

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第 33 卷 第 24 期 Vol.33 No.24 **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

(SHENGTAI XUEBAO)

第 33 卷 第 24 期 2013 年 12 月 (半月刊)

目 次

前沿理论与学科综述

- 中国南方红壤生态系统面临的问题及对策 赵其国, 黄国勤, 马艳芹 (7615)
- 《生态学基础》: 对生态学从传统向现代的推进——纪念 E.P. 奥德姆诞辰 100 周年
..... 包庆德, 张秀芬 (7623)
- 食物链长度理论研究进展 张 欢, 何 亮, 张培育, 等 (7630)

个体与基础生态

- 天山盘羊夏季采食地和卧息地生境选择 李 叶, 余玉群, 史 军, 等 (7644)
- 松果梢斑螟对虫害诱导寄主防御的抑制作用 张 晓, 李秀玲, 李新岗, 等 (7651)
- 菹草附着物对营养盐浓度的响应及其与菹草衰亡的关系 魏宏农, 潘建林, 赵 凯, 等 (7661)
- 濒危高原植物羌活化学成分与生态因子的相关性 黄林芳, 李文涛, 王 珍, 等 (7667)
- 四年 O₃ 熏气对小麦根际土壤氮素微生物转化的影响 吴芳芳, 郑有飞, 吴荣军, 等 (7679)
- 重金属 Cd²⁺ 和 Cu²⁺ 胁迫下泥蚶消化酶活性的变化 陈肖肖, 高业田, 吴洪喜, 等 (7690)

种群、群落和生态系统

- 不同生境中橘小实蝇种群动态及密度的差异 郑思宁 (7699)
- 亚热带樟树-马尾松混交林凋落物量及养分动态特征 李忠文, 闫文德, 郑 威, 等 (7707)

景观、区域和全球生态

- 中国陆地生态系统通量观测站点空间代表性 王绍强, 陈蝶聪, 周 蕾, 等 (7715)
- 雅鲁藏布江流域 NDVI 变化与风沙化土地演变的耦合关系 李海东, 沈渭寿, 蔡博峰, 等 (7729)
- 高精度遥感影像下农牧交错带小流域景观特征的粒度效应 张庆印, 樊 军 (7739)
- 高寒草原土壤有机碳及土壤碳库管理指数的变化 蔡晓布, 于宝政, 彭岳林, 等 (7748)
- 芦芽山亚高山草甸、云杉林土壤有机碳、全氮含量的小尺度空间异质性
..... 武小钢, 郭晋平, 田旭平, 等 (7756)
- 湘中丘陵区不同演替阶段森林土壤活性有机碳库特征 孙伟军, 方 晰, 项文化, 等 (7765)
- 东北黑土区片蚀和沟蚀对土壤团聚体流失的影响 姜义亮, 郑粉莉, 王 彬, 等 (7774)
- 滇西北高原纳帕海湿地土壤氮矿化特征 解成杰, 郭雪莲, 余磊朝, 等 (7782)
- 红壤区桉树人工林炼山后土壤肥力变化及其生态评价 杨尚东, 吴 俊, 谭宏伟, 等 (7788)
- 2000—2010 年黄河流域植被覆盖的时空变化 袁丽华, 蒋卫国, 申文明, 等 (7798)
- 庐山森林景观格局变化的长期动态模拟 梁艳艳, 周年兴, 谢慧玮, 等 (7807)

暖温带-北亚热带生态过渡区物种生境相关性分析 袁志良,陈 云,韦博良,等 (7819)

不同生境和去趋势方法下的祁连山柏径向生长对气候的响应 张瑞波,袁玉江,魏文寿,等 (7827)

资源与产业生态

大小兴安岭生态资产变化格局 马立新,覃雪波,孙 楠,等 (7838)

生态环境移动数据采集系统研究与实现 申文明,孙中平,张 雪,等 (7846)

城乡与社会生态

城市遥感生态指数的创建及其应用 徐涵秋 (7853)

研究简报

大明竹属遗传多样性 ISSR 分析及 DNA 指纹图谱研究 黄树军,陈礼光,肖永太,等 (7863)

干旱胁迫下 4 种常用植物幼苗的光合和荧光特性综合评价 卢广超,许建新,薛 立,等 (7872)

基于 ITS2 和 16S rRNA 的西施舌群体遗传差异分析 孟学平,申 欣,赵娜娜,等 (7882)

两种浒苔无机碳利用对温度响应的机制 徐军田,王学文,钟志海,等 (7892)

北京山区侧柏林冠层对降雨动力学特征的影响 史 宇,余新晓,张建辉,等 (7898)

学术信息与动态

景观生态学研究:传统领域的坚守与新兴领域的探索——2013 厦门景观生态学论坛述评
..... 杨德伟,赵文武,吕一河 (7908)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 296 * zh * P * ¥ 90.00 * 1510 * 33 * 2013-12



封面图说:黄土丘陵农牧交错带——黄土丘陵是中国黄土高原的主要地貌形态,由于黄土质地疏松,加之雨季集中,降水强度较大,地表流水冲刷形成很多沟谷,斜坡所占的面积很大。这里千百年来的农牧交错作业,地表植被和生态系统均遭受了严重的破坏。利用高精度影像对小流域景观的研究表明,这里耕地、林地和水域景观相对比较规则简单,荒草地和人工草地景观比较复杂。农牧交错带小流域景观形态具有分形特征,各类景观斑块的分维数对粒度变化的响应不同,分维数随粒度的增大呈非线性下降趋势。

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/stxb201301060046

孙伟军,方晰,项文化,张仕吉,李胜蓝.湘中丘陵区不同演替阶段森林土壤活性有机碳库特征.生态学报,2013,33(24):7765-7773.

Sun W J, Fang X, Xiang W H, Zhang S J, Li S L. Active pools of soil organic carbon in subtropical forests at different successional stages in Central Hunan, China. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(24): 7765-7773.

湘中丘陵区不同演替阶段森林土壤活性有机碳库特征

孙伟军^{1,2}, 方 晰^{1,2,*}, 项文化^{1,2}, 张仕吉¹, 李胜蓝^{1,2}

(1. 中南林业科技大学生命科学与技术学院, 长沙 410004; 2. 南方林业生态应用技术国家工程实验室, 长沙 410004)

摘要: 为了解天然次生林保护对土壤活性有机碳库的影响, 采用空间替代时间研究方法, 对湘中丘陵区不同演替阶段 4 种林分类型(杉木人工林、马尾松+石栎针阔混交林、南酸枣落叶阔叶林、青冈+石栎常绿阔叶林)土壤活性有机碳及其与土壤养分相关性进行研究。结果表明: 1) 各土层总有机碳(TOC)、微生物生物量碳(MBC)、水溶性有机碳(DOC)、易氧化有机碳(EOC)含量均表现为: 青冈+石栎常绿阔叶林>南酸枣落叶阔叶林>马尾松+石栎针阔混交林>杉木人工林, 在 0—30cm 土层, 马尾松+石栎针阔混交林、南酸枣落叶阔叶林、青冈+石栎常绿阔叶林 TOC 含量比杉木人工林分别高出 13.40%、19.40% 和 29.91%, MBC 含量分别高出 15.62%、32.89% 和 53.33%, DOC 含量分别高出 8.52%、8.75% 和 13.76%, EOC 含量分别高出 32.79%、38.48% 和 78.30%; 2) 天然次生林各土层 MBC 占 TOC 的比率以南酸枣落叶阔叶林最高, 青冈+石栎常绿阔叶林为其次, 马尾松+石栎混交林最低, 均高于同一土层杉木人工林(除马尾松+石栎混交林 15—30cm 土层外), 天然次生林各土层 DOC 占 TOC 的比率随着演替进展而下降, 均低于同一土层杉木人工林(除马尾松+石栎混交林 0—15cm 土层外), 天然次生林各土层 EOC 占 TOC 的比率随着演替进展而增加, 且均高于同一土层杉木人工林; 3) 土壤 MBC、DOC、EOC 含量与 TOC 含量的相关性均达到极显著水平, 且天然次生林土壤 MBC、DOC、EOC 含量与 TOC 含量的相关系数随着演替进展而增高, 均高于杉木人工林; 4) 4 种林分土壤 TOC、MBC、DOC、EOC 含量与土壤全 N、碱解 N、全 P、有效 P、全 K、速效 K 含量之间的相关性均达到显著或极显著水平。

