对 SOC 含量的贡献减少较快, 如 20 cm 深处, 高寒草原根系对 SOC 含量的贡献为 11.27%, 温带草原仅为 2.98%。

3 讨论

3.1 不同草原土壤有机碳含量变化的控制因素

SOC 主要来源于植物、动物、微生物残体和根系分泌物，并处于不断形成-分解的动态过程。在 SOC 的积累过程中，气候因子(主要是温度和降水)起着重要作用。一方面，气候条件通过制约植被类型、影响植被的生产力从而决定生物量 C 的输入；另一方面，气候条件通过改变土壤水分和温度条件影响微生物对有机碳的分解和转化^[30]，控制 SOC 的输出。在干旱、半干旱温带草原降水通过增加初级生产量贡献于 SOC 的积累^[4,9,11,31]；温度则通过加速微生物分解作用^[4,10]，或者减少植被生产力^[32-34]使得 SOC 随温度增加而减少。相反，在高寒草原由于温度对植物生长的刺激效应^[9,35]，SOC 含量与温度正相关^[25,31]。同时受地貌、母质、土壤剖面的年龄等非地带性因素的制约，不同的生物气候条件和同一生物带内 SOC 含量变化相当大^[23]。我国高寒草原生态系统生物量(平均为 253.37 g C/m^2)虽然显著($P=0.01$)低于温带草原的相应值(383.01 g C/m^2 ^[9])，但是高寒草原的 SOC 含量(20.18 kg C/m^2)却是温带草原相应值(9.23 kg C/m^2)的 2 倍多(图 1)，一致于全球 SOC 贮存量与净初级生产量之间关系较弱^[36]的结论。这是由于青藏高原独特的寒冷气候条件使得生长季节高寒草原生态系统呼吸速率较低^[35]；非生长期(10月—4月)长、土壤冻结时间较长以及土壤微生物活动较弱耦合作用导致 SOM 分解速率较慢^[37]，即较低的 SOC 输出量使得高寒草原 SOC 含量较大^[31]。较大的地貌单元通过改变降水量和植被类型影响 SOC 含量。青藏高原腹地高寒草原的 SOC 含量为 11.43 kgC/m^2 ，仅是青藏高原东北部高寒草甸草原 SOC 含量(43.51 kgC/m^2)的 $1/4$ (图 1)。这是由于青藏高原东北部高寒草甸草原位于大通河谷地上游，祁连山脉的迎风坡，夏季风在这里形成较多降水，使得高寒草甸草原的初级生产量(329.74 gC/m^2)显著高于高寒草原(177.00 gC/m^2 ^[9]， $P=0.000$)所导致。温带草原不同群落类型 SOC 含量的差异也是由于降水空间分布差异导致的初级生产量不同所致。显然，研究区不同草原生态系统内部 SOC 含量的变化受制于降水导致的植被生物量 C 的变化。在成土母质、气候条件和植被类型没有发生根本性变化的情况下，在较小的尺度上，SOC 含量及其变异还受地貌部位及其造成的土壤水再分配的影响。如表 1 样地 3(位于山麓)和 2(位于山坡)，SOC 含量分别为 12.00 kg C/m^2 和 3.33 kg C/m^2 。

3.2 土壤环境因素对 SOC 含量的影响

3.2.1 土壤水分、容重对 SOC 含量的作用

土壤水分主要来自于大气降水。在区域尺度上土壤水分通过影响植物生产力和 SOC 分解速率控制 SOC 含量^[4,11,38-39]。研究区不同土壤剖面各层 SOC 含量与土壤水分含量显著正相关($P=0.000$ ，图 2)，与其他研究结果一致^[25,28,40]。但是有研究表明土壤湿度降低有利于 SOC 的积累，这是由于土壤湿度降低一方面减少根呼吸；另一方面使得根系向深处发展，增加土壤中惰性碳的含量^[37,41]所致。另外，土壤水分含量变化通过影响土壤的通透性而影响微生物活动进而作用于土壤呼吸。如 Wang 等研究得出 SOM 分解速率随土壤水分含量的增加而增加，直到最适宜的土壤水分为止，然后又随土壤水分含量的增加而减少^[39]。然而当水分的变化对土壤微生物与植物根系的活动影响较小时，则水分对土壤呼吸的影响难以确定^[42]。因此，土壤水分含量变化对 SOC 含量的影响是有限的。本研究中温带草原土壤水分对 SOC 含量的贡献为 33.27%。揭示土壤水分是温带草原生态系统 SOC 含量的主要控制性因素之一。

