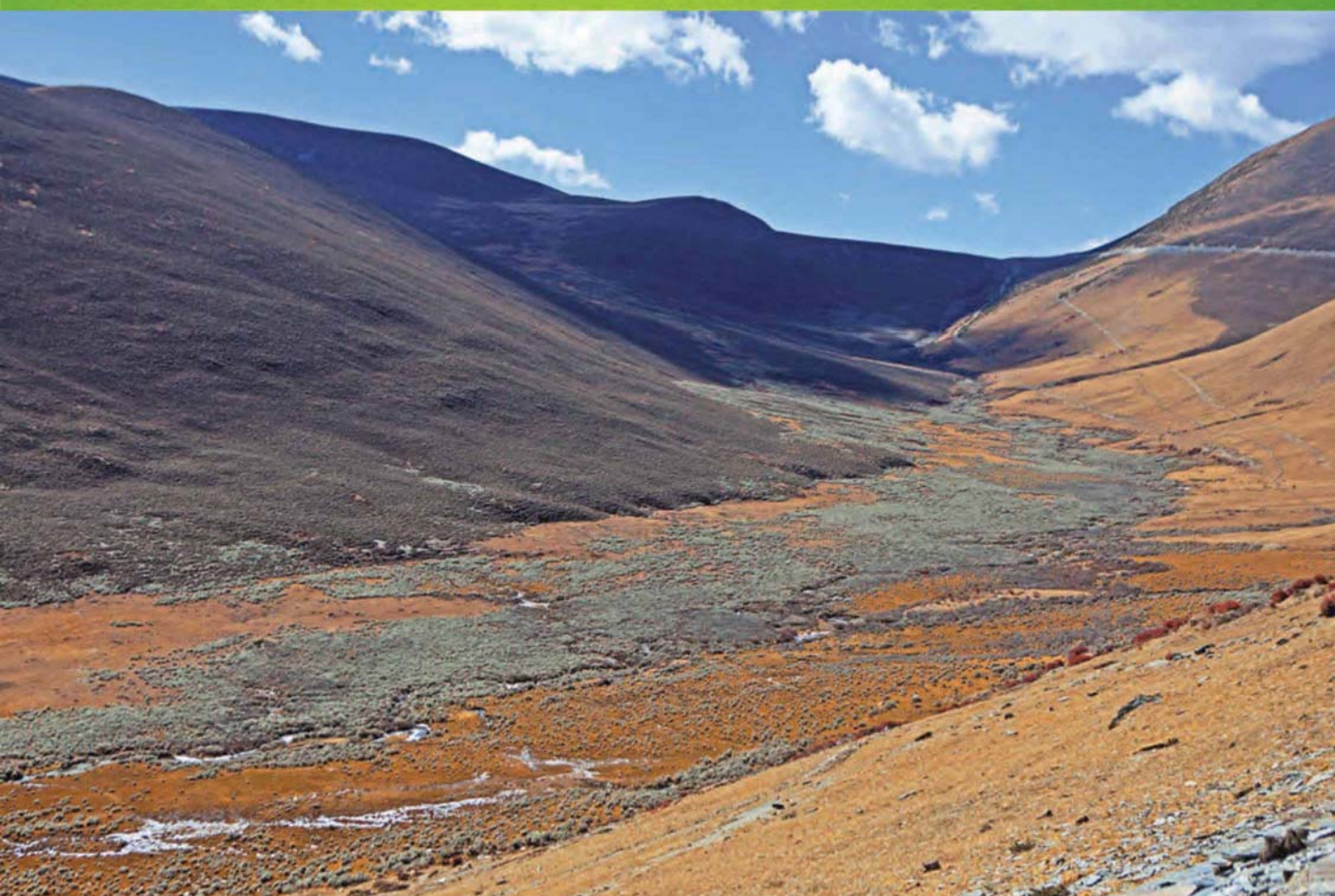


ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica

中国生态学会 2013 年学术年会专辑



第 33 卷 第 18 期 Vol.33 No.18 **2013**

中国生态学会
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 18 期 2013 年 9 月 (半月刊)

目 次

中国生态学会 2013 年学术年会专辑 卷首语

- 美国农业生态学发展综述 黄国勤, Patrick E. McCullough (5449)
- 水足迹研究进展 马 晶, 彭 建 (5458)
- 江西省主要作物(稻、棉、油)生态经济系统综合分析评价 孙卫民, 欧一智, 黄国勤 (5467)
- 植物干旱胁迫下水分代谢、碳饥饿与死亡机理 董 蕾, 李吉跃 (5477)
- 生态化学计量学特征及其应用研究进展 曾冬萍, 蒋利玲, 曾从盛, 等 (5484)
- 三峡库区紫色土植被恢复过程的土壤团粒组成及分形特征 王轶浩, 耿养会, 黄仲华 (5493)
- 城市不同地表覆盖类型对土壤呼吸的影响 付芝红, 呼延佼奇, 李 锋, 等 (5500)
- 华南地区 3 种具有不同入侵性的近缘植物对低温胁迫的敏感性 王宇涛, 李春妹, 李韶山 (5509)
- 沙丘稀有种准噶尔无叶豆花部综合特征与传粉适应性 施 翔, 刘会良, 张道远, 等 (5516)
- 水浮莲对水稻竞争效应、产量与土壤养分的影响 申时才, 徐高峰, 张付斗, 等 (5523)
- 珍稀药用植物白及光合与蒸腾生理生态及抗旱特性 吴明开, 刘 海, 沈志君, 等 (5531)
- 不同温度及二氧化碳浓度下培养的龙须菜光合生理特性对阳光紫外辐射的响应 杨雨玲, 李 伟, 陈伟洲, 等 (5538)
- 土壤氧气可获得性对双季稻田温室气体排放通量的影响 秦晓波, 李玉娥, 万运帆, 等 (5546)
- 免耕稻田氮肥运筹对土壤 NH_3 挥发及氮肥利用率的影响 马玉华, 刘 兵, 张枝盛, 等 (5556)
- 香梨两种树形净光合速率特征及影响因素 孙桂丽, 徐 敏, 李 疆, 等 (5565)
- 沙埋对沙米幼苗生长、存活及光合蒸腾特性的影响 赵哈林, 曲 浩, 周瑞莲, 等 (5574)
- 半干旱区旱地春小麦全膜覆土穴播对土壤水热效应及产量的影响 王红丽, 宋尚有, 张绪成, 等 (5580)
- 基于 Le Bissonnais 法的石漠化区桑树地埂土壤团聚体稳定性研究 汪三树, 黄先智, 史东梅, 等 (5589)
- 不同施肥对雷竹林径流及渗漏水中氮形态流失的影响 陈裴裴, 吴家森, 郑小龙, 等 (5599)
- 黄土丘陵区不同植被土壤氮素转化微生物生理群特征及差异 邢肖毅, 黄懿梅, 安韶山, 等 (5608)
- 黄土丘陵区植被类型对土壤微生物量碳氮磷的影响 赵 彤, 闫 浩, 蒋跃利, 等 (5615)
- 林地覆盖对雷竹林土壤微生物特征及其与土壤养分制约性关系的影响 郭子武, 俞文仙, 陈双林, 等 (5623)
- 降雨对草地土壤呼吸季节变异性的影响 王 旭, 闫玉春, 闫瑞瑞, 等 (5631)
- 基于土芯法的亚热带常绿阔叶林细根空间变异与取样数量估计 黄超超, 黄锦学, 熊德成, 等 (5636)
- 4 种高大树木的叶片性状及 WUE 随树高的变化 何春霞, 李吉跃, 孟 平, 等 (5644)
- 干旱荒漠区银白杨树干液流动态 张 俊, 李晓飞, 李建贵, 等 (5655)
- 模拟增温和不同凋落物基质质量对凋落物分解速率的影响 刘瑞鹏, 毛子军, 李兴欢, 等 (5661)
- 金沙江干热河谷植物叶片元素含量在地表凋落物周转中的作用 闫帮国, 纪中华, 何光熊, 等 (5668)
- 温带 12 个树种新老树枝非结构性碳水化合物浓度比较 张海燕, 王传宽, 王兴昌 (5675)
- 断根结合生长素和钾肥施用对烤烟生长及糖碱比、有机钾指数的影响 吴彦辉, 薛立新, 许自成, 等 (5686)
- 光周期和高脂食物对雌性高山姬鼠能量代谢和产热的影响 高文荣, 朱万龙, 孟丽华, 等 (5696)
- 绿原酸对凡纳滨对虾抗氧化系统及抗低盐度胁迫的影响 王 芸, 李 正, 李 健, 等 (5704)

