

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

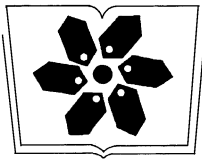
Acta Ecologica Sinica



第33卷 第2期 Vol.33 No.2 **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 2 期 2013 年 1 月 (半月刊)

目次

前沿理论与学科综述

- 岩溶山区水分时空异质性及植物适应机理研究进展..... 陈洪松, 聂云鹏, 王克林 (317)
- 红树林植被对大型底栖动物群落的影响 陈光程, 余 丹, 叶 勇, 等 (327)
- 淡水湖泊生态系统中砷的赋存与转化行为研究进展..... 张 楠, 韦朝阳, 杨林生 (337)
- 纳米二次离子质谱技术(NanoSIMS)在微生物生态学研究中的应用 胡行伟, 张丽梅, 贺纪正 (348)
- 城市系统碳循环: 特征、机理与理论框架 赵荣钦, 黄贤金 (358)
- 城市温室气体排放清单编制研究进展..... 李 晴, 唐立娜, 石龙宇 (367)

个体与基础生态

- 科尔沁沙地家榆林的种子散布及幼苗更新..... 杨允菲, 白云鹏, 李建东 (374)
- 环境因子对木棉种子萌发的影响 郑艳玲, 马焕成, Scheller Robert, 等 (382)
- 五花米草与短叶荳蔻落物分解过程中碳氮磷化学计量学特征 欧阳林梅, 王 纯, 王维奇, 等 (389)
- 性别、季节和体型大小对吐鲁番沙虎巢域的影响 李文蓉, 宋玉成, 时 磊 (395)
- 遮蔽行为对海刺猬摄食、生长和性腺性状的影响..... 罗世滨, 常亚青, 赵 冲, 等 (402)
- 水稻和玉米苗上饲养的稻纵卷叶螟对温度的反应 廖怀建, 黄建荣, 方源松, 等 (409)

种群、群落和生态系统

- 亚热带不同林分土壤表层有机碳组成及其稳定性 商素云, 姜培坤, 宋照亮, 等 (416)
- 禁牧条件下不同类型草地群落结构特征 张鹏莉 陈 俊 崔树娟, 等 (425)
- 高寒退化草地狼毒与赖草种群空间格局及竞争关系 任 珩, 赵成章 (435)
- 小兴安岭 4 种典型阔叶红松林土壤有机碳分解特性 宋 媛, 赵溪竹, 毛子军, 等 (443)
- 新疆富蕴地震断裂带植被恢复对土壤古菌群落的影响 林 青, 曾 军, 张 涛, 等 (454)
- 长期施肥对紫色土农田土壤动物群落的影响 朱新玉, 董志新, 况福虹, 等 (464)
- 潮虫消耗木本植物凋落物的可选择性试验 刘 燕, 廖允成 (475)
- 象山港网箱养殖对近海沉积物细菌群落的影响 裘琼芬, 张德民, 叶仙森, 等 (483)
- 2005 年夏季东太平洋中国多金属结核区小型底栖生物研究 王小谷, 周亚东, 张东声, 等 (492)
- 川西亚高山典型森林生态系统截留水文效应 孙向阳, 王根绪, 吴 勇, 等 (501)

景观、区域和全球生态

- 中国水稻生产对历史气候变化的敏感性和脆弱性 熊 伟, 杨 婕, 吴文斌, 等 (509)
- 1961—2005 年东北地区气温和降水变化趋势 贺 伟, 布仁仓, 熊在平, 等 (519)
- 地表太阳辐射减弱和臭氧浓度增加对冬小麦生长和产量的影响 郑有飞, 胡会芳, 吴荣军, 等 (532)

资源与产业生态

- 基于环境卫星数据的黄河湿地植被生物量反演研究 高明亮, 赵文吉, 官兆宁, 等 (542)
- 黄土高原南麓县域耕地土壤速效养分时空变异 陈 涛, 常庆瑞, 刘 京, 等 (554)

不同水稻栽培模式下小麦秸秆腐解特征及对土壤生物学特性和养分状况的影响..... 武 际,郭熙盛,鲁剑巍,等 (565)

施氮时期对高产夏玉米光合特性的影响 吕 鹏,张吉旺,刘 伟,等 (576)

城乡与社会生态

城市景观组分影响水质退化的阈值研究 刘珍环,李正国,杨 鹏,等 (586)

长株潭地区生态可持续性 戴亚南,贺新光 (595)

外源 NO 对镉胁迫下水稻幼苗抗氧化系统和微量元素积累的影响 朱涵毅,陈益军,劳佳丽,等 (603)

达里诺尔湖沉积物中无机碳的形态组成 孙园园,何 江,吕昌伟,等 (610)

绿洲土 Cd、Pb、Zn、Ni 复合污染下重金属的形态特征和生物有效性 武文飞,南忠仁,王胜利,等 (619)

柠檬酸和 EDTA 对铜污染土壤环境中吊兰生长的影响 汪楠楠,胡 珊,吴 丹,等 (631)

研究简报

海州湾生态系统服务价值评估 张秀英,钟太洋,黄贤金,等 (640)

内蒙古羊草群落、功能群、物种变化及其与气候的关系 谭丽萍,周广胜 (650)

氮磷供给比例对长白落叶松苗木磷素吸收和利用效率的影响 魏红旭,徐程扬,马履一,等 (659)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 352 * zh * P * ¥90.00 * 1510 * 38 * 2013-01



封面图说: 科尔沁沙地榆树——榆树疏林草原属温带典型草原地带,适应半干旱半湿润气候的隐域性沙地顶级植物群落,具有极强的适应性、稳定性,生物产量较高。在我国仅见于科尔沁沙地和浑善达克沙地。是防风固沙、保护沙区生态环境和周边土地资源的一种重要的植物群落类型,是耐旱沙生植物的重要物种基因库和荒漠野生动物的重要避难所和栖息地。这些年来,由于人类毁林开荒、过度放牧、甚至片面地建立人工林群落等的干扰,不同程度地破坏了榆树疏林的生态环境,影响了其特有的生态作用。

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

DOI: 10.5846/stxb201112021844

宋媛, 赵溪竹, 毛子军, 孙涛, 侯玲玲. 小兴安岭 4 种典型阔叶红松林土壤有机碳分解特性. 生态学报, 2013, 33(2): 0443-0453.

Song Y, Zhao X Z, Mao Z J, Sun T, Hou L L. SOC decomposition of four typical broad-leaved Korean pine communities in Xiaoxing' an Mountain. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(2): 0443-0453.

小兴安岭 4 种典型阔叶红松林土壤有机碳分解特性

宋媛, 赵溪竹, 毛子军*, 孙涛, 侯玲玲

(东北林业大学森林植物生态学教育部重点实验室, 哈尔滨 150040)

摘要: 土壤有机碳分解是陆地生态系统碳循环的重要组成部分。主要采用土壤有机碳释放速率的室内培养实验的方法, 并根据三库一级动力学模型, 对小兴安岭地区 4 种典型阔叶红松林的土壤有机碳分解特征及各组分含量进行研究。实验结果如下: (1) 土壤有机碳的分解趋势表现为前期迅速, 后期缓慢, 并且土壤腐殖质层(A)大于淀积层(B); 在 4 种阔叶红松林中, 云冷杉红松林土壤有机碳的分解速率最大, 枫桦红松林最小; 土壤有机碳的分解速率与土壤总有机碳、活性碳及土壤的 C/N 呈显著的正相关关系($P < 0.05$)。 (2) 在土壤 A 层和 B 层, 4 种阔叶红松林的活性碳分别占总有机碳的 0.89%—1.78% 和 1.91%—2.87%, 平均驻留时间为 12—35 d 和 27—58 d。缓效性碳占总有机碳的 22.58%—28.44% 和 23.87%—42.63%, 平均驻留时间为 4—19 a 和 18—37 a。惰性碳占总有机碳的 69.98%—76.24% 和 54.50%—74.22%, 平均驻留时间为 173 a; 土壤有机碳各组分含量及驻留时间的大小顺序均为: 云冷杉红松林>椴树红松林>枫桦红松林>蒙古栎红松林。

关键词: 土壤有机碳分解; 活性碳; 缓效性碳; 惰性碳

SOC decomposition of four typical broad-leaved Korean pine communities in Xiaoxing' an Mountain

SONG Yuan, ZHAO Xizhu, MAO Zijun*, SUN Tao, HOU Lingling

Key Laboratory of Forest Plant Ecology of Ministry of Education, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China

