

中国百种杰出学术期刊
中国精品科技期刊
中国科协优秀期刊
中国科学院优秀科技期刊
新中国 60 年有影响力的期刊
国家期刊奖

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica

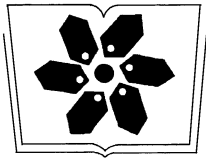
(Shengtai Xuebao)

第 31 卷 第 1 期
Vol.31 No.1
2011



中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 31 卷 第 1 期 2011 年 1 月 (半月刊)

目 次

青藏高原东缘林线杜鹃-岷江冷杉原始林的空间格局	缪 宁, 刘世荣, 史作民, 等 (1)
季风常绿阔叶林不同恢复阶段藤本植物的物种多样性比较	李帅锋, 苏建荣, 刘万德, 等 (10)
越冬和复苏时期太湖水体蓝藻群落结构的时空变化	顾婷婷, 孔繁翔, 谭 啸, 等 (21)
海南新村湾海草床主要鱼类及大型无脊椎动物的食源	樊敏玲, 黄小平, 张大文, 等 (31)
广西涠洲岛造礁珊瑚种群结构的空间分布	梁 文, 张春华, 叶祖超, 等 (39)
宽窄行栽植模式下三倍体毛白杨根系分布特征及其与根系吸水的关系	席本野, 王 烨, 贾黎明, 等 (47)
干旱河谷-山地森林交错带土壤水分与养分特征	刘 彬, 罗承德, 张 健, 等 (58)
信号分子水杨酸减缓干旱胁迫对紫御谷光合和膜脂过氧化的副效应	易小林, 杨丙贤, 宗学凤, 等 (67)
UV-B 辐射对南方红豆杉生活史型和紫杉烷类含量的影响	于景华, 李德文, 庞海河, 等 (75)
模拟氮沉降对石栎和苦槠幼苗土壤呼吸的影响	李 凯, 江 洪, 由美娜, 等 (82)
环渤海湾地区连作苹果园土壤中酚酸类物质变化	孙海兵, 毛志泉, 朱树华 (90)
不同施肥方法对马来沉香和土沉香苗期根系生长的影响	王 冉, 李吉跃, 张方秋, 等 (98)
秋华柳和枫杨幼苗对镉的积累和耐受性	贾中民, 魏 虹, 孙晓灿, 等 (107)
祁连山北坡退化林地植被群落的自然恢复过程及土壤特征变化	赵成章, 石福习, 董小刚, 等 (115)
中国北方农牧交错带 C3 草本植物 $\delta^{13}\text{C}$ 与温度的关系及其对水分利用效率的指示	刘贤赵, 王国安, 李嘉竹, 等 (123)
不同退耕模式细根(草根)分解过程中 C 动态及土壤活性有机碳的变化	荣 丽, 李守剑, 李贤伟, 等 (137)
黑龙江省完达山东部林区东北虎猎物生物量	周绍春, 张明海, 孙海义 (145)
生态保护项目对大熊猫栖息地的影响	张玉波, 王梦君, 李俊清 (154)
石灰和 EM 处理条件下土壤动物群落在落叶分解中的变化	高梅香, 张雪萍 (164)
基于 EPG 的麦长管蚜、麦二叉蚜和禾谷缢管蚜取食行为比较	苗 进, 武予清, 郁振兴, 等 (175)
对映-贝壳杉烷型二萜类化合物对土壤纤毛虫群落的毒性效应	宁应之, 杜海峰, 王红军 (183)
红脂大小蠹种群空间格局地统计学分析及抽样技术	潘 杰, 王 涛, 宗世祥, 等 (195)
山西不同生态型大豆种质资源蛋白亚基的变异	王燕平, 李贵全, 郭数进, 等 (203)
施肥和覆膜垄沟种植对旱地小麦产量及水氮利用的影响	李廷亮, 谢英荷, 任苗苗, 等 (212)
近 40a 甘肃省气候生产潜力时空变化特征	罗永忠, 成自勇, 郭小芹 (221)
基于 GIS 的农村住区生态重要性空间评价及其分区管制——以兴国县长冈乡为例	谢花林, 李秀彬 (230)
农户收入差异对生活用能及生态环境的影响——以江汉平原为例	杨 振 (239)
河北省耕地生态经济系统能值指标空间分布差异及其动因	王 千, 金晓斌, 周寅康, 等 (247)
土地利用对石漠化地区土壤团聚体有机碳分布及保护的影响	罗友进, 魏朝富, 李 渝, 等 (257)
专论与综述	
景观格局-土壤侵蚀研究中景观指数的意义解释及局限性	刘 宇, 吕一河, 傅伯杰 (267)
美国煤矿废弃地的生态修复	张成梁, B. Larry Li (276)
农田土壤食物网管理的原理与方法	陈云峰, 胡 诚, 李双来, 等 (286)
学术信息与动态	
旱地、荒漠和荒漠化: 探寻恢复之路 —— 第三届国际荒漠化会议述评	吕一河, 傅伯杰 (293)

不同退耕模式细根(草根)分解过程中 C 动态及土壤活性有机碳的变化

荣 丽^{1,2}, 李守剑³, 李贤伟^{1,*}, 张 健¹, 王 鹏¹

(1. 四川农业大学 长江上游生态林业工程四川省重点实验室, 四川雅安 625014; 2. 云南大学亚洲国际河流中心, 昆明 650091;
3. 四川省林业勘察设计研究院, 成都 610081)

摘要: 由于土壤活性有机碳可以在土壤全碳变化之前反映土壤因管理措施和环境引起的微小的变化, 又直接参与土壤微生物化学转化过程, 对土壤碳平衡和土壤化学、土壤肥力保持具有重要意义。因此, 采用原状土芯(intact core)法, 探讨了 4 种退耕还林模式——光皮桦(*Betula luminifera*)与扁穗牛鞭草(*Hemarthria compressa*)复合模式、扁穗牛鞭草草地、柳杉(*Cryptomeria fortunei*)人工林、光皮桦人工林细根(草根)分解过程中的 C 动态以及土壤活性有机碳变化。研究表明, 各模式细根(草根)中的 C 表现为净释放, 其质量残留率符合单指数模型($P < 0.01$)。光皮桦与扁穗牛鞭草复合模式下的土壤微生物量碳(SMBC)、水溶性有机碳(WSOC)、易氧化碳(ROC)、总有机碳(TOC)都大于其他 3 种模式。4 种模式下的 SMBC 对土壤 TOC 的贡献分别是 1.2%—3.3%、0.7%—1.5%、0.8%—2.2%、0.5%—0.8%; 光皮桦与扁穗牛鞭草复合模式的 ROC/TOC 大于其他 3 种模式; 各模式土壤 ROC 含量与土壤 TOC 呈极显著正相关关系($P < 0.05$)。以上结果显示, 与其他人工林相比, 光皮桦与扁穗牛鞭草复合模式土壤有机碳活性大、易转化, 土壤总有机碳的高低决定了易氧化碳的丰缺。

