

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

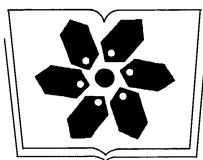
Acta Ecologica Sinica



第31卷 第18期 Vol.31 No.18 **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 18 期 2011 年 9 月 (半月刊)

目 次

高寒矮嵩草草甸冬季 CO ₂ 释放特征	吴 琴, 胡启武, 曹广民, 等 (5107)
开垦对绿洲农田碳氮累积及其与作物产量关系的影响	黄彩变, 曾凡江, 雷加强, 等 (5113)
施氮对几种草地植物生物量及其分配的影响	祁 瑜, 黄永梅, 王 艳, 等 (5121)
浙江天台山甜槠种群遗传结构的时空自相关分析	祁彩虹, 金则新, 李钧敏 (5130)
大兴安岭林区不同植被对冻土地温的影响	常晓丽, 金会军, 于少鹏, 等 (5138)
樟子松树轮不同组分的稳定碳同位素分析	商志远, 王 建, 崔明星, 等 (5148)
内蒙古不同类型草地叶面积指数遥感估算	柳艺博, 居为民, 朱高龙, 等 (5159)
杭州西湖北里湖荷叶枯落物分解及其对水环境的影响	史 绮, 焦 锋, 陈 莹, 等 (5171)
火干扰对小兴安岭落叶松-苔草沼泽温室气体排放的影响	于丽丽, 牟长城, 顾 韩, 等 (5180)
黄河中游连伯滩湿地景观格局变化	郭东罡, 上官铁梁, 白中科, 等 (5192)
黄土区次生植被恢复对土壤有机碳官能团的影响	李 婷, 赵世伟, 张 扬, 等 (5199)
我国东北土壤有机碳、无机碳含量与土壤理化性质的相关性	祖元刚, 李 冉, 王文杰, 等 (5207)
黄土旱塬裸地土壤呼吸特征及其影响因子	高会议, 郭胜利, 刘文兆 (5217)
宁南山区典型植物根际与非根际土壤微生物功能多样性	安韶山, 李国辉, 陈利顶 (5225)
岩溶山区和石漠化区表土孢粉组合的差异性——以重庆市南川区为例	郝秀东, 欧阳绪红, 谢世友 (5235)
夏蜡梅及其主要伴生种叶的灰分含量和热值	金则新, 李钧敏, 马金娥 (5246)
苏柳 172 和垂柳对 Cu ²⁺ 的吸收特性及有机酸影响	陈彩虹, 刘治昆, 陈光才, 等 (5255)
导入 <i>TaNHX2</i> 基因提高了转基因普那菊苣的耐盐性	张丽君, 程林梅, 杜建中, 等 (5264)
空气湿度与土壤水分胁迫对紫花苜蓿叶表皮蜡质特性的影响	郭彦军, 倪 郁, 郭芸江, 等 (5273)
黄土高原旱塬区土壤贮水量对冬小麦产量的影响	邓振镛, 张 强, 王 强, 等 (5281)
咸阳地区近年苹果林地土壤含水量动态变化	赵景波, 周 旗, 陈宝群, 等 (5291)
苗药大果木姜子挥发油成分变化及其地理分布	张小波, 周 涛, 郭兰萍, 等 (5299)
环境因子对小球藻生长的影响及高产油培养条件的优化	丁彦聪, 高 群, 刘家尧, 等 (5307)
不同基质对北草蜥和中国石龙子运动表现的影响	林植华, 樊晓丽, 雷焕宗, 等 (5316)
安徽沿江浅水湖泊越冬水鸟群落的集团结构	陈锦云, 周立志 (5323)
黑胸散白蚁肠道共生锐滴虫目鞭毛虫的多样性分析与原位杂交鉴定	陈 文, 石 玉, 彭建新, 等 (5332)
基于熵权的珠江三角洲自然保护区综合评价	张林英, 徐颂军 (5341)
专论与综述	
中小尺度生态用地规划方法	荣冰凌, 李 栋, 谢映霞 (5351)
土地利用变化对土壤有机碳的影响研究进展	陈 朝, 吕昌河, 范 兰, 等 (5358)
海洋浮游植物与生物碳汇	孙 军 (5372)
多年冻土退化对湿地甲烷排放的影响研究进展	孙晓新, 宋长春, 王宪伟, 等 (5379)
生源要素有效性及生物因子对湿地土壤碳矿化的影响	张林海, 曾从盛, 仝 川 (5387)
生态网络分析方法研究综述	李中才, 徐俊艳, 吴昌友, 等 (5396)
研究简报	
不同群落中米氏冰草和羊草的年龄结构动态	金晓明, 艾 琳, 刘及东, 等 (5406)
主题分辨率对 NDVI 空间格局的影响	黄彩霞, 李小梅, 沙晋明 (5414)

期刊基本参数: CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 314 * zh * P * ¥ 70.00 * 1510 * 35 * 2011-09



封面图说: 在树上嬉戏的大熊猫——大熊猫是中国的国宝, 自然分布狭窄, 数量极少, 世界上仅分布在中国的四川、陕西、甘肃三省的部分地区, 属第四纪冰川孑遗物种, 异常珍贵。被列为中国国家一级重点保护野生动物名录, 濒危野生动植物种国际贸易公约绝对保护的 CITES 附录一物种名录。瞧, 够得上“功夫熊猫”吧。

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

李婷,赵世伟,张杨,马帅,李晓晓. 黄土区次生植被恢复对土壤有机碳官能团的影响. 生态学报, 2011, 31 (18): 5199-5206.

Li T, Zhao S W, Zhang Y, Ma S, Li X X. Effect of revegetation on functional groups of soil organic carbon on the Loess Plateau. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31 (18): 5199-5206.