Abstract: Decomposition of soil organic carbon is a critical component of the carbon cycling in terrestrial ecosystem. A 90-day laboratory incubation was conducted to measure CO_2 evolution from four different Korean pine forests in Xiaoxing' an mountain, and the data from the incubation experiment were fitted to a three-pool first-order model that separate mineralizable soil organic carbon (SOC) into active, slow and resistant carbon pools. The combination of laboratory measurement and field experiment were used to investigate SOC content and turnover rate in different forest stands. The results suggested that: (1) Although the decomposition rates of SOC vary widely in the four typical primary Korean pine forest stands, the dynamic change trend of decomposition was similar with the rapid decomposition in the initial incubation stages and slowly declined and tend to a steady state in the end; At A horizon, the decomposition rates followed the order *Picea* sp. -*Abies nephrolepis*-*Pinus koraiensis* forest > *Quercus mongolica*-*Pinus koraiensis* forest > *Tilia amurensis*-*Pinus koraiensis* forest > *Betula costata*-*Pinus koraiensis* forest, *Quercus mongolica*-*Pinus koraiensis* forest and *Tilia amurensis*-*Pinus koraiensis* forest did not display much more difference in SOC decomposition. However, at B horizon, the decomposition rate of *Picea* sp. -*Abies nephrolepis*-*Pinus koraiensis* forest was higher than the other three forests, and the marked difference was not found in the other three forest stands. The decomposition rate of *Picea* sp. -*Abies nephrolepis*-*Pinus koraiensis* forest was maximized and the minimum existed in *Betula costata*-*Pinus koraiensis* forest; The decomposition

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(31070350); “973”国家重点基础研究项目发展计划项目(2010CB951301); 国家教育部博士点基金资助项目(200802250005)

收稿日期: 2011-12-02; 修订日期: 2012-05-22

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zijunm@yahoo.com.cn

rate has a positive relationship with SOC and active carbon organic content and C/N. (2) The active carbon pool accounted for 0.89%—1.78% of SOC with an average MRT of 12—35 d at A horizon, 1.91%—2.87% and 27—58 d at B horizon. The slow carbon pool accounted for 22.58%—28.44% of SOC with an average MRT of 4—19 a at A horizon, 23.87%—42.63% and 16—37 a at B horizon. The Cr pool accounted for 69.98%—76.24% and 54.50%—74.42% of SOC with an average MRT of 173 a at A and B horizon, respectively. The content of Ca and Cs was greater at A horizon than that at B horizon, contrary to the changing tendency, the ratios of Ca to SOC and Cs to SOC increased with increasing depth in the soil profile; The pool size and laboratory mean residence times of SOC decreased in the order: *Picea* sp.-*Abies nephrolepis*-*Pinus koraiensis* forest > *Tilia amurensis*-*Pinus koraiensis* forest > *Betula costata*-*Pinus koraiensis* forest > *Quercus mongolica*-*Pinus koraiensis* forest. At A horizon or B horizon, the size of three carbon pools in *Picea* sp.-*Abies nephrolepis*-*Pinus koraiensis* forest was the biggest, but *Quercus mongolica*-*Pinus koraiensis* forest at high altitude has the lowest content of three kinds of SOC pools. Hence, the content of SOC in different community types has a great relationship with geographical location. In addition to this, the relationship between litterfall biomass and respiration and soil organic carbon content at A horizon further demonstrated that litterfall on the forest floor has an important effect on the soil organic carbon content.

Key Words: soil organic carbon decomposition; active carbon pool; slow carbon pool; Resistant carbon pool

土壤有机碳 SOC(soil organic carbon)是陆地生态系统中最大的有机碳库,全球约有 1400—1500 Pg 碳以有机质形式储存于土壤中,是陆地植被碳库(500—600 PgC)的 2—3 倍^[1-2]。土壤有机碳不仅为植被生长提供碳源、维持土壤良好的物理结构,同时也以 CO₂ 等温室气体的形式向大气释放碳^[3]。森林土壤有机碳约占全球土壤有机碳的 70%^[4],其含量的微小变化都可能导致大气中 CO₂ 的浓度发生巨大变化^[5]。

土壤有机质具有高度的复杂性和异质性,其组成成分包括易分解的微生物、新鲜的植物材料和在土壤中存在几千年的难分解物质^[6],所以,用单一组分或一库来描述整个土壤的分解速率和周转周期是不合理的^[7]。Parton 等根据有机碳周转时间的不同,将其划分为活性碳库(5%,周转时间 0.1—4.5 a),缓效性碳库(60%—85%,周转时间 5—50 a)和惰性碳库(10%—40%,周转时间 50—3000 a)^[6,8],并且土壤有机碳循环动力学模型已经证明用三库一级动力学模型能够合理描述土壤有机碳的分解动态变化^[9]。森林土壤有机碳不同碳库的准确评价是理解土壤碳循环机制和碳库动态变化的重要一步^[10]。

小兴安岭林区是对全球变化敏感的高纬度地区,但是关于该地区土壤有机碳的绝大多数研究都集中在其碳库储存方面,而且多数是利用土壤普查数据和剖面分布图进行的区域尺度的土壤碳估算^[11],基于不同群落类型的土壤有机碳含量的研究很少。此外,土壤有机碳不同组分周转时间各异,传统的研究中往往缺乏对土壤缓效性有机碳和惰性有机碳含量及周转速率的研究。因此,本研究以小兴安岭地区的地带性顶级生态系统(阔叶红松林)为研究对象,选取沿海拔梯度分布的 4 种不同阔叶红松林,其中云冷杉红松林为针叶林占优势,其他 3 种林分为针阔混交林,推测不同群落类型在土壤有机质的组成上会有不同,而且不同海拔梯度下每种林分的温度、湿度、以及其他环境条件可能会有不同,从而对土壤有机碳的含量、组成以及分解产生一定的影响。本项研究的目的是比较分析不同林分以及不同土层下的土壤有机碳分解速率的变化情况,并且最终量化表达土壤有机碳不同组分的含量以及周转速率。研究结果对于预测未来气候变化背景下中国温带地区针阔混交林生态系统的碳循环过程具有重要意义,并最终为正确理解陆地生态系统碳循环过程和准确评估碳排放提供科学依据。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究地概况

实验样地设于伊春地区的丰林国家级自然保护区(129°06′—129°30′E, 47°54′—48°19′N)。海拔 280—683 m,坡度多在 10—25°之间,该区属于温带大陆性季风气候,四季分明,冬季寒冷干燥,夏季短而湿热,年平均温度 -0.5 °C,年平均降水量 650 mm,无霜期约为 120 d 左右,地带性土壤为暗棕壤。该地区为小兴安岭典

型地段,主要森林类型有阔叶红松林、云冷杉林、落叶松林、白桦天然次生林和针叶杂木混交次生林(针混林)等,地带性植被是以红松占优势的阔叶红松林。本实验以该区内 4 种典型阔叶红松林群落类型为研究对象:蒙古栎红松林(QP: *Quercus mongolica*-*Pinus koraiensis* forest)、枫桦红松林(BP: *Betula costata*-*Pinus koraiensis* forest)、椴树红松林(TP: *Tilia amurensis*-*Pinus koraiensis* forest)、云冷杉红松林(PAP: *Picea* sp.-*Abies nephrolepis*-*Pinus koraiensis* forest)。各样地的具体立地情况和植被组成见表 1。

表 1 不同群落类型样地概况

Table 1 General situation of different forest sample plots

群落类型 Community type	纬度 latitude	经度 longitudes	海拔/m Elevation	土层厚度/m Soil thickness	地形 Geography	林分郁闭度 Canopy density	其他组成树种 Other component tree species
蒙古栎红松林 QP	48°07'45"	129°11'15"	577	30—40	阳坡上部 陡坡	0.6	兴安杜鹃(1), 胡枝子(2), 枫桦(3), 紫椴(4)
枫桦红松林 BP	48°07'51"	129°11'12"	514	45—55	半阴坡上部 缓坡	0.8	东北山梅花(5), 光萼溲苏(6), 青楷槭(7), 花楷槭(8), 紫椴(4), 臭冷杉(9), 云杉(10), 水曲柳(11)
椴树红松林 TP	48°07'53"	129°10'54"	440	45—55	半阴坡中下部 缓坡	0.8	东北山梅花(5), 光萼溲苏(6), 刺五加(12), 青楷槭(7), 花楷槭(8), 枫桦(3), 臭冷杉(9), 鱼鳞云杉(13)
云冷杉红松林 PAP	48°07'45"	129°10'51"	388	45—50	半阴坡下部 平地	0.8	青楷槭(7), 花楷槭(8), 枫桦(3)

QP: *Quercus mongolica*-*Pinus koraiensis* forest; BP: *Betula costata*-*Pinus koraiensis* forest; TP: *Tilia amurensis*-*Pinus koraiensis* forest; PAP: *Picea* sp.-*Abies nephrolepis*-*Pinus koraiensis* forest; (1) *Rhododendron dauricum* (2) *Lespedeza bicolor* (3) *Betula costata* (4) *Tilia amurensis* (5) *Philadelphus schrenkii* (6) *Deutzia glabrata* (7) *Acer tegmentosum* (8) *Acer ukurunduense* (9) *Abies nephrolepis* (10) *Picea koraiensis* (11) *Fraxinus mandshurica* (12) *Acanthopanax senticosus* (13) *Picea jezoensis*