研究结果显示：研究区 SOC 含量与土壤容重显著负相关，且高寒草原 SOC 含量与容重的负相关系数较大(图 2)。其原因是由于高寒草原土壤成土过程中生物和化学风化作用较弱，冻融风化作用较强使得土体内碎石较多，通透性较差，根系向下生长受到抑制；温带草原 SOC 含量与容重的负相关性较弱，可能是由于温

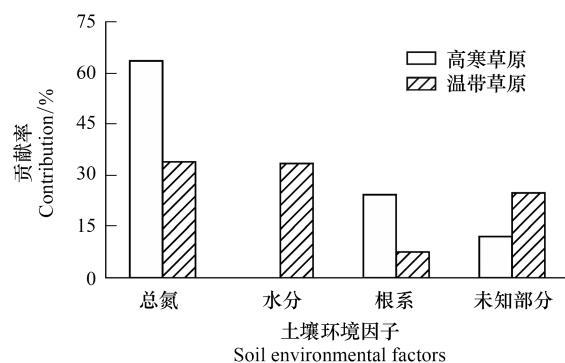


图 4 土壤环境因子对 SOC 含量贡献的区域差异(10cm)

Fig. 4 Contribution of soil environmental factors to soil organic carbon content (10cm)

带草原土壤多以细砂、粉砂为母质发育的土壤,通透性较好,有利于根系向下生长的结果。容重对 SOC 库的负控制效应,其内在机制有待进一步探讨。

3.2.2 土壤质地对 SOC 含量的影响

受土壤矿物风化速率制约的土壤质地变化虽较缓慢,但是许多研究者已经证实土壤质地对 SOM 更新过程的影响。这是由于土壤中粉粒和粘粒组分的增加一方面通过改变土壤肥力状况影响植物初级生产量的大小;另一方面通过吸附作用控制 SOM 的分解。因此, SOC 含量及其分解速率与土壤质地密切相关^[12]。土壤粘粒通过吸附作用和聚合作用能够阻碍 SOM 分解、减缓 SOC 更新速率、减少 SOC 淋失量等有效增加 SOC 蓄积量^[10-12];粉粒含量增加可以增加土壤的持水性,与气候条件一起可增加植物产量和 SOC 的输入^[10,25]。因此, SOC 含量随粉粒和粘粒含量的增加而增加。本研究结果显示,我国草原地区土壤质地与 SOC 含量的关系存在区域差异:温带草原 SOC 含量与土壤质地极显著正相关($P \leq 0.001$);而高寒草原 SOC 含量与粉粒含量极显著相关($P=0.000$),与粘粒组分相关性不显著($P=0.075$,图 2)。这可能是由于高寒草原土壤发育缓慢,粘粒含量较低所导致。

3.2.3 土壤总氮、pH 值与 SOC 含量的关系

土壤碳、氮循环通过植物生产和微生物分解紧密联系,研究区 SOC 含量与 STN 极显著正相关($P = 0.000$,图 2),回归分析得出 STN 是研究区 SOC 含量变化的主要控制因素(一致于武小钢等的研究结果^[28])也证实了这一点。氮元素是陆地生态系统的限制性肥力元素。土壤矿质态 N 的有效性不仅影响植被生长,而且直接控制 SOC 的分解速率。研究表明,土壤中较低的矿质态有效氮和较高的 C/N 比可使 SOC 的分解速率减缓^[43-44]从而导致 SOC 积累。因此,土壤 C/N 比可作为 SOM 微生物分解程度的代用指标^[45-46]。研究区高寒草原平均 SOC 含量大约是温带草原平均 SOC 含量的 2 倍左右,这是由于高寒草原土壤微生物活性较低(高寒草原土壤的 C/N 比显著高于温带草原的相应值)致使 SOM 分解矿化缓慢的结果。这一结论也可从研究区土壤稳定碳同位素组成($\delta^{13}\text{C}$)的空间变化:高寒草原土壤的平均 $\delta^{13}\text{C}$ 值[平均 $\delta^{13}\text{C} = (-24.54 \pm 0.74)\text{\%o}$, $n = 47$]显著小于温带草原的相应值[平均 $\delta^{13}\text{C} = (-23.93 \pm 0.66)\text{\%o}$, $n = 93$, $P = 0.000$]得以证实。另外, STN 含量相同时,温带草原 SOC 含量稍高于高寒草原 SOC 含量(图 2),这可能是由于温带草原生态系统较高的气温条件提高了土壤 N 素的有效性进而促进植物生长^[47-48],使得温带草原生物量 C 输入较多的结果。STN 差异造成的 SOC 含量空间异质性机制有待进一步探讨。