黄土区次生植被恢复对土壤有机碳官能团的影响

李 婷^{1,2,4}, 赵世伟^{1,2,*}, 张 杨³, 马 帅^{1,2,4}, 李晓晓^{1,2,4}

(1. 中国科学院水利部水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 杨凌 712100;

2. 西北农林科技大学水土保持研究所, 杨凌 712100;

3. 陕西省地产开发服务总公司, 西安 710075; 4. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要:以植被空间排列顺序推断时间演替顺序,采用同步辐射软 X 射线探讨子午岭林区典型植物样地白羊草 (*Bothriochlor ischaemum*) 狼牙刺 (*Sophora viciifolia*) 辽东栎群落 (*Quercus liaotungensis*) 演替过程中土壤有机碳官能团变化。图谱定性分析显示,恢复过程中各植被条件下 0—5 cm 和 20—40 cm 土层土壤脂肪-C、酮-C 吸收强度明显增加;0—5 cm 土层土壤脂肪-C 吸收较 20—40 cm 强,而土壤酮-C 吸收较 20—40 cm 弱。半定量分析结果显示,随植被演替进程,0—5 cm 土层土壤各官能团相对百分含量都有所增加,如芳香-C、脂肪-C、酮-C 呈现逐渐增加趋势,至辽东栎群落时,20—40 cm 土层土壤脂肪-C 相对百分含量明显增加。植被恢复过程中,各样地 SOC 官能团组成基本一致,但植被恢复影响土壤 SOC 官能团数量变化;植被恢复能促进 0—5 cm 和 20—40 cm 土层土壤脂肪-C、酮-C 含量增加,并且这种作用随着植被恢复时间的延长逐渐增强,说明植被演替增强了土壤有机碳化学稳定性。

关键词:土壤有机碳; 官能团; 植被恢复; 同步辐射软 X 射线

Effect of revegetation on functional groups of soil organic carbon on the Loess Plateau

LI Ting^{1,2,4}, ZHAO Shiwei^{1,2,*}, ZHANG Yang³, MA Shuai^{1,2,4}, LI Xiaoxiao^{1,2,4}

1 State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, China

2 Institute of Soil and Water Conservation, Northwest Sci-tech University of Agriculture and Forestry, Yangling 712100, China

3 Shaanxi Company Of Real Estate Service, Xi'an 710075, China

4 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: Vegetation succession affects soil physical and chemical properties, including organic carbon functional group species, quantities, and structural changes. Changes in soil organic carbon (SOC) functional groups during the vegetation restoration process could reveal the processes governing changes in the composition and properties of humus. The study was on the Loess Plateau in the Ziwuling forest region of Shaanxi Province, where various stages of secondary forests have developed. At different phases of development, vegetation systems in this region have changed from pioneer herbage species, which initially colonized abandoned croplands, (*Bothriochloa ischaemum*, *Artemisia girardii*, *Stipa bungeana*, *Artemisia sacrorum*, *Spodiopogon sibiricus*, *Sophora flavescens*, *Themeda japonica*, and *Arundinella anomala*), to secondary shrubs (*Hippophae rhamnoides*, *Sophora viciifolia*, and *Ostryopsis davidiana*), to an early forest community (*Populus davidiana*, *Betula platyphylla*, and *Platycladus orientalis* with groups of trees and/or shrubs), and finally to a *Liaotungensis*

基金项目:黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室自主研究项目(10502-Z11);中国科学院“西部之光”人才计划“黄土高原植被恢复对土壤团聚体稳定性和有机碳官能团的影响”;国家支撑计划重大项目课题(2006BAC01A07)

收稿日期:2011-04-02; 修订日期:2011-07-04

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: swzhao@ms.iswc.ac.cn

community forming the mature forest. The SOC content in the 0—40 cm soil layer increases significantly during the vegetation succession from abandoned cropland to mature *Liaotungensis* forest. The rate of increase in SOC is different during vegetation succession, and organic carbon functional groups varied among the different plant communities. Recent studies using synchrotron-based C(1s) near-edge X-ray absorption fine structure (NEXAFS) have shown it to be an effective, non-invasive technique, which can be used to identify and fingerprint the complex structural characteristics of SOC. Consequently it can be used to investigate the impact of management on the composition and biogeochemical cycling of organic C at the molecular level in terrestrial ecosystems. This synchrotron radiation technology has rarely been used to study SOC structure in China before so we used it in this study with the objective of developing a new method to explore the effect of the succession process under typical plant species (*Bothriochlor ischaemum*, *Sophora viciifolia*, *Quercus liaotungensis*) on changes in SOC functional groups. The time succession sequence could be inferred from current vegetation spatial arrangements. Therefore, we collected samples from two soil layers (0—5 cm, 20—40 cm) in soil profiles under selected vegetation systems typically representing different vegetation succession stages in the region. Results obtained, which were qualitatively analyzed, indicated that aliphatic-C and ketone-C absorption intensities in samples from the 0—5 cm and 20—40 cm soil layers increased significantly during the vegetation process; the peak intensity of aliphatic-C of the 0—5 cm layer was greater than in the 20—40 cm layer; the ketone-C absorption intensity of samples from the 0—5 cm soil layer was less than in the 20—40 cm layer. Results of a semi-quantitative analysis showed that the functional groups' relative percentage content in the 0—5 cm soil layers increased during the plant succession process, and the aliphatic-C aromatic-C, and ketone-C contents followed a gradually increasing trend. For the *Quercus liaotungensis* community, the aliphatic-C relative percentage content increased significantly in the 20—40 cm soil layer. The results show that the SOC functional groups from different land use-type samples were basically identical, and that the revegetation affected the change in the quantity of SOC functional groups during the revegetation process. Revegetation can promote increases in aliphatic-C and ketone-C contents in both the 0—5 cm and 20—40 cm soil layers, and this effect gradually increased with prolonged revegetation time. This illustrated that the vegetation succession enhanced SOC chemical stability.

Key Words: soil organic carbon (SOC); functional groups; revegetation; soft X-ray Synchrotron radiation

黄土高原总面积 64 万 km², 植被覆盖度低, 水土流失严重, 是我国主要生态脆弱区之一。植被恢复是黄土高原生态环境建设的根本途径。自建国以来, 黄土高原地区的人工造林面积累积超过其总面积的 1 倍, 目前该区森林覆盖率(包括疏林和灌木在内)仅为 12.2%^[1]。近年来, 研究者对黄土高原地区植被恢复对土壤理化性状、肥力以及抗侵蚀能力等问题进行了研究。研究表明, 植被恢复过程中土壤侵蚀得到控制, 有机质含量提高, 土壤发育程度增强^[2]。土壤有机质积累和转化是不同植物种竞争替代和植物群落演替的重要推动力^[3]。植被演替影响有机碳官能团种类、数量、结构变化, SOC 官能团变化在某种程度上可揭示植被恢复过程中腐殖质组成与性质变化规律。