关键词: 退耕还林; 细根(草根); C 动态; 土壤活性有机碳; 分解

Carbon dynamics of fine root (grass root) decomposition and active soil organic carbon in various models of land use conversion from agricultural lands into forest lands

RONG Li^{1,2}, LI Shoujian³, LI Xianwei^{1,*}, ZHANG Jian¹, WANG Peng¹

1 Sichuan Agriculture University, Forestry Ecological Engineering in Upper Reaches of Yangtze River Key Laboratory of Sichuan Province, Ya'an Sichuan 625014, China

2 Asian International Rivers Center, Yunnan University, Kunming 650091, China

3 Sichuan Forestry Exploration and Design Institute, Chengdu 610081, China

Abstract: Active soil organic carbon, derived from the decomposition of litter, root exudates, soil organic matter hydrolyzation, soil microbe per se and its metabolite is the active fraction of soil organic matter. Despite of the lower percent of the active soil organic carbon to the total soil organic matter, it was a more sensitive indicator of the soil effects caused by management and environmental changes. Therefore, active soil organic carbon was a critical component in maintaining the balance of soil organic carbon and soil fertility. The production, turnover and decomposition of fine roots are major process in the carbon and nutrient dynamics. The input of nutrients and organic matter to the soil by fine roots contributes to the soil fertility and carbon sequestration. Most previous studies focused on the soil organic carbon in plantations converted from agricultural lands, however, little information was available on the active soil organic carbon during the process decomposition process of fine root (grass root). The carbon dynamic of fine roots (grass roots) decomposition and soil microbial biomass carbon (SMBC), water soluble organic carbon (WSOC), readily oxidizable carbon (ROC) and total

基金项目: 国家自然科学基金项目(30771717); 国家“十一五”科技支撑项目(2006BAC01A11); 四川农业大学长江上游植被恢复与重建创新项目共同资助

收稿日期: 2010-03-17; **修订日期:** 2010-12-11

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lxw@sicau.edu.cn

organic carbon (TOC) in land use conversion from agricultural lands into forest lands were evaluated by the intact core methods in the present study. 560 intact soil cores were sampled from the plots of four models viz. *Betula luminifera*-*Hemarthria compressa* mixed pattern, *Betula luminifera* plantation, *Hemarthria compressa* grassland and *Cryptomeria fortunei* plantation for one year. After being placed in nylon bags, these intact soil cores were put back to the soil and collected again after 30, 90, 180, 270 and 365 d. Soil microbial biomass carbon (SMBC), water soluble organic carbon (WSOC), readily oxidizable carbon (ROC), total organic carbon (TOC) were then measured for each sample. The results showed that fine roots (grass roots) released net carbon during the decomposition in four models. Carbon loss of decomposing roots was fit by a single exponential decay model. SMBC, WSOC, ROC and TOC content were higher in *Betula luminifera*-*Hemarthria compressa* mixed pattern ($P < 0.05$) than other three models. The contribution ratio of SMBC to TOC were 1.2%—3.3%、0.7%—1.5%、0.8%—2.2%、0.5%—0.8%, respectively across the four models. ROC/TOC in *Betula luminifera*-*Hemarthria compressa* mixed pattern was also highest among the four plantations. Moreover, ROC content was positively correlated with TOC content among the four models ($P < 0.05$). The results indicated that soil organic carbon in *Betula luminifera*-*Hemarthria compressa* mixed pattern was much easier to be transformed compared to the other three plantations, and the ROC content in the four models depended on the content of TOC at sites with similar environmental conditions.

Key Words: conversion of agricultural lands to forest (grass) lands; fine root (grass root); carbon dynamics; active soil organic carbon; decomposition

土壤活性有机碳来源于植物凋落物的分解、根系分泌物、土壤有机质的水解、土壤微生物本身及代谢产物。沈宏等^[1]认为土壤活性有机碳是在一定时空条件下受植物、微生物影响强烈、具有一定溶解性,且在土壤中移动较快、不稳定、易氧化、易矿化,其形态和空间位置对植物和微生物有较高活性的那部分土壤碳素。Biederbeck 等^[2]认为,土壤有机质的短暂波动主要发生在土壤有机碳(SOC)的易分解部分,因此土壤碳动态研究过程中,土壤活性有机碳的研究一直受到重视。虽然土壤活性有机碳只占土壤有机碳总量的较小部分,但由于它可以在土壤全碳变化之前反映土壤因管理措施和环境引起的微小的变化,又直接参与土壤微生物化学转化过程,同时,也是土壤微生物活动能源和土壤养分的驱动力,因而它对土壤碳平衡和土壤化学、土壤肥力保持具有重要意义。

细根通常是指直径小于 2—5 mm 的根(包括菌根),同时也有研究者把其定义为没有次生加厚的根^[3]。本研究将直径小于 2 mm 的根作为细根。细根周转形成的地下凋落物,是土壤有机碳和营养的重要来源,在许多生态系统中是土壤有机碳库的主要形式之一^[4],通过根向土壤输入的营养和有机物是土壤肥力和碳封存的一个重要方面。林木根系主要通过 3 条途径向土壤输入碳:一是根系死亡后残体通过分解腐殖化形成土壤有机质;二是植物生长过程中根系或共生菌丝分泌物或脱落物,如根毛、代谢的细根;三是根共生菌周转^[5]。在以上 3 条途径中,根系分解所产生的碳占土壤有机碳库来源的 30%—60%^[6]。在某些生态系统中,由于细根比地上凋落物的年输入更多、腐烂得更快,细根分解所归还的碳甚至可能比地上凋落物所归还的高 4—5 倍^[7],因此细根分解是土壤碳循环的主要调解因素^[8]。目前,由于研究方法和技术的局限性,对根源可溶性化合物(如水溶物和低分子量的分泌物)和高分子量的不溶物(如胶粘物和死根残留物)数量不知,以及根系分泌物组分分离技术不够成熟,因此对根共生菌和分泌物等大都停留在定性研究的水平,在现有条件下基础上进行研究则有一定难度^[9]。因此,选择研究细根分解过程中土壤活性有机碳的变化具有现实意义,有助于进一步揭示人工林地力自我培肥能力及其调控机理,以及对调控森林吸收碳能力具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于四川省重点退耕还林示范区洪雅县柳江镇苦竹岗,该地区地理坐标为 103°38' E, 29°95' N,