基于盐分梯度的荒漠植物多样性与群落、种间联接响应	张雪妮, 吕光辉, 杨晓东, 等 (5714)
广西马山岩溶植被年龄序列的群落特征	温远光, 雷丽群, 朱宏光, 等 (5723)
戴云山黄山松群落与环境的关联	刘金福, 朱德煌, 兰思仁, 等 (5731)
四川盆地亚热带常绿阔叶林不同物候期凋落物分解与土壤动物群落结构的关系	王文君, 杨万勤, 谭 波, 等 (5737)
中亚热带常绿阔叶林不同演替阶段土壤活性有机碳含量及季节动态	范跃新, 杨玉盛, 杨智杰, 等 (5751)
塔克拉玛干沙漠腹地人工植被及土壤 C N P 的化学计量特征	李从娟, 雷加强, 徐新文, 等 (5760)
鄱阳湖小天鹅越冬种群数量与行为学特征	戴年华, 邵明勤, 蒋丽红, 等 (5768)
营养盐加富和鱼类添加对浮游植物群落演替和多样性的影响	陈 纯, 李思嘉, 肖利娟, 等 (5777)
西藏达则错盐湖沉积背景与有机沉积结构	刘沙沙, 贾沁贤, 刘喜方, 等 (5785)
西藏草地多项供给及调节服务相互作用的时空演变规律	潘 影, 徐增让, 余成群, 等 (5794)
太湖水体溶解性氨基酸的空间分布特征	姚 昕, 朱广伟, 高 光, 等 (5802)
基于遥感和 GIS 的巢湖流域生态功能分区研究	王传辉, 吴 立, 王心源, 等 (5808)
近 20 年来东北三省春玉米物候期变化趋势及其对温度的时空响应	李正国, 杨 鹏, 唐华俊, 等 (5818)
鄱阳湖湿地景观恢复的物种选择及其对环境因子的响应	谢冬明, 金国花, 周杨明, 等 (5828)
珠三角河网浮游植物生物量的时空特征	王 超, 李新辉, 赖子尼, 等 (5835)
南京市景观时空动态变化及其驱动力	贾宝全, 王 成, 邱尔发 (5848)
川西亚高山-高山土壤表层有机碳及活性组分沿海拔梯度的变化	秦纪洪 王 琴 孙 辉 (5858)
城市森林碳汇及其抵消能源碳排放效果——以广州为例	周 健, 肖荣波, 庄长伟, 等 (5865)
基于机器学习模型的沙漠腹地地下水含盐量变化过程及模拟研究	范敬龙, 刘海龙, 雷加强, 等 (5874)
干旱区典型绿洲城市发展与水资源潜力协调度分析	夏富强, 唐 宏, 杨德刚, 等 (5883)
海岸带区域综合承载力评估指标体系的构建与应用——以南通市为例	魏 超, 叶属峰, 过仲阳, 等 (5893)
中街山列岛海洋保护区鱼类物种多样性	梁 君, 徐汉祥, 王伟定 (5905)
丰水期长江感潮河口段网采浮游植物的分布与长期变化	江志兵, 刘晶晶, 李宏亮, 等 (5917)
基于生态网络的城市代谢结构模拟研究——以大连市为例	刘耕源, 杨志峰, 陈 彬, 等 (5926)
保护区及周边居民对野猪容忍性的影响因素——以黑龙江凤凰山国家级自然保护区为例	徐 飞, 蔡体久, 琚存勇, 等 (5935)
三江源牧户参与草地生态保护的意愿	李惠梅, 张安录, 王 珊, 等 (5943)
沈阳市降雨径流初期冲刷效应	李春林, 刘 淼, 胡远满, 等 (5952)
期刊基本参数: CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 514 * zh * P * ¥ 90.00 * 1510 * 59 * 2013-09	



封面图说: 川西高山地带土壤及植被——青藏高原东缘川西的高山地带坡面上为草地, 沟谷地带由于低平且水分较充足, 生长有很多灌丛。川西地区大约在海拔 4000m 左右为林线, 以下则分布有亚高山森林。亚高山森林是以冷、云杉属为建群种或优势种的暗针叶林为主体的森林植被。作为高海拔低温生态系统, 高山-亚高山地带土壤碳被认为是我国重要的土壤碳库。有研究表明, 易氧化有机碳含量与海拔高度呈显著正相关, 显示高海拔有利于土壤碳的固存。因而, 这里的表层土壤总有机碳含量随着海拔的升高而增加。

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/stxb201303300564

范跃新, 杨玉盛, 杨智杰, 谢锦升, 陈光水, 钟小剑, 郭剑芬. 中亚热带常绿阔叶林不同演替阶段土壤活性有机碳含量及季节动态. 生态学报, 2013, 33(18): 5751-5759.

Fan Y X, Yang Y S, Yang Z J, Xie J S, Chen G S, Zhong X J, Guo J F. Seasonal dynamics and content of soil labile organic carbon of mid-subtropical evergreen broadleaved forest during natural succession. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(18): 5751-5759.

中亚热带常绿阔叶林不同演替阶段 土壤活性有机碳含量及季节动态

范跃新^{1,2}, 杨玉盛^{1,2}, 杨智杰^{1,2}, 谢锦升^{1,2}, 陈光水^{1,2},
钟小剑^{1,2}, 郭剑芬^{1,2,*}

(1. 湿润亚热带山地生态国家重点实验室培育基地, 福州 350007; 2. 福建师范大学地理科学学院, 福州 350007)

摘要:为探明不同演替阶段土壤碳吸存潜力, 选取演替时间为 15a(演替初期)、47a(演替中期)、110a(演替后期)3 个中亚热带常绿阔叶林, 分析了各演替阶段的土壤有机碳(SOC)含量以及土壤微生物量碳(MBC)、可溶性碳(DOC)和微生物熵(SMQ)的季节变化。结果表明:演替中、后期不同土层的土壤 SOC、MBC、DOC 含量和 SMQ 均显著高于演替初期($P<0.05$); 与演替中期相比, 演替后期土壤 MBC、DOC 含量有所降低, SOC 含量和 SMQ 无显著差异。土壤 SOC、MBC 和 DOC 含量随土层加深而显著性降低(演替初、中期 DOC 除外), 并随演替进行逐渐向腐殖质层富集。不同演替阶段 MBC、DOC 和 SMQ 均有显著季节变化, 最低值出现在秋季, 最高值随演替进程由冬季逐步转向夏季。相关分析表明, 不同演替阶段土壤活性有机碳含量与土壤有机碳含量极显著相关($P<0.01$), 且土壤活性有机碳(MBC、DOC)和 SMQ 对土壤碳库变化更为敏感。

关键词:常绿阔叶林; 演替; 微生物量碳; 可溶性碳; 微生物熵; 季节动态

Seasonal dynamics and content of soil labile organic carbon of mid-subtropical evergreen broadleaved forest during natural succession

FAN Yuexin^{1,2}, YANG Yusheng^{1,2}, YANG Zhijie^{1,2}, XIE Jinsheng^{1,2}, CHEN Guangshui^{1,2}, ZHONG Xiaojian^{1,2}, GUO Jianfen^{1,2,*}

1 State Key Laboratory Breeding Base of Humid Subtropical Mountain Ecology, Fuzhou 350007, China

2 School of Geographical Sciences, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China

Abstract: Soil organic carbon (SOC) plays an essential role in determining the physical and chemical characteristics of soil and therefore in determining its fertility. Currently, there has been an additional interest in the role of SOC as a potential sink for atmospheric CO₂. Meanwhile, SOC is recognized to consist of various fractions varying in degree of decomposition, recalcitrance, and turnover rate. For example, dissolved organic carbon (DOC) is biologically available and a source of C and energy for soil microorganisms. Although the absolute C amount in microbial biomass (MBC) is small, the microbes are the most important labile C pool since they are vital for SOC dynamics and nutrient cycling. As SOC is a heterogeneous mixture of organic substances, the different forms or fractions of SOC might have different effects on soil fertility and quality.

Forest succession is a fundamental ecological process which can modify biogeochemical cycles, ameliorate stand conditions and microclimate factors and change in species composition and abundance. Soil carbon, nitrogen and microbe in the secondary forest succession have been studied. However, changes of soil labile fractions along with the secondary successional gradient of evergreen broadleaved forests, have not been reported. The objective of this study was to evaluate the effects of forest succession on soil labile fractions (MBC and DOC) and soil microbial quotient (SMQ). Soil samples were

基金项目:国家自然科学基金(30800877); 福建省自然科学基金(2010J01249); 福建省高校杰出青年科研人才计划(JA11039)

收稿日期:2013-03-30; **修订日期:**2013-07-03

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: jfguo@fjnu.edu.cn

collected from a secondary successional sequence of evergreen broadleaved forest in Wangmulin Nature Reserve in Fujian Province. This successional series included three sites (one early successional site, one midsuccessional site and one late successional site) that were closely located. According to the age and vegetation type, we categorized the 15 year-old site as early successional; the 47 year-old site as midsuccessional; and the 110 year-old site as late successional. These successional sites are similar in topography, regional climate and soil type. The results showed that SOC, MBC, DOC and SMQ in 47-year-old and 110 year-old forests were significantly higher than those in 15 year-old forest ($P < 0.05$). MBC and DOC in 47-year-old forest were higher than those in 110 year-old forest, but there were no significant differences in SOC and SMQ between these two forests. SOC, DOC and MBC decreased with soil depth in three successional stages. Also, succession promoted accumulation of SOC, MBC and DOC in humus layer. We also found that MBC, DOC and SMQ had significant seasonal dynamics at three succession stages, the lowest values occurred in autumn, and the highest values transferred from winter to summer with the succession. Seasonal fluctuation of soil MBC content at 0—40 cm soil depth ranged from 216.5 to 411.2 mg/kg, 471.9 to 964.1 mg/kg and 374.5 to 903.0 mg/kg in early-, mid- and late successional forests, respectively. The corresponding DOC content ranged from 486.5 to 667.9 mg/kg, 987.1 to 1318.2 mg/kg and 828.4 to 1028.9 mg/kg in early-, mid- and late successional forests, respectively. Correlation analysis showed that SOC significantly correlated with MBC and DOC ($P < 0.01$). MBC, DOC and SMQ were more sensitive to the changes of soil carbon storage than SOC. It suggested that forest succession significantly affects seasonal variations and contents of soil labile organic C, which may be attributed to a combination of factors including quantity of litter materials, microbial activity etc., which would change greatly with the forest succession.