子午岭林区地跨陕西、甘肃两省, 处于黄土高原的腹地, 是黄土高原现存比较完整的天然次生林区。子午岭林区农田生态系统转换为林、草生态系统, 有利于土壤有机碳的积累, 且各生态系统中, 表层(0—10 cm)土壤总有机碳含量显著高于深层土壤(40—70 cm)^[4]。子午岭林区植被由草本向木本(尤其是辽东栎)方向演替过程中, 其植物残体腐解特征表明木本(辽东栎和沙棘)残体在土壤中残留率比较高, 可以保持较高的有机物质含量, 使土壤的理化性状保持较好的状态^[5]。关于黄土区土壤 SOC 结构化学特性研究, 近年来, 对子午岭人工与天然油松林土壤腐殖质组成、形态及胡敏酸光学特征进行研究^[6-7]。尽管对子午岭林区土壤物理固碳机制有较多研究^[8-12], 但目前鲜见针对本区植被恢复过程中土壤有机碳官能团特征的变化研究报道。

研究土壤有机碳结构的传统方法包括水解、氧化降解、还原降解和生物化学降解等化学方法, 使用传统方法研究土壤有机碳会使土壤有机碳发生某些反应(如脱羧过程, 脱氨基作用), 导致有机碳化学结构和性状的

改变,不能真实反映土壤有机碳结构特性的变化^[13-14]。相比之下,现代光谱技术同步辐射软 X 射线测定技术可无损、快速测定土壤有机碳结构组成特征。自 20 世纪 80 年代同步辐射光源发展以来,近边软 X 射线吸收精细结构(NEXAFS)光谱已经成为研究土壤的最好工具^[15-16],国外应用同步辐射光源研究 SOC 分布、形态、元素组成和与土壤微团聚体联结关系及人为耕作对 SOC 结构影响都取得较大成果^[17-20],而国内应用同步辐射光源研究土壤腐殖质结构较少。

在利用植被空间排列顺序推断时间演替顺序方法的基础上,本研究选取子午岭林区植被恢复过程中典型样点(白羊草、狼牙刺、辽东栎),应用同步辐射近边软 X 射线吸收(XANES)(X-ray Absorption Near Edge Structure)方法研究子午岭林区植被恢复过程中土壤有机碳官能团的变化规律,有助于了解植被演替过程中 SOC 的化学稳定机制。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区为子午岭北部甘肃合水县连家岭林场,位于北纬 35°03′—36°37′,东经 108°10′—109°08′,属黄土高原丘陵沟壑区。海拔约 1500 m,相对高差 200 m 左右,为半干旱季风气候,年均气温 7.4 ℃,年均降雨量 587.6 mm,≥10 ℃积温 2671.0 ℃,干燥度 0.97,阴阳坡水热条件变化较大但无气候的垂直带状变化,土壤以石灰性褐土为主,属暖温带北部落叶栎林亚地带^[21]。

1.2 样地的选择

在黄土高原子午岭林区选取不同植被演替阶段的代表性植被群落样地,作为时间序列下植被恢复演替的过程进行试验研究。邹厚远等^[21]在采取植被空间排列顺序推断时间演替顺序的基础上,通过对子午岭北部现存植被与过去资料的对比、对弃耕地弃耕时间的追访以及对该区森林资源动态变化的了解等途径,研究了近 50 a 该区植被演替规律,指出该区目前还保存有空间上完整的植被正向演替系列,主要演替阶段齐全,并得出了详尽的植被演替关系,弃耕地先锋群落——草本群落(白羊草 *Bothriochlor ischaemum*、菱蒿 *Artemisia giradii*+长茅草 *Stipa bungeana*、铁杆蒿 *Artemisia vestita*、大油芒 *Spodiopogon sibiricus*+苦参 *Sophora flavescens*、黄营草 *Themeda japonica* 或野古草 *Arundinella anomala*);灌丛群落(沙棘 *Hippophae rhamnoides*、狼牙刺 *Sophora viciifolia*、虎棒子 *Ostryopsis davidiana*);早期森林群落(乔灌群聚、山杨 *Populus davidiana*、白桦 *Betula platyphlla*、侧柏 *Platycladus orientalis*);辽东栎群落(*Quercus liaotungensis*)。在演替序列中选择植物群落的典型样地,草本群落白羊草、灌丛群落狼牙刺、辽东栎群落辽东栎 3 种植被下的土壤为研究对象,以农地为对照。草本群落的典型样地(10 m × 10 m)分别设 3 个 1 m × 1 m 样方,在灌丛群落样地(50 m × 50 m)分别设 3 个 5 m × 5 m 样方,在辽东栎阶段的各个样地(100 m × 100 m)分别设 3 个 10 m × 10 m 样方,在每个样地对角线选择 3 个植被盖度较为一致的样方进行地上植被调查和土壤样品的采集。表层 0—5 cm 及浅层土壤中的 0—40 cm 相邻土层间 SOC 含量差异显著,而深层 SOC 含量较稳定^[22-23],因此以上各样点均采集 0—5 cm、20—40 cm、40—70 cm 土层土壤,将同一植被条件下 3 个样方的同一土层土壤混匀,带回室内风干。土样用高频共振机(北京开源多邦有限公司)研磨至约 20 μm 粉末待测。具体样地条件如表 1 所示。

表 1 子午岭样地基本情况

Table 1 The basic situation of site in Ziwuling mountain

样地 Site	坐标 Longitude Latitude	海拔 Altitude/m	坡向 Slope aspect	坡度 Gradient	植被 Plant
农地	108°28′5.4″E 36°4′26.9″N	1482	西 偏 南 10°	13°	马铃薯
白羊草	108°31′50.7″E 36°4′56″N	1323	南 偏 西 5°	21°	白羊草 80%、柴胡 5%、菱蒿 3.5% 等
狼牙刺	108°31′53.7″E 36°5′1.6″N	1347	正西坡	25°	狼牙刺 70%、丁香 10%、大针茅 4.6% 等
辽东栎	108°31′29.3″E 36°2′59.7″N	1442	东 偏 北 45°	17°	辽东栎 75%、虎棒子 7.6%、披针苔草 4.3% 等

1.3 测定与分析

实验仪器:中国科学院高能物理所同步辐射实验室软 X 实验站(4B7B),扫描能量范围为 280—310 eV,扫描步长为 0.1 eV。样品处光源参数:能量范围为 50—1700 eV,能量分辨率($E/\Delta E$)R-1000。

软 X 射线测定:将土样装入装样板,上机待测。软 X 射线图谱采用 Athena 进行数据规一化,应用 Originpro7.5 选基线(吸收峰谷底的连线)并半定量对吸收峰面积进行统计分析^[17],对吸收峰分峰积分并用高斯函数积分求各 SOC 官能团的相对百分含量(%)。参照 Dawit S^[17],Johannes L^[18]和 Jiamin W^[20]在近边软 X 射线测试土壤图谱解析,对本实验土壤测定图谱吸收峰属性进行指认。