海拔 600—700 m, 属中亚热带湿润山地季风气候。年内降水分配不均, 主要集中于 5—9 月份。图 1 为 2006 年 8 月—2008 年 8 月的月气温和月降雨量。地貌以低山丘陵为主, 土壤类型为酸性紫色土, 土壤层平均厚度 50 cm, pH 值 4.9—5.6。2000 年 1 月退耕后, 2 月完成光皮桦 (*Betula luminifera*) 和柳杉 (*Cryptomeria fortunei*) 的造林工作, 株行距分别为 3 m × 2 m 和 3 m × 3 m, 造林后不再施肥。9 月上旬在光皮桦造林地上采用种苗扦插方法进行无性繁殖扁穗牛鞭草 (*Hemarthria compressa*), 株行距为 5 cm × 30 cm。扦插后, 施 1 次农家肥。每年刈割 4 次左右, 每次刈割后施少量农家肥, 全年不进行灌溉。采样地为坡改梯形成的水平台状旱地, 4 种模式退耕前均为农耕地, 以种植玉米 (*Zea mays*)、红薯 (*Ipomoea batatas*)、白菜 (*Brassica rapa*)、辣椒 (*Capsicum frutescens*) 为主, 耕作方式主要是轮作。

1.2 研究方法

1.2.1 2007 年 8 月初, 在尽量保证海拔、坡度、坡向一致的条件下选取位置相互毗邻的光皮桦与扁穗牛鞭草复合模式 (HN)、光皮桦人工林模式 (H)、扁穗牛鞭草牧草地模式 (NC)、柳杉人工林模式 (LS) 4 种退耕还林模式。具体的研究方法、试验地概况和理化性质、各模式细根(草根)初始化学成分含量详见文献^[10-11]。

1.2.2 测定方法

将挑拣根后的土壤混合, 一部分置于 4℃ 的冰箱保存, 用于测定土壤微生物量碳 (SMBC) 与土壤水溶性碳 (WSOC); 剩下的置于通风处风干, 用于测定土壤总有机碳 (TOC) 和土壤易氧化碳 (ROC)。

SMBC 的测定: 采用氯仿熏蒸- K_2SO_4 提取法^[15-16]。将新鲜土过 2 mm 筛后, 取两份 10 g 土样(每份土壤各重复 3 次), 置于 100 mL 烧杯中, 一份进行氯仿熏蒸, 一份不进行熏蒸。将装有要熏蒸土壤的烧杯放入真空干燥箱中, 并放置盛有去乙醇氯仿(约 2/3 烧杯)的烧杯 3 只, 烧杯内放入少量石英砂, 防止暴沸。同时放入一烧杯稀 NaOH 溶液以吸收熏蒸期间释放出来的 CO_2 。真空度控制在 -0.07 MPa 以下, 使氯仿剧烈沸腾 2 min, 关闭真空干燥器阀门, 在 25℃ 恒温培养 24 h。培养结束后将氯仿移去, 再反复抽真空以驱除土壤中残留氯仿。向熏蒸后的土壤加入 0.5 mol/L K_2SO_4 (土水比为 1:4), 在往复式振荡机上振荡 30 min, 用中速定量滤纸过滤, 然后用 0.45 μm 滤膜抽滤^[14]。未熏蒸的土壤直接加入 0.5 mol/L K_2SO_4 溶液提取。土壤提取液过滤后直接在总有机碳分析仪 (TOC-V_{CPH}, Shimadzu) 上直接测定。

SMBC 的计算采用公式: $Bc = Ec/k_{EC}$

式中, Ec 为熏蒸与未熏蒸土壤的差值; k_{EC} 为转化系数, 取值 0.45。

TOC 采用重铬酸钾氧化-外加热法^[12]。ROC 按参考文献^[13]、WSOC 根据参考文献^[14]测定。

1.2.3 数据处理与统计分析

数据分析采用 Office Excel 2003 和 DPS 6.55 统计软件。研究期间, 细根(草根)分解速率数据参见文献^[11]。各模式 SMBC、WSOC、ROC、TOC 之间的差异采用单因素方差分析 (One-Way ANOVA), 如果差异显著, 再采用 LSD 法进行多重比较分析, 然后经过 t 检验 ($P < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 细根分解过程中 C 动态

在以往报道中^[11], 4 种模式细根(草根)质量损失在分解前 90 d 内最快, 然后进入缓慢阶段。在研究期间, NC 模式下的扁穗牛鞭草草根分解最快, LS 的细根分解最慢, HN 介于 H 与 NC 之间。4 种模式细根(草

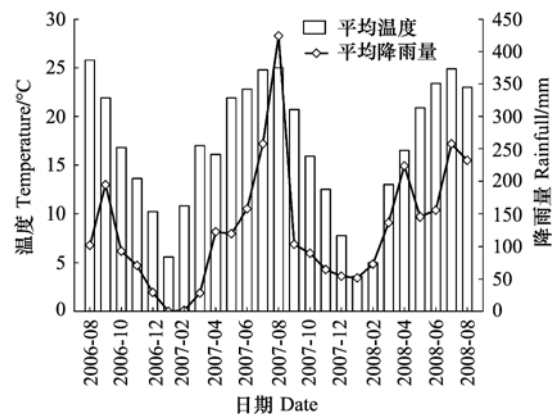


图 1 研究区 2006 年 8 月—2008 年 8 月月均气温和月降雨量

Fig. 1 Monthly mean air temperature and rainfall in study area from 2006.8 to 2008.8

根) C 初始浓度的大小顺序为 $LS > H > HN > NC$ ($P < 0.05$) (图 2)。分解 90 d 后, 4 种模式细根 C 浓度显著下降, NC 模式草根含量最小, LS 模式细根含量最大, 但各模式之间 C 含量差异不显著 ($P > 0.05$)。分解 1a 后 C 残留率大小为: $LS(39.47\%) > H(30.50\%) > HN(21.29\%) > NC(19.69\%)$ ($P < 0.01$), 这就说明了, 4 种模式中细根(草根)分解向土壤释放的 C 可能取决于细根(草根)的质量, 而不是 C 含量。各模式细根(草根) C 质量残留率模型与细根(草根)分解模型相似, 都符合单指数模型(图 2) ($P < 0.01$)。

