

ISSN 1000-0933

CN 11-2031/Q

生态学报

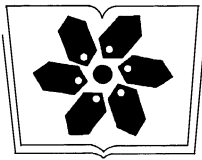
Acta Ecologica Sinica



第 32 卷 第 20 期 Vol.32 No.20 **2012**

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 32 卷 第 20 期

2012 年 10 月 (半月刊)

目 次

太湖流域源头溪流氧化亚氮(N_2O)释放特征.....	袁淑方, 王为东 (6279)
闽江河口湿地植物枯落物立枯和倒伏分解主要元素动态.....	曾从盛, 张林海, 王天鹅, 等 (6289)
宁夏荒漠草原小叶锦鸡儿可培养内生细菌多样性及其分布特征.....	代金霞, 王玉炯 (6300)
陕西省栎黄枯叶蛾蛹的空间分布.....	章一巧, 宗世祥, 刘永华, 等 (6308)
模拟喀斯特生境条件下干旱胁迫对青冈栎苗木的影响.....	张中峰, 尤业明, 黄玉清, 等 (6318)
中国井冈山生态系统多样性.....	陈宝明, 林真光, 李 贞, 等 (6326)
鄂西南木林子常绿落叶阔叶混交林恢复过程中优势树种生态位动态.....	汤景明, 艾训儒, 易咏梅, 等 (6334)
不同增温处理对夏蜡梅光合特性和叶绿素荧光参数的影响	徐兴利, 金则新, 何维明, 等 (6343)
模拟长期大风对木本猪毛菜表观特征的影响	南 江, 赵晓英, 余保峰 (6354)
雷竹林土壤和叶片 N、P 化学计量特征对林地覆盖的响应	郭子武, 陈双林, 杨清平, 等 (6361)
利用树木年轮重建赣南地区 1890 年以来 2—3 月份温度的变化	曹受金, 曹福祥, 项文化 (6369)
川西亚高山草甸土壤呼吸的昼夜变化及其季节动态.....	胡宗达, 刘世荣, 史作民, 等 (6376)
火干扰对小兴安岭白桦沼泽和落叶松-苔草沼泽凋落物和土壤碳储量的影响	周文昌, 牟长城, 刘 夏, 等 (6387)
黄土丘陵区三种典型退耕还林地土壤固碳效应差异.....	佟小刚, 韩新辉, 吴发启, 等 (6396)
岩质公路边坡生态恢复土壤特性与植物多样性	潘树林, 辜 彬, 李家祥 (6404)
坡位对东灵山辽东栎林土壤微生物量的影响.....	张 地, 张育新, 曲来叶, 等 (6412)
太湖流域典型入湖港口景观格局对河流水质的影响.....	王 瑛, 张建锋, 陈光才, 等 (6422)
基于多角度基尼系数的江西省资源环境公平性研究	黄和平 (6431)
中国土地利用空间格局动态变化模拟——以规划情景为例	孙晓芳, 岳天祥, 范泽孟 (6440)
世界主要国家耕地动态变化及其影响因素	赵文武 (6452)
不同氮源下好氧反硝化菌 <i>Deffluibacter lusatiensis</i> str. DN7 的脱氮特性	肖继波, 江惠霞, 褚淑祎 (6463)
基于生态足迹方法的南京可持续发展研究.....	周 静, 管卫华 (6471)
基于投入产出方法的甘肃省水足迹及虚拟水贸易研究.....	蔡振华, 沈来新, 刘俊国, 等 (6481)
浦江县土壤碱解氮的空间变异与农户 N 投入的关联分析	方 斌, 吴金凤, 倪绍祥 (6489)
长江河口潮间带盐沼植被分布区及邻近光滩鱼类组成特征	童春富 (6501)
深圳湾不同生境湿地大型底栖动物次级生产力的比较研究.....	周福芳, 史秀华, 邱国玉, 等 (6511)
灰斑古毒蛾口腔反吐物诱导沙冬青细胞 Ca^{2+} 内流及 H_2O_2 积累	高海波, 张淑静, 沈应柏 (6520)
濒危物种金斑喙凤蝶的行为特征及其对生境的适应性.....	曾菊平, 周善义, 丁 健, 等 (6527)
细叶榕榕小蜂群落结构及动态变化.....	吴文珊, 张彦杰, 李凤玉, 等 (6535)
专论与综述	
流域生态系统补偿机制研究进展	张志强, 程 莉, 尚海洋, 等 (6543)
可持续消费的内涵及研究进展——产业生态学视角	刘晶茹, 刘瑞权, 姚 亮 (6553)
工业水足迹评价与应用.....	贾 佳, 严 岩, 王辰星, 等 (6558)
矿区生态风险评价研究述评.....	潘雅婧, 王仰麟, 彭 建, 等 (6566)
研究简报	
围封条件下荒漠草原 4 种典型植物群落枯落物枯落量及其蓄积动态.....	李学斌, 陈 林, 张硕新, 等 (6575)
密度和种植方式对夏玉米酶活性和产量的影响.....	李洪岐, 蔺海明, 梁书荣, 等 (6584)
期刊基本参数: CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 312 * zh * P * ¥ 70.00 * 1510 * 35 * 2012-10	

封面图说: 草丛中的朱鹮——朱鹮有着鸟中“东方宝石”之称。洁白的羽毛, 艳红的头冠和黑色的长嘴, 加上细长的双脚, 朱鹮历来被日本皇室视为圣鸟。20 世纪前朱鹮在中国东部、日本、俄罗斯、朝鲜等地曾有较广泛地分布, 由于环境恶化等因素导致种群数量急剧下降, 至 20 世纪 70 年代野外已认为无踪影。1981 年 5 月, 中国鸟类学家经多年考察, 在陕西省洋县重新发现朱鹮种群, 一共只有 7 只, 也是世界上仅存的种群。此后对朱鹮的保护和科学研究做了大量工作, 并于 1989 年在世界首次人工孵化成功。

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

DOI: 10.5846/stxb201201020003

佟小刚, 韩新辉, 吴发启, 张艳云, 于小玲, 蒋碧. 黄土丘陵区三种典型退耕还林地土壤固碳效应差异. 生态学报, 2012, 32(20): 6396-6403.

Tong X G, Han X H, Wu F Q, Zhang Y Y, Yu X L, Jiang B. Variance analysis of soil carbon sequestration under three typical forest lands converted from farmland in a Loess Hilly Area. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(20): 6396-6403.