Key Words: evergreen broadleaved forest; succession; MBC; DOC; SMQ; seasonal dynamics

增强森林碳汇是降低大气 CO_2 浓度的重要举措,而演替是森林碳汇的重要影响因素。以阿尔卑斯山脉挪威云杉为例,生态系统碳库在演替初期仅为 75 tC/hm^2 ,而演替后期则高达 350 tC/hm^2 ,增加了近 4 倍^[1]。多数研究表明,森林生态系统碳库随演替进程逐渐增大,但森林土壤碳库却并非如此。如有研究发现随演替进程土壤碳库持续增加^[2-3],也有在演替初期降低,之后逐渐增加^[1, 4-6],还有随演替进程变化不显著等不同的结果^[7-8]。鉴于森林土壤有机碳库是全球陆地碳库的重要组成部分,其微小变化可能对全球碳平衡产生直接影响^[9]。因此,深入探讨森林土壤碳库随演替进程如何变化,有助于森林土壤碳吸存潜力的评价和森林生态系统碳收支的精确估算^[10]。

土壤活性碳(如微生物量碳和可溶性碳等)是土壤碳库中有效性较高、易被土壤微生物分解利用、对植物养分供应有直接作用的有机碳^[11-13]。它虽只占总有机碳的极小比例,却参与了生态系统养分循环、有机质分解等诸多生态过程,影响着土壤有机质的转化,在陆地生态系统碳循环中发挥着重要作用^[8, 12, 14]。与土壤有机碳相比,土壤活性碳在土壤中周转较快、易于氧化分解和矿化,能快速反映土壤潜在生产力和土壤有机质变化,常用作土壤碳库变化的早期敏感性指标^[13, 15]。此外,人们常用土壤微生物量碳与有机碳的比值,也就是微生物熵(Soil microbial quotient, SMQ),从微生物学角度揭示土壤肥力,反映土壤碳库动态和变化^[16]。

目前演替对森林土壤碳库影响的报道多集中于北方森林地区^[1, 5, 8],而亚热带常绿阔叶林土壤碳库随演替进程如何变化较为少见。我国亚热带地区山高坡陡、土壤有机层薄、土壤抗蚀性差而易发生水土流失,生态系统具有极大的潜在脆弱性,加之该地区东亚季风盛行,冬冷夏热、水热同季、季节变化显著^[17],在此环境下,森林土壤碳库如何响应对估算本区域森林碳库潜力十分重要。鉴此,本研究以中亚热带常绿阔叶林为研究对象,探讨不同演替阶段土壤有机碳和土壤活性碳的变化趋势,对比各演替阶段土壤活性碳的季节变化,揭示不同演替阶段土壤碳库动态,为评价植被演替对土壤碳吸存潜力的影响提供基础数据。

1 材料与方法

1.1 研究区自然概况

研究地设在福建省建瓯市万木林自然保护区,地处武夷山和鹫峰山之间($27^{\circ}03'N$, $118^{\circ}09'E$),为典型的东南低山丘陵地貌,土壤为花岗岩发育的山地红壤,气候类型属中亚热带季风气候。多年平均气温 19.4°C ,多年平均降雨量 1731 mm ,多年平均蒸发量 1466 mm ,相对湿度 81% ,全年无霜期 277 d 。万木林已有 600 多年历史,是由杉木林演替而成的中亚热带顶级群落^[18]。诸多植物群落共存于自然保护区中,其中以樟科(*Lauraceae*)、木兰科(*Magnoliaceae*)、壳斗科(*Fagaceae*)、杜英科(*Elaeocarpaceae*)、山茶科(*Theaceae*)、冬青科(*Aquifoliaceae*)、山矾科(*Symplocaceae*)和金缕梅科(*Hamamelidaceae*)等植物种类为主。

1.2 样地选择和实验设计

参照亚热带地区植被演替的一般规律“针叶林—以针叶树种为主的针阔叶混交林—以阳性阔叶树种为主的针阔叶混交林—以阳性植物为主的常绿阔叶林—以中生植物为主的常绿阔叶林—中生顶级群落”^[19],结合万木林自然保护区内常绿阔叶林群落的形成模式,选取以针叶林、针阔叶混交林和常绿阔叶林为优势树种的 3 块典型样地,分别代表演替初期、中期和后期 3 个阶段。

演替初期样地的演替时间为 15a,母岩为花岗岩,土壤为红壤。原为杉木林砍伐后的苗圃地,1994 年苗圃地废弃之后次生演替而成,因受到一定的人为干扰,群落优势种除杉木(*Cunninghamia lanceolata*)之外,枫香(*Liquidambar formosana*)、南酸枣(*Choerospondias axillaris*)等阳性树种夹杂其中,灌木层成分较为复杂,櫟木(*Loropetalum chinense*)、山茶(*Camellia grijsii*)等多种植物共生,早本层以梭草(*Eulaliopsis binata*)等为主。

演替中期样地的演替时间为 47a,土壤为花岗岩发育的红壤。前身为 1962 年杉木林砍伐之后的次生马尾松(*Pinus massoniana*)、杉木林,因土质相对较好,木荷(*Schima superba*)、东南野桐(*Mallotus lianus*)等阔叶树种快速入侵形成以阔叶树种为主的针阔混交林,灌木层以石笔木(*Tutcheria championii*)、野含笑(*Ichelia skinneriana*)等为主,草本层稀疏。

演替后期样地演替时间为 110a,土壤为花岗岩发育的红壤。样地为 19 世纪 90 年代末期杉木林砍伐之后的次生演替群落,乔木层优势树种为木荷、罗浮栲(*Castanopsis fabri*),灌木层以杜茎山(*Maesa japonica*)、狗脊(*Rhizoma cibotii*)、山矾(*Symplocos fukienensis*)等为主,有木质藤本植物及附生植物,草本层稀疏。

样地设计时间为 2009 年 8 月,在每块样地内均设置 3 块 20 m×20 m 的标准样方。在每块标准样方内随机挖 3 个土壤剖面,分 0—10 cm、10—20 cm、20—40 cm 等 3 个土层取土,并将相同土层混匀,迅速带回实验室,挑去石砾和根系,过 2 mm 筛后低温(4℃)储藏,用于土壤微生物量碳和可溶性碳分析。本研究分 2009 年 10 月(秋季)、2010 年 1 月(冬季)、2010 年 4 月(春季)、2010 年 7 月(夏季)4 次取土,取样时间为每月下旬。

表 1 试验样地概况

Table 1 General situation of the experimental samples

演替阶段 Succession stages	海拔 Elevation /m	坡度 Slop /(°)	平均树高 High /m	平均胸径 Diameter at breast height /cm	容重 Bulk density /(g/cm ³)	pH	全氮 Total N /(g/kg)	全磷 Total P /(g/kg)	全钾 Total K /(g/kg)	NH ₄ ⁺ -N /(mg/kg)	NO ₃ ⁻ -N /(mg/kg)
演替初期 Early succession stage	307	28.5	6.7	8.3	1.35	4.56	0.94	0.34	8.21	6.21	1.96
演替中期 Middle succession stage	290	19.7	10.2	13.4	1.22	4.21	1.32	0.44	7.23	7.21	2.61
演替后期 Later succession stage	355	21.6	15.4	17.6	1.14	3.93	1.22	0.46	7.31	7.63	2.33

表中数据均为 2009 年 8 月样地布设时调查数据,NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 采用 0.5 mol/L 的 K₂SO₄溶液浸提,用流动分析仪测定

1.3 土壤有机碳、微生物量碳、可溶性碳测定

土壤有机碳(SOC)含量测定采用浓硫酸-重铬酸钾高温外加热氧化-硫酸亚铁滴定法,微生物量碳(MBC)含量测定采用氯仿熏蒸浸提法,浸提液为 0.5 ml/L 的 K₂SO₄,然后用 TOC-VCPH 仪(日本岛津公司)测定。可溶性碳(DOC)测定采用 0.5 ml/L 的 K₂SO₄溶液按土水比 1:5 浸提 30 min,离心过滤,滤液经 0.45 μm 微孔滤膜抽气过滤,然后用 TOC-VCPH 仪(日本岛津公司)测定。

1.4 数据处理与分析

本文采用 Origin8.5 制图,用 SPSS (17.0) 软件做数据统计分析,采用单因素方差分析和 LSD 多重比较法进行差异显著性检验,采用三因素方差分析演替阶段、季节动态和土层深度对土壤活性碳库的影响。以各个土层的 SOC、MBC、DOC 和 SMQ 为样本进行 Pearson 相关分析。文中各土层的土壤 MBC、DOC 含量及 SMQ 为季节均值,0—40 cm 土层的土壤 MBC、DOC 含量和 SMQ 为各土层的加权平均值。

2 结果与分析

2.1 土壤有机碳和活性有机碳含量

演替对土壤有机碳含量和活性有机碳含量均有显著影响(表 2)。SOC、SMQ、MBC 和 DOC 均为演替中、后期显著高于演替初期($P<0.05$),SOC 和 SMQ 在中期和后期无显著差异,MBC 和 DOC 则中期高于后期(图 1)。可见,演替初期到中期是本研究区内土壤有机碳和活性有机碳的快速积累时期,而中期到后期土壤有机碳含量无显著变化,活性有机碳含量显著降低。