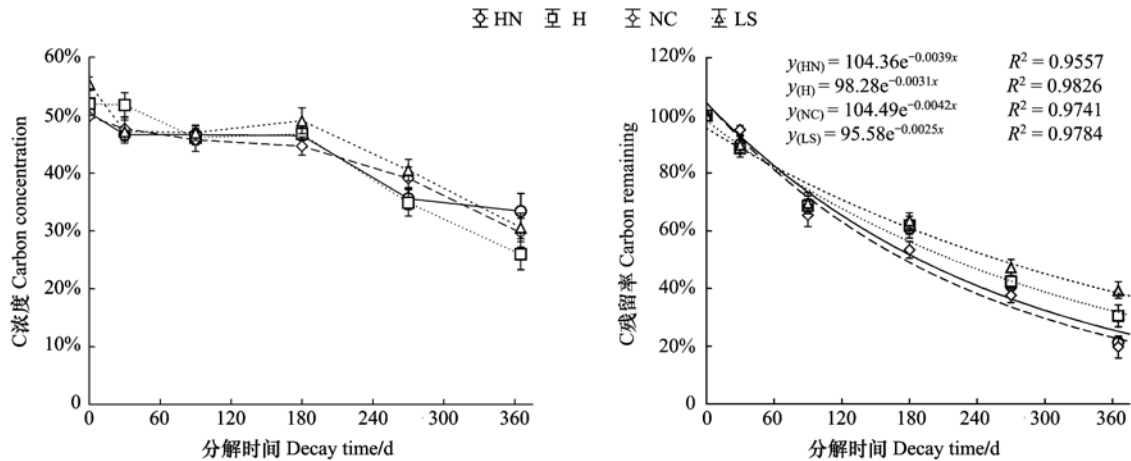


图 2 4 种模式细根(草根) C 浓度及 C 残留率 ($n=3$)

Fig. 2 Carbon concentration and carbon remaining in decomposing fine roots (grass roots) in four models

2.2 土壤活性有机碳的变化

各个取样阶段 HN 模式的 SMBC 含量都显著大于其他 3 种模式 ($P < 0.05$) (图 3a)。分解前 90 d 内, 4 种模式的 SMBC 含量呈增加趋势, 分解 180 d (2008 年 2 月) 后都显著降低, 270 d 后其含量增加达最大值, 分别为 250.94 (HN)、130.36 (H)、189.38 (NC)、75.24 mg/kg (LS)。

分解 30 d 后, 各模式土壤 WSOC 含量大小顺序为: $HN > NC > H > LS$ ($P < 0.01$)。180 d 以前, 各模式土壤 WSOC 含量逐渐增加, 除 NC 有显著增加外, 其他模式 30 d 与 90 d 的土壤 WSOC 差异不显著 ($P > 0.05$) (图 3b)。分解的 180 d, 土壤 WSOC 达到研究期间的最大值, 其大小为 $HN(376.41 \text{ mg/kg}) > NC(284.07 \text{ mg/kg}) > H(195.54 \text{ mg/kg}) > LS(102.15 \text{ mg/kg})$ ($P < 0.05$), 此后, 各模式 WSOC 含量显著下降, 这可能与降雨量有关(图 1)。

在分解 30 d 时, HN 模式的土壤 ROC 含量与 H、NC 差异不显著, 在 90 d 与 180 d 时与 NC 差异不显著(图 3c)。在整个研究期间内, LS 的土壤 ROC 含量都表现为最低。与 SMBC 含量一样, 在 270 d 时, 各模式土壤 ROC 含量都显著高于其他取样时间, 大小顺序为 $HN(2.36 \text{ g/kg}) > NC(2.05 \text{ g/kg}) > H(1.83 \text{ g/kg}) > LS(1.4 \text{ g/kg})$, 但 HN 与 NC 模式下土壤 ROC 差异不显著 ($P > 0.05$)。365 d 以后各模式 ROC 含量显著下降 ($P < 0.05$)。

2.3 土壤 TOC 的变化

由图 3d 可知, 除第 30 天外, HN 模式下的 TOC 含量都显著大于其他模式 ($P < 0.05$), LS 模式 TOC 值基本最低。在分解的第 30 天时, HN 与 H、LS 都没有显著差异, 与 NC 有显著差异, 这可能是因为 8 月份降雨量较大(图 1)以及枯落物的移走, 可溶性碳更容易发生淋洗, 导致表层土壤有机碳减少; 另外 HN、H、NC、LS 模式 TOC 含量都在 270 d 时达到最大值, 分别为 13.26、11.32、11.82、10.5 g/kg, 都显著大于其他取样时间 ($P < 0.05$), 这可能是植物根系经过第 2 年的生长后其根系较丰富, 根系的分泌物和脱落物较多, 土壤微生物生长活跃, 引起各模式土壤表层 TOC 的增加。