黄土丘陵区三种典型退耕还林地土壤固碳效应差异

佟小刚¹, 韩新辉^{2,*}, 吴发启¹, 张艳云¹, 于小玲¹, 蒋 碧¹

(1. 西北农林科技大学资源与环境学院, 农业部西北植物营养与农业环境重点实验室, 杨凌 712100;

2. 西北农林科技大学农学院, 杨凌 712100)

摘要:探讨了黄土丘陵区退耕种植 10—40a 的柠条、沙棘及刺槐林地土壤总有机碳库及其活性组分密度随退耕时间、土层分布及相对比例的变化差异。结果表明:100 cm 深土壤碳库在退耕 10a 时仅柠条林地碳库未比坡耕地显著增加,但退耕 20—40a 3 种林地比退耕 10a 时都已有显著增加,且增幅均为刺槐>沙棘>柠条,其中总有机碳的最大增幅分别达到 90.92、27.87、14.89 Mg/hm²,活性有机碳的分别达到 30.28、10.51、9.67 Mg/hm²。各还林地碳库增加在退耕 10a 时主要来自 0—40 cm 浅层土,而 40—100 cm 深层土碳库到退耕 20a 起才开始显著增加。对比退耕 10a 时,到退耕 40a 时柠条、沙棘及刺槐林地 0—20 cm 表层土分别平均累积了 35.4%、27.9%、27.1% 的总有机碳,20.2%、45.1%、23.1% 的活性有机碳,而 20—100 cm 各土层间对碳库累积比例大小变化无一致规律,平均每 20 cm 厚土层累积了 17.4% 的总有机碳和 17.6% 活性有机碳。并且相比坡耕地,各林地均使 100 cm 深土壤活性有机碳占总有机碳的比例提高,改良了碳库质量。综上分析,长期退耕下 3 种林地固碳效应有明显差异,以刺槐林地碳累积效应较强。

关键词:黄土丘陵区;退耕还林;土壤有机碳;氧化活性有机碳;固碳效应

Variance analysis of soil carbon sequestration under three typical forest lands converted from farmland in a Loess Hilly Area

TONG Xiaogang¹, HAN Xinhui^{2,*}, WU Faqi¹, ZHANG Yanyun¹, YU Xiaoling¹, JIANG Bi¹

1 Key Laboratory of Plant Nutrition and the Agri-environment in Northwest China, Ministry of Agriculture, College of Source and Environment, Northwest Agricultural & Forestry University, Yangling 712100, Shannxi, China

2 College of Agricultural Sciences, Northwest Agricultural & Forestry University Yangling 712100, Shannxi, China

Abstract: Quantifying soil carbon sequestration may be an important consideration under large scale afforestation because it has been counted in global carbon budgets according to the Kyoto Protocol. The conversion of cropland to forest as part of a huge ecological afforestation engineering scheme has played a very important role in reversing ecological destruction in the Loess Plateau and strongly affects the carbon cycle. This research was conducted to determine the changes in total soil organic carbon and its labile fraction in soil to 100 cm under three typical forested lands. These typical forest lands are Caragana, Buckthorn, and Robinia, which have been converted from farmland between 10 and 40 years ago in a Loess Hilly Area. The results showed that, compared with sloped farmland, the concentration of total organic carbon and labile organic carbon in soil at 100 cm was not higher in Caragana forest land 10 years after conversion from farmland. The carbon pool was significantly increased in Buckthorn and Robinia after the same period. Compared with 10 years since farmland conversion, the total organic carbon and labile carbon was further increased in all forest lands after 20 to 40 years of

基金项目:陕西省自然科学基金基础研究计划资助项目(2010JQ5001);教育部高等学校博士点基金(20090204120038);国家自然科学基金(30971695);西北农林科技大学基本科研业务费专项(QN2011153);西北农林科技大学博士启动金(2010BSJJ032)

收稿日期:2012-01-02; 修订日期:2012-07-17

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: hanxinhui@nwsuaf.edu.cn

conversion from farmland. This increase followed the order Robinia > Buckthorn > Caragana, and the highest increase in total organic carbon reached 90.92, 27.87, and 14.89 Mg/hm², and for labile organic carbon was 30.28, 10.51, and 9.67 Mg/hm² respectively. The changes in soil organic carbon in different soil layers were also significantly different with time since farmland conversion. The soil organic carbon and its labile fraction was increased mainly in the 0—40 cm soil layer 10 years after farmland conversion in all forest lands. The soil organic carbon pools in the 40—100 cm layer were increased significantly 20 years after farmland conversion. As a result, all soil layers showed a contribution to soil organic carbon increase with long term conversion of cropland to forest. Forty years after farmland conversion 35.4%, 27.9%, and 27.1% of the increased total organic carbon and 20.2%, 45.1%, and 23.1% of the increased labile organic carbon in the soil to 100 cm was sequestered in the 0—20 cm layer under Caragana, Buckthorn, Robinia forest land respectively. By contrast, the proportion of soil organic carbon sequestration showed inconsistent changes among the forest lands in the 20—100 cm soil layer, with an average of 17.4% of the increased total organic carbon and 17.6% of the increased labile organic carbon sequestered in each 20 cm layer. Additionally, in comparison with sloped farmland, the ratio of labile organic carbon to total organic carbon was significantly different in each soil layer of all forest lands 40 years after farmland conversion. This was especially so in the 60—100 cm soil layer where the ratio was increased by 146.7%, 76.9%, and 126.1% in Caragana, Buckthorn, and Robinia forest lands, respectively. The ratio in the 100 cm soil layer also increased by 63.7%, 34.0%, and 47.0% in Caragana, Buckthorn, and Robinia, respectively, which indicated the activation of soil carbon pools had been enhanced, and the quality of soil was improved indirectly. Consequently, conversion of cropland to forest could sequester carbon in soil and Robinia is the better forest land to improve the soil organic carbon pool. Soil carbon sequestration following the afforestation of former arable land would be a powerful carbon sink for anthropogenic CO₂ production in the Loess Plateau in the future.