关键词: 天然次生林; 演替进展; 杉木人工林; 活性有机碳库; 湘中丘陵区

Active pools of soil organic carbon in subtropical forests at different successional stages in Central Hunan, China

SUN Weijun^{1,2}, FANG Xi^{1,2,*}, XIANG Wenhua^{1,2}, ZHANG Shiji¹, LI Shenglan^{1,2}

1 College of Life science and technology, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, China

2 State Key Laboratory of Ecological Applied technology in Forest Area of South China, Changsha 410004, China

Abstract: Quantification of soil organic carbon as affected by forest succession can facilitate conservation and restoration of the secondary growth forests and increase understanding of the potential for forest ecosystems to sequester carbon. The active pools of soil organic active carbon and its correlations with soil nutrients were investigated for four forest types in central Hunan, China. The four forest types included *Cunninghamia lanceolata* plantation (PM), *Pinus massoniana* + *Lithocarpus glaber* mixed forests (CL), *Choerospondias axillaries* deciduous broad leaved forests (CA) and *Cyclobalanopsis glauca* + *Lithocarpus glaber* evergreen broad-leaved forests (CG), and the last three forests represent the natural secondary growth forests at different successional stages in the subtropical region.. The results showed that (1) The contents of total organic carbon (TOC), microbial biomass carbon (MBC), dissolved organic carbon (DOC) and easily oxidized organic carbon (EOC) in the same soil layers were in the following order: *Cyclobalanopsis glauca* and *Lithocarpus glaber* evergreen broad-

基金项目: 国家林业公益性行业科研专项资助项目(201304317); 国家野外科学观测研究站资助项目(GW2012926); 湖南省科技厅资助项目(2011SK3120)

收稿日期: 2013-01-06; 修订日期: 2013-04-18

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: fangxizhang@sina.com

leaved forests > *Choerospondias axillaries* deciduous broad leaved forests > *Pinus massoniana* + *Lithocarpus glaber* mixed forests > Chinese fir plantations at the 0—30cm soil layer. Specifically, the content of TOC was 13.40%, 19.40% and 29.91% higher in *Pinus massoniana* + *Lithocarpus glaber* mixed forests, *Choerospondias axillaries* deciduous broad leaved forests, *Cyclobalanopsis glauca* and *Lithocarpus glaber* evergreen broad-leaved forests than in the Chinese fir plantations, respectively. The corresponding values were 15.62%, 32.89% and 53.33%, 8.52%, 8.75% and 13.76%, and 32.79%, 38.48% and 78.30% for the contents of MBC, DOC and EOC, respectively. (2) In the different soil layers under natural secondary growth forests, the ratio of MBC to TOC displayed the following order: *Choerospondias axillaries* deciduous broad leaved forests > *Cyclobalanopsis glauca* and *Lithocarpus glaber* evergreen broad-leaved forests > *Pinus massoniana* + *Lithocarpus glaber* mixed forests, and all of the values were higher than that in the Chinese fir plantations at the same soil layer, except the ratio of *Pinus massoniana* + *Lithocarpus glaber* mixed forests at the 15—30cm soil layer. The ratio of DOC to TOC decreased with the advanced stages in the succession series, and the values were lower in the secondary growth forests than in the Chinese fir plantations, except the ratio of *Pinus massoniana* + *Lithocarpus glaber* mixed forests at the 0—15cm soil layer. The ratio of EOC to TOC increased with the progress of the successions, and the values were higher in the different successional staged forests than in the Chinese fir plantations. (3) MBC, DOC and EOC were significantly correlated with TOC, and their relative coefficients increased with the advanced succession stages of the studied forests. All the coefficients were higher in the secondary growth forests than in the Chinese fir plantations. (4) In the four forest types, TOC, MBC, DOC and EOC had a significant correlation with soil total N, available N, total P, available P, total K and available K.

Key Words: natural secondary growth forests; forest succession; Chinese fir plantation; active organic carbon pool; Hunan Province

土壤活性有机碳是指在土壤中具有一定溶解性、移动较快、易分解矿化、对植物和土壤微生物具有较高活性的有机碳^[1],尽管它占土壤总有机碳的比率很小,但直接参与土壤生物化学转化过程,是土壤养分循环的驱动力,对土壤养分供应起着重要的作用,能反映出管理措施而引起土壤碳的微小变化^[1-2],其数量可作为衡量土壤碳库平衡和潜在生产力的敏感指标^[2-3]。目前,还无法直接测定土壤活性有机碳库或潜在矿化有机碳库的数量,主要通过测定土壤中一些活性有机碳组分来表征土壤活性有机碳库的大小,如土壤微生物生物量碳(MBC)、水溶性有机碳(DOC)、易氧化有机碳(EOC)、可矿化有机碳(MLC)等^[4]。森林土壤有机碳主要来源于植物残体(如枯枝落叶、地下根系及其分泌物)和动物残体的分解和积累,其含量反映出植物群落空间上的分布和时间上的演替阶段^[5],不同林分类型树种组成不同,凋落物化学组成不同导致不同林分土壤活性有机碳库存在明显的差异^[6]。研究表明,天然常绿阔叶林土壤活性有机碳含量明显高于杉木人工林^[7-10],阔叶林土壤活性有机碳含量均显著高于针叶林^[11-12],灌木林和阔叶林土壤有机碳库存在一定的差异^[13],天然次生林土壤无论 TOC 还是 EOC、DOC 和轻组有机质含量均高于同一地区的杉木人工林^[14],川南天然常绿阔叶林及其人工更新后形成的檫木林、柳杉林和水杉林土壤 EOC 含量在各季节均为:天然常绿阔叶林>檫木林>水杉林>柳杉林^[15],苏南丘陵杉木林随林龄的增长,土壤 EOC 含量呈现先降低后增加的变化,过熟林阶段最高,中龄林最低^[16]。

我国中亚热带地区由于长期经营活动和社会经济快速发展对木材生产的需求,人工林成为该地区主要森林类型。近年来,随着国家对天然林保护的高度重视,形成了不同演替阶段天然次生林,树种组成趋于复杂。次生林保护和林分类型对土壤有机碳库产生怎样的影响,在区域碳吸存方面发挥怎样的作用,目前这方面的研究相对缺乏^[9,10]。本研究选择湘中丘陵区不同演替阶段的天然次生林(马尾松(*Pinus massoniana*) + 石栎(*Lithocarpus glaber*)针阔混交林、南酸枣(*Choerospondias axillaris*)落叶阔叶林、青冈(*Cyclobalanopsis glauca*) + 石栎常绿阔叶林)和杉木(*Cunninghamia lanceolata*)人工林为对象,研究其土壤活性有机碳库特征及其与土壤