1.2 土壤样品的采集与处理

2008 年 8 月上旬,在 4 个群落类型内布设 30 m×30 m 样方,在样方外距离四角 2—3 m 处及样方内的中心位置选定 1 m×1 m 土壤样方,挖取 3 个土壤剖面,剖面深度根据土壤发生层次而定(至母质 C 层为止),每一土层取约 1 kg 土样装入样品袋,带回室内,风干、研磨、过筛后进行土壤有机碳和化学性质测定分析。

1.3 实验方法

1.3.1 土壤有机碳和全氮含量测定

土壤惰性碳的测定采用酸水解法^[12],即称取 2 g 过 2 mm 筛的风干土样于消煮管中,然后加入 6 mol/L HCl 并在 115 ℃ 下消煮 16 h,样品冷却后用蒸馏水洗至中性,再在 55 ℃ 下烘干,研磨过 180 μm 筛,用重铬酸钾容量法-外加热法测得的有机碳即为惰性碳。土壤全氮的测定采用传统的半微量开氏法(K_2SO_4 - $CuSO_4$ -Se 蒸馏法)。

1.3.2 土壤有机碳释放速率的培养实验

采用室内恒温培养、碱液吸收法^[10],即称取过 0.95 mm 风干土样 100 g 于玻璃广口瓶底部,广口瓶的体积为 900 mL 左右,调节含水量为田间持水量 65% 时的需水量(用质量法维持实验期间广口瓶中的土壤含水量),在小烧杯中加入 25 ml 0.4 mol/L NaOH (保证在要求时间内能吸收完释放的 CO_2 ,并有少量盈余),之后将小烧杯放入广口瓶中,同时进行空白实验,然后密封放置在 25 ℃ 的恒温培养箱内,黑暗条件下培养 90 d。培养期间,定期通气,以保证微生物活动所需氧气。在一定时间间隔之后,将吸收液全部抽出并换上新的吸收液,再按上述方法继续培养。抽出的吸收液加 20 mL 的 1 mol/L $BaCl_2$,摇匀后以酚酞为指示剂,用 0.4 mol/L HCl 滴定中和未耗尽的 NaOH,通过 HCl 消耗量来计算 CO_2 的数量,进而求出有机碳的分解量。

1.3.3 凋落物现存量、有机碳含量、呼吸速率的测定

在4个样地(30 m×30 m)的四个角和中心设置5个5 m×5 m样方,在样方内随机选取1个0.5 m×0.5 m的小样方,收集该小样方内的地面凋落物,拣出石块和泥粒等,将样品装入样品袋中并编号,带回实验室,在65℃下烘至恒重后称重,计算其生物量。并将采集的植物样品在植物粉碎机中粉碎,通过0.3—0.5 mm的筛子,用分析天平称取植物样品0.02—0.03 g,放在25 cm×200 cm的硬质试管中。采用重铬酸钾容量法-外加热法测得有机碳。

凋落物呼吸的测定:在每个固定样地(30 m×30 m)内随机选择4个1 m×1 m的小样方,用壕沟隔断法去除凋落物与根系,其内部呼吸速率代表土壤微生物的呼吸速率。同时靠近每个小样方边缘再随机设置高6 cm(清除凋落物)和10 cm(有凋落物)的PVC土壤环各3个,形成1个区组。凋落物呼吸速率等于总呼吸速率减去样方外无枯枝落叶的土壤呼吸速率。具体的实验操作步骤参照陆斌等^[13]的方法。

1.4 数据分析

模型拟合法^[14,9]:本研究应用三库一级动力学模型 $C_{\text{soc}} = C_a e^{-k_a t} + C_s e^{-k_s t} + C_r e^{-k_r t}$ 拟合土壤有机碳的分解动态,利用统计软件 SAS8.2 拟合出活性有机碳和缓效性有机碳含量及平均驻留时间 MRT。式中 C_{soc} 为 t 时的土壤有机碳含量; C_a 和 K_a 为活性有机碳含量和分解速率; C_s 和 K_s 为缓效性有机碳含量和分解速率; C_r 和 K_r 为惰性有机碳含量和分解速率。假设田间土壤惰性碳的平均驻留时间为 1000a, $\text{MRT}_{\text{lab}} = \text{MRT}_{\text{field}}/Q_{10}$, $Q_{10} = 2^{[(25-\text{MRT})/10]}$, 式中, Q_{10} 是温度系数, MAT 为该地区的年平均温度,通过此方程可将田间平均驻留时间 ($\text{MRT}_{\text{field}}$) 转换为实验室平均驻留时间 (MRT_{lab})。同时根据 $K_r = 1/\text{MRT}$ 可计算出惰性碳库的分解速率。利用 90d 培养数据,实验测得 C_{soc} 、 C_r 和假定的 MRT,根据一级动力学方程,用 SAS8.2 中的非线性回归,经过循环迭代,迭代收敛,残差平方和最小,拟合出 C_a 、 K_a 和 K_s 3 个参数的估计值。最后用 $C_s = C_{\text{soc}} - C_a - C_r$, 得到 C_s 。绘图采用 origin8.0 软件完成。

2 结果

2.1 土壤有机碳分解动态

由图1可以看出,虽然在不同的阔叶红松林中,土壤有机碳的分解速率不同,但是其分解动态均呈现相似的变化规律,即在培养前期,分解迅速,之后缓慢下降并基本趋于稳定状态。A层(腐殖质层)土壤在培养实验进行的第2天,云冷杉红松林、蒙古栎红松林和枫桦红松林土壤有机碳的释放速率均达到最大,而椴树红松林的有机碳释放速率却仍在增加,并在第4天达到最大值。在实验进行至第50天时,各阔叶红松林的有机碳

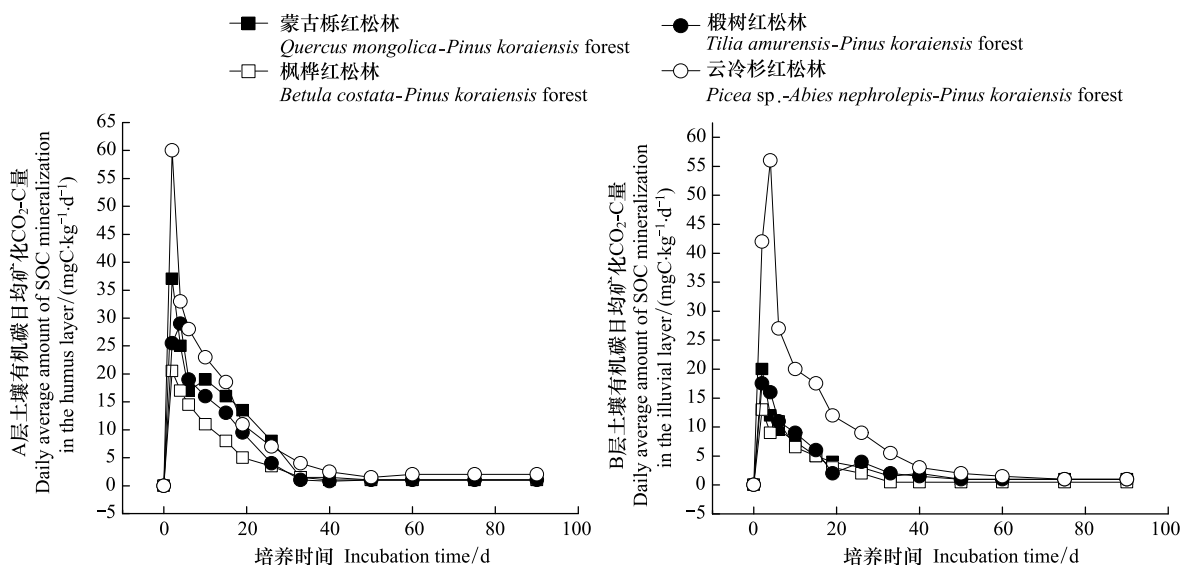


图1 实验室培养条件下小兴安岭地区阔叶红松林土壤有机碳释放速率动态

Fig.1 Decomposition of SOC from four Korean pine-broadleaved forest under Xiaoxing'an Regions in the laboratory

释放速率降至最低,均在 $1 \text{ mgC kg}^{-1} \text{ d}^{-1}$ 左右。B 层(淀积层)土壤有机碳的分解情况表现为:云冷杉红松林土壤有机碳释放速率在第 4 天达到最大,其值为 $56 \text{ mgC kg}^{-1} \text{ d}^{-1}$,而其他 3 种林分在第 2 天就已经达到最大值,分别为:蒙古栎红松林($20 \text{ mgC kg}^{-1} \text{ d}^{-1}$)、椴树红松林($17.5 \text{ mgC kg}^{-1} \text{ d}^{-1}$)和枫桦红松林($13 \text{ mgC kg}^{-1} \text{ d}^{-1}$)。可见各林分 B 层土壤的最大有机碳释放速率均小于 A 层土壤,除此之外,土壤有机碳的分解时间也长于 A 层,在培养的第 75 天才降至最小值,稍微滞后于 A 层。在开始培养的第一周内,A 层的土壤有机碳分解量占总分解量的 57%—62%,而在 B 层该值为 61%—63%,由此可知土壤有机碳的分解主要集中在培养前期。