2 结果与分析

2.1 软 X 射线测定图谱特征

图 1 和图 2 表明,土壤有机碳的主要吸收峰在 284—310 eV 范围内,主要吸收峰在 285.2 eV,287.2 eV,288.8 eV,290.5 eV,297.4 eV,300.4 eV。在 285.2 eV 处,代表 C1s- π^* 质子化的芳香-C,有较强吸收峰;287.2 eV 代表 1 s-3 p/ σ^* 脂肪-C,有较弱吸收峰或肩吸收峰;288.8 eV 代表 1S- π^* 羧基-C,有强吸收峰;290.5 eV 代表碳酸盐与含羰基的有机碳比例,根据 0—60 cm 土层内部土壤碳酸盐含量呈正态分布,且各土层土壤碳酸盐含量均值差异不显著^[24],本实验假定土壤 0—40 cm 土层碳酸盐含量基本一致,那么 290.5 eV 吸收强度变化就主要受含羰基的有机碳变化影响;297.4 eV,300.4 eV 表示土壤钾 L_{III},L_{II} 吸收峰。本实验土壤吸收图谱与 Jiamin Wan 等^[20]用近边软 X 射线测定土壤图谱图形一致。

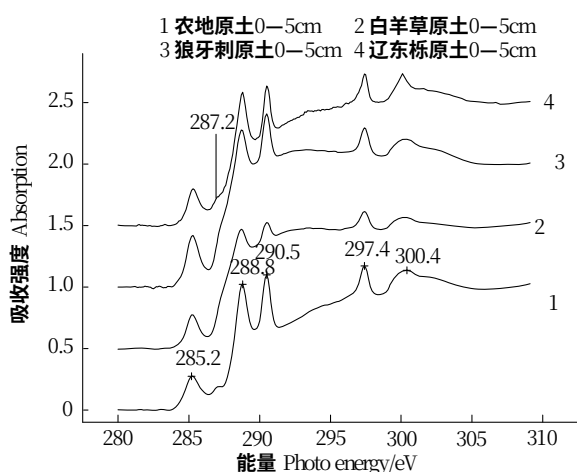


图 1 不同植被条件下 0—5 cm 土层土壤有机碳官能团软 X 射线吸收谱

Fig. 1 Carbon K-edge spectra of various soil samples from 0—5 cm soil horizon in different vegetation

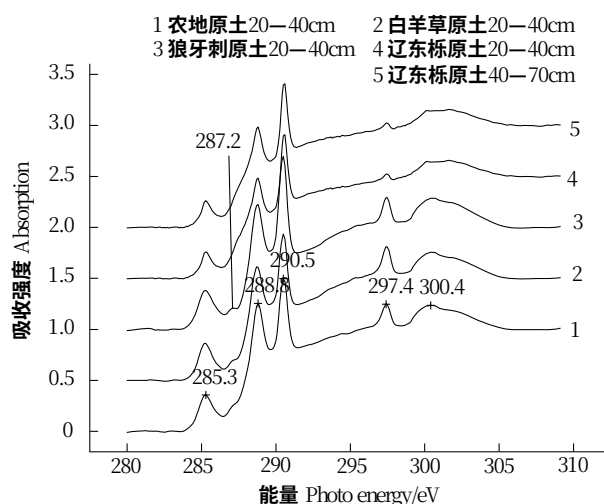


图 2 不同植被条件下 20—40 cm 土层土壤有机碳官能团软 X 射线吸收谱

Fig. 2 Carbon K-edge spectra of various soil samples from 20—40 cm soil horizon in different vegetation

2.2 XANES 吸收图谱特征定性分析

0—5 cm 土层各植被条件下土壤 XANES 吸收图谱中(图 1),各土壤样品的 SOC 官能团吸收图谱形状特征大体一致,羧基-C 吸收最强,其次为酮-C,芳香-C,脂肪-C。图中狼牙刺、辽东栎土壤羧基-C 吸收较农地强,因脂肪-C 与羧基-C 叠加,所以需在半定量分析中进一步讨论羧基-C 变化。酮-C 吸收峰被羧基-C 吸收峰抬高,在农地、狼牙刺、辽东栎土壤中酮-C 吸收峰较强,白羊草土壤酮-C 吸收较弱,农地酮-C 吸收最强。各土样土壤芳香-C 吸收较强,且吸收强度差异不明显,狼牙刺土壤芳香-C 吸收较农地、白羊草有所增强。白羊草、狼牙刺、辽东栎土壤中脂肪-C 为较弱肩吸收峰,农地脂肪-C 吸收为弱单独吸收峰,且白羊草、狼牙刺、辽东栎土壤脂肪-C 吸收比农地强,说明在恢复过程中土壤脂肪-C 含量有不同程度增加。

如图 2,20—40 cm 土层土壤吸收图谱特征与 0—5 cm 土层土壤吸收图谱特征基本一致。羧基-C 吸收最

强,其次为酮-C、芳香-C、脂肪-C。在植被恢复过程中,各土壤芳香-C 吸收强度变化不明显,辽东栎土壤芳香-C 吸收较白羊草、狼牙刺有所减弱。农地、白羊草、狼牙刺土壤脂肪-C 有弱肩吸收峰,辽东栎土壤较强肩吸收峰。受辽东栎土壤脂肪-C 较强肩吸收峰影响,辽东栎土壤脂肪-C、羧基-C 叠加峰较农地、白羊草、狼牙刺宽且上升较缓。各土壤有强酮-C 吸收峰,狼牙刺土壤酮-C 吸收峰强度较农地、白羊草有着明显增加。

0—5 cm 和 20—40 cm 两个土层土壤吸收图谱特征对比,芳香-C、羧基-C 吸收峰强度相差不大,20—40 cm 土层土壤脂肪-C 吸收明显比 0—5 cm 土层弱,酮-C 吸收峰明显比 0—5 cm 强。表明 0—5 cm,20—40 cm 土层土壤芳香-C、羧基-C 含量变化不明显,而 0—5 cm 土层土壤脂肪-C 含量高,20—40 cm 土层土壤酮-C 含量高。0—5 cm 土层土壤脂肪-C 含量高可能是表层植物残体分解或根系作用导致 0—5 cm 土层土壤输入更多脂肪-C,另外活性较差的酮-C 在成土过程中,通过其它活性相对较强官能团(醇、羧基-C)转化而不断积累,所以受外界影响较小的 20—40 cm 土层土壤积累较多。辽东栎 20—40 cm,40—70 cm 土层土壤 K 吸收峰强度较农地、白羊草、狼牙刺土壤弱,且比辽东栎 0—5 cm 土层土壤 K 吸收弱,说明随着土层加深,辽东栎土壤 K 含量减少。