土层深度影响土壤有机碳和土壤微生物量随演替进程的变化规律(表 2),在 0—10 cm 和 10—20 cm 土层,SOC 和 SMQ 均为演替初期显著增加($P<0.05$),中期和后期差异不显著($P>0.05$),在 20—40 cm 土层,各演替阶段 SOC 含量无显著差异,SMQ

为演替中期最高,后期次之,初期最低(图1)。与之不同,不同土层的 MBC 和 DOC 均为演替中期>后期>初期(图1),说明各土层活性碳含量随演替进程的变化规律一致。

2.2 土壤有机碳和活性有机碳垂直分布

演替阶段和土层深度及其交互作用对土壤有机碳和活性有机碳变化均有显著影响(表2)。其中土壤有机碳含量均随土层加深显著降低($P<0.01$),且呈现演替时间越长,土壤有机碳表聚性越强的变化规律(图1)。如演替初期 0—10 cm 土层的有机碳含量分别是 10—20 cm、20—40 cm 土层的 1.75 倍和 2.57 倍,演替中期上升到 2.20 倍和 4.26 倍,而在演替后期达到 2.22 倍和 4.46 倍。土壤微生物碳在演替初期不因土层而异,在演替中期、后期随土层加深而增大(图1),说明演替促进了深层土壤质量的提高和改善。

不同演替阶段土壤微生物量碳含量均随土层加深而显著降低($P<0.01$)(图1),其中演替初期、中期和后期 0—10 cm 土层土壤微生物量碳含量分别是 10—20 cm 和 20—40 cm 土层的 1.81 倍和 2.48 倍(初期)、2.11 倍和 3.33 倍(中期)、2.19 倍和 3.66 倍(后期),亦呈演替时间越长,表聚性越强的特点。

各演替阶段土壤可溶性碳垂直分布规律不同,比较同一演替阶段不同土层的可溶性碳含量发现,演替初期为表层(0—10 cm)含量最低,演替中期和后期则为表层含量最高。与土壤微生物量碳类似,土壤可溶性碳含量亦表现出随演替进行逐渐向表层(0—10 cm)富集的趋势(图1)。

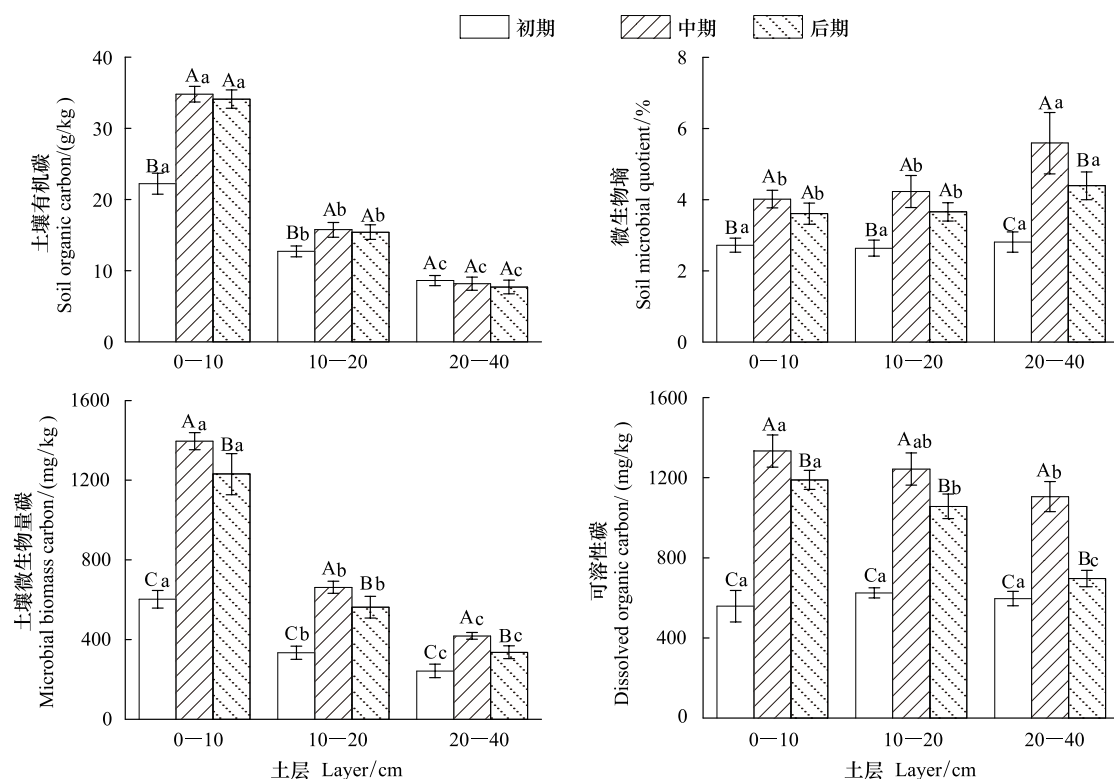


图1 不同演替阶段土壤有机碳、微生物熵、微生物量碳和可溶性碳的垂直分布

Fig.1 The vertical distribution of SOC, SMQ, MBC and DOC in different succession stages

标有不同小写字母(同一阶段)或大写字母(同一土层)表示有显著性差异($P<0.05$),否则无显著差异

2.3 土壤微生物量碳、可溶性碳和微生物熵季节动态

季节变化也是中亚热带常绿阔叶林土壤活性碳库的影响因素之一(表2),图2可见各演替阶段的土壤微生物量碳、可溶性碳和微生物熵均有显著季节变化($P<0.05$),且各土层与 0—40 cm 土层的季节变化趋势接近。其中,0—40 cm 土层的微生物量碳季节变幅分别为 216.5—411.2 mg/kg(初期)、471.9—964.1 mg/kg(中期)、374.5—903.0 mg/kg(后期);可溶性碳分别为 486.5—667.9 mg/kg(初期)、987.1—1318.2 mg/kg(中期)、828.4—1028.9 mg/kg(后期);微生物熵分别为 1.66—3.16(初期)、2.66—5.44(中期)、2.31—5.57(后期)。

土壤微生物量碳、可溶性碳和微生物熵季节变化规律因演替阶段而异。土壤微生物量碳和微生物熵在演替初期为冬季>春季>夏季>秋季;演替中期为冬、夏季高,春、秋季低;而在演替后期则夏季最高,冬季、春季次之,秋季最低,表现出随演替进行,微生物量碳和微生物熵的峰值季节由冬季逐渐转向夏季。土壤可溶性碳季节动态有所不同,在演替初期为冬季最高,春季

次之, 秋季最低; 在演替中期为冬、春两季高, 夏、秋两季低; 演替后期则春、夏两季最高, 冬季次之, 秋季最低。可见各演替阶段的土壤微生物量碳、可溶性碳和微生物熵均在秋季最低。

表 2 土壤 SOC、MBC、DOC 含量和 SMQ 变化的三因素方差分析
Table 2 Three-way ANOVA of the change of soil SOC、MBC、DOC and SMQ

影响因素 Effect factors	土壤有机碳 Soil organic carbon, SOC			土壤微生物熵 Soil microbial quotient, SMQ			微生物量碳 Microbial biomass carbon, MBC			可溶性碳 Dissolved organic carbon, DOC		
	df	F	Sig.	df	F	Sig.	df	F	Sig.	df	F	Sig.
A	2	287.005	0.000	2	244.033	0.000	2	875.051	0.000	2	1816.755	0.000
B	2	4789.277	0.000	2	29.702	0.000	2	2388.098	0.000	2	238.658	0.000
C	3	—	—	3	285.163	0.000	3	331.299	0.000	3	88.118	0.000
A×B	4	183.271	0.000	4	12.859	0.000	4	170.288	0.000	4	124.986	0.000
A×C	6	—	—	6	65.019	0.000	6	89.105	0.000	6	36.149	0.000
B×C	6	—	—	6	35.958	0.000	6	10.186	0.000	6	22.395	0.000
A×B×C	12	—	—	12	27.738	0.000	12	40.381	0.000	12	20.657	0.000