Key Words: Loess Hilly Area; conversion of cropland to forest; soil organic carbon; oxidizable labile organic carbon; carbon sequestration

土壤有机碳(SOC)一方面作为土壤肥力的核心物质,影响着土壤结构和持水保肥性,并起到缓解或调节与土壤退化及其生产力有关的一系列土壤过程^[1-2];另一方面,土壤有机碳作为陆地生态系统中最大的碳库^[3],其碳汇功能对于减排大气 CO₂,缓解温室效应的作用已受到众多学者的认可^[4-5]。因此,土壤碳不再局限于对土壤质量的指示,更关系到生态环境、大气圈及生物圈的可持续发展^[2,4],掌握土壤碳库演变及固碳机理对于人们认知不同土地利用方式和植被恢复措施对提升土壤质量和改良生态环境的效应具有重要意义。

退耕还林作为我国一项宏伟的生态造林工程,通过植被恢复改变了土壤内部及与植物群落的养分元素流动状况,必然引起土壤碳库变化。国内外多数研究亦显示农田退耕还林后将会引起土壤碳的增加^[6-8],但也有研究认为造林后土壤碳储量在初期会下降,一般 10a 后才开始积累^[6,9],如薛蕙等^[10]和王春梅等^[8]分别报道刺槐林和长白落叶松林退耕 10a 后土壤有机碳才开始恢复,周国模等^[11]更得出人工毛竹林土壤总有机碳持续下降至 20a 后才趋于稳定。可见,人工造林后土壤碳库恢复是一个漫长的过程,并且总有机碳的累积只是矿化分解和合成的平衡结果,不能反映碳库性质变化、转化速率及累积机制等。因此,根据有机碳分解速率或活性差异进行碳分组研究成为探究土壤碳周过程和固定机理的重要手段^[2,12]。这类碳组分中国内的研究多倾向于用高锰酸钾可氧化的碳作为活性有机碳(LOC),而未被氧化的作为非活性有机碳(NLOC),它们分别在快速响应短期土地管理措施影响及碳固定上起着积极的指示作用^[10,13-14]。但这些研究多集中于中表层土壤或是单一林种,缺乏同地区内不同人工林地间及深层土壤碳库及其组分在不同土层、退耕时间序列变化上的差异分析。因此,本研究采集黄土丘陵区 10—40a 不同典型退耕还林地 0—100 cm 不同土层土壤,进行总有机碳、活性有机碳储量随退耕年限、不同土层分布及相对比例变化上的对比分析研究。揭示不同退耕还林地提升土壤碳库储量、质量效应及差异特征,以期评价人工林促进生态恢复效果、土壤质量提高及选择生

态碳库管理技术提供依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于陕西省安塞县纸坊沟流域(E109°13'46"—109°16'03", N36°46'42"—36°46'28"), 该区地形破碎, 沟壑纵横, 属黄土高原丘陵沟壑地貌, 暖温带半干旱季风气候, 海拔 1 010—1 400 m, 年均气温 8.8 ℃, 年均降水量 505.3 mm。土壤类型以黄土母质上发育而成的黄绵土为主, 有机质含量低、抗侵蚀能力差, 植被类型处于暖温带落叶阔叶林向干草原过渡的森林草原带^[10]。该流域生态系统自 20 世纪 60、70 年代开始由破坏期转向逐渐稳定和恢复期, 至 20 世纪末 90 年代初进入良性生态初步形成期, 这主要是在多年的水土保持综合治理, 开展了林草植被和工程等措施建设下, 有效遏制了该流域的土壤侵蚀, 成功地恢复了退化生态系统^[15]。目前, 该区域林地面积从 1980 年的不足 5% 增加到 40% 以上, 流域生态经济系统进入良性循环阶段^[10]。因此, 该区域也拥有长期不同灌木林、乔木林及经济林等退耕还林类型林地, 为本研究提供了良好的自然研究基础。

1.2 样地选取及采样

基于时空互代法, 2010 年 9 月于研究区选择退耕还林年限为 10a、20a、40a 的柠条(*Caragana korshinskii*) C₁₀、C₂₀、C₄₀; 沙棘(*Hippophae rhamnoides*) H₁₀、H₂₀、H₄₀; 刺槐(*R. pseudoacacia*) R₁₀、R₂₀、R₄₀ 共 3 种退耕还林地样地, 并以长期坡耕地(SF) 为对照。样地土壤类型均为黄绵土, 粘粒含量为 7%—9%, 各样地其它基本特征见表 1。每种还林地都选择 3 个立地条件基本一致的重复样地进行采样。在每个样地内, 设置 20 m×20 m 标准采样区, 采样时先除去地面凋落物, 按照“S”型选 12 点, 取 0—20、20—40、40—60、60—80、80—100 cm 共 5 层林下及草本植物覆盖下土样, 以客观代表退耕还林地土壤, 每层取样点土样混合后作为该层待测土样。同时, 挖取剖面采用环刀法测定各土层密度, 以计算土壤有机碳密度。土壤样品自然风干后研磨过 0.25 mm 筛备用。

表 1 样地基本特征

Table 1 Description of the sampling plots

样地 Site	坡位 Slope position	坡向 Aspect	坡度/(°) Slope	海拔/m Altitude	林分密度 Stand density /(株/hm ²)	林下主要草本种类 Mainly vegetation types of herb
SF	梁坡中部	S	23	1167	—	荞麦
C ₁₀	梁坡中部	SW20°	33	1154	3000	铁杆蒿、长芒草、艾蒿
H ₁₀	梁坡中上部	S	24	1175	3300	胡枝子、长芒草
R ₁₀	梁坡中部	SE10°	21	1179	2100	胡枝子、阿尔泰紫苑、长芒草
C ₂₀	梁坡中部	S	22	1145	2400	铁杆蒿、长芒草、狗尾草
H ₂₀	梁坡中上部	SW32°	24	1157	2800	胡枝子、长芒草、艾蒿
R ₂₀	梁坡中部	SE	34	1158	1800	胡枝子、长芒草、
C ₄₀	梁坡中上部	S	25	1169	2300	铁杆蒿、长芒草、狗尾草
H ₄₀	梁坡上部	SW15°	29	1148	2600	胡枝子、长芒草
R ₄₀	梁坡中部	SW18°	30	1149	1600	白刺花、菱蒿、立式黄芪

1.3 指标测定

土壤总有机碳(TOC) 采用重铬酸钾加热法测定^[16]; 土壤活性有机碳的测定采用 KMnO₄ 氧化法^[17], 即称取含有 15 mg 总有机碳的土样于 50 mL 离心管中, 加入 333mmol/L KMnO₄ 25 mL, 振荡 1 h, 离心 5 min(转速 2 000 r/min), 取上清液用去离子水按 1:250 稀释, 然后将稀释液在 565 nm 比色。根据 KMnO₄ 浓度的变化求出样品的活性有机碳含量(氧化过程中 1 mmol/L KMnO₄ 消耗 9 mgC)。非活性有机碳为总有机碳与活性有机碳之差。