2.4 土壤 ROC 在土壤 TOC 中的分配比率

土壤活性有机碳占土壤 TOC 的比率被称为该种活性有机碳的分配比例^[17], 它比活性有机碳总量更能反

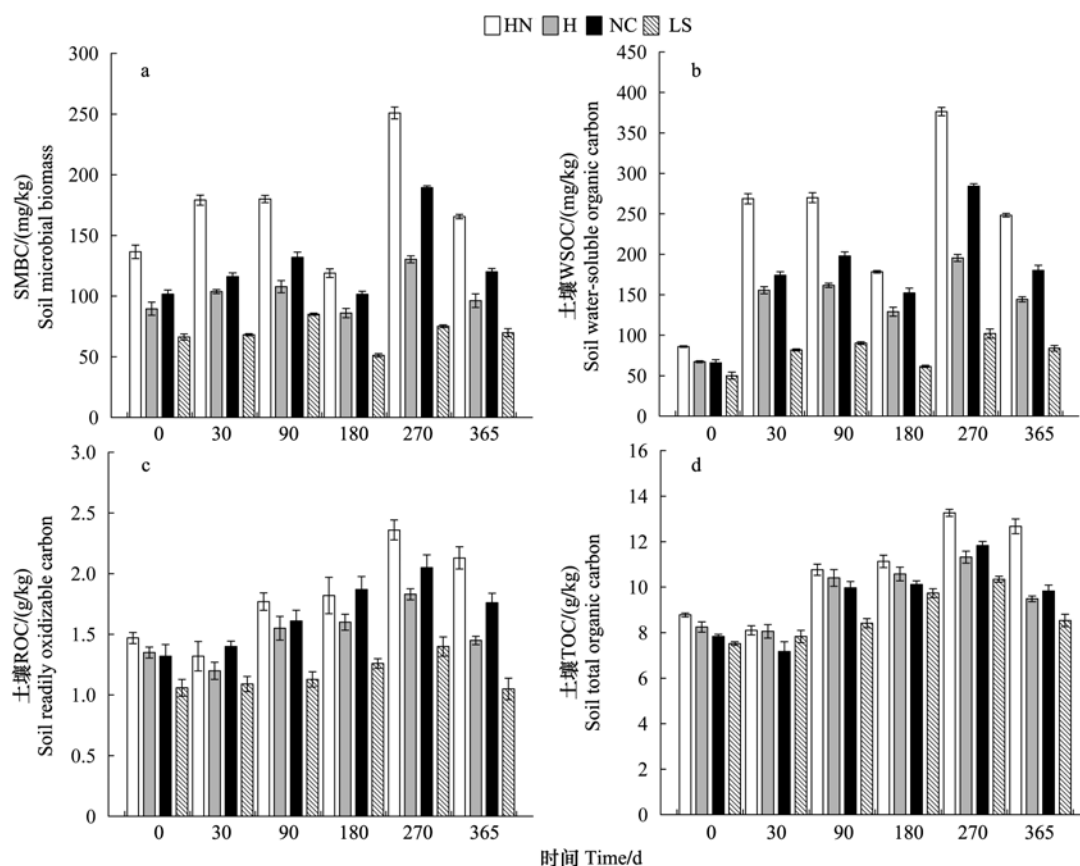
图3 4种模式 SMBC、WSOC、ROC、TOC 含量变化 ($n=3$)

Fig. 3 Variations of soil microbial biomass carbon, water-soluble organic carbon, readily oxidizable carbon, total organic carbon content in four models

映不同土地利用类型下植被对土壤碳行为的影响结果。有研究报道,ROC 含量与土壤 TOC 的比率所占比例越高,说明土壤碳的活性越大,稳定性越差^[18]。表1显示,野外试验中 HN 模式的 ROC/TOC 大于 H、LS 模式,直到 365 d 后才显著大于 NC 模式 ($P < 0.05$),说明 HN、NC 模式土壤有机碳活性大、易转化。经过相关分析表明,野外试验中各模式土壤 ROC 含量与 TOC 呈极显著正相关关系 (HN: $r^2 = 0.9813$, $P = 0.0001$; H: $r^2 = 0.9200$, $P = 0.0025$; NC: $r^2 = 0.8789$, $P = 0.0057$; LS: $r^2 = 0.8595$, $P = 0.0078$),不同模式土壤 ROC 含量基本上与 TOC 含量相似,说明土壤 TOC 的高低决定了易氧化碳的丰缺。

表1 土壤 ROC 在土壤 TOC 中的分配比率 (ROC/TOC, %)

Table 1 Percentage of soil oxidizable carbon in soil total organic carbon (ROC/TOC, %)

模式 Model	0 d	30 d	90 d	180 d	270 d	365 d
HN	16.74 ± 0.22a	16.30 ± 1.02b	16.43 ± 0.59a	16.34 ± 0.59ab	17.79 ± 0.46a	19.80 ± 0.2a
H	16.36 ± 0.54ab	14.89 ± 0.52b	14.89 ± 0.81ab	15.13 ± 0.49bc	16.16 ± 0.45a	14.29 ± 0.27b
NC	16.86 ± 0.59a	19.52 ± 0.37a	16.14 ± 0.34ab	18.49 ± 0.78a	17.34 ± 0.35a	16.92 ± 0.18b
LS	14.10 ± 0.6b	13.92 ± 0.72b	13.43 ± 0.54b	12.94 ± 0.1c	13.53 ± 0.35b	12.30 ± 0.49c

3 讨论

土壤微生物是决定土壤健康的最易分解、最有活性的有机质组分^[19],在陆地生态系统碳及养分循环中起着重要作用,是比其他生态过程如凋落物和根系动态更好的作为生态系统恢复的指标^[20]。本研究 HN 模式下的 SMBC 显著大于其他模式,主要是因为 HN 模式的 0—10 cm 土层内分布有较多的光皮桦细根,而扁穗

牛鞭草草根也主要分布于此土层中^[21],根系较其他模式更加丰富,根系的分泌物和脱落物都可能为微生物提供丰富的能源。在野外,SMBC 动态与环境因素变化有关。有研究表明,SMBC 含量与土壤水分和平均气温呈显著正相关^[22],不同森林的 SMBC 含量也因季节而发生变化^[23-24]。本研究表明,各模式的 SMBC 在温度最低的月份(2008 年 2 月)含量最低,5 月份温度上升,降雨量增加,其值也显著增加。尽管 5 月份正是植物旺盛生长的月份,此时大部分植物都处于他们的生长顶峰可能会限制土壤微生物对养分的可利用性^[25],但 5 月份温度上升以及细根较大面积的生长有利于微生物群落生长以及微生物量 C 的积累。有研究表明,土壤有效碳与细根生物量呈极显著正相关关系^[26]。HN、H、NC、LS 模式下的 SMBC 对土壤 TOC 的贡献分别是 1.2%—3.3%、0.7%—1.5%、0.8%—2.2%、0.5%—0.8%。H、NC 和 LS 模式下的结果与择伐后的亚热带湿润森林(0.7—1.7)相似^[24],但低于热带森林微生物量碳对土壤有机碳的贡献(1.5%—6%)^[27-28],而 HN 模式却介于该值之间,这就说明退耕还林工程中在光皮桦人工林里植入扁穗牛鞭草有利于土壤活性有机碳的积累。