A、B、C 分别表示演替阶段、土层深度、季节变化, A×B、A×C、B×C 和 A×B×C 则表示三者之间的交互作用; — 表示未作方差分析

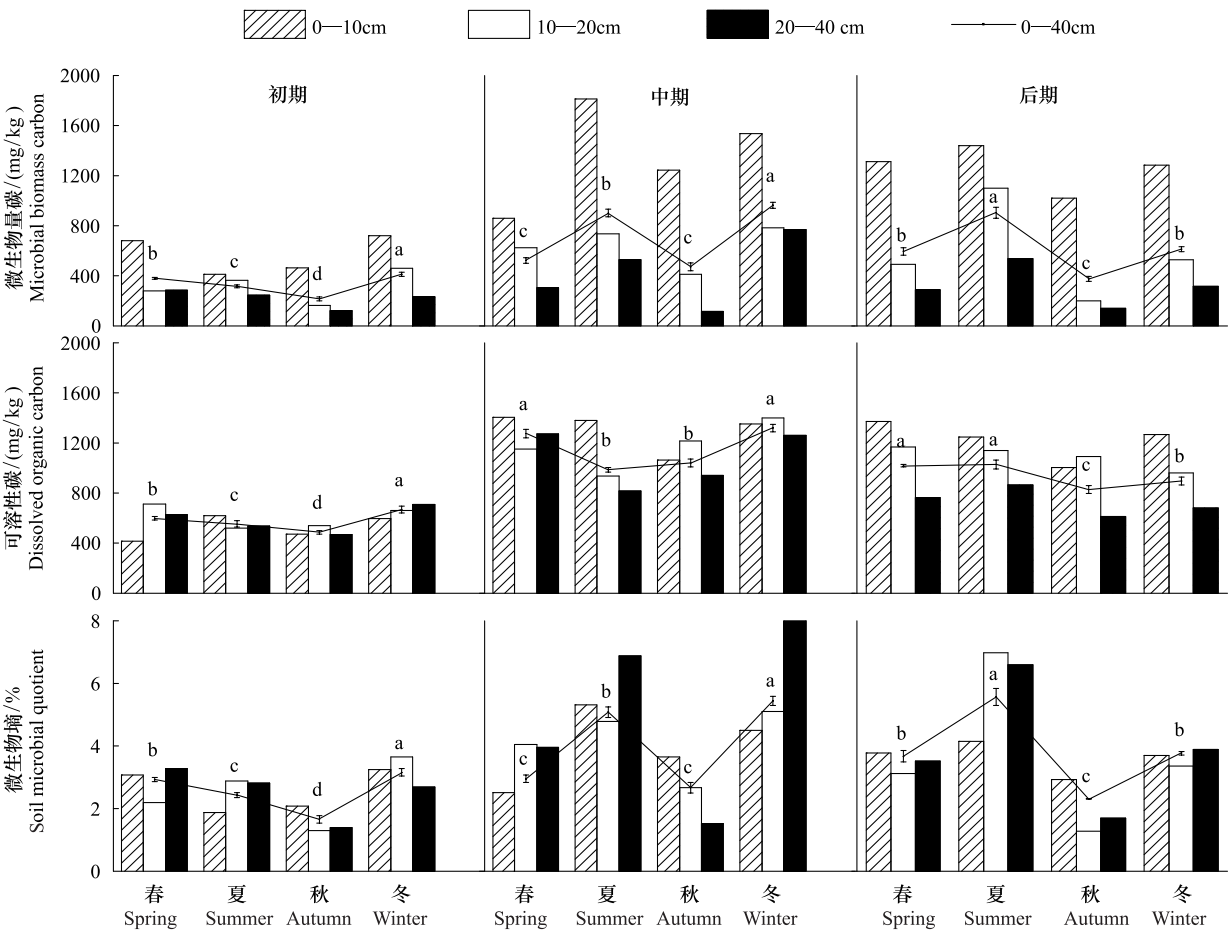


图 2 不同演替阶段土壤微生物量碳、可溶性碳和微生物熵的季节动态

Fig.2 The seasonal dynamics of MBC, DOC and SMQ in different succession stages
字母不同表示(0—40 cm 土层)有显著性差异 ($P<0.05$), 否则无显著差异

3 讨论与结论

3.1 土壤有机碳和活性有机碳含量

纵观全球不同区域具有百年以上演替历史的森林土壤有机碳的变化趋势(表 3), 发现其变化模式并不相同。虽多数研究观测到土壤有机碳含量随演替进行逐渐增大^[2, 20], 但仍有不少报道发现土壤有机碳在演替初期降低而后逐渐增加^[1, 4], 也有随

演替进程无显著变化^[8],还有结果得出随演替进程先增加后降低^[21]。本研究中演替初期到中期的土壤有机碳和活性有机碳含量显著增加,而中期到后期土壤有机碳含量无显著变化,活性有机碳含量显著降低。

土壤碳库动态是土壤有机碳源输入和碳素输出的平衡过程^[22],土壤碳库是积累还是消耗则取决于输入和输出方式的变化^[23]。无干扰(火灾、台风折断树枝、人类砍伐等)条件下,土壤有机碳有两个主要来源:1)落叶、细根及枝条等死亡残体通过腐殖化过程进入土壤;2)植物生长过程中向根际释放的根系分泌物或脱离物,即根际凋落物,也称为根际沉降^[24]。土壤有机碳输出的主要途径是土壤呼吸,即自然土壤中产生 CO₂ 的过程,主要是由微生物活动和根系呼吸所产生,只有很少部分是由土壤动物呼吸和土壤有机物的化学氧化分解产生^[25],此外,降雨导致的地表径流、淋溶下渗等也会引起土壤碳素迁移和损失。

Odum^[26]的生态系统演替理论将演替看做是一个有方向性且可预测的有序过程,是群落改变物理环境的结果,最终走向具有自我平衡性质的稳态-顶极群落,而群落结构、能量流、生物地球化学循环等伴随演替过程不断变化,其中能量流的主要指标总初级生产力(GPP)和净初级生产力(NPP)在演替开始后逐渐增大,促进生态系统的能量积累,在演替后期则逐渐降低,以保持能量的平衡和演替的稳态。据此理论,可以对本研究中演替初期到中期的土壤有机碳和活性有机碳含量显著增加做出解释,即演替初期生产力旺盛,NPP 增加促进了土壤碳源增加,课题组也发现研究区内演替中期的凋落物年归还量和细根生物量分别比初期高 719 kg/hm²、1.82 t/hm²。而演替中期到后期土壤有机碳含量未显著增加,可能与演替后期植被生产力降低和土壤呼吸速率增大有关。本研究中演替后期的土壤呼吸通量比中期高出 225.9 gC·m⁻²·a⁻¹,不仅增加了土壤碳输出,也降低了演替后期的 NPP。Gouldend 等^[27]也发现北方森林生态系统的 NPP、碳生产率(NPP/GPP)、生态系统净生产力(NEP)和碳吸存率(NEP/TNPP)在演替后期均有所降低。

表 3 全球范围内森林土壤有机碳含量/储量随演替进程变化趋势

Table 3 The trend of the world forest soil organic carbon content/store by succession process

研究区域 Survey region	优势树种 Dominant species	演替时间 Succession time/a	土层深度 Soil layer/cm	变化趋势 Trend	资料来源 References
英国汉普郡 Hampshire, England	山杨 <i>Populus davidiana</i>	>120	0—50	先增加后降低 first increased then decreased	[21]
德国图林根州和阿尔卑斯山脉 Thuringen, Germany and Alps	云杉 <i>Picea asperata</i>	0—146	<70	先降低后增加,但低于初始水平 first decreased then increased, but lower than initial level	[1]
美国俄勒冈州 Oregon, America	花旗松 <i>Pseudotsuga menziesii</i> 、 铁杉 <i>Pinaceae</i> 、冷杉 <i>Abies</i> 等	13—300	0—100	先降低后增加,但低于初始水平 first decreased then increased, but lower than initial level	[4]
美国威斯康星州、密歇根州 Wisconsin and Michigan, America	北方硬叶林 Northern hardwood	1—350	0—60	先降低后增加 first decreased then increased	[5]
加拿大东海岸新斯科舍省 Nova Scotia, Canada	红果云杉 <i>Picea rubens</i>	<140	0—10	变化不显著 no significant change	[8]
美国罗德岛州 Rhode island, America	橡树混交林 Oak mixed forest	10—114	0—70	逐渐增加 accumulate gradually	[2]
中国河南 Henan Province, China	锐齿槲栎 <i>Quercus alienavari</i> <i>acuteserrata</i> Maxim、千金鹅耳枥 <i>Carpinus cordata</i> 等	40—130	0—50	逐渐增加 accumulate gradually	[28]
中国广东 Guangdong Province, China	常绿阔叶林 Evergreen broad-leaved forest	>400	0—20	逐渐增加 accumulate gradually	[20]

土壤活性有机碳变化一方面可能受土壤有机碳的影响,根据 Pearson 相关分析结果,土壤活性碳(MBC、DOC)和土壤有机碳均极显著相关($P < 0.01$) (表 4)。另一方面可能受土壤 P 缺乏的限制,多数研究者认为,生态系统在演替初期会受到土壤 N 缺乏的限制,而演替后期则易受 P 的制约^[28],尤其是在亚热带地区高度分化土壤中,P 由于被铁、铝氧化物吸附而十分缺乏^[29],使植被和土壤微生物受到生理抑制,可能导致土壤活性碳含量降低。此外,树种组成、微域小气候、土壤性质、土层深度以及演替时间等也可能影响土壤活性有机碳的变化趋势^[30-31] (表 2)。如演替中期为针阔混交林,针叶、阔叶凋落叶混合一起易于分解^[32-33],促进养分快速释放,便于微生物利用,可能提高中期土壤活性有机碳的含量。因此,演替过程中森林土壤碳库动态受多种因素交互影响,精确预测长时间尺度森林土壤碳吸存潜力变化仍要求针对各种因素开展更为深入的研究。

微生物熵常用作反映土壤碳库数量和质量变化的敏感性指标^[34-35]。通常情况下,微生物熵变大说明土壤碳库正在积累,微生物对土壤碳库的利用效率提高,土壤质量得到改善^[36];反之,则说明土壤碳库减小,土壤质量正在退化^[37]。本研究中演替中、后期微生物熵显著高于初期,说明土壤碳素积累和土壤碳库有效性增强主要发生在演替初期到中期。表明演替是本研究区