在白羊草、狼牙刺、辽东栎 0—5 cm 土层土壤总有机碳含量比农地有着明显增加情况下,定性分析图谱显示,主要变化是脂肪-C 和酮-C 的吸收强度,而芳香-C 和羧基-C 吸收强度变化不明显。白羊草、狼牙刺、辽东栎 0—5 cm 土层土壤脂肪-C 吸收明显比农地强,土壤酮-C 吸收峰比农地弱,但在这个恢复序列中,土壤总有机碳含量增加不明显情况下,0—5 cm 土层土壤酮-C 吸收峰强度明显增加,且有逐渐增加趋势。在恢复过程中,辽东栎 20—40 cm 土层土壤脂肪-C 吸收明显比其它图谱强。随植被演替,因草本植物残落物有机碳矿化率平均值(33.14%)>灌木(27.80%)>乔木(23.23%)^[25],土壤中脂肪-C 和酮-C 含量出现逐渐增加趋势,可能受植物残体矿化速率及植物残体不同碳氮比的影响。

土壤酮-C、脂肪-C 吸收强度的显著变化说明植被演替改变 SOC 各官能团含量,即改变 SOC 官能团组成结构,且主要影响 0—5 cm 土层 SOC。当恢复至辽东栎序列时,可能受其根系较深及残体矿化作用的影响,辽东栎群落对 20—40 cm 土层土壤 SOC 结构也有显著影响。

2.3 软 X 射线测定图谱特征半定量分析

半定量分析显示(表 2),农地 0—5 cm 土层 SOM 官能团中羧基-C(41.47%)相对百分含量最多,其次为酮-C(23.17%),芳香-C(19.28%),脂肪-C(16.08%);20—40 cm 土层土壤各官能团相对百分含量由大至小顺序与 0—5 cm 一致,且 20—40 cm 土层土壤中活性较强的羧基-C、脂肪-C 百分含量比 0—5 cm 低,稳定性较强的芳香-C、酮-C 较 0—5 cm 土层高。农地与白羊草、狼牙刺 20—40 cm 土层土壤各官能团相对百分含量由大到小顺序都是羧基-C、酮-C、芳香-C、脂肪-C;白羊草和狼牙刺 0—5 cm 土层土壤各官能团由大至小顺序

表 2 土壤 SOC 各官能团相对百分含量

Table 2 Organic carbon functional groups relative content change

土样 Samples	土层 Soil layer/cm	官能团 Functional groups				总有机碳/(g/kg) Total organic carbon
		芳香-C/% Aromatic-C	脂肪-C/% Aliphatic-C	羧基-C/% Carboxylic-C	酮-C/% Ketone-C	
农地原土	0—5	19.28	16.08	41.47	23.17	11.21
白羊草原土	0—5	22.88	20.08	46.65	10.39	25.13
狼牙刺原土	0—5	24.54	22.87	36.72	15.87	17.57
辽东栎原土	0—5	19.03	20.52	41.96	18.50	26.14
农地原土	20—40	19.36	13.69	37.23	29.73	4.98
白羊草原土	20—40	24.11	6.81	39.46	29.62	3.86
狼牙刺原土	20—40	20.94	7.82	37.11	34.13	3.53
辽东栎原土	20—40	20.13	21.77	26.34	31.75	6.65
辽东栎原土	40—70	14.29	0.00	54.77	30.94	4.50

为羧基-C, 芳香-C, 脂肪-C 和酮-C。辽东栎 0—5 cm 土层土壤各官能团由大至小顺序为羧基-C, 脂肪-C, 芳香-C, 酮-C; 20—40 cm 土层土壤酮-C (31.75%) 相对含量最多, 而羧基-C (26.34%), 脂肪-C (21.77%) 与芳香-C (20.13%) 含量相当; 40—70 cm 土层土壤各官能团顺序为羧基-C (54.77%), 酮-C (30.94%), 芳香-C (14.29%), 脂肪-C 没有吸收峰。

半定量分析表明随着土层加深, 活性较强的脂肪-C 相对百分含量有所减少, 较稳定的酮-C、芳香-C 相对百分含量有所增加; 同时表明白羊草、狼牙刺 20—40 cm 土层各官能团与农地 SOC 各官能团数量结构组成相同, 即羧基-C 相对百分含量最高, 稳定性官能团相对百分含量较高。

本实验 SOC 羧基-C 相对百分含量最多, 这与 Dawit Solomon^[19] 研究土壤中羧基-C 相对百分含量最高一致, 且在恢复序列中, 0—5 cm 土层中土壤脂肪-C 相对百分含量逐渐增加, 芳香-C、酮-C 相对百分含量逐渐减少, 这与 Dawit Solomon^[17] 研究土壤开垦过程中, 土壤表层 SOC 芳香-C 相对百分含量增加相反, 但正好与预测恢复过程中, 脂肪-C 相对百分含量增加, 芳香-C 相对百分含量减少一致。因白羊草和狼牙刺根系对 20—40 cm 土层土壤影响较小, 输入有机碳较少, 因此其土壤各官能团相对百分含量顺序与农地一致, 而辽东栎根系较为明显影响 20—40 cm 土层土壤, 如表 2 中辽东栎 20—40 cm 土层有机碳含量增加, 因此到辽东栎时, 20—40 cm 土层土壤脂肪-C 相对百分含量明显增加, 说明 20—40 cm 土层土壤辽东栎群落 SOC 官能团组成发生明显改变, 这与定性分析结果一致。