森林土壤 WSOC 含量与森林植被种类及森林植被的生物归还能力有较大的关系^[29]。本研究表明,光皮桦-扁穗牛鞭草复合模式与光皮桦人工林下的土壤 WSOC 含量显著高于柳杉人工林下的土壤。Smolander 和 Kitunen^[30]也得出桦木林土壤的水溶性碳含量大于针叶林土壤。另外,不同的森林类型,其细根分解速率及细根养分归还能力有差异,这可能也是导致各模式 WSOC 差异的原因之一。各模式 WSOC 含量在降雨量最少的 2 月最高,雨量增加后其值又逐渐降低。有国外学者研究也表明,降雨量特别少的年份采集的土壤样品中,水溶性有机碳的含量比其它年份有显著的增加(增加约 33%)^[31]。温度也是影响 WSOC 的主要原因,草甸沼泽土中水溶性有机物在 20℃ 时释放速率最快,温度降低与升高均导致释放速率下降^[32]。本研究与该结果相反,各模式 WSOC 含量在温度最低的 2 月最高,这可能与 2008 年 1 月下旬到 2 月上旬的冰雪灾害天气有关。因为冻融作用能够增加土壤中 WSOC 含量^[33]。细根(草根)C 在各模式中始终表现为净释放(图 2),为微生物提供了丰富的碳源,成为 WSOC 的来源之一^[34]。经过相关分析表明,WSOC 与 SMBC 显著相关(HN: $r = 0.889$, $P = 0.018$; H: $r = 0.858$, $P = 0.029$; NC: $r = 0.843$, $P = 0.035$),所以认为土壤微生物对土壤水溶性碳库有很大贡献^[35],但柳杉林下的土壤 WSOC 与 SMBC 含量的相关性不显著($r = 0.671$, $P = 0.145$),这可能是因为土壤水溶性碳本来就处于不断产生和消耗的动态平衡中^[29],柳杉林下土壤可利用性 C 含量较少,微生物需要利用这些可溶性物质合成自身物质,水溶性有机碳被微生物消耗多,从而使两者相关性不显著。

草本植物根系发达,主要密集于表层,根系分泌物和死亡的根式微生物丰富的能源物质^[36],草地比耕地和林地更易促进土壤微生物生长^[37]。HN 模式的 0—10 cm 土层内分布有较多的光皮桦细根,而扁穗牛鞭草草根也主要分布于此土层中^[21],根系较其他模式更加丰富,ROC/TOC 显著大于光皮桦人工林和柳杉人工林;另外,正式因为 HN 模式中有扁穗牛鞭草的植入,有利于土壤微生物的生长,而细根分解过程中又主要是土壤微生物起着重要作用,并成为 ROC 的重要来源。柳杉细根因含有较多不易分解纤维素、木质素等(表 1),短期内不易分解,对 ROC 含量影响较小。本研究表明,在高温的 8 月份,各模式 ROC 含量都显著降低,这可能是因为温度升高可能会促进 ROC 的分解^[26]。通过以上分析,表明了与其他人工林相比,光皮桦与扁穗牛鞭草复合模式中由于扁穗牛鞭草的植入,改善了林下土壤环境,提高了土壤活性有机碳及土壤有机质的含量,有利于该模式土壤肥力的维持。

References:

- [1] Wang J L, OU Y H, Wang Z H, Chang T J, Li P, Shen Z X, Zhong Z M. Influential factors and distribution characteristics of topsoil labile organic carbon in alpine grassland ecosystem at the south of Gongga south mountain Laguigangri Mountain. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(7): 3501-3508.
- [2] Biederbeck V O, Janzen H H, Campbell C A, Zentner R P. Labile soil organic matter as influenced by cropping practices in an arid environment. *Soil Biology and Biochemistry*, 1994, 26:1647-1656.
- [3] Zhang X Q, Wu K H. Fine-root production and turnover for forest ecosystems. *Scientia Silvae Sinicae*, 2001, 37(3):126-135.
- [4] Xiao C W, Sang W G, Wang R Z. Fine root dynamics and turnover rate in an Asia white birch forest of Donglingshan mountain, China. *Forest*

- Ecology and Management, 2008, 255:765-773.
- [5] Farrar J F, Jones D L. The control of carbon acquisition by roots. *New Phytologist*, 2000, 147:43-53.
- [6] Heal O W, Anderson J M, Swift M J. Plant litter quality and decomposition: an history review//Cadisch G & Giller K E, eds. *Driven by Nature: Plant Litter Quality and Decomposition*. Wallingford: Cab International, 1997:3-32.
- [7] Fogel R. Root turnover and productivity of coniferous forests. *Plant and Soil*, 1983, 71:75-85.
- [8] Gill R A, Jackson R B. Global patterns of root turnover for terrestrial ecosystems. *New Phytologist*, 2000, 147:13-31.
- [9] Wang Z Y, LV J Y, Li F M, Xu B C. A rhizodeposition and its role in carbon cycling in plant-soil system. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, 17(10):1963-1968.
- [10] Rong L, Li S J, Li X W, Fan C. Soil enzyme dynamics during fine root (including grass root) decomposition in different farmland-to-forest/grassland conversions in the rainy zone of western China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2010, 34(6):642-650.
- [11] Rong L, LI X W, Zhang J, Zhu T H, Fan C, Pu D Q. Major microbial function groups related to fine root and grass root decomposition in different models of conversion of farmland to forest in the rainy zone of west China. *Journal of Natural Resources*, 2009, 24(6):1069-1079.
- [12] Criteria for forestry of PRC. LY/T 1237—1999 Determination of organic matter in forest calculation carbon-nitrogen ratio. Beijing: China Criteria Press, 1999.
- [13] Shen H, Cao Z H, Xu Z H. Effect of fertilization on different carbon fractions and carbon pool management index in soils. *Acta Pedologica Sinica*, 2000, 37(2):166-173.
- [14] Jiang P K. Soil active carbon pool under different types of vegetation. *Scientia Silvae Sinicae*, 2005, 41(1):10-13.
- [15] Vance E D, Brookes P C, Jenkinson D S. An extraction method for measuring soil microbial biomass C. *Soil Biology and Biochemistry*, 1987, 19:703-707.
- [16] Lü G H, Zhou G S, Zhou L, Jia Q Y. Methods of soil dissolved organic carbon measurement and their applications. *Journal of Meteorology and Environment*, 2006, 22(2):51-55.
- [17] Garten C T, Post III W M, Hanson P J, Cooper L W. Forest soil carbon inventories and dynamics along an elevation gradient in the southern Appalachian Mountains. *Biogeochemistry*, 1999, 45:115-145.
- [18] 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.
- [19] Joergensen R G, Anderson T H, Wolters T. Carbon and nitrogen relationships in the microbial biomass of soils in beech (*Fagus sylvatica*) forests. *Biology and Fertility of Soils*, 1995, 19:141-147.
- [20] Arunachalam A, Pandey H N. Ecosystem restoration of jhum fallows in northeast India: microbial C and N along altitudinal and successional gradients. *Restoration Ecology*, 2003, 11: 168-173.
- [21] Wang Q, Li X W, Yang M, Li D H, Rong L. Biomass and spatial distribution of the fine root of the *Betula luminifera*-*Hemarthria compressa* composite mode. *Journal of Sichuan Agricultural University*, 2007, 25(4):430-435.
- [22] Ruan H, Zou X, Scatena F, Zimmerman J. Asynchronous fluctuations of soil microbial biomass and plant litterfall in a tropical wet forest. *Plant and Soil*, 2004, 260:147-154.
- [23] Bohlen P J, Groffman P M, Driscoll C T, Fahey T J, Siccama T G. Plant soil microbial interactions in a northern hardwood forest. *Ecology*, 2001, 82:965-978.
- [24] Maithani K, Tripathi R S, Arunachalam A, Pandey H N. Seasonal dynamics of microbial biomass C, N and P during regrowth of a disturbed subtropical humid forest in north-east India. *Applied Soil Ecology*, 1996, 4:31-37.
- [25] Sarathchandra S U, Perrott K W, Upsdell M P. Microbiological and biochemical characteristics of a range of New Zealand soils under established pastures. *Soil Biology and Biochemistry*, 1984, 16: 177-183.
- [26] 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.
- [27] Luizao R C C, Bonde T A, Rosswall T. Seasonal variation of soil microbial biomass — the effect of clear felling in a tropical rain forest and establishment of pasture in the Central Amazon. *Soil Biology and Biochemistry*, 1992, 24:805-813.
- [28] Barbhuiya A R, Arunachalam A, Pandey H N, Arunachalam K, Khan M L, Nath P C. Dynamics of soil microbial biomass C, N and P in disturbed and undisturbed stands of a tropical wet-evergreen forest. *European Journal of Soil Biology*, 2004, 40:113-121.
- [29] Xu Q F, Jiang P K. Study on active carbon of soils under different types of vegetation. *Journal of Soil Water Conservation*, 2004, 18(6):57-60.
- [30] Smolander A, Kitunen V. Soil microbial activities and characteristics of dissolve organic C and N in relation to tree species. *Soil Biology and Biochemistry*, 2002, 34(5):651-660.
- [31] Zsolnay A, Grolitz H. Water extractable organic matter in arable soils-effect of drought and long-term fertilization. *Soil Biology and Biochemistry*,