内土壤碳素积累和土壤碳库质量变化的重要影响因素,且在演替初期更为明显,而微生物熵可作为表征演替对土壤碳库影响的早期指标之一。

表 4 有机碳、微生物量碳、可溶性碳和微生物熵的相关分析
Table 4 The correlation analysis between SOC, MBC, DOC and SMQ

	有机碳 SOC	微生物量碳 MBC	可溶性碳 DOC	微生物熵 SMQ
有机碳 SOC		0.960 **	0.560 **	0.100 ns
微生物量碳 MBC			0.741 **	0.719 **
可溶性碳 DOC				0.345 *

ns 为 $P > 0.05$, * 为 $P < 0.05$, ** 为 $P < 0.01$

3.2 土壤有机碳、微生物量碳、可溶性碳和微生物熵的垂直分布

本研究中不同演替阶段土壤有机碳、微生物量碳含量总体上随土层加深而显著降低 ($P < 0.01$),与已有研究结果一致^[17, 38-40]。但土壤可溶性碳含量在演替初期为 0—10 cm 土层最低,中、后期逐渐转变为 0—10 cm 土层最高,这可能与演替进程改变植被郁闭度有关。演替初期郁闭度低,强烈的雨水淋洗作用使得可溶性碳由腐殖质层淋溶下渗^[41],而中、后期郁闭度增加,腐殖质层(0—10 cm)淋溶损失减少而逐渐富集(图 2),此外,土壤有机碳的垂直分布模式也可能是影响因素之一。

本研究中土壤有机碳、微生物量碳、可溶性碳均随演替进行逐渐向表层富集。这可从以下几个方面解释:首先,森林地被层随群落演替持续增加,丰富和促进了土壤表层的碳素积累^[3];其次,表层土壤细根生物量增加扩大了有机碳源,如本研究中 0—10 cm 土层的细根生物量随演替进程显著增大(未发表数据);第三,演替中、后期林下植被层光强减弱,温度较低,减缓了有机质分解速率^[42];此外,相比于演替初期,演替中、后期表层土壤容重降低,孔隙度增大,有利于土壤有机碳和活性碳在表层富集^[43]。另一方面,表层富集的土壤碳易受自然、人为扰动而加速分解^[3],因此需减少人为干扰以增强森林土壤碳汇功能和碳吸存潜力。

3.3 土壤微生物量碳、可溶性碳和微生物熵季节动态

土壤微生物量碳、可溶性碳和微生物熵均有明显的季节变化,但季节动态模式与现有报道结果不尽相同^[41, 44]。王国兵^[45]等将森林土壤微生物量碳季节变化归纳为夏高冬低型、夏低冬高型和干-湿季节交替循环型 3 种模式,并将土壤温度和湿度变化、干-湿季交替或植物生长节律变化等归结为主要原因。

本研究中不同演替阶段土壤微生物量碳和微生物熵的季节动态可能主要受植物生长节律决定的养分竞争机制驱动。如演替初期植被生物量积累迅速,对土壤养分需求旺盛,在植被旺盛生长的夏季,植物对土壤微生物的养分竞争最强,从而导致夏季土壤微生物量降低;冬季温度降低,植物生长缓慢,对养分需求减弱,同微生物竞争减小;同时微生物代谢较弱,其维持呼吸所需要的能量较低,在较低能量供给条件下就能维持较高的微生物生物量^[46],因而土壤微生物量峰值出现在冬季。与之相反,演替后期的植被生长速度缓慢,对土壤养分需求较少,减弱了地上植被层与土壤微生物的养分竞争,因而土壤微生物量碳含量在水热组合更适于微生物生长的夏季最高。这表明养分竞争机制可能是本研究中土壤微生物量碳、微生物熵季节动态的主导因素,是峰值季节随演替进行由冬季向夏季转移的一个主要原因。

不同于微生物量碳,土壤可溶性碳除源自凋落物、根系分泌物、细根分解产物之外,降水淋溶和土壤腐殖质也是主要来源^[47],而来源的差异可能是可溶性碳与微生物量碳季节动态差异的原因之一。如本研究发现演替后期可溶性碳含量在春、夏两季最高,就可能与本研究区内降水量主要集中在春、夏两季有关。

综上,土壤活性碳季节动态是一个多因素交互影响的复杂过程^[48]。除温度、水分和干-湿季交替之外,演替也可能通过调节植被与土壤微生物的养分竞争机制,间接影响土壤活性碳的季节动态。

References:

[1] Thuille A, Schulze E D. Carbon dynamics in successional and afforested spruce stands in Thuringia and the Alps. *Global Change Biology*, 2006, 12 (2): 325-342.

[2] Hooker T D, Compton J E. Forest ecosystem carbon and nitrogen accumulation during the first century after agricultural abandonment. *Ecological Applications*, 2003, 13(2): 299-313.

[3] Pregitzer K S, Euskirchen E S. Carbon cycling and storage in world forests: biome patterns related to forest age. *Global Change Biology*, 2004, 10 (12): 2052-2077.

[4] Sun O J, Campbell J, Law B E, Wolf V. Dynamics of carbon stocks in soils and detritus across chronosequences of different forest types in the Pacific Northwest, USA. *Global Change Biology*, 2004, 10(9): 1470-1481.

[5] Tang J, Bolstad P V, Martin J G. Soil carbon fluxes and stocks in a Great Lakes forest chronosequence. *Global Change Biology*, 2009, 15(1): 145-155.

- [6] Li X D, Yi M J, Son Y, Park P S, Lee K H, Son Y M, Kim R H, Jeong M J. Biomass and carbon storage in an Age-Sequence of Korean Pine (*Pinus koraiensis*) plantation forests in Central Korea. *Journal of Plant Biology*, 2010, 54(1): 33-42.
- [7] Martin J L, Gower S T, Plaut J, Holmes B. Carbon pools in a boreal mixedwood logging chronosequence. *Global Change Biology*, 2005, 11(11): 1883-1894.
- [8] Taylor A R, Wang J R, Chen H Y H. Carbon storage in a chronosequence of red spruce (*Picea rubens*) forests in central Nova Scotia, Canada. *Canadian Journal of Forest Research*, 2007, 37(11): 2260-2269.
- [9] Abiven S, Menasseri S, Chenu C. The effects of organic inputs over time on soil aggregate stability — A literature analysis. *Soil Biology and Biochemistry*, 2009, 41(1): 1-12.
- [10] Van der Kamp J, Yassir I, Buurman P. Soil carbon changes upon secondary succession in Imperata grasslands (East Kalimantan, Indonesia). *Geoderma*, 2009, 149(1/2): 76-83.
- [11] Blair G J, Lefroy R D B, Lisle L. Soil carbon fractions based on their degree of oxidation, and the development of a carbon management index for agricultural systems. *Australian Journal of Agricultural Research*, 1995, 46(7): 1459-1466.
- [12] 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.
- [13] Wang Q K, Wang S L, Feng Z W, Huang Y. Active soil organic matter and its relationship with soil quality. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(3): 513-519.
- [14] Taylor L A, Arthur M A, Yanai R D. Forest floor microbial biomass across a northern hardwood successional sequence. *Soil Biology and Biochemistry*, 1999, 31(3): 431-439.
- [15] Dalal R C, Henderson P A, Glasby J M. Organic matter and microbial biomass in a vertisol after 20 year of zero-tillage. *Soil Biology and Biochemistry*, 1991, 23(5): 435-441.
- [16] Zhang F, Huang F Q, Xiao X P, Wu J M. Short-term influences of winter crops on microbial biomass carbon, microbial biomass nitrogen and C_{mic} -to- C_{org} in a paddy soil. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(2): 734-739.
- [17] Yang Y S, Xie J S, Sheng H, Chen G S, Li X. The impact of land use/cover change on soil organic carbon stocks and quality in mid-subtropical mountainous area of southern China. *Acta Geographica Sinica*, 2007, 62(11): 1123-1131.
- [18] Yu X T. The ecological ethics ponderation on the forest with myriad trees—commemorating the forest with myriad trees in Jian'ou for 600 years. *Journal of Fujian Forestry Science and Technology*, 2001, 28(1): 5-7.
- [19] Peng S L, Fang W. Study on dynamics of *Castanopsis chinensis* and *Schima superba* population in forest succession of Dinghushan mountain. *Acta Phytocologica Sinica*, 1995, 19(4): 311-318.
- [20] Zhou G Y, Liu S G, Li Z A, Zhang D Q, Tang X L, Zhou C Y, Yan J H, Mo J M. Old-growth forests can accumulate carbon in soils. *Science*, 2006, 314(5804): 1417-1417.
- [21] Pastor J, Post W M. Influence of climate, soil moisture, and succession on forest carbon and nitrogen cycles. *Biogeochemistry*, 1986, 2(1): 3-27.
- [22] Schlesinger W H. Carbon balance in terrestrial detritus. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1977, 8(1): 51-81.
- [23] Yang M, Li X W, Zhang J, Xue B. Review of soil organic carbon dynamic progress and the impact factors during herbaceous and woody vegetation types conversation. *Acta Prataculturae Sinica*, 2007, 16(4): 126-138.
- [24] Kuzyakov Y, Schneckenberger K. Review of estimation of plant rhizodeposition and their contribution to soil organic matter formation. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2004, 50(1): 115-132.
- [25] Liu S H, Fang J Y. Effect factors of soil respiration and the temperature's effects on soil respiration in the global scale. *Acta Ecologica Sinica*, 1997, 17(5): 469-476.
- [26] Odum E P. The strategy of ecosystem development. *Science*, 1969, 164(3877): 262-270.
- [27] Goulden M L, McMillan A M S, Winston G C, Rocha A V, Manies K L, Harden J W, Bond-Lamberty B P. Patterns of NPP, GPP, respiration, and NEP during boreal forest succession. *Global Change Biology*, 2011, 17(2): 855-871.
- [28] Walker T W, Syers J K. The fate of phosphorus during pedogenesis. *Geoderma*, 1976, 15(1): 1-19.
- [29] Sanchez P A. Soil fertility and hunger in Africa. *Science*, 2002, 295(5562): 2019-2020.
- [30] Paul K I, Polglase P J, Nyakuengama J G, Khanna P K. Change in soil carbon following afforestation. *Forest Ecology and Management*, 2002, 168(1/3): 241-257.
- [31] Knops J M H, Tilman D. Dynamics of soil nitrogen and carbon accumulation for 61 years after agricultural abandonment. *Ecology*, 2000, 81(1): 88-98.
- [32] Yang Y S, Chen G S, Guo J F. Litter decomposition and nutrient release in a mixed forest of *Cunninghamia lanceolata* and *Tsoongiodendron odorum*. *Acta Phytocologica Sinica*, 2002, 26(3): 275-282.
- [33] Xiao C Y, Huang Q C, Ruan H H. Characteristics of decomposition of litter from Pine, Oak and Pine-Oak mixed forests. *Acta Pedologica Sinica*, 2002, 39(5): 763-767.
- [34] Zhang Y Y, Qu L Y, Chen L D, Wei W. Soil microbial properties under different vegetation types in Loess hilly region. *Chinese Journal of Applied*