1.4 数据计算与分析

土壤有机碳密度是指单位面积一定厚度的土层中有机碳的质量,可以指示土壤有机碳的储量。对于分层的土壤剖面而言,土壤有机碳的密度计算公式为:

$$T_0 = (1 - \delta_j) \rho_j c_j d_j / 10$$

式中, T_0 为第 j 层土壤有机碳的密度 (Mg/hm^2); δ_j 、 ρ_j 、 c_j 、 d_j 分别为第 j 层土中 $>2 \text{ mm}$ 砾石的体积分数(%)、土的密度(g/cm^3)、有机碳平均含量(g/kg)、土层厚度(cm)。0—100 cm 土层有机碳密度则为各层土壤有机碳密度之和。退耕还林地 0—100 cm 深土壤固定增加的有机碳在不同土层的分配比例按以下公式计算:

$$R_j \% = \frac{(C_{40j} - C_{10j}) \rho_j \times d_j}{\sum_j^n (C_{40j} - C_{10j}) \rho_j \times d_j} \times 100$$

式中, R_j 为固定的有机碳在第 j 层土壤的分配比例; C_{40j} 和 C_{10j} 分别为退耕还林 40a 和 10a 时土壤有机碳含量(g/kg)。

以上实验结果的统计与分析采用 Excel 和 SPSS16.0 软件进行。不同退耕还林地及土层中有机碳密度、分配比例、活性有机碳占总有机碳比例等差异显著性采用邓肯法进行检验分析($P < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 土壤总有机碳密度变化

表 2 显示,不同还林地各土层 TOC 随退耕年限延长均呈显著增加趋势,但土层间增幅演变明显不同。相比坡耕地各土层,柠条、沙棘、刺槐林地 0—20 cm 表层土 TOC 密度增加最明显,在退耕 10a 时即分别增加了 0.2、1.0、0.9 倍,到退耕 20a 时增加更为明显,退耕 40a 时达到最大值,增幅分别达到 1.0、2.3、4.8 倍;20—40 cm 土层在退耕 10a 时,仅柠条林未显著增加 TOC 密度,之后退耕 20a 里,柠条、沙棘、刺槐林地 TOC 均持续增加,同样到 40a 时增幅达到最高,增幅分别为 0.6、1.6、4.4 倍;40—100 cm 各土层 TOC 密度增加效果则明显减缓,退耕 10a 时不同还林地 TOC 密度均未有显著增加,到退耕 20a 时仅沙棘和刺槐林地 TOC 才开始显著增加,到退耕 40a 时柠条、沙棘、刺槐林地 40—100 cm 各土层 TOC 密度平均分别显著增加了 0.5、1.0 及 3.0 倍。

表 2 不同退耕还林地土壤总有机碳密度

Table 2 Density of soil TOC in different forest lands converted from slope farmland / (Mg/hm^2)

样地 Sites	土壤深度 Soil depth/cm				
	0—20	20—40	40—60	60—80	80—100
SF	6.39a	5.32a	5.32a	4.95a	4.58a
C ₁₀	7.22b	6.00ab	5.52ab	5.47a	4.67a
H ₁₀	13.08d	8.57c	6.10ab	3.85a	5.19a
R ₁₀	12.31d	6.80b	6.06ab	5.01a	4.46a
C ₂₀	9.94c	6.06b	4.87a	5.90a	5.20a
H ₂₀	16.54e	7.97c	6.32b	8.11b	4.48a
R ₂₀	30.33g	10.71d	10.54c	10.21c	9.42c
C ₄₀	12.49d	8.41c	7.28b	7.90b	7.69b
H ₄₀	20.85f	13.74e	12.51d	11.08e	6.49b
R ₄₀	36.95h	28.94f	19.09e	19.72f	20.87d

同列内小写字母表示在 $P < 0.05$ 水平下不同还林地及其退耕年限下有机碳密度差异显著

长期退耕还林下不同土层 TOC 密度的显著增加也使得总体 100 cm 深土壤 TOC 密度随退耕年限显著提升。如图 1 显示,相比坡耕地,退耕还林 10a 时沙棘和刺槐林地 100 cm 深土层 TOC 密度即开始显著增加,而柠条林地 TOC 密度还未有显著差异。与退耕还林 10a 相比,退耕 20a 时 3 种林地 TOC 密度均持续显著增加,到退耕 40a 时最高,且增幅为刺槐>沙棘>柠条,分别达到 90.92、27.87、14.89 Mg/hm^2 ,说明刺槐林地土壤相对固碳效应更好。

2.2 土壤活性有机碳密度变化

长期退耕还林下 LOC 密度在不同还林地各土层均成显著增加趋势(表 3)。各土层相比坡耕地,仍以 0—20 cm 表层土 LOC 密度增加最明显,退耕 10a 时柠条、沙棘、刺槐林地使其分别增加了 0.4、0.8、1.2 倍,到退耕 40a 时增幅分别达到 1.3、3.0、4.5 倍。20—40 cm 土层柠条林地 LOC 密度到退耕 40a 时才比坡耕地显著增加 1.3 倍;沙棘和刺槐林地 LOC 密度在退耕 10—40a 里持续增加,增幅分别为 0.6—2.0 倍和 0.4—7.2 倍。40—100 cm 土层 LOC 密度增加减缓。退耕 10a 时,仅刺槐林使 40—60 cm 和 80—100 cm 土层 LOC 密度分别增加 0.4 倍和 0.5 倍;退耕 20a 时,不同还林地间 LOC 密度变化出现分异,柠条和沙棘倾向于显著增加 60—100 cm 深层 LOC 密度,刺槐则使 40—100 cm 各土层 LOC 密度均有显著增加。退耕 40a 时,柠条、沙棘、刺槐林地 40—100 cm 各土层 LOC 密度均显著增加,且增幅随土层加深变大,分别达到 1.2—3.4 倍、1.3—2.0 倍及 4.2—11.4 倍。

表 3 不同退耕还林地土壤活性有机碳密度
Table 3 Density of soil LOC in different forest lands converted from slope farmland/(Mg/hm²)