与农地相比, 白羊草、狼牙刺、辽东栎 0—5 cm 土层土壤羧基-C, 芳香-C, 脂肪-C 相对百分含量都有所增加, 芳香-C、脂肪-C 呈现逐渐增加趋势; 酮-C 相对百分含量有所减少, 但在植被演替过程中土壤酮-C 相对百分含量有逐渐增加趋势, 这与定性分析结果一致。20—40 cm 土层土壤羧基-C、芳香-C、脂肪-C 相对百分含量比表层少, 且脂肪-C 相差最多的, 说明固碳过程中增加幅度最大的是脂肪-C, 植被演替对脂肪-C 影响最大。辽东栎 40—70 cm 没有脂肪-C 吸收峰, 可能是土层深度影响没有脂肪-C 输入。本文研究得出植被恢复过程中, SOC 含量增加条件下, 脂肪-C 增加较多, 说明在整个演替过程中, 脂肪-C 相对含量增加与 SOC 固定有相互作用。这与 Aleksander Jokic^[26] 利用核磁共振 NMR 分析湿地 SOC 结构主要由脂肪-C (如多糖, 长链聚乙烯) 组成研究结果一致, 且 Aleksander Jokic 提出脂肪-C 较多主要是因为聚乙烯结构能强吸附有机质分子。脂肪-C 与土壤矿物颗粒结合对 SOC 结构保护起到很重要作用^[27-28]。土壤中存在大量脂肪-C, 决定了表层 SOC 的稳定性^[26]。子午岭植被演替过程中, SOC 中脂肪-C 的增加对 SOM 的积累有重要作用, 且化学稳定性较强的酮-C、芳香-C 也明显增加, 因此植被演替促进 SOC 增加, 同时也增强了 SOC 化学稳定性。

3 结论

(1) 图谱定性分析表明植被恢复能促进 0—5 cm, 20—40 cm 土层土壤脂肪-C, 酮-C 含量增加, 并且这种作用随演替时间的延长和植被类型由坡耕地、弃耕地向草地、灌木、森林改变逐渐增强。土壤剖面 SOC 官能团变化研究表明表层土壤脂肪化程度高, 且随土层加深而减弱, 稳定性较强的酮-C 变化趋势与之相反。

(2) 半定量分析表明, 恢复过程中有机碳官能团种类数量发生变化; 0—5 cm 土层土壤 SOC 官能团变化更活跃, 测出的各种官能团中脂肪-C 变化最活跃, 增加最多, 可能官能团变化主要受根系作用。

本实验结果将为黄土高原植被恢复对土壤腐殖质结构变化影响及土壤 SOC 化学稳定机制提供依据。本文因涉及植物残体矿化及微生物活性等因素影响, 未对 SOC 各官能团形成与变化的生化过程进行探讨。

致谢: 感谢中国科学院高能物理所软 X 射线实验站赵屹东老师与实验站同学在实验与分析中给予的帮助。

References:

- [1] Wu Q X, Yang W Z. Vegetation Construction and Sustainable Development in the Loess Plateau. Beijing: Science Press, 1998: 16-35.
- [2] Zhu C Z. The main characteristics of the vegetation and its impact on the soil essence in the Loess Plateau of Northern Shanxi Province. Journal of Plant Ecology, 1993, 17(3): 280-286.
- [3] Han X G, Huang J H, Lou Z P. The significance and problems associated with the keystone species concept in biodiversity conservation. Chinese Bulletin of Botany, 1995, 12(2): 168-184.

- [4] Zhao S W, Lu L, Liu N N, Wu J S, Su J, Yang Y H. Effects of ecosystem conversion on the characteristics of soil organic carbon in Ziuling Forest Region. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2006, 26(5): 1030-1035.
- [5] Chen X Y, Lu J L, Zhang H, Zhao S W, Li S C. Residue decomposition in soils under different vegetation types. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2008, 26(4): 83-88.
- [6] Wang X. Effects of different management mode of artificial *Pinus tabulaeformis* forest on the characteristics and binding forms of humus in Ziuling Mountain. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2010, 24(2): 232-237.
- [7] Wang X. Study on the soil humus characteristics of the natural Chinese Pine Forest in Ziuling Mountain. *Journal of Longdong University*, 2009, 20(5): 37-42.
- [8] Zhao Y G, Zhao S W, Hua J, Zhang Y. Soil structural properties of enclosed steppe in the semiarid area. *Acta Agrestia Sinica*, 2009, 17(1): 106-113.
- [9] Liang X F, Zhao S W, Hua J, Zhang Y. Analysis of soil structure and its stability indexes under typical vegetation in Ziuling Forest Area. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2008, 28(3): 12-18.
- [10] Hua J, Zhao S W, Zhang Y, Ma S. Distribution characteristics of labile organic carbon in soil aggregates in different stages of vegetation restoration of grassland in Yunwu Mountain. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(9): 4613-4620.
- [11] Hua J, Zhao S W, Zhang Y, Ma S. Distribution characteristics of soil labile organic carbon of different grassland communities in Yunwu Mountain. *Acta Agrestia Sinica*, 2009, 17(3): 315-321.
- [12] Wang G, Wang C Y, Wang W Y, Wang Q J. Study on gray cinnamonic soil protecting soil organic carbon ability and each density components biochemical characteristics of forest in Ziuling Mountain. *Chinese Science Bulletin*, 2004, 49(24): 2562-2567.
- [13] Hori S, Okuda A. Purification of humic acid by the use of ion exchange resin. *Soil Science and Plant Nutrition*, 1961, 7(1): 4-11.
- [14] Krosshavn M, Kügel-Knabner I, Southon T E. The influence of humus fractionation on the chemical composition of soil organic matter studied by solid state ^{13}C NMR. *Journal of Soil Science*, 1992, 43(3): 473-483.
- [15] Kirz J, Jacobsen C, Howells M. Soft X-ray microscopes and their biological applications. *Quarterly Reviews of Biophysics*, 1995, 28(1): 33-130.
- [16] Lombi E, Susini J. Synchrotron-based techniques for plant and soil science: opportunities, challenges and future perspectives. *Plant and Soil*, 2009, 320(1/2): 1-35.
- [17] Solomon D, Lehmann J, Kinyangi J, Amelung W, Lobe I, Pell A, Riha S, Ngoze S, Verchot L, Mbugua D, Skjemstad J, Schäfer T. Long-term impacts of anthropogenic perturbations on dynamics and speciation of organic carbon in tropical forest and subtropical grassland ecosystems. *Global Change Biology*, 2007, 13(2): 511-530.
- [18] Lehmann J, Biqing L, Solomon D, Lerotic M, Luizao F, Kinyangi J, Schäfer T, Wirick S, Jacobsen C. Near-edge X-ray absorption fine structure (NEXAFS) spectroscopy for mapping nano-scale distribution of organic carbon forms in soil: application to black carbon particles. *Global Biogeochemical Cycles*, 2005, 19(1): 1-12.
- [19] Solomon D, Lehmann J, Kinyangi J, Liang B Q, Schäfer T. Carbon K-Edge NEXAFS and FTIR-ATR spectroscopic investigation of organic carbon speciation in soils. *Soil Science Society of America Journal*, 2005, 69(1): 107-119.
- [20] Wan J M, Tylliszczak T, Tokunaga T K. Organic carbon distribution, speciation, and elemental correlation within soil microaggregates: application of STXM and NEXAFS spectroscopy. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2007, 71(22): 5439-5449.
- [21] Zou H Y, Liu G B, Wang H S. The vegetation development in North Ziuling forest region in last fifty years. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2002, 22(1): 1-8.
- [22] Wang Z, Liu G B, Xu M X. Effect of revegetation on soil organic carbon concentration in deep soil layers in the hilly Loess Plateau of China. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(14): 3947-3952.
- [23] Jia S W, He X B, Chen Y M. Effect of land abandonment on soil organic carbon sequestration in Loess hilly areas. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2004, 18(3): 78-82.
- [24] Jia Y P, Duan J N. Spatial distribution characteristics of the carbonate carbon content in soil in a small watershed in the gully region of the Loess Plateau. *Arid Land Geography*, 2004, 27(2): 166-172.
- [25] Chen X L, Zhou J B, Wang C Y, Liu J L. Carbon and Nitrogen Mineralization of the Different Plant Residues from the Loess Plateau. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2010, 24(3): 109-114.
- [26] Jokic A, Cutler J N, Ponomarenko E, van der Kamp G, Anderson D W. Organic carbon and sulphur compounds in wetland soils: insights on structure and transformation processes using K-edge XANES and NMR spectroscopy. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2003, 67(14): 2585-2597.
- [27] Collins M J, Bishop A N, Farrimond P. Sorption by mineral surfaces: rebirth of the classical condensation pathway for kerogen formation? *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1995, 59(11): 2387-2391.