- Ecology, 2010, 21(1): 165-173.
- [35] Sparling G P. Ratio of microbial biomass carbon to soil organic carbon as a sensitive indicator of changes in soil organic matter. *Australian Journal of Soil Research*, 1992, 30(2): 195-207.
- [36] Huang Y, Wang S L, Feng Z W, Gao H, Wang Q K, Hu Y L, Yan S K. Soil quality assessment of forest stand in different plantation ecosystems. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(12): 2199-2205.
- [37] Balota E L, Colozzi-Filho A, Andrade D S, Dick R P. Microbial biomass in soils under different tillage and crop rotation systems. *Biology and Fertility of Soils*, 2003, 38(1): 15-20.
- [38] Chen T H, Chiu C Y, Tian G L. Seasonal dynamics of soil microbial biomass in coastal sand dune forest. *Pedobiologia*, 2005, 49(6): 645-653.
- [39] Han L, Zhang Y L, Jin S, Wang J, Wei Y Y, Cui N, Wei W. Effect of different irrigation patterns on soil dissolved organic carbon and microbial biomass carbon in protected field. *Scientia Agricultura Sinica*, 2010, 43(8): 1625-1633.
- [40] Liu S, Wang C K. Spatio-temporal patterns of soil microbial biomass carbon and nitrogen in five temperate forest ecosystems. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(12): 3135-3143.
- [41] Christ M J, David M B. Dynamics of extractable organic carbon in Spodosol forest floors. *Soil Biology and Biochemistry*, 1996, 28(9): 1171-1179.
- [42] Baird M, Zabowski D, Everett R. Wildfire effects on carbon and nitrogen in inland coniferous forests. *Plant and Soil*, 1999, 209(2): 233-243.
- [43] Wang Q, Yin F, Hao S P, Li C H. Effects of subsoil bulk density on rhizospheric soil microbial population, microbial biomass carbon and nitrogen of corn (*Zea mays* L.) field. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(6): 3096-3104.
- [44] Devi N B, Yadava P S. Seasonal dynamics in soil microbial biomass C, N and P in a mixed-oak forest ecosystem of Manipur, North-east India. *Applied Soil Ecology*, 2006, 31(3): 220-227.
- [45] Wang G B, Ruan H H, Tang Y F, He R. A review on the dynamics of soil microbial biomass in forest ecosystems. *Journal of Anhui Agricultural University*, 2009, 36(1): 100-104.
- [46] Brookes P, Ocio J, Wu J. The soil microbial biomass: its measurement, properties and role in soil nitrogen and carbon dynamics following substrate incorporation. *Soil Microorganisms*, 1990, 35: 39-51.
- [47] Pang X Y, Bao W K, Wu N. Influence factors of soil dissoluble organic matter (carbon) in forest ecosystems: A review. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2009, 15(3): 390-398.
- [48] Yang K, Zhu J J, Zhang J X, Yan Q L. Seasonal dynamics of soil microbial biomass C and N in two larch plantation forests with different ages in Northeastern China. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(10): 5500-5507.

参考文献:

- [12] 沈宏, 曹志洪, 胡正义. 土壤活性有机碳的表征及其生态效应. *生态学杂志*, 1999, 18(3): 32-38.
- [13] 王清奎, 汪思龙, 冯宗炜, 黄宇. 土壤活性有机质及其与土壤质量的关系. *生态学报*, 2005, 25(3): 513-519.
- [16] 张帆, 黄凤球, 肖小平, 吴家梅. 冬季作物对稻田土壤微生物量碳、氮和微生物熵的短期影响. *生态学报*, 2009, 29(2): 734-739.
- [17] 杨玉盛, 谢锦升, 盛浩, 陈光水, 李旭. 中亚热带山区土地利用变化对土壤有机碳储量和质量的影响. *地理学报*, 2007, 62(11): 1123-1131.
- [18] 俞新妥. “万木林”的生态伦理学思考——纪念建瓯万木林 600 年. *福建林业科技*, 2001, 28(1): 5-7.
- [19] 彭少麟, 方炜. 鼎湖山植被演替过程中椎栗和荷木种群的动态. *植物生态学报*, 1995, 19(4): 311-318.
- [23] 杨渺, 李贤伟, 张健, 薛波. 植被覆盖变化过程中土壤有机碳库动态及其影响因素研究进展. *草业学报*, 2007, 16(4): 126-138.
- [25] 刘绍辉, 方精云. 土壤呼吸的影响因素及全球尺度下温度的影响. *生态学报*, 1997, 17(5): 469-476.
- [32] 杨玉盛, 陈光水, 郭剑芬. 杉木观光木混交林凋落物分解及养分释放的研究. *植物生态学报*, 2002, 26(3): 275-282.
- [33] 肖慈英, 黄青春, 阮宏华. 松、栎纯林及混交林凋落物分解特性研究. *土壤学报*, 2002, 39(5): 763-767.
- [34] 张燕燕, 曲来叶, 陈利顶, 卫伟. 黄土丘陵沟壑区不同植被类型土壤微生物特性. *应用生态学报*, 2010, 21(1): 165-173.
- [36] 黄宇, 汪思龙, 冯宗炜, 高洪, 王清奎, 胡亚林, 颜绍旭. 不同人工林生态系统林地土壤质量评价. *应用生态学报*, 2004, 15(12): 2199-2205.
- [39] 韩琳, 张玉龙, 金烁, 王娇, 魏岩岩, 崔宁, 魏巍. 灌溉模式对保护地土壤可溶性有机碳与微生物量碳的影响. *中国农业科学*, 2010, 43(8): 1625-1633.
- [40] 刘爽, 王传宽. 五种温带森林土壤微生物生物量碳氮的时空格局. *生态学报*, 2010, 30(12): 3135-3143.
- [43] 王群, 尹飞, 郝四平, 李潮海. 下层土壤容重对玉米根际土壤微生物数量及微生物量碳、氮的影响. *生态学报*, 2009, 29(6): 3096-3104.
- [45] 王国兵, 阮宏华, 唐燕飞, 何容. 森林土壤微生物生物量动态变化研究进展. *安徽农业大学学报*, 2009, 36(1): 100-104.
- [47] 庞学勇, 包维楷, 吴宁. 森林生态系统土壤可溶性有机质(碳)影响因素研究进展. *应用与环境生物学报*, 2009, 15(3): 390-398.
- [48] 杨凯, 朱教君, 张金鑫, 闫巧玲. 不同林龄落叶松人工林土壤微生物生物量碳氮的季节变化. *生态学报*, 2009, 29(10): 5500-5507.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol.33 ,No.18 Sep. ,2013(Semimonthly)