样地 Sites	土壤深度 Soil depth /cm				
	0—20	20—40	40—60	60—80	80—100
SF	2.09a	1.16a	1.13a	0.75a	0.59a
C ₁₀	2.88b	1.03a	0.82a	0.68a	0.34b
H ₁₀	3.66c	1.89bc	1.25a	0.78a	0.56a
R ₁₀	4.61d	1.60b	1.62b	0.63a	0.88c
C ₂₀	3.58c	1.13a	1.37ab	0.86a	0.83c
H ₂₀	5.09d	2.17c	1.25ab	1.29b	1.20c
R ₂₀	6.32e	3.20d	2.07c	1.78b	1.63d
C ₄₀	4.83d	2.72d	2.49c	2.75c	2.62e
H ₄₀	8.39f	3.47d	2.62c	2.39d	1.78f
R ₄₀	11.58g	9.48e	5.83d	5.42e	7.31g

图 1 显示总体上退耕 10a 时 100 cm 深土层各还林地 LOC 密度仅柠条未与坡耕地达到显著差异,但退耕 20—40a 时 3 种还林地 LOC 密度均比退耕 10a 时都有了显著增加,并且增幅表现为刺槐>沙棘>柠条,分别达到 9.28—30.28 Mg/hm²、5.28—10.51 Mg/hm²、2.04—9.67 Mg/hm²,说明长期退耕还林下能够显著提升土壤碳库活性组分,起到了改良土壤内养分循环过程的作用。

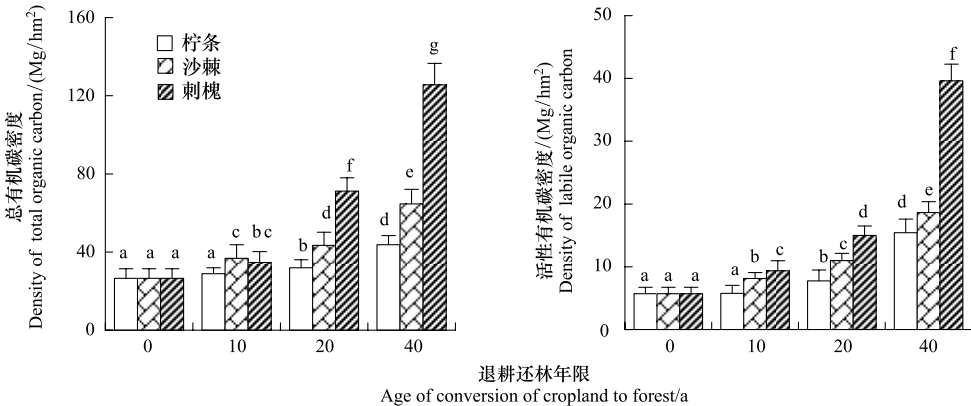


图 1 不同还林地 100 cm 深土壤总有机碳和活性有机碳密度
Fig. 1 Density of TOC and LOC in 100cm soil layer under different forest lands converted from slope farmland
不同字母表示在 $P<0.05$ 水平下不同还林地及其退耕年限下有机碳密度差异显著

2.3 土壤固定碳的分布特征及性质变化

退耕还林 40a 后,各还林地不同土层对土壤碳固定均表现出积极的作用(图 2)。0—20 cm 表层土对总体

100 cm 深土壤 TOC 增加贡献最大,在柠条、沙棘、刺槐林地中分别固定了 35.4%、27.9%、27.1% 的 TOC,但在 20—100 cm 各土层,随土层加深 TOC 累积的比例高低变化并无明显规律,固碳比例分别在 16.3%—20.3%、4.7%—23.9%、14.3%—24.4%。而对 LOC 仅沙棘林地在 0—20 cm 表层土累积 LOC 的比例显著高于低层土壤,累积比例达到 45.1%;柠条和刺槐林表层土壤累积的 LOC 比例分别为 20.2% 和 23.1%,并不都高于所有低层土壤。同样,在 20—100 cm 随土层加深,柠条、沙棘、刺槐林地各土层累积 LOC 的比例高低差异无一致规律,分别平均为 20.0%、13.7%、19.2%,说明长期退耕还林对深层土壤中 LOC 组分库的增加也有积极作用。

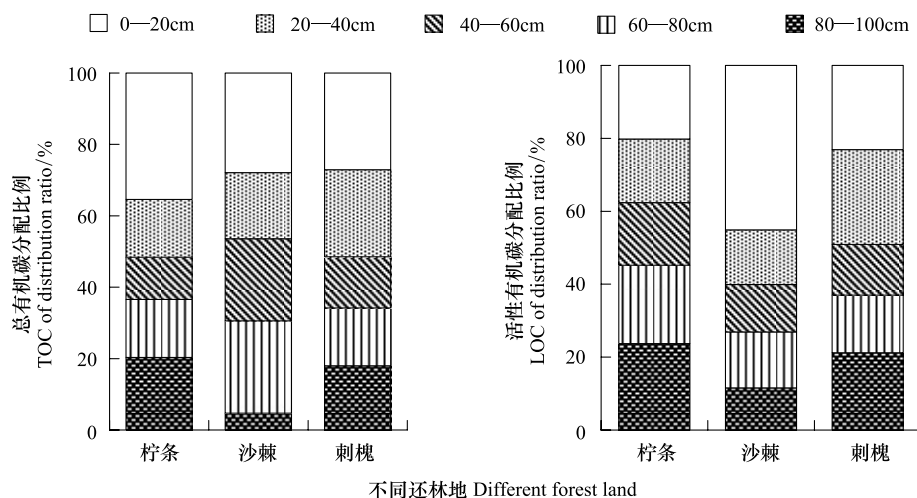


图 2 退耕还林 40a 不同林地固定的有机碳在不同土层中的分布

Fig. 2 Distribution of sequestered organic carbon in different forest land soil layer after 40 years conversion of farmland to forest

土壤中活性有机碳占总有机碳的比例 (LOC/TOC) 可在一定程度上反映土壤有机碳的质量和稳定程度。该比例大表明土壤有机碳较易矿化、周转期较短或活性高,该比例小则有机碳较稳定,不易被生物所利用^[18-19]。图 3 显示,退耕还林 40a 后,柠条和沙棘林地 0—20 cm 土层 LOC/TOC 比例达到 38.7% 和 40.2%,而 20—100 cm 各土层该比例较低,且基本接近,平均分别为 33.8% 和 23.8%。刺槐林地 100 cm 深土壤各土层 LOC/TOC 比例都基本接近,平均为 31.4%。与坡耕地比较,各还林地仅未使 0—60 cm 深土壤个别土层的 LOC/TOC 比例显著提高,但柠条、沙棘、刺槐林均使 60—80 cm 和 80—100 cm 深层土壤 LOC/TOC 比例显著增加,且增幅显著高于浅层土壤,分别达到 128.9%—164.4%、41.4%—112.4%、80.9%—171.3%,说明长期退耕还林对深层土壤碳库质量和稳定性有显著影响。从整体 100 cm 土壤看,各还林地 LOC/TOC 比例均比坡耕地显著增加,且增幅表现为柠条(63.7%)、刺槐林(47.0%)>沙棘林(34.0%)。可见,长期退耕还林能够增加土壤活性碳组分所占比例,改良了土壤碳库质量。