1994, 26:1257-1261.

- [32] Liu Y, Wang S L, Wang X W, Yu X J, Yang Y J. Effects of tree species fine roots decomposition on soil active organic carbon. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 18(3):481-486.
- [33] Wang F L, Berrany J R. Influence of freeze-thaw and flooding on the losses of soluble organic and carbon dioxide from soil. *Journal of Environmental Quality*, 1993, 22:709-714.
- [34] Ni J Z, Xu J M, Xie Z M. Advances in soil water-soluble organic carbon research. *Ecology and Environment*, 2003, 12(1):71-75.
- [35] Haynes R J. Labile organic matter as an indicator of organic matter quality in arable and pastoral soils in New Zealand. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, 32:211-219.
- [36] Wang Y, Zhou L, Wang Y. Major physiological groups of soil microorganism and its distribution in primitive Korean pine and broad-leaved forest in Liangshui reserve. *Journal of Northeast Forestry University*, 2008, 36(3):16-17.
- [37] Bauhus J, Pare D C, Cote L. Effects of tree species stand age and soil type on soil microbial biomass and its activity in a southern boreal forest. *Soil Biology and Biochemistry*, 1998, 30(8):1077-1089.

参考文献:

- [1] 王建林, 欧阳华, 王忠红, 常天军, 李鹏, 沈振西, 钟志明. 高寒草原生态系统表层土壤活性有机碳分布特征及其影响因素——以贡嘎南山——拉轨岗日山为例. *生态学报*, 2009, 29(7):3501-3508.
- [3] 张小全, 吴可红. 森林细根生长与周转研究. *林业科学*, 2001, 37(3):126-135.
- [9] 王振宇, 吕金印, 李凤民, 徐炳成. 根际沉积及其在植物——碳循环中的作用. *应用生态学报*, 2006, 17(10):1963-1968.
- [10] 荣丽, 李守剑, 李贤伟, 范川. 华西雨屏区不同退耕模式细根(包括草根)分解过程中土壤酶动态. *植物生态学报*, 2010, 34(6):642-650.
- [11] 荣丽, 李贤伟, 张健, 朱天辉, 范川, 蒲德强. 华西雨屏区不同退耕模式细根、草根分解及主要土壤微生物功能群动态. *自然资源学报*, 2009, 24(6):1069-1079.
- [12] 中华人民共和国林业行业标准. LY/T 1237—1999 森林土壤有机质的测定及碳氮比的计算. 北京: 中国标准出版社, 1999.
- [13] 沈宏, 曹志洪, 徐志红. 施肥对土壤不同碳形态及碳库管理指数的影响. *土壤学报*, 2000, 37(2):166-173.
- [14] 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.
- [16] 吕国红, 周广胜, 周莉, 贾庆宇. 土壤溶解性有机碳测定方法与应用. *气象与环境学报*, 2006, 22(2):51-55.
- [18] 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.
- [21] 王巧, 李贤伟, 杨渺, 李德会, 荣丽. 光皮桦木-扁穗牛鞭草复合模式细根草根生物量及空间分布. *四川农业大学学报*, 2007, 25(4):430-435.
- [26] 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):539-544.
- [29] 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):57-60.
- [32] 刘艳, 汪思龙, 王晓伟, 余小军, 杨跃军. 不同温度条件下杉木、桉木、火力楠细根分解对土壤活性有机碳的影响. *应用生态学报*, 2007, 18(3):481-486.
- [34] 倪进治, 徐建民, 谢正苗. 土壤水溶性有机碳的研究进展. *生态环境*, 2003, 12(1):71-75.
- [36] 王轶, 邹莉, 王义. 凉水自然保护区原始阔叶红松林土壤微生物的主要生理类群及分布. *东北林业大学学报*, 2008, 36(3):16-17.