此外,土壤微生物的活性还受土壤 pH 值的制约。土壤 pH 值过高(>8.5)或过低(<5.5)都会抑制微生物的活动从而使 SOC 分解速率下降^[49]。本研究中绝大多数样品 pH 值变化于 6.36—8.50 之间,只有 1/5 样品(全部位于 30—40 cm 处)的 pH 值 >8.5 。温带草原 SOC 含量与 pH 值表现为负相关性($P=0.000$),高寒草原二者的相关性不明显($P=0.13$)。研究区土壤 pH 值的垂直分布随深度而增加,至 30—40 cm 达到最大值,指示草原土壤无机碳的淋溶、淀积深度。

3.2.4 根系与 SOC 含量

森林土壤根系对 SOC 的平均贡献是对应地上凋落物的 1.8 倍,平均残留时间是来自凋落物碳的 2.4 倍^[50]。草原生态系统光合作用产物主要分配于地下部分,地下生物量(根系)占总生物量碳库的 90% 左右^[9,51],成为草原 SOC 的主要来源^[52]。我国草原 SOC 含量与土壤根系含量呈极显著正相关($P=0.000$,图 2),亦证实地下生物量是草原土壤碳库的最主要输入源^[53-54]。高寒草原土壤根系对 SOC 含量的贡献(24.25%, 10 cm)高于温带草原的相应值(7.62%),与高寒草原根系在 0—10 cm 的分布(占总根系的 60% 以上)高于温带草原(占总根系的 55% 左右)一致。

初级生产量虽然是驱动 SOC 含量变化的控制因子^[20,55],但是 SOC 储量或许更大地受制于 SOC 分解和迁移速率的控制^[11]。随着大气 CO₂ 浓度增高,植物的 C/N 比可能上升。当植物残体的 C/N 比超过一定数值时, SOC 的矿化过程会因 N 素营养不足而受到抑制^[56]。同时植物残体中酚类化合物含量的上升,也将导致 SOC 分解速率的下降^[57]。相反,大气 CO₂ 浓度增加使得根系 CO₂ 通量增加,增加了对微生物的碳供应,促

进微生物的种群增长、生物活性提高，进而导致 SOC 的微生物分解加速。此外，过量的人为大气氮沉降改变土壤微生物量及其功能，如过量的氮沉降导致土壤微生物量减少、酶的活性降低、土壤呼吸速率减少，最终导致 SOC 的累积^[58-59]。

随着全球环境变化，土壤 SOC 库的变化取决于地表自然过程(风化过程、水循环、土壤形成和养分活性、生物过程等)和人类活动的变化。因此，位于气候变化敏感地区的中国草原生态系统 SOC 库如何响应这些变化需进一步研究。

4 结论

SOC 的形成-分解受气候、植被、母质、土壤理化生物学性质(土壤质地、温度、湿度、pH 值、根系)等因子的综合影响。其中，气候条件影响下的初级生产量是 SOC 形成的主要控制因子，土壤理化生物学性质控制着 SOC 的分解-迁移速率。我国不同草原生态系统 SOC 含量的较大差异揭示 SOC 含量或许更大地受土壤理化生物学因子的制约。草原 SOC 含量与各土壤理化生物学因子的关系不同且存在差异：土壤剖面各层 SOC 含量与容重显著负相关，与土壤含水量、粉粒含量、根系含量、总氮含量和 C/N 比显著正相关，与土壤 pH 值负相关，与粘粒含量正相关。不同草原类型下 SOC 含量与 pH 值的负相关性以及与粘粒含量的正相关性存在差异。

土壤总氮含量、土壤含水量和根系含量是我国草原 SOC 含量(10 cm)变化的关键控制因子。土壤总氮和根系对高寒草原 SOC 含量(10 cm)变化的综合贡献为 87.84%，土壤总氮含量、土壤含水量和根系对温带草原 SOC 含量(10 cm)变化的综合贡献为 75.00%。土壤总氮含量和根系分别对高寒草原 SOC 含量(10 cm)变化的贡献均大于对温带草原 SOC 含量(10 cm)变化的贡献。土壤水分对温带草原 SOC 含量的贡献达 33.27%。高寒草原土壤 C/N 比显著高于温带草原土壤的相应值，揭示青藏高原高寒草原 SOM 分解矿化缓慢是由于土壤微生物活性较低所导致。