4 种阔叶红松林不同土壤层有机碳分解规律不同,在 A 层,不同阔叶红松林土壤有机碳分解速率的大小顺序为:云冷杉红松林>蒙古栎红松林>椴树红松林>枫桦红松林,且蒙古栎红松林和椴树红松林之间没有表现出太大的差异,但是在 B 层,云冷杉红松林的分解速率明显大于其他 3 种林分,而这 3 种林分的土壤有机碳分解速率却没有表现出明显不同。

2.2 土壤有机碳各组分含量及周转情况

2.2.1 土壤有机碳各组分含量

本研究表明(表 2),4 种林分 A 层 SOC 的含量在 $86.87\text{—}166.14 \text{ g/kg}$ 之间,B 层 SOC 在 $23.92\text{—}148.28 \text{ g/kg}$ 之间。活性碳的含量分别在 $0.77\text{—}2.95 \text{ g/kg}$ 之间和 $0.69\text{—}2.75 \text{ g/kg}$ 之间,其占总有机碳的 0.89%—1.78% 和 1.91%—2.87%。缓效性碳的含量分别在 $19.87\text{—}37.51 \text{ g/kg}$ 和 $7.76\text{—}35.39 \text{ g/kg}$ 之间,占总有机碳的 22.58%—28.44% 和 23.87%—42.63%。惰性碳的含量分别在 $66.23\text{—}125.67 \text{ g/kg}$ 和 $13.04\text{—}110.05 \text{ g/kg}$ 之间,占总有机碳的 69.98%—76.24% 和 54.50%—74.22%。在 4 种阔叶红松林中,云冷杉红松林在 A 层或 B 层,土壤活性碳、缓效性碳及惰性碳的含量均是最大的,然而位于最高海拔的蒙古栎红松林,其土壤有机碳各组分的含量却是最小的,且与枫桦红松林没有太大差异,而椴树红松林的土壤总有机碳及各组分的含量仅次于云冷杉红松林。虽然 A 层的活性碳和缓效性碳含量大于 B 层,但是其各自占总有机碳的比例却是 A 层小于 B 层。

2.2.2 土壤有机碳各组分在土壤剖面的垂直分布

不同阔叶红松林中,土壤有机碳各组分的分布情况虽然不同,但有机碳各组分在 A 层的含量始终大于 B 层,而且其随土层加深而下降的幅度也有不同,其 B 层相对于 A 层下降的幅度分别为,活性碳:蒙古栎红松林(10.4%)、枫桦红松林(8.9%)、椴树红松林(5.0%)、云冷杉红松林(6.8%),缓效性碳:蒙古栎红松林(48.5%)、枫桦红松林(64.0%)、椴树红松林(6.1%)、云冷杉红松林(5.7%),惰性碳:蒙古栎红松林(80.3%)、枫桦红松林(81.0%)、椴树红松林(39.4%)、云冷杉红松林(12.4%)。由土壤有机碳各组分的下降程度可知,云冷杉红松林和椴树红松林的土壤有机碳在土壤剖面中分布较均匀,而蒙古栎红松林和枫桦红松林的土壤有机碳在土壤剖面分布的稳定性较差。此外,在整体情况下,惰性碳下降最明显,缓效性碳次之,活性碳最小。

2.2.3 土壤有机碳各组分周转情况

由表 2 可知,4 种阔叶红松林土壤有机碳各组分的驻留时间的变化情况与其含量的分布情况一致,即云冷杉红松林>枫桦红松林>椴树红松林>蒙古栎红松林,且在 A 层的驻留时间小于 B 层,由此进一步说明各阔叶红松林土壤 A 层有机碳的分解速率大于 B 层。4 种阔叶红松林土壤活性碳在 A 层和 B 层的驻留时间分别在 12—35 d 和 27—58 d 之间,其中枫桦红松林和椴树红松林的驻留时间差异不大。蒙古栎红松林土壤活性碳的驻留时间在两个土层之间相差 37 d,而枫桦红松林却只相差 8 d。缓效性碳库在 A 层和 B 层的驻留时间分别为 4—19 a 和 16—37 a。枫桦红松林土壤缓效性碳的驻留时间在 A 土层和 B 土层之间相差 21 a,相差时间最少的为椴树红松林,只有 7 a。根据公式可计算出土壤惰性碳的驻留时间为 171 a。

3 讨论

3.1 土壤有机碳分解动态及其影响因素

土壤有机碳的分解主要集中在培养前期,说明土壤有机碳在组成成分上是较复杂的,既有易分解的组分,

表 2 不同阔叶红松林土壤活性、缓效性和惰性有机碳含量及驻留时间

Table 2 Pool sizes and laboratory mean residence times (MRT) of active, slow and resistant soil organic carbon pools under different Korean pine-broadleaved forest

群落类型 Community type	土层 Soil layer	土壤 有机碳 SOC /(g/kg)	活性碳 含量 C_a /(g/kg)	活性碳 占总有机 碳比例 C_a/SOC /%	活性碳 驻留时间 MRT /d	缓效性 碳含量 C_s /(g/kg)	缓效性碳 占总有机 碳比例 C_s/SOC /%	缓效性碳 驻留时间 MRT /a	惰性碳 含量 C_r /(g/kg)	惰性碳占 总有机碳 比例 C_r/SOC /%	惰性碳驻 留时间 MRT/a
蒙古栎红松林 QP	A	86.87± 19.13	0.77	0.89	12	19.87	22.87	4	66.23	76.24	171
	B	23.92± 14.03	0.69	2.87	49	10.23	42.63	16	13.04	54.50	171
枫桦红松林 BP	A	92.93± 13.04	0.90	0.97	19	21.58	23.22	7	70.45	75.81	171
	B	28.85± 4.395	0.82	2.84	27	7.76	41.28	28	13.34	55.92	171
椴树红松林 TP	A	113.09± 4.086	1.79	1.58	20	32.16	28.44	11	79.14	69.98	171
	B	79.86	1.70	2.13	31	30.19	37.80	18	47.97	60.07	171
云冷杉红松林 PAP	A	166.14± 10.77	2.95	1.78	35	37.51	22.58	19	125.67	75.64	171
	B	148.28± 15.41	2.75	1.91	58	35.39	23.87	37	110.05	74.22	171

A:腐殖质层;B:淀积层

也有很难分解的组分,所以将土壤有机碳分为易被微生物分解利用的活性碳和理化性质稳定极难分解的惰性碳以及介于两者之间的缓效性碳是合理的。在培养早期,分解的 SOC 主要来源于由大部分植物残体、相当数量的微生物和周转迅速的微小动物碎片等组成的活性碳^[15],这些物质提供给微生物充足的营养物质,使得微生物活动剧烈,分解速率较快。但是在培养后期,难分解的木质素和纤维素等成分的有机碳占优势,释放给微生物的能源物质缓慢,微生物活动也相应缓和^[7]。在培养实验进行的早期,由于土壤有机质中的活性部分的分解,导致 CO₂ 通量迅速下降,之后稳定性介于活性碳和惰性碳之间的有机碳的分解作用占优势,导致 CO₂ 的释放速率逐渐趋于稳定^[6]。Yang 等^[10]也发现同样的规律。Zhang 等^[16]在中国南方 3 种水稻土的表层土壤有机碳的矿质化作用和 CO₂ 释放的研究中也发现在 114 d 的培养实验中,有机碳的矿质化作用可以分成明显不同的 3 个阶段。在不同群落类型中,A 层土壤有机碳的释放速率大于 B 层,这可能是因为森林的枯枝落叶层不但为土壤层提供大量有机碳,而且使表层土壤具有较高的养分浓度和较好的水分条件,从而为植物细根向表土层聚集提供了良好的条件^[17],而根系分泌物和死亡的根可以为微生物提供能源物质^[18]。夏汉平等^[19]的研究发现在同一土壤剖面,表层的养分含量和微生物数量都明显高于中下层。在半干旱地区的土壤酶活性的剖面分布大多随着深度的增加而降低^[20]。在生长状况不同的云冷杉林中,其土壤酶活性和土壤养分含量均随土层深度的增加而降低^[21]。所以,可能是由于土壤酶以及养分在土壤剖面中的不同分布导致土壤有机碳分解速率发生差异。

研究结果表明,在土壤 A 层,4 种阔叶红松林土壤有机碳分解速率的大小顺序为:云冷杉红松林>蒙古栎红松林>椴树红松林>枫桦红松林,在 B 层,云冷杉红松林的分解速率明显大于其他 3 种林分,而这 3 种林分的土壤有机碳分解速率却没有表现出明显不同。因为土壤孵化实验是在恒定温度和湿度下进行的,温度和湿度不再是影响有机碳分解的主要因素^[7]。有研究认为,在实验室培养条件下,不同群落间土壤有机碳分解动态的差异可能与土壤有机碳的初始含量、C/N 比和土壤的 N 含量不同有关^[22],而且 C/N 相对较高的林地土壤,抗分解能力强,有利于土壤有机碳的累积^[23]。Côté 等^[24]认为不同森林类型土壤有机碳矿质化作用速率的不同是由活性碳库引起的,为此,进行了土壤有机碳的最大分解速率与土壤有机碳的初始含量、活性碳含