CONTENTS

Development of agroecology in USA	HUANG Guoqin, McCullough Patrick E. (5449)
Research progress on water footprint	MA Jing, PENG Jian (5458)
Analysis and evaluation of the eco-economic systems of the main crops (rice, cotton and rapeseed) in Jiangxi Province, China	SUN Weimin, OU Yizhi, HUANG Guoqin (5467)
Relationship among drought, hydraulic metabolic, carbon starvation and vegetation mortality	DONG Lei, LI Jiyue (5477)
Reviews on the ecological stoichiometry characteristics and its applications	ZENG Dongping, JIANG Liling, ZENG Congsheng, et al (5484)
Composition and fractal features of purple soil aggregates during the vegetation restoration processes in the Three Gorges Reservoir Region	WANG Yihao, GENG Yanghui, HUANG Zhonghua (5493)
Impacts of different surface covers on soil respiration in urban areas	FU Zhihong, HUYAN Jiaoqi, LI Feng, et al (5500)
Chilling sensitivities of three closely related plants with different invasiveness in South China	WANG Yutao, LI Chunmei, LI Shaoshan (5509)
The flower syndrome and pollination adaptation of desert rare species <i>Eremosparton songoricum</i> (litv.) Vass.(Fabaceae)	SHI Xiang, LIU Huiliang, ZHANG Daoyuan, et al (5516)
Competitive effect of <i>Pistia stratiotes</i> to rice and its impacts on rice yield and soil nutrients	SHEN Shicai, XU Gaofeng, ZHANG Fudou, et al (5523)
Photosynthetic physiological ecology characteristics of rare medicinal plants <i>Bletilla striata</i>	WU Mingkai, LIU Hai, SHEN Zhijun, et al (5531)
Photosynthetic responses to Solar UV radiation of <i>Gracilaria lemaneiformis</i> cultured under different temperatures and CO ₂ concentrations	YANG Yuling, LI Wei, CHEN Weizhou, et al (5538)
The effect of soil oxygen availability on greenhouse gases emission in a double rice field	QIN Xiaobo, LI Yu'e, WAN Yunfan, et al (5546)
Effects of nitrogen management on NH ₃ volatilization and nitrogen use efficiency under no-tillage paddy fields	MA Yuhua, LIU Bing, ZHANG Zhisheng, et al (5556)
Study on characteristics of net photosynthetic rate of two kinds of tree shape and Impact Factors in Korla fragrant pear	SUN Guili, XU Min, LI Jiang, et al (5565)
Effects of sand burial on growth, survival, photosynthetic and transpiration properties of <i>Agriophyllum squarrosum</i> seedlings	ZHAO Halin, QU Hao, ZHOU Ruilian, et al (5574)
Effects of using plastic film as mulch combined with bunch planting on soil temperature, moisture and yield of spring wheat in a semi-arid area in drylands of Gansu, China	WANG Hongli, SONG Shangyou, ZHANG Xucheng, et al (5580)
Study on soil aggregates stability of mulberry ridge in Rocky Desertification based on Le Bissonnais method	WANG Sanshu, HUANG Xianzhi, SHI Dongmei, et al (5589)
Effects of fertilization on nitrogen loss with different forms via runoff and seepage under <i>Phyllostachy praecox</i> stands	CHEN Peipei, WU Jiasen, ZHENG Xiaolong, et al (5599)
Characteristics of physiological groups of soil nitrogen-transforming microbes in different vegetation types in the Loess Gully region, China	XING Xiaoyi, HUANG Yimei, AN Shaoshan, et al (5608)
Effects of vegetation types on soil microbial biomass C, N, P on the Loess Hilly Area	ZHAO Tong, YAN Hao, JIANG Yueli, et al (5615)
Influence of mulching management on soil microbe and its relationship with soil nutrient in <i>Phyllostachys praecox</i> stand	GUO Ziwu, YU Wenxian, CHEN Shuanglin, et al (5623)
Effect of rainfall on the seasonal variation of soil respiration in Hulunber Meadow Steppe	WANG Xu, YAN Yuchun, YAN Ruirui, et al (5631)
Spatial heterogeneity of fine roots in a subtropical evergreen broad-leaved forest and their sampling strategy based on soil coring method	HUANG Chaochao, HUANG Jinxue, XIONG Decheng, et al (5636)
Changes of leaf traits and WUE with crown height of four tall tree species	HE Chunxia, LI Jiyue, MENG Ping, et al (5644)
Sap flow dynamics of <i>Populus alba</i> L.× <i>P.talassica</i> plantation in arid desert area	ZHANG Jun, LI Xiaofei, LI Jiangui, et al (5655)
Effects of simulated temperature increase and vary little quality on litter decomposition	LIU Ruipeng, MAO Zijun, LI Xinghuan, et al (5661)
The effects of leaf stoichiometric characters on litter turnover in an arid-hot valley of Jinsha River, China	YAN Bangguo, JI Zhonghua, HE Guangxiong, et al (5668)
Comparison of concentrations of non-structural carbohydrates between new twigs and old branches for 12 temperate species	ZHANG Haiyan, WANG Chuankuan, WANG Xingchang (5675)
Combined effects of root cutting, auxin application, and potassium fertilizer on growth, sugar:nicotine ratio, and organic potassium index of flue-cured tobacco	WU Yanhui, XUE Lixin, XU Zicheng, et al (5686)
Effects of photoperiod and high fat diet on energy intake and thermogenesis in female <i>Apodemus chevrieri</i>	GAO Wenrong, ZHU Wanlong, MENG Lihua, et al (5696)
Effects of dietary chlorogenic acid supplementation on antioxidant system and anti-low salinity of <i>Litopenaeus vannamei</i>	WANG Yun, LI Zheng, LI Jian, et al (5704)

- Responses of desert plant diversity, community and interspecific association to soil salinity gradient ZHANG Xueni, LÜ Guanghui, YANG Xiaodong, et al (5714)
- Community characteristics in a chronosequence of karst vegetation in Mashan county, Guangxi WEN Yuanguang, LEI Liquan, ZHU Hongguang, et al (5723)
- Association between environment and community of *Pinus taiwanensis* in Daiyun Mountain LIU Jinfu, ZHU Dehuang, LAN Siren, et al (5731)
- The dynamics of soil fauna community during litter decomposition at different phenological stages in the subtropical evergreen broad-leaved forests in Sichuan basin WANG Wenjun, YANG Wanqin, TAN Bo, et al (5737)
- Seasonal dynamics and content of soil labile organic carbon of mid-subtropical evergreen broadleaved forest during natural succession FAN Yuexin, YANG Yusheng, YANG Zhijie, et al (5751)
- The stoichiometric characteristics of C, N, P for artificial plants and soil in the hinterland of Taklimakan Desert LI Congjuan, LEI Jiaqiang, XU Xinwen, et al (5760)
- A preliminary investigation on the population and behavior of the Tundra Swan (*Cygnus columbianus*) in Poyang Lake DAI Nianhua, SHAO Mingqin, JIANG Lihong, et al (5768)
- Effects of nutrient enrichment and fish stocking on succession and diversity of phytoplankton community CHEN Chun, LI Sijia, XIAO Lijuan, HAN Boping (5777)
- The depositional environment and organic sediment component of Dagze Co, a saline lake in Tibet, China LIU Shasha, JIA Qinxian, LIU Xifang, et al (5785)
- Spatiotemporal variation of interacting relationships among multiple provisioning and regulating services of Tibet grassland ecosystem PAN Ying, XU Zengrang, YU Chengqun, et al (5794)
- Spatial distribution of dissolved amino acids in Lake Taihu, China YAO Xin, ZHU Guangwei, GAO Guang, et al (5802)
- RS- and GIS-based study on ecological function regionalization in the Chaohu Lake Basin, Anhui Province, China WANG Chuanhui, WU Li, WANG Xinyuan, et al (5808)
- Trends of spring maize phenophases and spatio-temporal responses to temperature in three provinces of Northeast China during the past 20 years LI Zhengguo, YANG Peng, TANG Huaqun, et al (5818)
- Species selection for landscape rehabilitation and their response to environmental factors in Poyang Lake wetlands XIE Dongming, JIN Guohua, ZHOU Yangming, et al (5828)
- Temporal and spatial pattern of the phytoplankton biomass in the Pearl River Delta WANG Chao, LI Xinhui, LAI Zini, et al (5835)
- Spatio-temporal dynamics of land use/land cover and its driving forces in Nanjing from 1995 to 2008 JIA Baoquan, WANG Cheng, QIU Erfa (5848)
- Changes of organic carbon and its labile fractions in topsoil with altitude in subalpine-alpine area of southwestern China QIN Jihong, WANG Qin, SUN Hui (5858)
- The carbon sink of urban forests and efficacy on offsetting energy carbon emissions from city in Guangzhou ZHOU Jian, XIAO Rongbo, ZHUANG Changwei, et al (5865)
- Groundwater salt content change and its simulation based on machine learning model in hinterlands of Taklimakan Desert FAN Jinglong, LIU Hailong, LEI Jiaqiang, et al (5874)
- Analysis of coordination degree between urban development and water resources potentials in arid oasis city XIA Fuqiang, TANG Hong, YANG Degang, et al (5883)
- Constructing an assessment indices system to analyze integrated regional carrying capacity in the coastal zones: a case in Nantong WEI Chao, YE Shufeng, GUO Zhongyang, et al (5893)
- Fish species diversity in Zhongjieshan Islands Marine Protected Area (MPA) LIANG Jun, XU Hanxiang, WANG Weiding (5905)
- Distribution and long-term changes of net-phytoplankton in the tidal freshwater estuary of Changjiang during wet season JIANG Zhibing, LIU Jingjing, LI Hongliang, et al (5917)
- Study of urban metabolic structure based on ecological network: a case study of Dalian LIU Gengyuan, YANG Zhifeng, CHEN Bin, et al (5926)
- Factors influencing of residents' tolerance towards wild boar in and near nature reserve: Taking the Heilongjiang Fenghuangshan Nature Reserve as the example XU Fei, CAI Tiji, JU Cunyong, et al (5935)
- Herdsmen's willingness to participate in ecological protection in Sanjiangyuan Region, China LI Huimei, ZHANG Anlu, WANG Shan, et al (5943)
- Analysis of first flush in rainfall runoff in Shenyang urban city LI Chunlin, LIU Miao, HU Yuanman, et al (5952)

《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,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

本期责任副主编 陈利顶

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 18 期 (2013 年 9 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 33 No. 18 (September, 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