随着全球气候变化，土壤 SOC 库的变化取决于地表自然过程(风化过程、水循环、土壤形成和养分活性、生物过程等)和人类活动变化的耦合作用。因此，位于气候变化敏感地区的中国草原生态系统 SOC 库如何响应这些变化值得进一步研究。

References:

- [1] Raich J W, Potter C S. Global patterns of carbon dioxide emissions from soils. *Global Biogeochemical Cycles*, 1995, 9(1): 23-36.
- [2] Trumbore S E, Chadwick O A, Amundson R. Rapid exchange between soil carbon and atmospheric carbon dioxide driven by temperature change. *Science*, 1996, 272(5260): 393-396.
- [3] Amundson R. The carbon budget in soils. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2001, 29: 535-562.
- [4] Jobbágy E G, Jackson R B. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation. *Ecological Applications*, 2000, 10(2): 423-436.
- [5] Schlesinger W H. Carbon balance in terrestrial detritus. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1977, 8: 51-81.
- [6] Oades J M. The retention of organic matter in soils. *Biogeochemistry*, 1988, 5(1): 33-70.
- [7] Sala O E, Parton W J, Joyce L A, Lauenroth W K. Primary production of the central grassland region of the United States. *Ecology*, 1988, 69(1): 40-45.
- [8] Amundson R G, Chadwick O A, Sowers J M. A comparison of soil climate and biological activity along an elevational gradient in the eastern Mojave Desert. *Oecologia*, 1989, 80(3): 395-400.
- [9] Ma W H, Fang J Y, Yang Y H, Mohammat A. Biomass carbon stocks and their changes in northern China's grasslands during 1982—2006. *Science China-Life Sciences*, 2010, 53(7): 841-850.
- [10] Burke I C, Yonker C M, Parton W J, Cole C V, Flach K, Schimel D S. Texture, climate, and cultivation effects on soil organic matter content in U. S. Grassland soils. *Soil Science Society of America Journal*, 1989, 53(3): 800-805.
- [11] Wynn J G, Bird M I, Vallen L, Grand-Clement E, Carter J, Berry S L. Continental-scale measurement of the soil organic carbon pool with climatic, edaphic, and biotic controls. *Global Biogeochemical Cycles*, 2006, 20: GB1007, doi: 10.1029/2005GB002576.
- [12] Schimel D, Stillwell M A, Woodmansee R G. Biogeochemistry of C, N, and P in a soil catena of the shortgrass steppe. *Ecology*, 1985, 66(1): 276-282.
- [13] 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.
- [14] Chen Z Z, Wang S P. Typical Grassland Ecosystem in China. Beijing: Science Press, 2000.
- [15] Yang Y H, Fang J Y, Ma W H, Smith, Mohammat A, Wang S P, Wang W. Soil carbon stock and its changes in northern China's grasslands from 1980s to 2000s. *Global Change Biology*, 2010, 16(11) : 3036-3047.
- [16] Fang J Y, Liu G H, Xu S L. Soil carbon pool in China and its global significance. *Journal of Environmental Sciences*, 1996, 8(2) : 249-254.
- [17] Ni J. Carbon storage in grasslands of China. *Journal of Arid Environments*, 2002, 50(2) : 205-218.
- [18] Li K R, Wang S Q, Cao M K. Vegetation and soil carbon storage in China. *Science in China Series D*, 2004, 47(1) : 49-57.
- [19] Xie Z B, Zhu J G, Liu G, Cadisch G, Hasegawa T, Chen C M, Sun H F, Tang H Y, Zeng Q. Soil organic carbon stocks in China and changes from 1980s to 2000s. *Global Change Biology*, 2007, 13(9) : 1989-2007.
- [20] Yang Y H, Mohammat A, Feng J M, Zhou R, Fang J Y. Storage, patterns and environmental controls of soil organic carbon in China. *Biogeochemistry*, 2007, 84(2) : 131-141.
- [21] Chinese Academy of Sciences. *Vegetation Atlas of China*. Beijing: Science Press, 2001.
- [22] Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences. *Physico-chemical Analysis of Soils*. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1978 : 142-512.
- [23] Post W M, Emanuel W R, Zinke P J, Stangenberger A G. Soil carbon pools and world life zones. *Nature*, 1982, 298(5870) : 156-159.
- [24] Wang G X, Qian J, Cheng G D, Lai Y M. Soil organic carbon pool of grassland soils on the Qinghai-Tibetan Plateau and its global implication. *Science of the Total Environment*, 2002, 291(1/3) : 207-217.