3 结论与讨论

3.1 长期退耕还林下不同林种及土层间固碳效应存在显著差异

Jandla 等^[6] 和 Guo 等^[20] 通过综述分析都说明农地转为林地后会显著增加土壤碳库,并且认为树种也是引起土壤碳库数量变化和差异的原因之一。本研究亦显示长期退耕还林下 100 cm 深土壤总有机碳密度比坡耕地显著增加,但固碳量以刺槐林最高,是沙棘和柠条林的 3.3 倍和 6.1 倍。不同土层间总有机碳累积则呈现随土层变深而减缓。表层土碳的迅速增加与凋落物的投入密切相关^[21-22],郭胜利等^[22] 研究显示黄土区乔木林类凋落物是灌木林类的 1.9 倍,而 0—20 cm 表层土有机碳含量前者是后者的 2.3 倍。这也解释了刺槐林作为乔木林在表层土对碳库增加就显著高于沙棘和柠条。随土层加深,林地根系生物碳的投入成为土壤碳增加的主要来源^[23]。如此,3 种林地间根系投入的不同使碳库变化产生差异,如曲卫东等^[23] 报道灌木林根系生物量主要分布在 0—30 cm 土层,并且在长期生长下逐渐衰落,故造成其固定碳量显著低于刺槐林。但根系

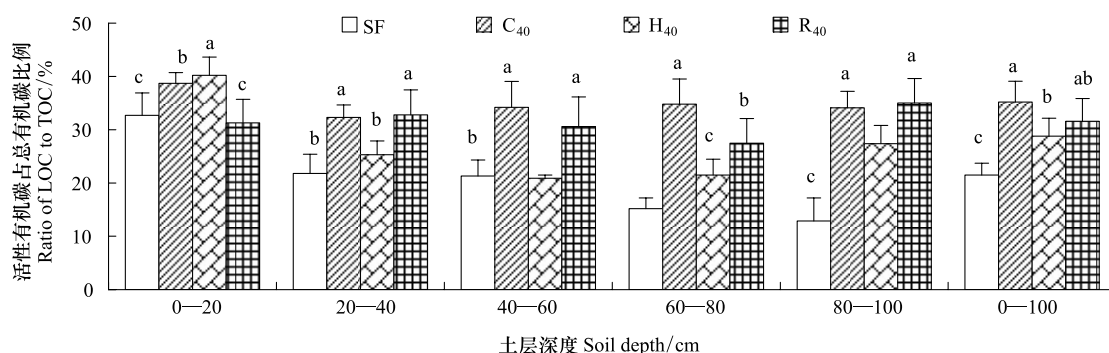


图3 退耕还林 40a 后不同林地土壤活性有机碳占总有机碳的比值

Fig.3 Ratio of LOC to TOC in different forest land after 40 years conversion of farmland to forest

不同小写字母代表同一土层中不同还林地活性有机碳占总有机碳比例相比差异显著

生长和恢复一定时间后才有更多的根系代谢有机物投入,从而促进碳积累。因此,3 种林地 40—100 cm 各土层总有机碳在退耕 20a 后才开始恢复增加,到退耕 40a 时也平均贡献了共 50.2% 的碳汇,可见评价黄土丘陵区植被恢复的土壤固碳效应时应充分考虑深层土壤有机碳储量和变化^[24]。

3.2 长期退耕还林显著提升了土壤活性碳组分密度,改良了土壤碳库质量

活性有机碳是土壤有机碳库中最活跃的部分,可促进土壤结构改善、养分供应及循环,能作为碳库和土壤质量改良的重要指标^[18,25]。本研究中长期退耕还林下 100 cm 深土壤活性有机碳随退耕年限延长显著增加,且增幅表现为刺槐>沙棘>柠条,说明其不仅促进了土壤总碳库的增加,且使碳库质量显著提升^[9,19]。但不同林地还林种和生长差异可能使输入土壤有机碳源的类型和多少有差异,从而引起各还林地对活性有机碳影响明显不同。这是因为 Tirol-Padre 等^[26]研究发现高锰酸钾能够氧化有机碳主要是糖类化合物、有机酸类如氨基酸、抗坏血酸及木质素等,它们都属于有机质的分解和根系分泌的产物,与植物种类密切相关。说明不同林种也会引起土壤碳库性质和质量产生显著差异。

从不同土层看,长期退耕还林下 3 种林地各土层对活性有机碳增加均有积极作用,但表层土壤对活性有机碳累积的贡献比例并不都高于深层土壤,说明退耕还林下深层土壤对活性有机碳的增加也有积极作用,并且活性有机碳可能是土壤碳库优先变化的组分^[17]。这可能是因为植被恢复过程中,植物作为碳素的源以凋落物、根系残体及其分泌物的形式把养分归还于土壤,而土壤作为库贮存碳素,随着植被恢复生物量增加,对作为生物生长所需速效基质的活性碳素需求逐渐增大,引起活性有机碳迅速增加^[10,25]。这与本研究中退耕还林显著提升了各还林地中 100 cm 深土壤活性有机碳占总有机碳的比例提高也对应。并且 3 种林地活性有机碳占总有机碳比例在 60—100 cm 深层土壤提高显著高于浅层土壤,说明退耕还林下即使深层土壤碳库活性也会明显发生变化,以促进植物生长与土壤间的碳及养分循环,间接的也改良了土壤质量^[18-19]。

References:

- [1] Lal R. Forest soils and carbon sequestration. *Forest Ecology and Management*, 2005, 220(1/3): 242-258.
- [2] Wu T Y, Schoenau J J, Li F M, Qian P Y, Zhang S Q, Malhi S S, Wang F. Concepts and relative analytical techniques of soil organic matter. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(4): 717-722.
- [3] Eswaran, H, Berg E van den, Reich P. Organic carbon in soils of the world. *Soil Science Society of America Journal*, 1993, 57(1): 192-194.
- [4] Lal R. Soil carbon sequestration to mitigate climate change. *Geoderma*, 2004, 123(1/2): 1-22.
- [5] Post W M, Kwon K. C. Soil carbon sequestration and land-use change: processes and potential. *Global Change Biology*, 2000, 6(3): 317-327.
- [6] Jandla R, Lindnerb M, Vesterdal L, Vesterdal L, Bauwens B, Baritz R, Hagedorn F, Johnson D W, Minkinen K, Byrne K A. How strongly can forest management influence soil carbon sequestration? *Geoderma*, 2007, 137(3/4): 253-268.
- [7] Akala V A, Lal R. Soil organic carbon pools and sequestration rates in reclaimed mine soils in Ohio. *Journal of Environmental Quality*, 2001, 30(6): 2098-2104.
- [8] Wang C M, Liu Y H, Shao B, Zhao J G. Quantifying the soil carbon changes following the afforestation of former arable land. *Journal of Beijing*

- Forestry University, 2007, 29(3): 112-119.
- [9] Jug A, Makeschin F, Rehfuess K E, Hofmann-Schielle C. Short-rotation plantations of balsam poplars, aspen and willows on former arable land in the Federal Republic of Germany (III): soil ecological effects. *Forest Ecological Manage*, 1999, 121(1/2): 85-99.
- [10] Xue S, Liu G B, Pan Y P, Dai Q H, Zhang C, Yu N. Evolution of soil labile organic matter and carbon management index in the Artificial Robinia of Loess Hilly Area. *Scientia Agricultura Sinica*, 2009, 42(4): 1458-1464.
- [11] Zhou G M, Xu J M, Wu J S, Jiang P K. Changes in soil active organic carbon with history of intensive management of *Phyllostachy pubescens* forest. *Science Silvae Sinicae*, 2006, 42(6): 124-128.
- [12] Lützw M V, Kögel-Knabner I, Ekschmitt K, Flessac H, Guggenberger G, Matzner E, Marschner B. SOM fractionation methods: relevance to functional pools and to stabilization mechanisms. *Soil Biology and Biochemistry*, 2007, 39(9): 2183-2207.
- [13] 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.
- [14] Dai Q H, Liu G B, Xue S, Yu N, Zhang C, Lan X. Effect of different vegetation restoration on soil carbon and carbon management index in Eroded Hilly Loess Plateau. *Research of Soil and Water Conservation*, 2008, 15(3): 61-64.
- [15] Liu G B. Soil conservation and sustainable agriculture on the Loess Plateau: challenge and prospective. *AMBIO*, 1999, 28(8): 663-668.
- [16] Bao S D. *Soil Agrochemical Analysis*. Beijing: China Agricultural Press, 2007: 30-34.
- [17] Blair G J, Lefrey 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.
- [18] Luan J W, Xiang C H, Liu S R, Luo Z S, Gong Y B, Zhu X L. Assessments of the impacts of Chinese fir plantation and natural regenerated forest on soil organic matter quality at Longmen mountain, Sichuan, China. *Geoderma*, 2010, 156(3/4): 228-236.
- [19] Tong X G, Xu M G, Zhang W J, Lu C A. Influence of long-term fertilization on content and distribution of organic carbon in particle-size fractions of Red Soil and Fluvo-aquic soil in China. *Scientia Agricultura Sinica*, 2008, 41(11): 3664-3671.
- [20] Guo L B, Gifford R M. Soil carbon stocks and land use change: a meta analysis. *Global Change Biology*, 2002, 8(4): 345-360.
- [21] Vesterdal L, Ritter E, Gundersen P. Change in soil organic carbon following afforestation of former arable land. *Forest Ecology and Management*, 2002, 169(1/2): 137-147.
- [22] Guo S L, Ma Y H, Che S G, Sun W Y. Effects of artificial and natural vegetations on litter production and soil organic carbon change in Loess Hilly areas. *Scientia Silvae Sinicae*, 2009, 45(10): 14-18.
- [23] Qu W D, Chen Y P, Wang L L, Zhang F, Zhang X W. Dynamics of soil organic carbon in *Caragana microphylla* forest and its relationship with environment factors in Loess Hilly region. *Science of Soil and Water Conservation*, 2011, 9(4): 72-77.
- [24] Wang Z, Liu G B, Xu M X. Effect of revegetation on soil organic carbon concentration in deep soil layers in the hilly Loess Plateau of China. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(14): 3947-3952.
- [25] 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(2): 211-219.
- [26] Tirol-Padre A, Ladha J K. Assessing the reliability of Permanganate-Oxidizable Carbon as an Index of soil labile carbon. *Soil Science Society of American Journal*, 2004, 68(3): 969-978.

参考文献:

- [2] 武天云, Schoenau J J, 李凤民, 钱佩源, 张树清, Malhi S S, 王方. 土壤有机质概念和分组技术研究进展. *应用生态学报*, 2004, 15(4): 717-722.
- [8] 王春梅, 刘艳红, 邵彬, 赵景刚. 量化退耕还林后土壤碳变化. *北京林业大学学报*, 2007, 29(3): 112-119.
- [10] 薛莲, 刘国彬, 潘彦, 戴全厚, 张超, 余娜. 黄土丘陵区人工刺槐林土壤活性有机碳与碳库管理指数演变. *中国农业科学*, 2009, 42(4): 1458-1464.
- [11] 周国模, 徐建明, 吴家森, 姜培坤. 毛竹林集约经营过程中土壤活性有机碳库的演变. *林业科学*, 2006, 42(6): 124-128.
- [13] 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.
- [14] 戴全厚, 刘国彬, 薛莲, 余娜, 张超, 兰雪. 不同植被恢复模式对黄土丘陵区土壤碳库及其管理指数的影响. *水土保持研究*, 2008, 15(3): 61-64.
- [16] 鲍士旦. *土壤农化分析*. 北京: 中国农业出版, 2007: 30-34.
- [19] 佟小刚, 徐明岗, 张文菊, 卢昌艾. 长期施肥对红壤和潮土颗粒有机碳含量与分布的影响. *中国农业科学*, 2008, 41(11): 3664-3671.
- [22] 郭胜利, 马玉红, 车升国, 孙文义. 黄土区人工与天然植被对凋落物量和土壤有机碳变化的影响. *林业科学*, 2009, 45(10): 14-18.
- [23] 曲卫东, 陈云明, 王琳琳, 张飞, 张学伍. 黄土丘陵区柠条人工林土壤有机碳动态及其影响因子. *中国水土保持科学*, 2011, 9(4): 72-77.
- [24] 王征, 刘国彬, 许明祥. 黄土丘陵区植被恢复对深层土壤有机碳的影响. *生态学报*, 2010, 30(14): 3947-3952.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 32, No. 20 October, 2012 (Semimonthly)