量、C/N 比及土壤的 N 含量的相关性分析,结果表明:土壤有机碳的最大分解速率与土壤活性碳及总有机碳的含量均有一个极显著的相关关系($P<0.01$) (图 2);在 4 种阔叶红松林中,无论在土壤 A 层还是 B 层,云冷杉红松林的土壤全氮含量是最多的,分别为 0.68% 和 0.56%,而蒙古栎红松林的土壤全氮量却只有 0.36% 和 0.14% (表 3);在 C/N 方面,云冷杉红松林最高,A 层的 C/N 是 24.35,除与蒙古栎红松林差异不显著外,与其他两种林分的 C/N 比差异显著,各林分 C/N 的大小顺序为:云冷杉红松林>蒙古栎红松林>椴树红松林>枫桦红松林,与 A 层土壤有机碳的分解速率的变化情况一致。云冷杉红松林 B 层的 C/N 也是最大的,与其余 3 种林分差异显著,而后 3 种红松林的 C/N 之间没有显著差异,这与 B 层土壤有机碳分解速率的动态变化规律也是相一致的。土壤有机碳最大释放速率与 C/N 的相关分析结果表明,两者之间有一个极其显著的相关关系($P=0.009$) (图 2),说明土壤较高的 C/N 值可能是影响土壤中有机碳滞留的重要因素^[25],而且其矿质化作用的强度是受基质的性质决定的^[26]。徐侠等^[27]在武夷山不同海拔高度土壤活性有机碳变化的研究中发现土壤有效碳与土壤全氮之间有一个极显著的相关关系,而且不同海拔高度群落类型的土壤有机碳释放速率的变化规律与其土壤中的 C/N 分布情况一致。该结论与本实验的研究结果一致,此外,在姜培坤^[28]的研究中也发现土壤活性碳与土壤全氮之间表现出很好的相关性,由此进一步说明土壤有机质中氮的含量会影响微生物对其分解和利用的速率。

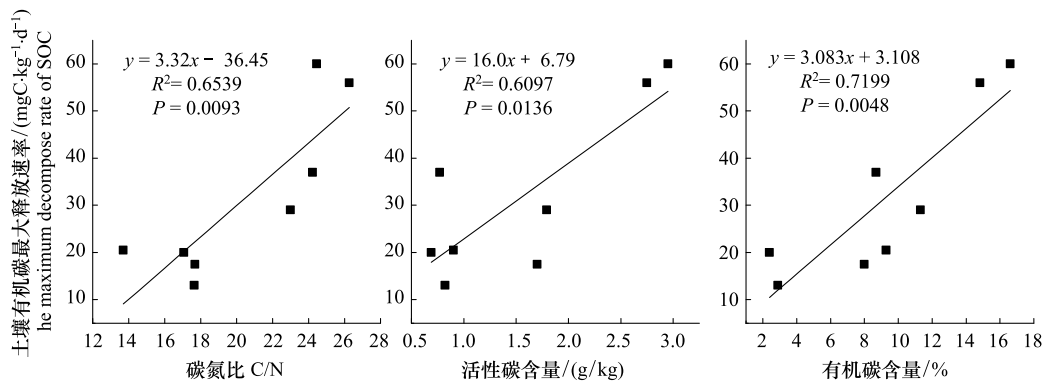


图 2 土壤有机碳释放速率与碳氮比、有机碳含量、活性碳含量的相关关系

Fig. 2 Correlation between decomposition rate of SOC with C/N, active carbon, soil carbon organic

表 3 不同红松林土壤全氮含量及碳氮比

Table 3 Total nitrogen and SOC/TN under different *Pinus koraiensis* forests

群落类型 Community type	土层 Soil thickness	全氮含量/% The content of total nitrogen	碳氮比 C/N
蒙古栎红松 QP	A	0.36±0.06	24.23±2.24a
	B	0.14±0.04	17.07±3.53C
枫桦红松林 BP	A	0.68±0.10	13.71±3.12c
	B	0.16±0.07	17.64±2.85C
椴树红松林 TP	A	0.49±0.08	22.99±4.52b
	B	0.45±0.08	17.69±4.26C
云冷杉红松林 PAP	A	0.68±0.11	24.35±2.37a
	B	0.56±0.09	26.27±4.89A

数值后的大小写字母分别表示 A 层和 B 层不同林分之间土壤的 C/N 比较,字母相同的表示差异不显著 ($P>0.05$, $\alpha=0.05$),字母不同表示差异显著 ($P<0.05$, $\alpha=0.05$)

植物群落间树种组成的差异决定了各群落凋落物的化学属性,如木质素、氮元素、C/N、木质素/N 等不同,而凋落物的上述特性决定了供分解者分解的土壤有机质的性质^[29-31]。凋落物作为外源有机物质,由易分解成分(如糖类、淀粉、脂肪等)和难分解成分(木质素、多酚等)组成,进入土壤后其分解不但会增加土壤中的碳源,改变土壤理化性质,还会增加土壤中各种微生物的数量,改变土壤微生物群落性状,从而对土壤有机碳

矿化产生重要影响。凋落物自身分解特征与土壤有机碳的分解特征相同,均是前期迅速,后期缓慢^[32]。并且有研究表明在凋落物分解的初期,凋落物分解速率的差异是由凋落物中易分解有机物的含量决定的,而与凋落物中的总有机碳含量、全氮含量及 C/N 比等没有直接的关系^[33]。王清奎等^[34]的研究发现添加凋落物显著增加了土壤中可溶性有机碳含量。虽然在本研究中,4 种阔叶红松林的凋落物生物量及有机碳含量均没有表现出显著的差异性($P>0.05$) (表 4),但是仍然可以看出其大致的变化趋势,即与土壤有机碳含量的变化情况一致(表 3),由此说明其与有机碳的分解有一定的联系。对 4 种林分的凋落物呼吸测定结果(表 4)进一步说明了凋落物的化学性质对土壤有机碳的分解具有非常重要的作用。史学军等^[35]也发现麻栎、马尾松和青冈栎 3 种凋落物对土壤有机碳矿化的贡献率都在 80% 以上。

表 4 不同红松林凋落物有机碳含量、现存量和呼吸作用

Table 4 Biomass and organic and respiration of litter under different *Pinus koraiensis* forests

群落类型 Community type	凋落物有机碳含量 The organic carbon content of litter fall / (g/kg)	凋落物现存量 The litter fall biomass / (t/hm ²)	凋落物呼吸 The litter fall respiration / (μmol·m ⁻² ·s ⁻¹)
蒙古栎红松林 QP	560.41±43.73	6.10±0.56	0.28±0.04
枫桦红松林 BP	642.97±37.37	10.98±0.73	0.72±0.06
椴树红松林 TP	626.92±31.67	6.14±0.62	0.79±0.11
云冷杉红松林 PAP	693.20±46.47	9.86±0.49	0.94±0.09

3.2 土壤有机碳各组分含量

4 种阔叶红松林土壤 A 层和 B 层的活性碳分别占总有机碳的 0.89%—1.78% 和 1.91%—2.87%, 平均驻留时间为 12—35 d 和 27—58 d。缓效性碳占总有机碳的 22.58%—28.44% 和 23.87%—42.63%, 平均驻留时间为 4—19 a 和 18—37 a。惰性碳占总有机碳的 69.98%—76.24% 和 54.50%—74.22%。Iqbal 等^[25]发现,林地中的土壤活性有机碳占总有机碳的 0.84%, 平均驻留时间为 49 d, 缓效性碳占总有机碳的 25.27%, 平均驻留时间为 27 a, 惰性碳占总有机碳的 73.88%, 与本研究的结论相符。此外, Yang 等^[10]在中国温带和亚热带森林的土壤有机碳分解和碳库研究中得出如下结论,即在长白山样地的 0—12 cm 土层中的土壤活性碳占总有机碳的 0.93%, 平均驻留时间为 11 d, 缓效性碳占总有机碳的 25.20%, 平均驻留时间为 4 a, 惰性碳占总有机碳的 73.87%, 平均驻留时间为 250 a。邵月红等^[7]也对长白山地区不同森林植被下土壤有机碳各组分的含量及周转速率进行研究,发现针阔混交林下的暗棕壤的土壤有机碳含量在 11.90—103.37 g/kg 之间,活性碳含量在 0.22—0.55 g/kg 之间,平均驻留时间为 17—60 d,缓效性碳含量在 8.23—31.90 g/kg 之间,平均驻留时间为 9—49 a,惰性碳含量在 3.44—70.91 g/kg 之间。