- [25] Yang Y H, Fang J Y, Tang Y H, Ji C J, Zheng C Y, He J S, Zhu B. Storage, patterns and controls of soil organic carbon in the Tibetan grasslands. *Global Change Biology*, 2008, 14(7) : 1592-1599.
- [26] Chen Q M, Wang S Q, Yu G R. Spatial characteristics of soil organic carbon and nitrogen in Inner Mongolia. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14(5) : 699-704.
- [27] He Z B, Zhao W Z, Liu H, Su Y Z. Characteristic of *Picea crassifolia* forest soil organic carbon and relationship with environment factors in the Qilian Mountain. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(8) : 2572-2577.
- [28] Wu X G, Guo J P, Yang X Y, Tian X P. Soil organic carbon storage and profile inventory in the different vegetation types of Luya Mountain. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(11) : 3009-3019.
- [29] Geng Z C, Jiang L, Li S S, She D, Hou L. Profile distribution of organic carbon and nitrogen in major soil types in the middle of Qilian Mountains. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(3) : 665-672.
- [30] Davidson E A, Trumbore S E, Amundson R. Soil warming and organic carbon content. *Nature*, 2000, 408(6814) : 789-790.
- [31] Callesen I, Liski J, Raulund-Rasmussen K, Olsson M T, Tau-Strand L, Vesterdal L, Westman C J. Soil carbon stores in Nordic well-drained forest soils-relationships with climate and texture class. *Global Change Biology*, 2003, 9(3) : 358-370.
- [32] Epstein H E, Lauenroth W K, Burke I C. Effects of temperature and soil texture on ANPP in the U. S. Great Plains. *Ecology*, 1997, 78(8) : 2628-2631.
- [33] Ma W H, Yang Y H, He J S, Hui Z, Fang J Y. Above- and below-ground biomass in relation to environmental factors in temperate grasslands, Inner Mongolia. *Science in China Series C*, 2008, 51(3) : 263-270.
- [34] Yang Y H, Fang J Y, Pan Y D, Ji C J. Aboveground biomass in Tibetan grasslands. *Journal of Arid Environments*, 2009, 73(1) : 91-95.
- [35] Kato T, Tang Y H, Gu S, Hirota M, Du M Y, Li Y N, Zhao X Q. Temperature and biomass influences on interannual changes in CO₂ exchange in an alpine meadow on the Qinghai-Tibetan Plateau. *Global Change Biology*, 2006, 12(7) : 1285-1298.
- [36] Batjes N H. Total carbon and nitrogen in soils of the world. *European Journal of Soil Science*, 1996, 47(2) : 151-163.
- [37] Tao Z, Shen C D, Gao Q Z, Sun Y M, Yi W X, Li Y N. Soil organic carbon storage and soil CO₂ flux in the alpine meadow ecosystem. *Science in China (Series D: Earth Sciences)*, 2007, 50(7) : 1103-1114.
- [38] Yang Y H, Fang J Y, Ma W H, Guo D L, Mohammat A. Large-scale pattern of biomass partitioning across China's grasslands. *Global Ecology and Biogeography*, 2009, 19(2) : 268-277.
- [39] Wang Y, Amundson R, Niu X F. Seasonal and altitudinal variation in decomposition of soil organic matter inferred from radiocarbon measurements of soil CO₂ flux. *Global Biogeochemical Cycles*, 2000, 14(1) : 199-211.
- [40] Fu H, Chen Y M, Wang Y R, Wan C G. Organic carbon content in major grassland types in Alex, Inner Mongolia. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(3) : 469-470.
- [41] Gansert D. Root respiration and its importance for the carbon balance of beech saplings (*Fagus sylvatica* L.) in a montane beech forest. *Plant and Soil*, 1994, 167(1) : 109-119.
- [42] Chen Q S, Li L H, Han X G, Yan Z D. Effects of water content on soil respiration and the mechanisms. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(5) : 972-978.
- [43] Wang L, Ouyang H, Zhou C P, Zhang F, Song M H, Tian Y Q. Soil organic matter dynamics along a vertical vegetation gradient in the Gongga Mountain on the Tibetan Plateau. *Journal of Integrative Plant Biology*, 2005, 47(4) : 411-420.