CONTENTS

Characteristics of nitrous oxide (N ₂ O) emission from a headstream in the upper Taihu Lake Basin	YUAN Shufang, WANG Weidong (6279)
Nutrient dynamics of the litters during standing and sediment surface decay in the Min River estuarine marsh	ZENG Congsheng, ZHANG Linhai, WANG Tian'e, et al (6289)
Diversity and distribution of endophytic bacteria isolated from <i>Caragana microphylla</i> grown in desert grassland in Ningxia	DAI Jinxia, WANG Yujiong (6300)
Spatial distribution of <i>Trabala vishnou gigantina</i> Yang pupae in Shaanxi Province, China	ZHANG Yiqiao, ZONG Shixiang, LIU Yonghua, et al (6308)
Effects of drought stress on <i>Cyclobalanopsis glauca</i> seedlings under simulating karst environment condition	ZHANG Zhongfeng, YOU Yeming, HUANG Yuqing, et al (6318)
Ecosystem diversity in Jinggangshan area, China	CHEN Baoming, LIN Zhengguang, LI Zhen, et al (6326)
Niche dynamics during restoration process for the dominant tree species in montane mixed evergreen and deciduous broadleaved forests at Mulinzi of southwest Hubei	TANG Jingming, AI Xuenru, YI Yongmei, et al (6334)
Effects of different day/night warming on the photosynthetic characteristics and chlorophyll fluorescence parameters of <i>Sinocalycanthus chinensis</i> seedlings	XU Xingli, JIN Zexin, HE Weiming, et al (6343)
The effect of simulated chronic high wind on the phenotype of <i>Salsola arbuscula</i>	NAN Jiang, ZHAO Xiaoying, YU Baofeng (6354)
Responses of N and P stoichiometry on mulching management in the stand of <i>Phyllostachys praecox</i>	GUO Ziwu, CHEN Shuanglin, YANG Qingping, et al (6361)
Tree-ring-based reconstruction of the temperature variations in February and March since 1890 AD in southern Jiangxi Province, China	CAO Shoujin, CAO Fuxiang, XIANG Wenhua (6369)
Diel variations and seasonal dynamics of soil respirations in subalpine meadow in western Sichuan Province, China	HU Zongda, LIU Shirong, SHI Zuomin, et al (6376)
Effects of fire disturbance on litter mass and soil carbon storage of <i>Betula platyphylla</i> and <i>Larix gmelinii</i> - <i>Carex schmidtii</i> swamps in the Xiaoxing'an Mountains of Northeast China	ZHOU Wenchang, MU Changcheng, LIU Xia, et al (6387)
Variance analysis of soil carbon sequestration under three typical forest lands converted from farmland in a Loess Hilly Area	TONG Xiaogang, HAN Xinhui, WU Faqi, et al (6396)
Soil-property and plant diversity of highway rocky slopes	PAN Shulin, GU Bin, LI Jiaxiang (6404)
Effects of slope position on soil microbial biomass of <i>Quercus liaotungensis</i> forest in Dongling Mountain	ZHANG Di, ZHANG Yuxin, QU Laiye, et al (6412)
Responses of water quality to landscape pattern in Taihu watershed: case study of 3 typical streams in Yixing	WANG Ying, ZHANG Jianfeng, CHEN Guangcai, et al (6422)
Study on the fairness of resource-environment system of Jiangxi Province based on different methods of Gini coefficient	HUANG Heping (6431)
Simulation of the spatial pattern of land use change in China: the case of planned development scenario	SUN Xiaofang, YUE Tianxiang, FAN Zemeng (6440)
Arable land change dynamics and their driving forces for the major countries of the world	ZHAO Wenwu (6452)
Denitrification characteristics of an aerobic denitrifying bacterium <i>Deffluibacter lusatiensis</i> str. DN7 using different sources of nitrogen	XIAO Jibo, JIANG Huixia, CHU Shuyi (6463)
Study on sustainable development in nanjing based on ecological footprint model	ZHOU Jing, GUAN Weihua (6471)
Applying input-output analysis method for calculation of water footprint and virtual water trade in Gansu Province	CAI Zhenhua, SHEN Laixin, LIU Junguo, et al (6481)
Correlation analysis of spatial variability of Soil available nitrogen and household nitrogen inputs at Pujiang County	FANG Bin, WU Jinfeng, NI Shaoxiang (6489)
Characteristics of the fish assemblages in the intertidal salt marsh zone and adjacent mudflat in the Yangtze Estuary	TONG Chunfu (6501)
A comparison study on the secondary production of macrobenthos in different wetland habitats in Shenzhen Bay	ZHOU Fufang, SHI Xiuhua, QIU Guoyu, et al (6511)
Regurgitant from <i>Orgyia ericae</i> Germar induces calcium influx and accumulation of hydrogen peroxide in <i>Ammopiptanthus mongolicus</i> (Maxim. ex Kom.) Cheng f. cells	GAO Haibo, ZHANG Shujing, SHEN Yingbai (6520)
Behavior characteristics and habitat adaptabilities of the endangered butterfly <i>Teinopalpus aureus</i> in Mount Dayao	ZENG Juping, ZHOU Shanyi, DING Jian, et al (6527)
Community structure and dynamics of fig wasps in syconia of <i>Ficus microcarpa</i> Linn. f. in Fuzhou	WU Wenshan, ZHANG Yanjie, LI Fengyu, et al (6535)
Review and Monograph	
Review and trend of eco-compensation mechanism on river basin	ZHANG Zhiqiang, CHENG Li, SHANG Haiyang, et al (6543)
Definition and research progress of sustainable consumption: from industrial ecology view	LIU Jingru, LIU Ruiquan, YAO Liang (6553)
The estimation and application of the water footprint in industrial processes	JIA Jia, YAN Yan, WANG Chenxing, et al (6558)
Research progress in ecological risk assessment of mining area	PAN Yajing, WANG Yanglin, PENG Jian, et al (6566)
Scientific Note	
Litter amount and its dynamic change of four typical plant community under the fenced condition in desert steppe	LI Xuebin, CHEN Lin, ZHANG Shuoxin, et al (6575)
Effects of planting densities and modes on activities of some enzymes and yield in summer maize	LI Hongqi, LIN Haiming, LIANG Shurong, et al (6584)

《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 32 卷 第 20 期 (2012 年 10 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 32 No. 20 (October, 2012)

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:1000717	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 70.00 元