养分关系,为进一步揭示亚热带次生林保护对土壤有机碳库影响机制,为亚热带天然林合理经营提供科学依据。

1 研究地概况

试验地设置在湖南省长沙县大山冲湖南省森林公园内(纬度 $28^{\circ}23'—28^{\circ}24'$,经度 $113^{\circ}17'—113^{\circ}19'$),属大陆型亚热带季风湿润气候,年平均气温 $16.6—17.6\text{ }^{\circ}\text{C}$,最高气温 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$,最低气温 $-11\text{ }^{\circ}\text{C}$,年降水量 $1412—1559\text{ mm}$ 之间;地处幕阜山脉西缘的湘中丘陵区,海拔高度 $55—350\text{ m}$ 之间,土壤为由板岩和页岩发育而成的红壤。在湖南植被区划上,属湘中湘东山地丘陵地栲(*Castanopsis fargesii*)林、马尾松林、毛竹(*Phyllostachys heterocycla*)林、油茶(*Camellia oleifera*)林及农田植被区——幕阜、连云山地丘陵植被小区^[17]。由于该公园长期对森林资源的保护,园内有不同林分类型。

2 研究方法

2.1 调查样地情况

在大山冲森林公园内,选择杉木人工林和具有代表性的天然次生林:马尾松+石栎针阔混交林、南酸枣落叶阔叶林、青冈+石栎常绿阔叶林 4 种林分类型,分别设置 1 块面积为 1 hm^2 的固定样地,分别表示为 CL、PM、CA 和 CG(下同)。林分的树种组成和基本特征如表 1 所示。

表 1 样地的基本特征

Table 1 Characteristics of the four forest types in the study site

林分类型 Forest type	优势植物 Dominant plants	密度 Density /(株/ hm^2)	年龄 Age/a	平均胸径 Average DBH/cm	平均树高 Average tree height/m	海拔 Elevation /m	坡向 Slope aspect	坡度/ $(^{\circ})$ Slope
CL	杉木 <i>Cunninghamia lanceolata</i>	625	51	23.54 (5.0—35.0)	19.51 (4.5—27.0)	223—258	东南 Southeast	24
PM	马尾松 <i>Pinus massoniana</i> 石栎 <i>Lithocarpus glaber</i>	1975	47	9.33 (5.0—26.0)	8.37 (4.0—15.4)	220—262	西南 Southwest	15
CA	南酸枣 <i>Choerospondias axillaries</i> 豹皮樟 <i>Litsea coreana</i> 四川山矾 <i>Symplocos setchuensis</i> 台湾冬青 <i>Ilex formosana</i> 千年桐 <i>Aleurites montana</i>	1075	58	12.68 (5.0—53.7)	6.60 (2.5—12.5)	245—321	西 West	35
CG	青冈 <i>Cyclobalanopsis glanca</i> 石栎 <i>Lithocarpus glaber</i> 马尾松 <i>Pinus massoniana</i> 南酸枣 <i>Choerospondias axillaris</i>	1474	58	11.91 (5.0—42.0)	9.30 (1.0—26.1)	225—254	西北 Northwest	22

括号内的数据为每个林分中树木的胸径或树高的变化范围;CL: 杉木人工林;PM: 马尾松+石栎混交林;CA: 南酸枣落叶阔叶林;CG: 青冈+石栎常绿阔叶林

2.2 土壤样品采集和理化性质分析

在 4 种林分样地的上、中、下坡分别设置 1 块 $10\text{ m}\times 10\text{ m}$ 的小样方,每个小样方随机设置 3 个固定采样点,每种林分类型构成 9 个重复,于 2012 年 3 月中旬采集土壤样品。采集时移去地表枯枝落叶,均按 $0—15\text{ cm}$ 、 $15—30\text{ cm}$ 分层采集约 2 kg 土壤样品,放入无菌塑料袋,带回实验室,清除土样中的植物根系、凋落物和石砾,每个样品混合均匀后分成 2 份。1 份过 2 mm 土壤筛后,装入无菌塑料袋密封后,放入冰箱 $0—4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下保存,用于测定土壤 MBC 和 DOC,另 1 份自然风干,过 0.25 mm 土壤筛,用于测定土壤 pH 值、全 N、全 P、全 K、碱解 N、有效 P、速效 K 和 TOC、EOC。同时,采用环刀法测定土壤容重和自然含水率。

土壤 TOC 用重铬酸钾-水合加热法测定;MBC 用氯仿熏蒸, K_2SO_4 浸提,滤液直接在 TOC-1020A 分析仪上测定^[12];DOC 用水土比 $4:1$,蒸馏水浸提,在 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下恒温振荡 30 min ,用 $0.45\text{ }\mu\text{m}$ 滤膜抽滤,滤液直接在 TOC-1020A 分析仪上测定^[18];EOC 用 333 mmol/LKMnO_4 氧化比色法测定^[15];全 N 用凯氏半微量定氮法、碱解 N 用碱解扩散法、全 P 用钼锑抗比色法、全 K 用火焰光度计法、有效 P 用盐酸-氟化铵法、速效 K 用醋酸铵浸提-火

焰光度法^[19]、自然含水率用 105 ℃ 烘干法测定, pH 值用水土比 2.5:1, pH 计测定。4 种林分类型的土壤理化性质如表 2 所示。

表 2 不同林分土壤的理化性质

Table 2 Physical and chemical properties of soils in the four forest types

林分类型 Forest type	土壤深度 Soil depth /cm	容重 Bulk density /(g/cm ³)	含水量 Water content /%	pH 值 pH value	全 N Total N /(g/kg)	全 P Total P /(g/kg)	全 K Total K /(g/kg)	碱解 N Available N /(mg/kg)	有效 P Available P /(mg/kg)	速效 K Available K /(mg/kg)
CL	0—15	1.40±0.09	19.91±3.14	4.28±0.12	1.14±0.20	0.14±0.04	7.11±2.27	69.80±11.64	2.49±1.31	122.71±12.05
	15—30	1.41±0.09	23.13±5.54	4.29±0.11	0.88±0.34	0.12±0.04	7.16±1.98	45.79±9.29	1.60±1.25	108.29±16.49
PM	0—15	1.19±0.10	23.23±4.51	4.31±0.12	1.14±0.25	0.16±0.07	7.34±2.11	41.08±7.11	3.28±1.43	118.32±16.53
	15—30	1.29±0.07	20.01±2.78	4.42±0.11	0.83±0.05	0.14±0.03	7.64±2.96	28.04±5.08	2.25±0.90	119.34±16.06
CA	0—15	1.28±0.14	22.32±6.47	4.47±0.09	1.43±0.35	0.19±0.07	7.45±1.82	74.13±3.60	2.98±2.05	142.37±11.69
	15—30	1.38±0.10	18.83±4.37	4.42±0.06	0.89±0.35	0.18±0.06	7.47±2.30	51.39±2.43	1.63±1.52	110.36±15.86
CG	0—15	1.26±0.06	21.32±2.65	4.37±0.08	1.40±0.31	0.15±0.03	7.36±1.44	72.22±11.34	2.35±1.22	136.04±15.05
	15—30	1.31±0.13	20.34±2.36	4.40±0.04	0.99±0.34	0.14±0.04	6.69±1.27	50.87±11.77	2.37±1.35	109.85±12.05