- [44] Li S J, Qiu L P, Zhang X C. Mineralization of soil organic carbon and its relations with soil physical and chemical properties on the Loess Plateau. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(5): 1217-1226.
- [45] Michael Z, Roland Z, Bruno G. A 240,000-year stable carbon and nitrogen isotope record from a loess-like palaeosol sequence in the Tumara Valley, Northeast Siberia. *Chemical Geology*, 2007, 242(3/4): 307-318.
- [46] Aerts R. Climate, leaf litter chemistry and leaf litter decomposition in terrestrial ecosystems: a triangular relationship. *Olkos*, 1997, 79(3): 439-449.
- [47] Luo Y Q, Wan S Q, Hui D F, Wallace L L. Acclimatization of soil respiration to warming in a tall grass prairie. *Nature*, 2001, 413(6956): 622-625.
- [48] Melillo J M, Steudler P A, Aber J D, Newkirk K, Lux H, Bowles F P, Catricala C, Magill A, Ahrens T, Morrisseau S. Soil warming and carbon cycle feedbacks to the climate system. *Science*, 2002, 298(5601): 2173-2176.
- [49] Zhang P, Zhang T, Chen N L. Vertical distribution patterns of soil organic carbon and total nitrogen and related affecting factors along northern slope of Qilian Mountains. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(3): 518-524.
- [50] Rasse D P, Rumpe I C, Dignac M F. Is soil carbon mostly root carbon? Mechanisms for a specific stabilisation. *Plant and Soil*, 2005, 269(1/2): 341-356.
- [51] Reeder J D, Schuman G E. Influence of livestock grazing on C sequestration in semi-arid mixed-grass and short-grass rangelands. *Environmental Pollution*, 2002, 116(3): 457-463.
- [52] Boone R D, Nadelhoffer K J, Canary J D, Kaye J P. Roots exert a strong influence on the temperature sensitivity of soil respiration. *Nature*, 1998, 396(6711): 570-572.
- [53] Scurlock J M O, Hall D O. The global carbon sink: a grassland perspective. *Global Change Biology*, 1998, 4(2): 229-233.
- [54] Mokany K, Raison R J, Prokushkin A S. Critical analysis of root: shoot ratios in terrestrial biomes. *Global Change Biology*, 2006, 11(1): 84-96.
- [55] Yang H S, Yuan Y G, Zhang Q, Tang J J, Liu Y, Chen X. Changes in soil organic carbon, total nitrogen, and abundance of arbuscular mycorrhizal fungi along a large-scale aridity gradient. *Catena*, 2011, 87(1): 70-77.
- [56] Zhang L B, Cao H F, Gao J X, Shu J M. Effect of plant changes induced by elevated atmospheric CO₂ on soil Biota. *Chinese Journal of Ecology*, 1998, 17(4): 33-38.
- [57] Wang X F, Bai K Z, Kuang T Y. Responses of plant dark respiration to doubled CO₂ concentration. *Acta Botanica Sinica*, 1997, 9(9): 849-854.
- [58] Deforest J L, Zak D R, Pregitzer K S, Burton A J. Atmospheric nitrate deposition and the microbial degradation of cellobiose and vanillin in a northern hardwood forest. *Soil Biology and Biochemistry*, 2004, 36(6): 965-971.
- [59] Deforest J L, Zak D R, Pregitzer K S, Burton A J. Atmospheric nitrate deposition, microbial community composition, and enzyme activity in Northern Hardwood forests. *Soil Science Society America*, 2004, 68(1): 132-138.

参考文献:

- [13] 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.
- [14] 陈佐忠, 汪诗平. 中国典型草原生态系统. 北京: 科学出版社, 2000.
- [21] 中国科学院中国植被图编辑委员会. 中国植被图集. 北京: 科学出版社, 2001.
- [22] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析. 上海: 上海科学技术出版社, 1978: 142-512.
- [26] 陈庆美, 王绍强, 于贵瑞. 内蒙古自治区土壤有机碳、氮蓄积量的空间特征. *应用生态学报*, 2003, 14(5): 699-704.
- [27] 何志斌, 赵文智, 刘鹤, 苏永中. 祁连山青海云杉林斑表层土壤有机碳特征及其影响因素. *生态学报*, 2006, 26(8): 2572-2577.
- [28] 武小钢, 郭晋平, 杨秀云, 田旭平. 芦芽山典型植被土壤有机碳剖面分布特征及碳储量. *生态学报*, 2011, 31(11): 3009-3019.
- [29] 耿增超, 姜林, 李珊珊, 余雕, 侯磊. 祁连山中段土壤有机碳和氮素的剖面分布. *应用生态学报*, 2011, 22(3): 665-672.
- [40] 傅华, 陈亚明, 王彦荣, 万长贵. 阿拉善主要草地类型土壤有机碳特征及其影响因素. *生态学报*, 2004, 24(3): 469-470.
- [42] 陈全胜, 李凌浩, 韩兴国, 阎志丹. 水分对土壤呼吸的影响及机理. *生态学报*, 2003, 23(5): 972-978.
- [44] 李顺姬, 邱莉萍, 张兴昌. 黄土高原土壤有机碳矿化及其与土壤理化性质的关系. *生态学报*, 2010, 30(5): 1217-1226.
- [49] 张鹏, 张涛, 陈年来. 祁连山北麓山体垂直带土壤碳氮分布特征及影响因素. *应用生态学报*, 2009, 20(3): 518-524.
- [56] 张林波, 曹洪法, 高吉喜, 舒俭民. 大气CO₂浓度升高对土壤微生物的影响. *生态学杂志*, 1998, 17(4): 33-38.
- [57] 汪杏芬, 白克智, 匡廷云. 大气CO₂浓度倍增对植物暗呼吸的影响. *植物学报*, 1997, 9(9): 849-854.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 33, No. 9 May, 2013 (Semimonthly)

CONTENTS

Frontiers and Comprehensive Review

- Analysis of subject trends in research on sustainable development CHA Na, WU Jianguo, YU Runbing (2637)
Metabolic scaling theory and its application in microbial ecology HE Jizheng, CAO Peng, ZHENG Yuanming (2645)
Research progress on endophyte-promoted plant nitrogen assimilation and metabolism YANG Bo, CHEN Yan, LI Xia, et al (2656)

Review on the development of landscape architecture ecology in China YU Yijing, MA Jinyi, YUAN Yunjue (2665)

Autecology & Fundamentals

- Evaluating tillage practices impacts on soil organic carbon based on least limiting water range CHEN Xuewen, WANG Nong, SHI Xiuhuan, et al (2676)
Controls over soil organic carbon content in grasslands TAO Zhen, CI Dan Langjie, ZHANG Shenghua, et al (2684)
Antagonistic interactive effects of exogenous calcium ions and parasitic *Cuscuta australis* on the morphology and structure of *Alternanthera philoxeroides* stems CHE Xiuxia, CHEN Huijing, YAN Qiaodi, et al (2695)
Correlation between pigment content and reflectance spectrum of *Phyllostachys pubescens* stems during its rapid growth stage LIU Lin, WANG Yukui, WANG Xingxing, et al (2703)
Response of leaf functional traits and the relationships among them to altitude of *Salix dissa* in Balang Mountain FENG Qiuhong, CHENG Ruimei, SHI Zuomin, et al (2712)
Effects of phosphate and organic matter applications on arsenic uptake by and translocation in *Isatis indigotica* GAO Ningda, GENG Liping, ZHAO Quanli, et al (2719)
Effect of different preys on the predation and prey preference of *Orius similis* ZHANG Changrong, ZHI Junrui, MO Lifeng (2728)
Effects of predation risk on the patterns of functional responses in reed vole foraging TAO Shuanglun, YANG Xifu, YAO Xiaoyan, et al (2734)
Phylogenetic analysis of Veneridae (Mollusca: Bivalvia) based on the mitochondrial cytochrome c oxidase subunit I gene fragment CHENG Hanliang, PENG Yongxing, DONG Zhiguo, et al (2744)
Effects of different ecological environments in the laboratory on the covering behavior of the sea urchin *Glyptocidaris crenularis* CHANG Yaqing, LI Yunxia, LUO Shibin, et al (2754)

Population, Community and Ecosystem

- The ecosystem services value change in the upper reaches of Ganjiang River Based on RS and GIS CHEN Meiqiu, ZHAO Baoping, LUO Zhijun, et al (2761)
The reference condition for Eutrophication Indicator in the Yangtze River Estuary and adjacent waters — response variables ZHENG Binghui, ZHU Yanzhong, LIU Lusan, et al (2768)
The reference condition for eutrophication Indicator in the Yangtze River Estuary and adjacent waters — Causal Variables ZHENG Binghui, ZHOU Juan, LIU Lusan, et al (2780)
The stress response of biological communities in China's Yalu River Estuary and neighboring waters SONG Lun, WANG Nianbin, YANG Guojun, et al (2790)
Ecological characteristics of macrobenthic communities and its relationships with environmental factors in Hangzhou Xixi Wetland LU Qiang, CHEN Huili, SHAO Xiaoyang, et al (2803)
Effects of biological soil crusts on desert soil nematode communities LIU Yanmei, LI Xinrong, ZHAO Xin, et al (2816)
Associations between weather factors and the spring migration of the horned gall aphid, *Schlechtendalia chinensis* LI Yang, YANG Zixiang, CHEN Xiaoming, et al (2825)
Effects of vegetation on soil aggregate stability and organic carbon sequestration in the Ningxia Loess Hilly Region of northwest China CHENG Man, ZHU Qulian, LIU Lei, et al (2835)