- [28] Kennedy M J, Pevear D R, Hill R J. Mineral surface control of organic carbon in black shale. *Science*, 2002, 295(5555): 657-660.

参考文献:

- [1] 吴钦孝, 杨文治. 黄土高原植被建设与可持续发展. 北京: 科学出版社, 1998: 16-35.
- [2] 朱志诚. 陕北黄土高原植被基本特征及其对土壤性质的影响. *植物生态学与地植物学学报*, 1993, 17(3): 280-286.
- [3] 韩兴国, 黄建辉, 娄治平. 关键种概念在生物多样性保护中的意义与存在的问题. *植物学通报*, 1995, 12(2): 168-184.
- [4] 赵世伟, 卢璐, 刘娜娜, 吴金水, 苏静, 杨永辉. 子午岭林区生态系统转换对土壤有机碳特征的影响. *西北植物学报*, 2006, 26(5): 1030-1035.
- [5] 陈小燕, 吕家珑, 张红, 赵世伟, 李顺存. 不同植被覆盖下植物残体分解特性. *干旱地区农业研究*, 2008, 26(4): 83-88.
- [6] 王鑫. 子午岭人工油松林不同管理方式对土壤腐殖质性质及结合形态的影响. *水土保持学报*, 2010, 24(2): 232-237.
- [7] 王鑫. 对子午岭天然油松林群落土壤腐殖质性质的研究. *陇东学院学报*, 2009, 20(5): 37-42.
- [8] 赵勇钢, 赵世伟, 华娟, 张杨. 半干旱典型草原区封育草地土壤结构特征研究. *草地学报*, 2009, 17(1): 106-113.
- [9] 梁向锋, 赵世伟, 华娟, 张杨. 子午岭林区典型植被下土壤结构及稳定性指标分析. *水土保持通报*, 2008, 28(3): 12-18.
- [10] 华娟, 赵世伟, 张杨, 马帅. 云雾山草原区不同植被恢复阶段土壤团聚体活性有机碳分布特征. *生态学报*, 2009, 29(9): 4613-4620.
- [11] 华娟, 赵世伟, 张杨, 马帅. 云雾山不同草地群落土壤活性有机碳分布特征. *草地学报*, 2009, 17(3): 315-321.
- [12] 王刚, 王春燕, 王文颖, 王启基. 子午岭森林灰褐土保护有机碳的能力及各密度组分生化特征. *科学通报*, 2004, 49(24): 2562-2567.
- [21] 邹厚远, 刘国彬, 王晗生. 子午岭林区北部近 50 年植被的变化发展. *西北植物学报*, 2002, 22(1): 1-8.
- [22] 王征, 刘国彬, 许明祥. 黄土丘陵区植被恢复对深层土壤有机碳的影响. *生态学报*, 2010, 30(14): 3947-3952.
- [23] 贾松伟, 贺秀斌, 陈云明. 黄土丘陵区退耕撂荒对土壤有机碳的积累及其活性的影响. *水土保持学报*, 2004, 18(3): 78-82.
- [24] 贾宇平, 段建南. 黄土高原沟壑区小流域土壤碳酸盐碳的空间分布特征. *干旱区地理*, 2004, 27(2): 166-171.
- [25] 陈兴丽, 周建斌, 王春阳, 刘建亮. 黄土高原区几种不同植物残落物碳、氮矿化特性研究. *水土保持学报*, 2010, 24(3): 109-114.