2.3 数据处理

应用 SPSS (Statistical Package for Social Science) 13.0 软件包中的均数分析和方差分析方法统计不同林分类型各测定指标的均值、标准差并进行均值差异显著性检验, 应用软件包中的相关分析方法进行相关性回归分析与处理。

3 结果与分析

3.1 不同林分类型土壤各形态有机碳含量

如表 3 所示, 各林分土壤总有机 (TOC) 含量均表现 0—15 cm 土层明显高于 15—30 cm 土层, 且随着演替进展两个土层的差异增大。同一土层不同林分之间土壤 TOC 含量不同。3 种天然次生林随着演替进展, 各土层 TOC 含量逐渐提高 (除南酸枣落叶阔叶林 15—30 cm 土层外), 演替后期的青冈+石栎常绿阔叶林各土层 TOC 含量均为最高, 其次是演替中期南酸枣落叶阔叶林, 最低是马尾松+石栎混交林, 但差异均不显著 ($P > 0.05$)。3 种天然次生林各土层 TOC 含量均高于杉木人工林相应土层含量。0—30 cm 土层, 马尾松+石栎针阔混交林、南酸枣落叶阔叶林、青冈+石栎常绿阔叶林比杉木人工林分别高出 13.40%、19.40% 和 29.91%, 且青冈+石栎常绿阔叶林与杉木人工林间的差异达到显著水平 ($P < 0.05$), 表明天然次生林土壤积累更多的有机碳, 且随着演替进展逐渐增强, 次生林转变为杉木人工林后土壤 TOC 含量下降。

表 3 林地土壤不同形态有机碳的含量

Table 3 Active pools of soil organic carbon under the four forest types

项目 Item	土层深度/cm Soil layer depth	CL	PM	CA	CG
TOC/(g/kg)	0—15	19.0401±3.99a	20.3286±8.07ab	22.6349±6.14ab	26.3379±8.35b
	15—30	12.7817±2.73a	16.0034±3.28 b	15.4721±5.59ab	17.2138±4.24 b
	平均 mean	16.4636±4.70a	18.6693±6.89ab	19.6570±6.49ab	21.3883±9.43b
MBC/(mg/g)	0—15	0.3739±0.15a	0.4426±0.21ab	0.5248±0.18b	0.5770±0.19b
	15—30	0.3032±0.16a	0.3393±0.13 ab	0.3738±0.09 ab	0.4598±0.28 b
	平均 mean	0.3381±0.15a	0.3909±0.18a	0.4493±0.15a	0.5184±0.24b
DOC/(mg/g)	0—15	0.4540±0.02a	0.4792±0.04ab	0.4812±0.02ab	0.5093±0.05b
	15—30	0.4057±0.03a	0.4533±0.03ab	0.4533±0.02ab	0.4680±0.03b
	平均 mean	0.4296±0.04a	0.4662±0.04ab	0.4672±0.02ab	0.4887±0.04b
EOC/(mg/g)	0—15	4.5126±2.26a	6.2740±2.98b	6.3273±1.77b	8.1714±2.33b
	15—30	3.1585±1.81a	4.0186±2.11ab	4.1737±1.80ab	5.6483±3.70b
	平均 mean	3.8754±2.12a	5.1463±2.76ab	5.2505±2.10ab	6.9098±3.27b

同行不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$), 相同字母表示差异不显著 ($P \geq 0.05$); TOC: 总有机碳; MBC: 微生物生物量碳; DOC: 水溶性有机碳; EOC: 易氧化有机碳

从表 3 可以看出,4 种林分土壤 MBC、DOC、EOC 含量的分布、变化规律与土壤 TOC 含量相似,表现出明显的表聚性,3 种天然次生林随着演替进展,各土层 MBC、DOC、EOC 含量逐渐提高,但除 0—30 cm 土层的 MBC 含量,青冈+石栎常绿阔叶林与南酸枣落叶阔叶林、马尾松+石栎混交林间的差异达到显著水平($P<0.05$)外,不同林分之间各土层 MBC、DOC、EOC 含量差异均不显著($P>0.05$)。3 种天然次生林各土层 MBC、DOC、EOC 含量均分别高于杉木人工林相应土层,且青冈+石栎常绿阔叶林与杉木人工林间的差异均达到显著水平($P<0.05$)。在 0—30 cm 土层,马尾松+石栎针阔混交林、南酸枣落叶阔叶林、青冈+石栎常绿阔叶林 MBC 含量比杉木人工林分别高出 15.62%、32.89% 和 53.33%,DOC 含量分别高出 8.52%、8.75% 和 13.76%,EOC 含量分别高出 32.79%、38.48% 和 78.30%。表明不同演替阶段次生林对土壤有机碳库的影响不同,导致土壤不同形态活性有机碳含量不同,天然次生林转变为杉木人工林后土壤活性有机碳含量明显下降。

3.2 土壤活性有机碳占总有机碳的比率

从表 4 可以看出,4 种林分 15—30 cm 土层 MBC、DOC、EOC 占 TOC 的比率均高于 0—15 cm 土层,但差异较为明显的仅有 DOC 占 TOC 的比率,MBC、EOC 占 TOC 的比率差异不明显。不同林分同一土层 MBC 占 TOC 的比率不同,但两两间的差异均不显著($P>0.05$),介于 2.02%—2.82% 之间,3 种次生林各土层均以南酸枣落叶阔叶林为最高,其次是青冈+石栎常绿阔叶林,马尾松+石栎混交林最低,均高于同一土层杉木人工林(马尾松+石栎混交林 15—30 cm 土层除外),在 0—30 cm 土层,马尾松+石栎针阔混交林、南酸枣落叶阔叶林、青冈+石栎常绿阔叶林比杉木人工林分别高出 4.89%、19.11% 和 11.56%,表明随着演替进展,土壤有机碳向 MBC 的转化效率及微生物生物量维持能力逐渐提高,次生林转变为杉木人工林后,这种转化效率及维持能力呈下降趋势。3 种天然次生林各层土壤 DOC 占 TOC 的比率随着演替进展而下降,且均低于同一土层杉木人工林(除马尾松+石栎混交林 0—15 cm 土层外),在 0—30 cm 土层,马尾松+石栎针阔混交林、南酸枣落叶阔叶林、青冈+石栎常绿阔叶林分别比杉木人工林降低了 1.79%、4.29% 和 12.86%。3 种天然次生林各土层 EOC 占 TOC 的比率随着演替进展而提高,青冈+石栎常绿阔叶林为最高,马尾松+石栎针阔混交林最低,均高于同一土层杉木人工林,在 0—30 cm 土层,马尾松+石栎针阔混交林、南酸枣落叶阔叶林、青冈+石栎常绿阔叶林比杉木人工林分别高出 26.70%、30.86% 和 50.94%。表明天然次生林土壤有机碳活性大,易转化,有利于土壤养分的转化和循环,为植物的生长提供更多的碳素和有效养分。

表 4 不同林分土壤活性有机碳占总有机碳的比率

Table 4 The percentages of different labile organic carbon to TOC at the four forest types