CONTENTS

Spatial pattern analysis of a <i>Rhododendron-Abies</i> virginal forest near timberline on the eastern edge of Qinghai-Tibetan Plateau, China	MIAO Ning, LIU Shirong, SHI Zuomin, et al (1)
Changes of liana species diversity in different restoration stages of monsoonal broad-leaved evergreen forest	LI Shuaifeng, SU Jianrong, LIU Wande, et al (10)
Investigation on spatio-temporal pattern of cyanobacterial community structure by T-RFLP during overwinter and recruitment period in Taihu Lake	GU Tingting, KONG Fanxiang, TAN Xiao, et al (21)
Food sources of fish and macro-invertebrates in a tropical seagrass bed at Xincun Bay, Southern China	FAN Minling, HUANG Xiaoping, ZHANG Dawen, et al (31)
Spatial pattern of Scleractinian coral Population Structure in Weizhou Island, Beihai, Guangxi	LIANG Wen, ZHANG Chunhua, YE Zuchao, et al (39)
Property of root distribution of triploid <i>Populus tomentosa</i> and its relation to root water uptake under the wide-and-narrow row spacing scheme	XI Benye, WANG Ye, JIA Liming, et al (47)
Soil nutritional properties and moisture gradient of the ecotone between dry valley and montane forest of the Minjiang River	LIU Bin, LUO Chengde, ZHANG Jian, et al (58)
Signal chemical salicylic acid mitigates the negative effects of drought on photosynthesis and membrane lipid peroxidation of purple majesty	YI Xiaolin, YANG Bingxian, ZONG Xuefeng, et al (67)
Effects of supplementary UV-B radiation on life cycle forms and the accumulation of taxanes of <i>Taxus chinensis</i> var. <i>mairei</i>	YU Jinghua, LI Dewen, PANG Haihe, et al (75)
Effect of simulated nitrogen deposition on the soil respiration of <i>Lithocarpus glabra</i> and <i>Castanopsis sclerophylla</i>	LI Kai, JIANG Hong, YOU Meina, et al (82)
Changes of phenolic acids in the soil of replanted apple orchards surrounding Bohai Gulf	SUN Haibing, MAO Zhiqian, ZHU Shuhua (90)
Growing dynamic root system of <i>Aquilaria malaccensis</i> and <i>Aquilaria sinensis</i> seedlings in response to different fertilizing methods	WANG Ran, LI Jiyue, ZHANG Fangqiu, et al (98)
Accumulation and tolerance of <i>Salix variegata</i> and <i>Pterocarya stenoptera</i> seedlings to cadmium	JIA Zhongmin, WEI Hong, SUN Xiaocan, et al (107)
Dynamics of vegetation structure and soil properties in the natural restoration process of degraded woodland on the northern slope of Qilian Mountains, northwestern China	ZHAO Chengzhang, SHI Fuxi, DONG Xiaogang, et al (115)
Relationship between temperature and $\delta^{13}\text{C}$ values of C3 herbaceous plants and its implications of WUE in farming-pastoral zone in North China	LIU Xianzhao, WANG Guoan, LI Jiazhu, et al (123)
Carbon dynamics of fine root (grass root) decomposition and active soil organic carbon in various models of land use conversion from agricultural lands into forest lands	RONG Li, LI Shoujian, LI Xianwei, et al (137)
Prey biomass of the Amur tiger (<i>Panthera tigris altaica</i>) in the eastern Wanda Mountains of Heilongjiang Province, China	ZHOU Shaochun, ZHANG Minghai, SUN Haiyi (145)
The impact of conservation projects on giant Panda Habitat	ZHANG Yubo, WANG Mengjun, LI Junqing (154)
Fluctuation of soil fauna community during defoliation decomposition under lime and EM treatment	GAO Meixiang, ZHANG Xueping (164)
Comparative of feeding behaviors of <i>Sitobion avenae</i> , <i>Sitobion graminum</i> and <i>Rhopalosiphum padi</i> (Homoptera: Aphididae) using electrical penetration graph (EPG)	MIAO Jin, WU Yuqing, YU Zhenxing, et al (175)
Toxic effects of <i>ent</i> -kaurane diterpenoids on soil ciliate communities	NING Yingzhi, DU Haifeng, WANG Hongjun (183)
Geostatistical analysis and sampling technique on spatial distribution pattern of <i>Dendroctonus valens</i> population	PAN Jie, WANG Tao, ZONG Shixiang, et al (195)
Variation analysis of protein subunits of soybean germplasms of different eco-types in Shanxi	WANG Yanping, LI Guiquan, GUO Shujin, et al (203)
Effects of fertilization and plastic film mulched ridge-furrow cultivation on yield and water and nitrogen utilization of winter wheat on dryland	LI Tingliang, XIE Yinghe, REN Miaomiao, et al (212)
The changing characteristics of potential climate productivity in Gansu Province during nearly 40 years	LUO Yongzhong, CHENG Ziyong, GUO Xiaoqin (221)
Spatial assessment and zoning regulations of ecological importance based on GIS for rural habitation in Changgang Town, Xinguo county	XIE Hualin, LI Xiubin (230)
Influences of rural households' income differences on living energy consumption and eco-environment: a case study of Jiangnan Plain, China	YANG Zhen (239)
Spatial differences and its driving factors of emergy indices on cultivated land eco-economic system in Hebei Province	WANG Qian, JIN Xiaobin, ZHOU Yinkang, et al (247)
Effects of land use on distribution and protection of organic carbon in soil aggregates in karst rocky desertification area	LUO Youjin, WEI Chaofu, LI Yu, et al (257)
Review and Monograph	
Implication and limitation of landscape metrics in delineating relationship between landscape pattern and soil erosion	LIU Yu, LÜ Yihe, FU Bojie (267)
Ecological reclamation and restoration of abandoned coal mine in the United States	ZHANG Chengliang, B. Larry Li (276)
Managing farmland soil food web: principles and methods	CHEN Yunfeng, HU Cheng, LI Shuanglai, et al (286)

2009 年度生物学科总被引频次和影响因子前 10 名期刊*

(源于 2010 年版 CSTPCD 数据库)

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

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

编辑部主任: 孔红梅

执行编辑: 刘天星 段 靖

生 态 学 报
(SHENGTAI XUEBAO)
(半月刊 1981 年 3 月创刊)
第 31 卷 第 1 期 (2011 年 1 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA
(Semimonthly, Started in 1981)
Vol. 31 No. 1 2011

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel:(010)62941099 www.ecologica.cn Shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	冯宗炜	Editor-in-chief	FENG Zong-Wei
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717	Published by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail:journal@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		