无论在土壤 A 层,还是土壤 B 层,4 种阔叶红松林土壤总有机碳和活性有机碳含量的大小顺序均为:云冷杉红松林>椴树红松林>枫桦红松林>蒙古栎红松林,B 层的 C_a/C_t 和 C_s/C_t 大于 A 层。一般情况下,B 层的土壤有机碳含量较少,主要是由于其来源于少量植物细根、根毛及根系分泌物,或者是从土壤表层下移的较精细的有机质(可能是腐殖质),较难分解。而在本研究中,椴树红松林和云冷杉红松林的土壤 B 层有机碳含量偏高,但是 A 层和 B 层土壤之间的有机碳含量表现出不同,所以本文中所谈及的 B 层很可能是位于土壤 A 层下缘和 B 层上缘之间的土层。在 B 层,云冷杉红松林的活性碳及缓效性碳占总有机碳的比例均比其他林分小,而且,活性碳和缓效性碳的驻留时间也是最长的,除此之外,在 4 种林分中,云冷杉红松林的惰性碳占总有机碳的比例是最大的。这与云冷杉红松林分布地的树种组成及地形特点有关,在组成上,该林分主要组成树种均为常绿针叶树种,凋落叶中难分解的木质素等成分较阔叶树种多^[36],在生境上,该林分位于半阴坡下部,地形平缓,土壤温度较其他 3 种红松林稍低,土壤含水量较高,形成了相对冷湿的环境,所以有机物质容易积累,而且分解较慢。因此,云冷杉红松林的土壤有机碳较其他林分稳定。周玉荣等^[37]的研究发现云冷杉林下的土壤呼吸较弱,形成巨大的土壤碳贮库,是我国森林主要的碳库。然而位于最高海拔的蒙古栎红松林,其土壤总有机碳以及有机碳各组分的含量均是最少的。首先,这可能与蒙古栎的生态习性有关,在自然景观里,因为

蒙古栎对湿度、土壤条件有着比其他大多数森林树种更大的生态耐性或生态幅度,所以其只能在极端的或贫瘠的土壤上才能保持地位^[38]。栎树比较耐旱,在次生林区的冈脊部位,尤其经反复破坏和火烧后,是诸立地类型中最为干旱瘠薄的一类,在这样的立地条件下,惟有栎树最能适应,在短时间内其他树种不可能更替它^[39]。在样地的基本情况调查中,也发现蒙古栎红松林的土层厚度是最薄的只有 30—40 cm。其次,蒙古栎红松林样地位于阳坡上部陡坡,其他 3 种红松林样地均位于半阴坡的缓坡和平地。在坡度较大的情况下,凋落物以及土壤中的有机质容易被雨水带走,不利于有机碳的累积。何志斌等^[40]研究发现阴坡的土壤有机碳含量高于半阴坡和阳坡。此外,渠开跃等^[41]在辽东山区不同林型土壤有机碳剖面分布特征及碳储量研究中也发现,坡度较大的蒙古栎林地的土壤有机碳含量是最少的。

不同阔叶红松林土壤活性碳、缓效性碳和惰性碳的含量都是 A 层> B 层,但是其各自占总有机碳的比例却是 B 层> A 层,这说明森林植被的凋落物主要影响了 A 层土壤,使 A 层土壤的总有机碳含量明显提高,虽然也使活性碳、缓效性碳的含量有所提高,但它主要是增加了总有机碳中的惰性碳含量,从而使得 A 层土壤的活性碳、缓效性碳分别占总有机碳的比例小于 B 层土壤。这与邵月红等^[7]在长白山森林土壤有机碳库大小及周转的研究中得到的结果一致。渠开跃等^[41]也认为由于土壤表层地表枯落物较为丰富,土壤有机质较为丰富,使得表层有机碳含量较高,而在亚表层、底层受地表枯落物的影响较小,有机质相对表层低,因此导致亚表层、底层有机碳含量低于表层。

活性碳、缓效性碳和惰性碳均与土壤总有机碳有一个显著的相关关系($P<0.01$),各自相关程度的大小依次为: $C_r(R^2=0.990, P=0.000)>C_s(R^2=0.866, P=0.01)>C_a(R^2=0.771, P=0.004)$ 。其中活性碳的相关性最小,这是因为在一定的空间范围内,土壤活性碳极易受环境条件变化的影响,易氧化分解,而且由于土壤较高的背景值和较大的空间异质性,总土壤有机碳的微小变化很难被发现,所以活性碳是用来指示土壤有机碳动态变化的一个较有用的指标^[42]。在本研究中,土壤惰性碳随土层深度加大而下降的最明显,而活性碳的下降程度最小。土壤有机碳在土壤剖面表现出下降规律,这与土壤有机碳主要来源于凋落物有关,然而,活性碳含量的下降不仅与土壤总有机碳随土层深度的增加而下降有关,还与 B 层较高的粘粒含量密切相关^[43]。然而 Elzein 等^[44]却发现虽然土壤总有机碳含量随土层深度增加呈现快速的指数下降趋势,但是,性质稳定的土壤有机碳在土壤剖面中却是均匀分布的。这可能与土壤类型和土壤剖面的具体特点有关。

4 结论

实验室培养条件下,土壤有机碳的分解主要集中在培养前期,分解的土壤有机碳的 57%—63% 是在开始培养的第一周内完成的;4 种阔叶红松林腐殖质层土壤有机碳的分解速率均大于淀积层,但是不同林分之间却有差异:在腐殖质层,云冷杉红松林>蒙古栎红松林>椴树红松林>枫桦红松林,但蒙古栎红松林和椴树红松林之间差异不明显,淀积层,云冷杉红松林的分解速率明显大于其他 3 种林分,但是其他 3 种林分间差异不明显。土壤有机碳分解速率与土壤总有机碳、活性碳、及土壤的 C/N 呈正相关。

不同林分土壤腐殖质层的总有机碳、活性碳、缓效性碳和惰性碳的含量明显大于淀积层,但是 3 种土壤有机碳占总有机碳的比例却是腐殖质层小于淀积层,在 4 种红松林中,云冷杉红松林的土壤总有机碳、活性碳、缓效性碳及惰性碳含量最大,相比之下位于高海拔地带的蒙古栎红松林却是最小的,即基于群落类型的土壤有机碳含量的多少与其各自所处的地理位置有很大的关系。凋落物主要增加了土壤表层的有机碳含量,而且主要是增加了惰性碳的含量。

各群落土壤腐殖质层活性碳和缓效性碳的平均驻留时间短于淀积层的平均驻留时间。

References:

- [1] Su Y Z, Zhao H L. Advances in researches on soil organic carbon storages, affecting factors and its environmental effects. *Journal of Desert Research*, 2002, 22(3): 220-228.
- [2] Schlesinger W H. Evidence from chronosequence studies for a low carbon-storage potential of soils. *Nature*, 1990, 348(6298): 232-234.
- [3] Zhou L, Li B G, Zhou G S. Advances in controlling factors of soil organic carbon. *Advances in Earth Science*, 2005, 20(1): 99-105.
- [4] Pan G X, Li L Q, Zhang X H. Perspectives on issues of soil carbon pools and global change—With suggestions for studying organic carbon