项目 Item	土层深度/cm Soil layer depth	CL	PM	CA	CG
微生物生物量碳占	0—15	2.02±0.29a	2.37±1.18a	2.55±1.50a	2.36±0.92a
总有机碳的比率	15—30	2.48±0.38a	2.36±1.49a	2.82±1.54a	2.66±0.86a
MBC/TOC/%	平均 mean	2.25±0.84a	2.37±1.30a	2.68±1.48a	2.51±0.88a
水溶性有机碳占	0—15	2.48±0.60a	2.43±0.26a	2.31±0.84a	2.11±0.81a
总有机碳的比率	15—30	3.31±0.67a	2.96±0.75a	3.06±0.50a	2.80±0.72a
DOC/TOC/%	平均 mean	2.80±0.73a	2.75±0.75a	2.68±0.79a	2.44±0.83a
易氧化有机碳占	0—15	21.97±6.87a	28.89±5.20a	29.19±9.80a	33.44±18.05a
总有机碳的比率	15—30	22.81±12.11a	28.93±5.86a	29.34±20.05a	34.10±17.98a
EOC/TOC/%	平均 mean	22.36±9.38a	28.91±5.38a	29.26±15.31a	33.75±17.45a

同行不同字母表示差异显著($P\leq 0.05$),相同字母表示差异不显著($P\geq 0.05$)

3.3 土壤活性有机碳与土壤总有机碳的相关性

对 4 种林分土壤有机碳与不同形态活性有机碳之间的相关性分析结果(表 5)表明,4 种林分土壤 MBC、DOC、EOC 含量与 TOC 含量之间均呈极显著的相关性($P<0.01$),且 3 种次生林土壤 MBC、DOC、EOC 含量与 TOC 含量的相关系数随演替进展而逐渐增高,也均高于杉木人工林。土壤不同形态活性有机碳与土壤 TOC 的相关系数也存在一定的差异,其中 EOC 与 TOC 的相关系数较高,其次是 MBC,最低为 DOC。

表 5 土壤有机碳与土壤活性有机碳的相关系数 ($n=18$)

Table 5 Correlation coefficients between soil organic carbon and labile organic carbon at the four forest types

林分类型 Forest type	MBC	DOC	EOC	林分类型 Forest type	MBC	DOC	EOC
CL	0.6760 **	0.5970 **	0.7552 **	PM	0.5980 **	0.5915 **	0.8396 **
CA	0.6390 **	0.5979 **	0.8354 **	CG	0.6661 **	0.6624 **	0.846 **

* 表示 0.05 水平上差异显著; ** 表示 0.01 水平上差异显著

3.4 土壤有机碳与土壤养分的相关性

从表 6 可以看出,4 种林分土壤 TOC、MBC、DOC、EOC 含量与土壤全 N、碱解 N 含量之间的相关性(除杉木人工林 DOC 与碱解 N 的相关性为显著水平($P<0.05$)外)均达到极显著水平($P<0.01$),与全 P、有效 P、全 K、速效 K 之间相关性也达到显著($P<0.05$)或极显著水平($P<0.01$),但在不同林分表现不同且没有明显的规律性。表明土壤 TOC、MBC、DOC、EOC 含量均可作为衡量土壤养分(N、P、K)含量变化的重要指标,土壤养分及其供应状况在很大程度上取决于土壤有机碳的含量。此外,土壤有机碳与全 P、有效 P 的相关系数较有机碳与其它养分的相关系数小。

表 6 土壤有机碳、土壤活性有机碳与土壤养分的相关系数 ($n=18$)

Table 6 Correlation coefficients between soil organic carbon, labile carbon and nutrients at the four forest types

林分类型 Forest type		全 N Total N	全 P Total P	全 K Total K	碱解 N Available N	有效 P Available P	速效 K Available K
CL	TOC	0.6140 **	0.5421 *	0.7740 **	0.7159 **	0.6005 **	0.6608 **
	MBC	0.5931 **	0.6890 **	0.6605 **	0.5912 **	0.6010 **	0.5795 *
	DOC	0.5702 *	0.5443 *	0.5761 *	0.5572 *	0.5811 *	0.6478 **
	EOC	0.5238 *	0.5006 *	0.6126 **	0.5225 *	0.4883 *	0.6721 **
PM	TOC	0.6211 **	0.5693 *	0.5782 *	0.7643 *	0.5404 *	0.6187 **
	MBC	0.5609 *	0.5308 *	0.5862 *	0.7692 *	0.5589 *	0.6225 **
	DOC	0.5898 **	0.5943 **	0.6810 **	0.5108 *	0.4811 *	0.6368 **
	EOC	0.6523 **	0.5534 *	0.6360 **	0.7522 **	0.6902 **	0.6015 **
CA	TOC	0.6495 **	0.5117 *	0.5272 *	0.6839 **	0.5138 *	0.5899 **
	MBC	0.6161 **	0.5568 *	0.6574 *	0.6479 *	0.6292 **	0.5579 **
	DOC	0.6272 **	0.6152 **	0.5894 *	0.5616 *	0.4870 *	0.5518 *
	EOC	0.7317 **	0.5626 *	0.5448 *	0.5195 *	0.5395 *	0.5574 *
CG	TOC	0.6966 **	0.5650 *	0.6353 **	0.8530 *	0.7104 **	0.8250 **
	MBC	0.5801 *	0.5150 *	0.6300 **	0.6021 *	0.6546 **	0.6211 **
	DOC	0.6893 **	0.5700 *	0.6575 **	0.5445 *	0.6975 **	0.5165 *
	EOC	0.6160 **	0.5635 *	0.5549 *	0.5943 **	0.5195 *	0.5119 *

* 表示 0.05 水平上差异显著; ** 表示 0.01 水平上差异显著

4 结论与讨论

在特定的生物气候带,随着森林生长土壤碳库及碳素形态会逐渐达到稳定状态,因而土壤碳素状况常作为生态功能过程的标志或控制器^[15]。不同林分树种不同,凋落物数量和组成及其分解行为不同,因而对土壤的影响和形成的土壤碳库量与质不同,这正是不同森林植被通过直接控制其自身物质的适口性(palatability)和间接调节生物物质进入土壤的途径,影响土壤有机碳的积累和周转^[6]。常绿阔叶林土壤 TOC 含量显著高于天然针叶林和人工林^[9-15],天然林转变为人工林对土壤有机碳的影响因树种而异,种植阔叶树影响较小,而种植针叶树导致 15% 土壤有机碳损失^[20]。本研究中,3 种天然次生林随着演替进展,树种种类逐渐增多,阔叶树种比例增大(表 1),土壤理化性质改善(表 2),细根生物量呈增加的趋势^[21],凋落物数量增多,且阔叶树凋落物易分解,地表凋落物现存量也呈增加趋势,而未分解现存量占地表凋落物现存量的百分比呈下降趋

势^[22],迅速补给土壤有机碳。而杉木人工林树种单一,细根生物量低^[21],地表凋落物现存量仅为青冈+石栎常绿阔叶林的 74.09%,马尾松+石栎混交林的 76.57%和南酸枣落叶阔叶林的 97.81%,且未分解现存量占其地表枯落物现存量的百分比也均高于 3 种天然次生林^[22],此外多年来为了促进杉木林的生长,对杉木人工林逐年清理林内的枯死木、修枝、砍伐林下草灌木等抚育措施,对土壤有机碳的补给远低于次生林。因此天然次生林随着演替进展,各土层 TOC 含量逐渐提高,且均高于杉木人工林相应土层。同时也由于凋落物、根系及分泌物所形成的有机碳首先进入土壤表层,因而 4 种林分土壤 TOC 含量表现出明显的表聚性。

土壤活性有机碳来源于土壤 TOC,容易受到生物残体分解和利用的影响^[14],其变化受到土壤有机碳变化的制约^[11]。本研究中,4 种林分土壤 MBC、DOC、EOC 含量的分布、变化规律与土壤 TOC 含量相似,且与 TOC 含量的相关性均达到了极显著水平($P<0.01$)。表明林地土壤不同形态活性有机碳含量依赖于林地土壤 TOC 含量,尽管土壤不同形态活性有机碳的表述与测定方法不同,但各自从不同角度表征了土壤中活性较高部分的有机碳含量。