CONTENTS

CO ₂ emission from an alpine <i>Kobresia humilis</i> meadow in winters	WU Qin, HU Qiwu, CAO Guangmin, et al (5107)
Effect of cultivation on soil organic carbon and total nitrogen accumulation in Cele oasis croplands and their relation to crop yield ...	 HUANG Caibian, ZENG Fanjiang, LEI Jiaqiang, et al (5113)
Biomass and its allocation of four grassland species under different nitrogen levels	 QI Yu, HUANG Yongmei, WANG Yan, et al (5121)
Small-scale spatial patterns of genetic structure in <i>Castanopsis eyrei</i> populations based on autocorrelation analysis in the Tiantai Mountain of Zhejiang Province	 QI Caihong, JIN Zexin, LI Junmin (5130)
Influence of vegetation on frozen ground temperatures the forested area in the Da Xing'anling Mountains, Northeastern China	 CHANG Xiaoli, JIN Huijun, YU Shaopeng, et al (5138)
Analysis of stable carbon isotopes in different components of tree rings of <i>Pinus sylvestris</i> var. <i>mongolica</i>	 SHANG Zhiyuan, WANG Jian, CUI Mingxing, et al (5148)
Retrieval of leaf area index for different grasslands in Inner Mongolia prairie using remote sensing data	 LIU Yibo, JU Weimin, ZHU Gaolong, et al (5159)
Decomposition of lotus leaf litter and its effect on the aquatic environment of the Beili Lake in the Hangzhou West Lake	 SHI Qi, JIAO Feng, CHEN Ying, et al (5171)
Effects of fire disturbance on greenhouse gas emission from <i>Larix gmelinii</i> - <i>Carex schmidtii</i> forested wetlands in XiaoXing'an Mountains, Northeast China	 YU Lili, MU Changcheng, GU Han, et al (5180)
Wetland landscape transition pattern of Lianbo Beach along the Middle Yellow River	 GUO Donggang, SHANGGUAN Tieliang, BAI Zhongke, et al (5192)
Effect of revegetation on functional groups of soil organic carbon on the Loess Plateau	 LI Ting, ZHAO Shiwei, ZHANG Yang, et al (5199)
Soil organic and inorganic carbon contents in relation to soil physicochemical properties in northeastern China	 ZU Yuangang, LI Ran, WANG Wenjie, et al (5207)
Characteristics of soil respiration in fallow and its influencing factors at arid-highland of Loess Plateau	 GAO Huiyi, GUO Shengli, LIU Wenzhao (5217)
Soil microbial functional diversity between rhizosphere and non- rhizosphere of typical plants in the hilly area of southern Nixia	 AN Shaoshan, LI Guohui, CHEN Liding (5225)
Differences in the surface palynomorph assemblages on a karst mountain and rocky desertification areas: a case in Nanchuan District, Chongqing	 HAO Xiudong, OUYANG Xuhong, XIE Shiyu (5235)
Ash content and caloric value in the leaves of <i>Sinocalycanthus chinensis</i> and its accompanying species	 JIN Zexin, LI Junmin, MA Jine (5246)
Uptake kinetic characteristics of Cu ²⁺ by <i>Salix jiangsuensis</i> CL J-172 and <i>Salix babylonica</i> Linn and the influence of organic acids ...	 CHEN Caihong, LIU Zhikun, CHEN Guangcai, et al (5255)
Introduction of <i>TaNHX2</i> gene enhanced salt tolerance of transgenic puna chicory plants	 ZHANG Lijun, CHENG Linmei, DU Jianzhong, et al (5264)
Effects of air humidity and soil water deficit on characteristics of leaf cuticular waxes in alfalfa (<i>Medicago sativa</i>)	 GUO Yanjun, NI Yu, GUO Yunjiang, et al (5273)
Influence of water storage capacity on yield of winter wheat in dry farming area in the Loess Plateau	 DENG Zhenyong, ZHANG Qiang, WANG Qiang, et al (5281)
Research of dynamic variation of moisture in apple orchard soil in the area of Xianyang in recent years	 ZHAO Jingbo, ZHOU Qi, CHEN Baoqun, et al (5291)
Volatile oil contents correlate with geographical distribution patterns of the miao ethnic herb <i>Fructus Cinnamomi</i>	 ZHANG Xiaobo, ZHOU Tao, GUO Lanping, et al (5299)
Effect of environmental factors on growth of <i>Chlorella</i> sp. and optimization of culture conditions for high oil production	 DING Yancong, GAO Qun, LIU Jiayao, et al (5307)
The effects of substrates on locomotor performance of two sympatric lizards, <i>Takydromus septentrionalis</i> and <i>Plestiodon chinensis</i>	 LIN Zhihua, FAN Xiaoli, LEI Huanzong, et al (5316)
Guild structure of wintering waterbird assemblages in shallow lakes along Yangtze River in Anhui Province, China	 CHEN Jinyun, ZHOU Lizhi (5323)
Phylogenetic diversity analysis and <i>in situ</i> hybridization of symbiotic Oxymonad flagellates in the hindgut of <i>Reticulitermes chinensis</i> Snyder	 CHEN Wen, SHI Yu, PENG Jianxin, et al (5332)
An entropy weight approach on the comprehensive evaluation of the Pearl River Delta Nature Reserve	 ZHANG Linying, XU Songjun (5341)
Review and Monograph	
On planning method of mesoscale and microscale ecological land	 RONG Bingling, LI Dong, XIE Yingxia (5351)
Effects of land use change on soil organic carbon: a review	 CHEN Zhao, LÜ Changhe, FAN Lan, et al (5358)
Marine phytoplankton and biological carbon sink	 SUN Jun (5372)
Effect of permafrost degradation on methane emission in wetlands: a review	 SUN Xiaoxin, SONG Changchun, WANG Xianwei, et al (5379)
A review on the effects of biogenic elements and biological factors on wetland soil carbon mineralization	 ZHANG Linhai, ZENG Congsheng, TONG Chuan (5387)
A review of studies using ecological network analysis	 LI Zhongcai, Xu Junyan, WU Changyou, et al (5396)
Scientific Note	
Dynamics of age structures on <i>Agropyron michnoi</i> and <i>Leymus chinensis</i> in different communities	 JIN Xiaoming, AI Lin, LIU Jidong, et al (5406)
The impact of thematic resolution on NDVI spatial pattern	 HUANG Caixia, LI Xiaomei, SHA Jinming (5414)

2009 年度生物学科总被引频次和影响因子前 10 名期刊★

(源于 2010 年版 CSTPCD 数据库)

排序 Order	期刊 Journal	总被引频次 Total citation	排序 Order	期刊 Journal	影响因子 Impact factor
1	生态学报	11764	1	生态学报	1.812
2	应用生态学报	9430	2	植物生态学报	1.771
3	植物生态学报	4384	3	应用生态学报	1.733
4	西北植物学报	4177	4	生物多样性	1.553
5	生态学杂志	4048	5	生态学杂志	1.396
6	植物生理学通讯	3362	6	西北植物学报	0.986
7	JOURNAL OF INTEGRATIVE PLANT BIOLOGY	3327	7	兽类学报	0.894
8	MOLECULAR PLANT	1788	8	CELL RESEARCH	0.873
9	水生生物学报	1773	9	植物学报	0.841
10	遗传学报	1667	10	植物研究	0.809

★《生态学报》2009 年在核心版的 1964 种科技期刊排序中总被引频次 11764 次,全国排名第 1;影响因子 1.812,全国排名第 14;第 1—9 届连续 9 年入围中国百种杰出学术期刊;中国精品科技期刊

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 18 期 (2011 年 9 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA
(Semimonthly, Started in 1981)
Vol. 31 No. 18 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@csppg.net	Distributed by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel:(010)64034563 E-mail:journal@csppg.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