- sequestration in paddy soils of China. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2002, 25(3): 100-109.
- [5] Raich J W, Schlesinger W H. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate. *Tellus*, 1992, 44B(2): 81-99.
- [6] Townsend A R, Votousek P M, Trumbore S E. Soil organic matter dynamics along gradients in temperature and land use on the island of Hawaii. *Ecology*, 1995, 36(3): 721-723.
- [7] Shao Y H, Pan J J, Xu X W, Yang L X. Determination of forest soil organic carbon pool sizes and turnover rates in Changbaishan. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2006, 20(6): 99-102.
- [8] Parton W J, Schimel D S, Cole C V, Ojima D S. Analysis of factors controlling soil organic matter levels in great plains grasslands. *Soil Science Society of America Journal*, 51(5): 1173-1179.
- [9] Collins H P, Christenson D R, Blevens R L, Bundy L G, Dick W A, Hunggisand D R, Paul E A. Soil carbon dynamics in corn-based agroecosystems: Results from ^{13}C natural abundance. *Soil Science Society of America Journal*, 1999, 63(3): 584-591.
- [10] Yang L, Pan J, Shao Y, Chen J M, Ju W M, Shi X, Yuan S. Soil organic carbon decomposition and carbon pools in temperate and sub-tropical forests in China. *Journal of Environmental Management*, 2007, 85(3): 690-695.
- [11] Yang J Y, Wang C K. Soil carbon storage and flux of temperate forest ecosystems in northeastern China. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(11): 2875-2882.
- [12] Leavitt S W, Paul E A, Pendall E, Pinter P J Jr, Kimball B A. Field variability of carbon isotopes in soil organic carbon. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, 1997, 123(1/4): 451-454.
- [13] Lu B, Wang S H, Mao Z J, Sun T, Jia G M, Jin S B, Sun P F, Cheng C X. Soil respiration characteristics of four primary Korean pine communities in growing season at Xiaoxing'an mountain, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(15): 4065-4074.
- [14] Leavitt S W, Foorlett R F, Paul E A. Estimation of slow-and fast-cycling soil organic carbon pools from 6N HCl hydrolysis: ^{14}C and soil dynamics: special section = Estimation des cycles lents et rapides des zones de carbone d'origine organique d'hydrolyse de 6N HCl. *Radiocarbon*, 1996, 38(2): 231-239.
- [15] Gody S, Phillip S, Sharon R. Carbon and nitrogen in the light fraction of a forest soil: vertical distribution and seasonal patterns. *Soil Science*, 1983, 135(2): 79-87.
- [16] Zhang X H, Li L Q, Pan G X. Topsoil organic carbon mineralization and CO_2 evolution of three paddy soils from South China and the temperature dependence. *Journal of Environmental Sciences*, 2007, 19(3): 319-326.
- [17] Hendrick R L, Pregitzer K S. Temporal and depth-related patterns of fine root dynamics in northern hardwood forests. *Journal of Ecology*, 1996, 84(2): 167-176.
- [18] Smith J L, Paul E A. The significance of soil microbial biomass estimations // Bollag J M, Stotzky G, eds. *Soil Biochemistry*. New York: Marcel Dekker, 1991: 359-396.
- [19] Xia H P, Yu Q F, Zhang D Q. The soil acidity and nutrient contents and their characteristics of seasonal dynamic changes under 3 different forests of dinghushan nature reserve. *Acta Ecologica Sinica*, 1997, 17(6): 645-653.
- [20] Ding H, Hu H B, Wang R C. The relationships between soil enzyme activity and soil physical-chemical properties or microbial biomass in semi-arid area. *Journal of Nanjing Forestry University: Natural Sciences Edition*, 2007, 31(2): 13-18.
- [21] Chen L M, Man X L. Soil enzymes activities and soil nutrient of Picea and Abies forest. *Science of Soil and Water Conservation*, 2009, 7(4): 94-99.
- [22] Wang Q K, Wang S M, Yu X J, Zhang J, Liu Y X. Soil carbon mineralization potential and its effect on soil active organic carbon in evergreen broadleaved forest and Chinese fir plantation. *Chinese Journal of Ecology*, 2007, 26(12): 1918-1923.
- [23] Jiang Y, Zhang Y G, Liang W J, Wen D Z. Profile distribution and storage of soil organic carbon in an aquic brown soil as affected by land use. *Scientia Agricultura Sinica*, 2005, 38(3): 544-550.
- [24] Côté L, Brown S, Paré, D, Fyles J, Bauhus J. Dynamics of carbon and nitrogen mineralization in relation to stand type, stand age and soil texture in the boreal mixedwood. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, 32(8/9): 1079-1090.
- [25] Iqbal J, Hu R G, Lin S, Ahamadou B, Feng M L. Carbon dioxide emissions from Ultisol under different land uses in mid-subtropical China. *Geoderma*, 2009, 152(1/2): 63-73.
- [26] Diaz-Raviña M, Carballas T, Acea M J. Microbial biomass and metabolic activity in four acid soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 1988, 20(6): 817-823.
- [27] Xu X, Chen Y Q, Wang J S, Fang Y H, Quan W, Ruan H H, Xu Z K. Variations of soil labile organic carbon along an altitude gradient in Wuyi Mountain. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(3): 539-544.
- [28] Jiang P K. Soil active carbon pool under different types of vegetation. *Scientia Silvae Sinicae*, 2005, 41(1): 10-13.
- [29] Berg B, McLaugherty C. Nitrogen release from litter in relation to the disappearance of lignin. *Biogeochemistry*, 1987, 4(3): 219-224.
- [30] Taylor B R, Parkinson D, Parsons W F J. Nitrogen and lignin content as predictors of litter decay rates: a microcosm test. *Ecology*, 1989, 70(1): 97-104.
- [31] Riffaldi R, Saviozzi A, Levi-Minzi R. Carbon mineralization kinetics as influenced by soil properties. *Biology and Fertility of Soils*, 1996, 22(4): 293-298.
- [32] Li Y Q, Xu M, Sun O J, Cui W C. Effects of root and litter exclusion on soil CO_2 efflux and microbial biomass in wet tropical forests. *Soil Biology and Biochemistry*, 2004, 36(12): 2111-2114.
- [33] Wu Q B, Wang X K, Ouyang Z Y. Effects of labile organic carbon on the litters decomposition process. *Ecology and Environment*, 2006, 15(6): 1295-1299.

- [34] Wang Q K, Wang S L, Yu X J, Zhang J, Liu Y X. Effects of *Cunninghamia lanceolata*-broadleaved tree species mixed leaf litters on active soil organic matter. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(6): 1203-1207.
- [35] Shi X J, Pan J J, Chen J S, Yang Z Q, Zhang L M, Su B, Li P Z. Effects of different types of litters on soil organic carbon mineralization. *Chinese Journal of Environmental Science*, 2009, 30(6): 1832-1837.
- [36] Li X F, Han S J, Guo Z L, Zheng X B, Song G Z, Li K X. Decomposition of pine needles and twigs on and under the litter layer in the natural Korean pine broadleaved forests. *Journal of Beijing Forestry University*, 2006, 28(3): 8-13.
- [37] Zhou Y R, Yu Z L, Zhao S D. Carbon storage and budget of major Chinese forest types. *Acta Phytocologica Sinica*, 2000, 24(5): 518-522.
- [38] Gao Z T, Wu X C. Discussion on regulation on geographic distribution in Mengguli. *Protection Forest Science and Technology*, 2005, (2): 83-84.
- [39] Chen D K, Zhou X F, Zhao H X, Wang Y H, Jin Y Y. Study on the structure, function and succession of the four types in natural secondary forest. *Journal of Northeast Forestry University*, 1982, (2): 1-20.
- [40] He Z B, Zhao W Z, Liu H, Su Y Z. Characteristic of *Picea crassifolia* forest soil organic carbon and relationship with environment factors in the Qilian Mountain. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(8): 2572-2577.
- [41] Qu K Y, Feng H M, Dai L M, Zhou L. Profile distribution and storage of soil organic carbon of main forest types in eastern mountainous region of Liaoning. *Chinese Journal of Soil Science*, 2009, 40(6): 1316-1320.
- [42] Powlson D S, Jenkinson D S. A comparison of the organic matter, biomass, adenosine triphosphate and mineralizable nitrogen contents of ploughed and direct-drilled soils. *The Journal of Agricultural Science*, 1981, 97(3): 713-721.
- [43] 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 forest in the mountainous area of Beijing. *Journal of Beijing Forestry University*, 2009, 31(5): 19-24.
- [44] Elzein A, Balesdent J. Mechanistic simulation of vertical distribution of carbon concentrations and residence times in soils. *Soil Science Society of America Journal*, 1994, 59(5): 1328-1335.

参考文献:

- [1] 苏永中, 赵哈林. 土壤有机碳储量、影响因素及其环境效应的研究进展. *中国沙漠*, 2002, 22(3): 220-228.
- [3] 周莉, 李保国, 周广胜. 土壤有机碳的主导影响因子及其研究进展. *地球科学进展*, 2005, 20(1): 99-105.
- [4] 潘根兴, 李恋卿, 张旭辉. 土壤有机碳库与全球变化研究的若干前沿问题——兼开展中国水稻土有机碳固定研究的建议. *南京农业大学学报*, 2002, 25(3): 100-109.
- [7] 邵月红, 潘剑君, 许信旺, 杨丽霞. 长白山森林土壤有机碳库大小及周转研究. *水土保持学报*, 2006, 20(6): 99-102.
- [11] 杨金艳, 王传宽. 东北东部森林生态系统土壤碳贮量和碳通量. *生态学报*, 2005, 25(11): 2875-2882.
- [13] 陆斌, 王淑华, 毛子军, 孙涛, 贾桂梅, 靳世波, 孙鹏飞, 程春香. 小兴安岭 4 种原始红松林群落类型生长季土壤呼吸特征. *生态学报*, 2010, 30(15): 4065-4074.
- [19] 夏汉平, 余清发, 张德强. 鼎湖山 3 种不同林型下的土壤酸度和养分含量差异及其季节动态变化特性. *生态学报*, 1997, 17(6): 645-653.
- [20] 丁茜, 胡海波, 王人潮. 半干旱区土壤酶活性与其理化及微生物的关系. *南京林业大学学报: 自然科学版*, 2007, 31(2): 13-18.
- [21] 陈立明, 满秀玲. 云冷杉林土壤酶活性与土壤养分的研究. *中国水土保持科学*, 2009, 7(4): 94-99.
- [22] 王清奎, 汪思龙, 于小军, 张剑, 刘燕新. 常绿阔叶林与杉木林的土壤碳矿化潜力及其对土壤活性有机碳的影响. *生态学杂志*, 2007, 26(12): 1918-1923.
- [23] 姜勇, 张玉革, 梁文举, 闻大中. 潮棕壤不同利用方式有机碳剖面分布及碳储量. *中国农业科学*, 2005, 38(3): 544-550.
- [27] 徐侠, 陈月琴, 汪家社, 方燕鸿, 权伟, 阮宏华, 徐自坤. 武夷山不同海拔高度土壤活性有机碳变化. *应用生态学报*, 2008, 19(3): 537-544.
- [28] 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): 10-13.
- [33] 吴庆标, 王效科, 欧阳志云. 活性有机碳含量在凋落物分解过程中的作用. *生态环境*, 2006, 15(6): 1295-1299.
- [34] 王清奎, 汪思龙, 于小军, 张剑, 刘燕新. 杉木与阔叶树叶凋落物混合分解对土壤活性有机质的影响. *应用生态学报*, 2007, 18(6): 1203-1207.
- [35] 史学军, 潘剑君, 陈锦盈, 杨志强, 张黎明, 孙波, 李佩忠. 不同类型凋落物对土壤有机碳矿化的影响. *环境科学*, 2009, 30(6): 1832-1837.
- [36] 李雪峰, 韩士杰, 郭忠玲, 郑兴波, 宋国正, 李考学. 红松阔叶林内凋落物表层与底层红松枝叶的分解动态. *北京林业大学学报*, 2006, 28(3): 8-13.
- [37] 周玉荣, 于振良, 赵士洞. 我国主要森林生态系统碳贮量和碳平衡. *植物生态学报*, 2000, 24(5): 518-522.
- [38] 高志涛, 吴晓春. 蒙古栎地理分布规律的探讨. *防护林科技*, 2005, (2): 83-84.
- [39] 陈大珂, 周晓峰, 赵惠勋, 王义弘, 金永岩. 天然次生林四个类型的结构、功能及演替. *东北林业大学学报*, 1982, (2): 1-20.
- [40] 何志斌, 赵文智, 刘鸽, 苏永中. 祁连山青海云杉林斑表层土壤有机碳特征及其影响因素. *生态学报*, 2006, 26(8): 2572-2577.
- [41] 渠开跃, 冯慧敏, 代力民, 周莉. 辽东山区不同林型土壤有机碳剖面分布特征及碳储量研究. *土壤通报*, 2009, 40(6): 1316-1320.
- [43] 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): 19-24.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol.33 ,No.2 January ,2013(Semimonthly)

CONTENTS

Frontiers and Comprehensive Review

- Spatio-temporal heterogeneity of water and plant adaptation mechanisms in karst regions; a review CHEN Hongsong, NIE Yunpeng, WANG Kelin (317)
- Impacts of mangrove vegetation on macro-benthic faunal communities CHEN Guangcheng, YU Dan, YE Yong, et al (327)
- Advance in research on the occurrence and transformation of arsenic in the freshwater lake ecosystem ZHANG Nan, WEI Chaoyang, YANG Linsheng (337)
- Application of nano-scale secondary ion mass spectrometry to microbial ecology study HU Hangwei, ZHANG Limei, HE Jizheng (348)
- Carbon cycle of urban system; characteristics, mechanism and theoretical framework ZHAO Rongqin, HUANG Xianjin (358)
- Research and compilation of urban greenhouse gas emission inventory LI Qing, TANG Lina, SHI Longyu (367)

Autecology & Fundamentals

- Seed dispersal and seedling recruitment of *Ulmus pumila* woodland in the Keerqin Sandy Land, China YANG Yunfei, BAI Yunpeng, LI Jiandong (374)
- Influence of environmental factors on seed germination of *Bombax malabaricum* DC. ZHENG Yanling, MA Huancheng, Scheller Robert, et al (382)
- Carbon, nitrogen and phosphorus stoichiometric characteristics during the decomposition of *Spartina alterniflora* and *Cyperus malaccensis* var. *brevifolius* litters OUYANG Linmei, WANG Chun, WANG Weiqi, et al (389)
- Home range of *Teratoscincus roborowskii* (Gekkonidae): influence of sex, season, and body size LI Wenrong, SONG Yucheng, SHI Lei (395)
- Effects of the covering behavior on food consumption, growth and gonad traits of the sea urchin *Glyptocidaris crenularis* LUO Shibin, CHANG Yaqing, ZHAO Chong, et al (402)
- Biological response of the rice leaffolder *Cnaphalocrocis medinalis* (Güenée) reared on rice and maize seedling to temperature LIAO Huaijian, HUANG Jianrong, FANG Yuansong, et al (409)

Population, Community and Ecosystem

- Composition and stability of organic carbon in the top soil under different forest types in subtropical China SHANG Suyun, JIANG Peikun, SONG Zhaoliang, et al (416)
- The community characteristics of different types of grassland under grazing prohibition condition ZHANG Pengli, CHEN Jun, CUI Shujuan, et al (425)
- Spatial pattern and competition relationship of *Stellera chamaejasme* and *Aneurolepidium dasystachys* population in degraded alpine grassland REN Heng, ZHAO Chengzhang (435)
- SOC decomposition of four typical broad-leaved Korean pine communities in Xiaoxing' an Mountain SONG Yuan, ZHAO Xizhu, MAO Zijun, et al (443)
- The influence of vegetation restoration on soil archaeal communities in Fuyun earthquake fault zone of Xinjiang LIN Qing, ZENG Jun, ZHANG Tao, et al (454)
- Effects of fertilization regimes on soil faunal communities in cropland of purple soil, China ZHU Xinyu, DONG Zhixin, KUANG Fuhong, et al (464)
- Woody plant leaf litter consumption by the woodlouse *Porcellio scaber* with a choice test LIU Yan, LIAO Yuncheng (475)
- The bacterial community of coastal sediments influenced by cage culture in Xiangshan Bay, Zhejiang, China QIU Qiongfeng, ZHANG Demin, YE Xiansen, et al (483)
- A study of meiofauna in the COMRA's contracted area during the summer of 2005 WANG Xiaogu, ZHOU Yadong, ZHANG Dongsheng, et al (492)
- Hydrologic regime of interception for typical forest ecosystem at subalpine of Western Sichuan, China SUN Xiangyang, WANG Genxu, WU Yong, et al (501)

Landscape, Regional and Global Ecology

- Sensitivity and vulnerability of China's rice production to observed climate change XIONG Wei, YANG Jie, WU Wenbin, et al (509)

- Characteristics of temperature and precipitation in Northeastern China from 1961 to 2005 HE Wei, BU Rencang, XIONG Zaiping, et al (519)
- Combined effects of elevated O₃ and reduced solar irradiance on growth and yield of field-grown winter wheat ZHENG Youfei, HU Huifang, WU Rongjun, et al (532)
- Resource and Industrial Ecology**
- The study of vegetation biomass inversion based on the HJ satellite data in Yellow River wetland GAO Mingliang, ZHAO Wenji, GONG Zhaoning, et al (542)
- Temporal and spatial variability of soil available nutrients in arable Lands of Heyang County in South Loess Plateau CHEN Tao, CHANG Qingrui, LIU Jing, et al (554)
- Decomposition characteristics of wheat straw and effects on soil biological properties and nutrient status under different rice cultivation WU Ji, GUO Xisheng, LU Jianwei, et al (565)
- Effects of nitrogen application stages on photosynthetic characteristics of summer maize in high yield conditions LÜ Peng, ZHANG Jiwang, LIU Wei, et al (576)
- Urban, Rural and Social Ecology**
- The degradation threshold of water quality associated with urban landscape component LIU Zhenhuan, LI Zhengguo, YANG Peng, et al (586)
- Ecological sustainability in Chang-Zhu-Tan region; a prediction study DAI Yanan, HE Xinguang (595)
- The effect of exogenous nitric oxide on activities of antioxidant enzymes and microelements accumulation of two rice genotypes seedlings under cadmium stress ZHU Hanyi, CHEN Yijun, LAO Jiali, et al (603)
- Forms composition of inorganic carbon in sediments from Dali Lake SUN Yuanyuan, HE Jiang, LÜ Changwei, et al (610)
- Fractionation character and bioavailability of Cd, Pb, Zn and Ni combined pollution in oasis soil WU Wenfei, NAN Zhongren, WANG Shengli, et al (619)
- Effects of CA and EDTA on growth of *Chlorophytum comosum* in copper-contaminated soil WANG Nannan, HU Shan, WU Dan, et al (631)
- Research Notes**
- Values of marine ecosystem services in Haizhou Bay ZHANG Xiuying, ZHONG Taiyang, HUANG Xianjin, et al (640)
- Variations of *Leymus chinensis* community, functional groups, plant species and their relationships with climate factors TAN Liping, ZHOU Guangsheng (650)
- The effect of N:P supply ratio on P uptake and utilization efficiencies in *Larix olgensis* Henry. seedlings WEI Hongxu, XU Chengyang, MA Lüyi, et al (659)

《生态学报》2013 年征订启事

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

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,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

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 2 期 (2013 年 1 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 33 No. 2 (January, 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

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 90.00 元