土壤不同形态活性有机碳对土壤环境的变化极为敏感,可在相对较短的时间内监测土壤的变化,能较早期地反映或预示土壤的变化^[14],植被类型被认为是影响土壤微生物活动^[23]和土壤活性有机碳库大小的重要因子^[6]。本研究中,3 种次生林随着演替进展及其转变为杉木人工林后,土壤 MBC、DOC、EOC 含量有不一致的变化程度。在 0—30cm 土层,从演替早期的马尾松+石栎针阔混交林到演替后期的青冈+石栎常绿阔叶林,土壤 MBC、DOC、EOC 含量分别提高了 32.62%、4.83%和 34.27%,3 种天然次生林 MBC、DOC、EOC 含量也分别比杉木人工林高出 15.62%—53.33%、8.52%—13.76%、32.79%—78.30%。表明土壤 EOC、MBC 含量对土壤环境变化的响应比土壤 TOC、DOC 的响应更为敏感,植被类型对土壤 EOC、MBC 含量的影响比对土壤 TOC、DOC 的影响更为明显。土壤 DOC 含量对环境变化的响应不如 EOC、MBC,甚至不如土壤 TOC 敏感,原因可能是森林土壤 DOC 主要以富啡酸和分子量较小的有机酸、碳水化合物为主^[24],而杉木人工林土壤腐殖质含有较多的富啡酸和酚类物质,酸性大,易分散^[25],不利于微生物的活动,DOC 产生后不能被微生物快速分解利用^[14],从而维持较高 DOC 含量,天然次生林土壤微生物活性强,分解产生较多的 DOC,被微生物消耗也多,维持较低 DOC 含量。

土壤活性有机碳占总有机碳的比率比活性有机碳含量更能反映植被类型对土壤有机碳行为的影响^[14]。本研究中,4 种林分 0—15cm 土层不同形态活性有机碳占其 TOC 的比率均低于 15—30cm 土层,且 DOC 占 TOC 的比率的差异较为明显。可能是 0—15cm 土层 TOC 含量高(见表 3),微生物活性强,DOC 产生后被快速分解利用,也与 DOC 随下渗水迁移有关^[12]。EOC 占 TOC 的比率(21.97%—34.10%之间)明显高于土壤 MBC、DOC 占土壤 TOC 的比率(分别为 2.02%—2.82%之间和 2.11%—3.31%之间),与已有的一些研究结果基本一致^[11-12,14,26]。

土壤 MBC 占 TOC 比率可反映土壤中输入的有机质向微生物生物量碳转化的效率、土壤碳损失和土壤矿物对有机质的固定^[27],可作为土壤质量早期警示指标^[28],多在 1%—5%之间变化^[29],不施有机肥的土壤为 2.0%—2.5%,低于这一比率,土壤有机质含量趋于下降,反之则趋于升高^[30]。本研究中,4 种林分各土层 MBC 占 TOC 的比率在 2.02%—2.82%之间,表明 4 种林分土壤 TOC 含量有升高趋势。杉木人工林各土层 DOC 占 TOC 的比率高于次生林,与刘荣杰等的研究结果^[14,26]一致,由于杉木人工林土壤维持较高 DOC 含量,天然次生林维持较低 DOC 含量,而天然次生林土壤 TOC 含量比杉木人工林高。EOC 占 TOC 的比率反映土壤有机碳的稳定性,比率越高,土壤碳活性越大,越容易转化^[28]。本研究中,4 种林分各土层 EOC 占 TOC 的比率均表现为天然次生林高于杉木人工林,且随着演替进展而增高,与姜培坤^[12]研究结论“常绿阔叶林 EOC 占 TOC 的比率明显高于马尾松次生林和杉木人工林,常绿阔叶林土壤碳活性大、易转化”基本一致,表明湘中丘陵区林地土壤有机碳活性较大,不稳定,易转化,尤其是天然次生林,应减少人为干扰,以保持和稳定该地区林地土壤有机碳。与刘荣杰等^[14]的研究结论“杉木林各土层(除 10—20cm 土层外)EOC 占 TOC 的比率均高于天然次生林”,朱志建等^[31]的研究结论“杉木林土壤 EOC 占 TOC 的比率均高于常绿阔叶林”不一致。这可能

与不同地区植物类型的复杂性、生态景观单元内自然条件的差异有关。

4 种林分土壤 TOC、MBC、DOC、EOC 含量与土壤全 N、碱解 N、全 P、有效 P、全 K、速效 K 含量之间的相关性均达到显著 ($P < 0.05$) 或极显著水平 ($P < 0.01$), 与大多学者的研究结果^[13-15,32]一致, 进一步证实土壤不同形态有机碳可作为衡量土壤潜在生产力的敏感指标, 研究土壤不同形态有机碳可以预测天然次生林保护对土壤碳库和养分供应状况的影响。土壤不同形态有机碳来源于生物残体的分解, 而生物残体除有机碳外, 还有 N、P、K 等, 残体分解补给土壤有机碳越多, 释放养分的数量越多。本研究中, 土壤不同形态有机碳与全 P、有效 P 的相关系数普遍低于其与其它养分的相关系数, 与刘荣杰等^[14]的研究结果“土壤 TOC 与有效 P 的相关系数最小”基本一致。

References:

- [1] Shen H, Cao Z H, Hu Z Y. Characteristics and ecological effects of the active organic carbon in soil. *Chinese Journal of Ecology*, 1999, 18(3): 32-38.
- [2] Wander M, Traina S, Stinner B, Peters S. Organic and conventional management effects on biologically active soil organic matter pools. *Soil Science Society of America Journal*, 1994, 58: 1130-1139.
- [3] Haynes R J. Labile organic matter fractions as central components of the quality of agricultural soils: an overview. *Advances in Agronomy*, 2005, 85: 221-268.
- [4] Zhang S J, Xiang W H. Research progress in effects of land use mode on soil active organic carbon. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2011, 32(5): 134-143.
- [5] Su J, Zhao S W, Ma J D, Yang Y H, Liu N N. Influence of man-made vegetation on carbon pool in Southern Ningxia region in loess plateau. *Research of Soil and Water Conservatio*, 2005, 12(3): 50-52, 179.
- [6] Quideau S A, Chadwick O A, Trumbore S E, Johnson-Maynard J L, Graham R C, Anderson M A. Vegetation control on soil organic matter dynamics. *Organic Geochemistry*, 2001, 32(2): 247-252.
- [7] Wang Q K, Wang S L, Deng S J. Comparative study on active soil organic matter in Chinese fir plantation and native broad-leaved forest in subtropical China. *Journal of Forestry Research*, 2005, 16(1): 23-26.
- [8] Wang Q K, Wang S L, Feng Z W. Comparison of active soil organic carbon pool between Chinese fir plantations and evergreen broad-leaved forest. *Journal of Beijing Forestry University*, 2006, 28(5): 1-6.
- [9] Wang Q K, Wang S L. Response of labile soil organic matter to changes in forest vegetation in Subtropical regions. *Applied Soil Ecology*, 2011, 47: 210-216.
- [10] Luan J, Xiang C, Liu S, Luo Z, Gong Y, Zhu X. Assessments of the impacts of Chinese fir plantation and natural regenerated forest on soil organic matter quality at Longmen mountain, Sichuan. China. *Geoderma*, 2010, 156(3/4): 228-236.
- [11] Geng Y Q, Yu X X, Yue Y J, Li J H, Zhang G Z, Liu S. Soil active organic carbon pool of coniferous and broadleaved forests in the mountainous area of Beijing. *Journal of Beijing Forestry University*, 2009, 31(5): 192-224.
- [12] Jiang P K. Soil active carbon pool under different types of vegetation. *Scientia Silvae Sinicae*, 2005, 41(1): 10-14.
- [13] Xu Q F, Jiang P K, Sheng Q. Comparison of organic carbon pool of soil in bush and broad-leaved forest. *Journal of Beijing Forestry University*, 2005, 27(2): 182-222.
- [14] Liu R J, Wu Y C, Zhang Y, Li Z C, Ma S J, Wang B, Geri L T. Comparison of soil labile organic carbon in Chinese fir plantations and natural secondary forests in north subtropical areas of China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2012, 36(5): 431-437.
- [15] Gong W, Hu T X, Wang J Y, Gong Y B, Ran H. Soil carbon pool and fertility under natural evergreen broad-leaved forest and its artificial regeneration forests in Southern Sichuan Province. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(6): 2536-2545.
- [16] Li P, Zheng A B, Ruan H H, Li L, Shen Y J, Zhao Q Q, Xie T. Variation of soil labile organic carbon in different age Chinese fir plantations in south Jiangsu. *Chinese Journal of Ecology*, 2011, 30(4): 778-783.
- [17] Zhou Y, Deng X J, Mi X Q, Niu Y D. Investigation of avifauna community construction and diversity of Dashanchong of Changsha in Hunan Province. *Hunan forestry science and technology*, 2007, 34(2): 35-37.
- [18] Shi L, Dai W H. Variation of soil organic carbon under different land use in HuaiBei silt soil. *Journal of Anhui Normal University (Natural Science)*, 2008, 31(6): 585-589.
- [19] Chinese Academy of Sciences Institute of soil. *Soil physical and chemical analysis*. Shanghai: Shanghai Science and technology press, 1978.
- [20] Yang J C, Huang J H, Pan Q M, Tang J W, Han X G. Long-term impacts of land-use change on dynamics of tropical soil carbon and nitrogen pools. *Journal of Environmental Science*, 2004, 16(2): 256-261.
- [21] Liu C, Xiang W H, Tian D L, Fang X, Peng C H. Overyielding of fine root biomass as increasing plant species richness in subtropical forests in central southern China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2011, 35(5): 539-550.
- [22] Lu X, Xiang W H, Ren H, Peng C H. Litter biomass and its carbon and nitrogen storage in four subtropical forests in central Southern China.

- Chinese Journal of Ecology, 2012, 31(9): 2234-2240.
- [23] Sun B, Zhang T L, Zhao Q G. Evolution of sustained fertility of red soil hilly region of subtropical zone in China II Evolution of Chemical and biological fertility. *Acta Pedologica Sinica*, 1999, 36(2): 203-207.
- [24] Tao S, Cao J. Study on leaching kinetic model of soil water-soluble organic carbon in surface. *China Environmental Science*, 1999, 16(2): 410-414.
- [25] Liu C H, Luo N Y. Chemical characteristics of forest soil humus in hilly area of Ning-Zhen. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Science)*, 1990, 14(1): 1-6.
- [26] Xu Q F, Jiang P K. Study on active organic carbon of soil under different types of vegetation. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2004, 18(6): 84-87.
- [27] Zhang Y G, Zhang X Q, Xiao Y. Effects of land use change on soil organic carbon and microbial biomass carbon in Miyaluo forest area. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, 17(11): 2029-2033.
- [28] Wang X J, Wang X S, Huang C D, Wang Y J. Characteristics of soil organic carbon and labile organic carbon under different land use types at forest-drought valley ecotone in the upper reaches of Minjiang River. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2011, 25(2): 167-172.
- [29] Tang G Y, Huang D Y, Tong C L, Zhang W J, Xiao H A, Su Y R, Wu J S. Characteristics of soil organic carbon and microbial biomass carbon in hilly red soil region. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, 17(3): 429-433.
- [30] Wu J, Joergensen R G, Pommerening B, Chaussod R, Brookes P C. Measurement of soil microbial biomass C by fumigation extraction an automated procedure. *Soil Biology and Biochemistry*, 1990, 22(8): 1167-1169.
- [31] Zhu Z J, Jiang P K, Xu Q F. Study on the Active Organic Carbon in Soil under Different Types of Vegetation. *Forest Research*, 2006, 19(4): 523-526.
- [32] Smolander A, Kitunen V. Soil microbial activities and characteristics of dissolved organic C and N in relation to tree species. *Soil Biology and Biochemistry*, 2002, 34(5): 651-660.

参考文献:

- [1] 沈宏,曹志洪,胡正义.土壤活性有机碳的表征及其生态效应.生态学报,1999,18(3):32-38.
- [4] 张仕吉,项文化.土地利用方式对土壤活性有机碳影响的研究进展.中南林业科技大学学报,2011,32(5):134-143.
- [5] 苏静,赵世伟,马继东,杨永辉,刘娜娜.宁南黄土地丘陵区不同人工植被对土壤碳库的影响.水土保持研究,2005,12(3):50-52,179.
- [8] 王清奎,汪思龙,冯宗炜.杉木纯林与常绿阔叶林土壤活性有机碳库的比较.北京林业大学学报,2006,28(5):1-6.
- [11] 耿玉清,余新晓,岳永杰,李金海,张国桢,刘松.北京山地针叶林与阔叶林土壤活性有机碳库的研究.北京林业大学学报,2009,31(5):192-224.
- [12] 姜培坤.不同林分下土壤活性有机碳库研究.林业科学,2005,41(1):10-14.
- [13] 徐秋芳,姜培坤,沈泉.灌木林与阔叶林土壤有机碳库的比较研究.北京林业大学学报,2005,27(2):182-222.
- [14] 刘荣杰,吴亚丛,张英,李正才,马少杰,王斌,格日乐图.中国北亚热带天然次生林与杉木人工林土壤活性有机碳库的比较.植物生态学报,2012,36(5):431-437.
- [15] 龚伟,胡庭兴,王景燕,宫渊波,冉华.川南天然常绿阔叶林人工更新后土壤碳库与肥力的变化.生态学报,2008,28(6):2536-2545.
- [16] 李平,郑阿宝,阮宏华,李莉,沈玉娟,赵琦齐,谢涛.苏南丘陵不同林龄杉木林土壤活性有机碳变化特征.生态学报,2011,30(4):778-783.
- [17] 周毅,邓学建,米小其,牛艳东.长沙县大山冲鸟类群落结构调查及多样性研究.湖南林业科技,2007,34(2):35-37.
- [18] 石玲,戴万宏.淮北淤土不同土地利用方式下土壤有机碳组分的变异.安徽师范大学学报(自然科学版),2008,31(6):585-589.
- [19] 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.
- [21] 刘聪,项文化,田大伦,方晰,彭长辉.中亚热带森林植物多样性增加导致细根生物量“超产”.植物生态学报,2011,35(5):539-550.
- [22] 路翔,项文化,任辉,彭长辉.中亚热带四种森林凋落物及碳氮贮量比较.生态学报,2012,31(9):2234-2240.
- [23] 孙波,张桃林,赵其国.我国中亚热带缓丘区红壤肥力的演化 II.化学和生物学肥力的演化.土壤学报,1999,36(2):203-207.
- [24] 陶澍,曹军.山地土壤表层水溶性有机碳淋溶动力学模型研究.中国环境科学,1999,16(2):410-414.
- [25] 刘长怀,罗汝英.宁镇丘陵区森林土壤腐殖质的化学特征.南京林业大学学报(自然科学版)1990,14(1):1-6.
- [27] 张于光,张小全,肖烨.米亚罗林区土地利用变化对土壤有机碳和微生物量碳的影响.应用生态学报,2006,17(11):2029-2033.
- [28] 王晓君,王宪帅,黄丛德,王勇军.岷江上游森林/干旱河谷交错带不同土地利用类型土壤有机碳和活性有机碳特征.水土保持学报,2011,25(2):167-172.
- [29] 唐国勇,黄道友,童成立,张文菊,肖和艾,苏以荣,吴金水.红壤丘陵景观单元土壤有机碳和微生物生物量碳含量特征.应用生态学报,2006,17(3):429-433.
- [30] 徐秋芳,姜培坤.不同森林植被下土壤水溶性有机碳研究.水土保持学报,2004,18(6):84-87.
- [31] 朱志建,姜培坤,徐秋芳.不同森林植被下土壤微生物量碳和易氧化态碳的比较.林业科学研究,2006,19(4):523-526.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol.33, No.24 Dec., 2013 (Semimonthly)