Simulation of the carbon cycle of <i>Larix chinensis</i> forest during 1958 and 2008 at Taibai Mountain, China	LI Liang, HE Xiaojun, HU Lile, et al (2845)
Effects of different disturbances on diversity and biomass of communities in the typical steppe of loess region	CHEN Furong, CHENG Jimin, LIU Wei, et al (2856)
Age structure and point pattern of <i>Butula platyphylla</i> in Wulashan Natural Reserve of Inner Mongolia	HU Ercha, WANG Xiaojiang, ZHANG Wenjun, et al (2867)
The impacts of the Southwest China drought on the litterfall and leaf area index of an evergreen broadleaf forest on Ailao Mountain	QI Jinhua, ZHANG Yongjiang, ZHANG Yiping, et al (2877)
Spatial distribution of tree species richness in Xiaodonggou forest region of the Altai Mountains, Northwest China	JING Xuehui, CAO Lei, ZANG Runguo (2886)
Landscape, Regional and Global Ecology	
The ecological risk assessment of Taihu Lake watershed	XU Yan, GAO Junfeng, GUO Jianke (2896)
The value of fixing carbon and releasing oxygen in the Guanzhong-Tianshui economic region using GIS	ZHOU Zixiang, LI Jing, FENG Xueming (2907)
Resource and Industrial Ecology	
Effect of different controlled-release nitrogen fertilizers on availability of heavy metals in contaminated red soils under waterlogged conditions	LIANG Peijun, XU Chao, WU Qitang, et al (2919)
Research Notes	
Effect of heat and high irradiation stress on Deg1 protease and D1 protein in wheat chloroplasts and the regulating role of salicylic acid	ZHENG Jingjing, ZHAO Huijie, HU Weiwei, et al (2930)
The difference of drought impacts on winter wheat leaf area index under different CO ₂ concentration	LI Xiaohan, WU Jianjun, LÜ Aifeng, et al (2936)

《生态学报》2013 年征订启事

《生态学报》是由中国科学技术协会主管,中国生态学学会、中国科学院生态环境研究中心主办的生态学高级专业学术期刊,创刊于1981年,报道生态学领域前沿理论和原始创新性研究成果。坚持“百花齐放,百家争鸣”的方针,依靠和团结广大生态学科研工作者,探索自然奥秘,为生态学基础理论研究搭建交流平台,促进生态学研究深入发展,为我国培养和造就生态学科研人才和知识创新服务、为国民经济建设和发展服务。

《生态学报》主要报道生态学及各分支学科的重要基础理论和应用研究的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;新书评价和学术、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,300页,国内定价90元/册,全年定价2160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

本期责任编辑 欧阳志云

编辑部主任 孔红梅

执行编辑 刘天星 段 靖

生态学报

(SHENTAI XUEBAO)

(半月刊 1981年3月创刊)

第33卷 第9期 (2013年5月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 33 No. 9 (May, 2013)

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

主 编 王如松
主 管 中国科学技术协会
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

出 版 科 学 出 版 社
地址:北京东黄城根北街16号
邮政编码:100717

印 刷 北京北林印刷厂
行 书 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

订 购 全国各地邮局
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

广 告 经 营 京海工商广字第8013号
许 可 证

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

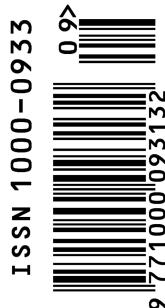
Editor-in-chief WANG Rusong
Supervised by China Association for Science and Technology
Sponsored by Ecological Society of China
Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS
Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China

Published by Science Press
Add:16 Donghuangchenggen North Street,
Beijing 100717, China

Printed by Beijing Bei Lin Printing House,
Beijing 100083, China

Distributed by Science Press
Add:16 Donghuangchenggen North
Street, Beijing 100717, China
Tel:(010)64034563
E-mail:journal@cspg.net

Domestic All Local Post Offices in China
Foreign China International Book Trading
Corporation
Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China



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 90.00 元