CONTENTS

Frontiers and Comprehensive Review

- The problems in red soil ecosystem in southern of China and its countermeasures ZHAO Qiguo, HUANG Guoqin, MA Yanqin (7615)
- Fundamentals of Ecology: promoting ecology from tradition to modern: To Commemorate The 100th Anniversary of E. P. Odum's Birthday BAO Qingde, ZHANG Xiufen (7623)
- Food chain length theory: a review ZHANG Huan, HE Liang, ZHANG Peiyu, et al (7630)

Autecology & Fundamentals

- Foraging and bed site selection of Tianshan argali (*Ovis ammon karelini*) in Central Tianshan Mountains in Summer LI Ye, YU Yuqun, SHI Jun, et al (7644)
- Inhibition of pine coneworm, larvae *Dioryctria pryeri*, on herbivore-induced defenses of *Pinus tabulaeformis* ZHANG Xiao, LI Xiuling, LI Xingang, et al (7651)
- Response of periphyton to nutrient level and relationships between periphyton and decay degree of *Potamogeton crispus* WEI Hongnong, PAN Jianlin, ZHAO Kai, et al (7661)
- Correlative study between chemical constituents and ecological factors of *Notopterygii Rhizoma* Et Radix of endangered plateau plant HUANG Linfang, LI Wentao, WANG Zhen, et al (7667)
- Induced changes in soil microbial transformation of nitrogen in maize rhizosphere by 4-year exposure to O₃ WU Fangfang, ZHENG Youfei, WU Rongjun, et al (7679)
- Changes of digestive enzyme activity of *Tegillarca granosa* exposed to cadmium and copper CHEN Xiaoxiao, GAO Yetian, WU Hongxi, et al (7690)

Population, Community and Ecosystem

- Population dynamics and density of *Bactrocera dorsalis* (Hendel) in different habitats ZHENG Sining (7699)
- Litter fall production and nutrient dynamic of *Cinnamomum camphora* and *Pinus massoniana* mixed forests in subtropics China LI Zhongwen, YAN Wende, ZHENG Wei, et al (7707)

Landscape, Regional and Global Ecology

- Assessing the spatial representativeness of eddy covariance flux observation stations of terrestrial ecosystems in China WANG Shaoqiang, CHEN Diecong, ZHOU Lei, et al (7715)
- The coupling relationship between variations of NDVI and change of aeolian sandy land in the Yarlung Zangbo River Basin of Tibet, China LI Haidong, SHEN Weishou, CAI Bofeng, et al (7729)
- Effects of higher resolution image and spatial grain size on landscape pattern in a small watershed of the farming-pastoral zone ZHANG Qingyin, FAN Jun (7739)
- The changes of soil organic carbon and carbon management index in alpine steppe CAI Xiaobu, YU Baozheng, PENG Yuelin, et al (7748)
- Spatial heterogeneity of soil organic carbon and total nitrogen at small scale in subalpine meadow and *Picea meyeri* forest in Luya Mountain WU Xiaogang, GUO Jinping, TIAN Xuping, et al (7756)
- Active pools of soil organic carbon in subtropical forests at different successional stages in Central Hunan, China SUN Weijun, FANG Xi, XIANG Wenhua, et al (7765)
- The impact of sheet and gully erosion on soil aggregate losses in the black soil region of Northeast China JIANG Yiliang, ZHENG Fenli, WANG Bin, et al (7774)
- Net nitrogen mineralization in soils of Napahai wetland in Northwest Yunnan XIE Chengjie, GUO Xuelian, YU Leichao, et al (7782)

- Variation of soil fertility in *Eucalyptus robusta* plantations after controlled burning in the red soil region and its ecological evaluation YANG Shangdong, WU Jun, TAN Hongwei, et al (7788)
- The spatio-temporal variations of vegetation cover in the Yellow River Basin from 2000 to 2010 YUAN Lihua, JIANG Weiguo, SHEN Wenming, et al (7798)
- Long-term dynamic simulation on forest landscape pattern changes in Mount Lushan LIANG Yanyan, ZHOU Nianxing, XIE Huiwei, et al (7807)
- Species habitat correlation analysis in temperate-subtropical ecological transition zone YUAN Zhiliang, CHEN Yun, WEI Boliang, et al (7819)
- Responses of Qilian junipers radial growth of different ecological environment and detrending method to climate change in Qinghai Province ZHANG Ruibo, YUAN Yujiang, WEI Wenshou, et al (7827)
- Resource and Industrial Ecology**
- The pattern of ecological capital in Daxiaoxinganling, Heilongjiang Province, China MA Lixin, QIN Xuebo, SUN Nan, et al (7838)
- Research and implementation of mobile data collection system for field survey of ecological environment SHEN Wenming, SUN Zhongping, ZHANG Xue, et al (7846)
- Urban, Rural and Social Ecology**
- A remote sensing urban ecological index and its application XU Hanqiu (7853)
- Research Notes**
- Genetic diversity and DNA fingerprint of *Pleioblastus* by ISSR HUANG Shujun, CHEN Liguang, XIAO Yongtai, et al (7863)
- Comprehensive evaluation on photosynthetic and fluorescence characteristics in seedlings of 4 drought resistance species LU Guangchao, XU Jianxin, XUE Li, et al (7872)
- Stock difference of *Coelomactra antiquata* based on nuclear (ITS2) and mitochondrial (16S rRNA) DNA sequence and secondary structure MENG Xueping, SHEN Xin, ZHAO Nana, et al (7882)
- The mechanism of the characters of inorganic carbon acquisition to temperature in two *Ulva* species XU Juntian, WANG Xuwen, ZHONG Zhihai, et al (7892)
- Research on changes of dynamic characteristics of rainfall though *Platycladus Orientalis* plantation canopy in Beijing Mountain Area SHI Yu, YU Xinxiao, ZHANG Jianhui, et al (7898)

《生态学报》2014 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工作者,探索生态学奥秘,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,280 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

本期责任副主编 丁 平

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 33 卷 第 24 期 (2013 年 12 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 33 No. 24 (December, 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	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	王如松	Editor-in-chief	WANG Rusong
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

国内外公开发刊

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 90.00 元