

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第 33 卷 第 10 期 Vol.33 No.10 **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 10 期 2013 年 5 月 (半月刊)

目次

福建长汀水土保持专题

- 福建省长汀县水土流失区的时空变化研究——“福建长汀水土保持”专题序言 徐涵秋 (2945)
- 福建省长汀县河田盆地近 35 年来地表裸土变化的遥感时空分析 徐涵秋 (2946)
- 福建省长汀县河田水土流失区植被覆盖度变化及其热环境效应 徐涵秋, 何 慧, 黄绍霖 (2954)
- 红壤侵蚀地马尾松林恢复后土壤有机碳库动态 何圣嘉, 谢锦升, 曾宏达, 等 (2964)
- 基于 RUSLE 的福建省长汀县河田盆地土壤侵蚀定量研究 杨冉冉, 徐涵秋, 林 娜, 等 (2974)
- 南方红壤水土流失区土地利用动态变化——以长汀河田盆地为例 林 娜, 徐涵秋, 何 慧 (2983)
- 亚热带地区马尾松林碳储量的遥感估算——以长汀河田盆地为例 黄绍霖, 徐涵秋, 林 娜, 等 (2992)
- 南方红壤侵蚀区土壤肥力质量的突变——以福建省长汀县为例 陈志强, 陈志彪 (3002)

前沿理论与学科综述

- 土壤有机质转化及 CO₂ 释放的温度效应研究进展 沈征涛, 施 斌, 王宝军, 等 (3011)
- 湖泊蓝藻水华发生机理研究进展 马健荣, 邓建明, 秦伯强, 等 (3020)

个体与基础生态

- 岩溶区不同植被下土壤水溶解无机碳含量及其稳定碳同位素组成特征 梁 轩, 汪智军, 袁道先, 等 (3031)
- 黄脊雷鳉越冬卵的滞育发育特性 朱道弘, 陈艳艳, 赵 琴 (3039)
- 香港巨牡蛎与长牡蛎种间配子兼容性 张跃环, 王昭萍, 闫喜武, 等 (3047)

种群、群落和生态系统

- 西藏珠穆朗玛峰国家级自然保护区鸟类群落结构与多样性 王 斌, 彭波涌, 李晶晶, 等 (3056)
- 采伐对长白山阔叶红松林生态系统碳密度的影响 齐 麟, 于大炮, 周旺明, 等 (3065)
- 胶州湾近岸浅水区鱼类群落结构及多样性 徐宾铎, 曾慧慧, 薛 莹, 等 (3074)
- 黄河口盐地碱蓬湿地土壤-植物系统重金属污染评价 王耀平, 白军红, 肖 蓉, 等 (3083)
- 不同起始状态对草原群落恢复演替的影响 杨 晨, 王 炜, 汪诗平, 等 (3092)
- 施肥梯度对高寒草甸群落结构、功能和土壤质量的影响 王长庭, 王根绪, 刘 伟, 等 (3103)
- 高寒退化草地狼毒种群株丛间格局控制机理 高福元, 赵成章 (3114)
- 藏东南色季拉山西坡土壤有机碳库研究 马和平, 郭其强, 刘合满, 等 (3122)
- 灵石山不同海拔米槠林优势种叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值与叶属性因子的相关性 王英姿 (3129)
- 西门岛人工秋茄林恢复对大型底栖生物的影响 黄 丽, 陈少波, 仇建标, 等 (3138)
- 喀斯特峰丛洼地土壤剖面微生物特性对植被和坡位的响应 冯书珍, 苏以荣, 秦新民, 等 (3148)
- 青藏高原高寒草甸植被特征与温度、水分因子关系 徐满厚, 薛 娴 (3158)

景观、区域和全球生态

近 60 年挠力河流域生态系统服务价值时空变化..... 赵 亮,刘吉平,田学智 (3169)

基于系统动力学的雏菊世界模型气候控制敏感性分析..... 陈海滨,唐海萍 (3177)

资源与产业生态

主要气候因子对麦棉两熟棉花产量的影响..... 韩迎春,王国平,范正义,等 (3185)

低覆盖度行带式固沙林对土壤及植被的修复效应..... 姜丽娜,杨文斌,卢 琦,等 (3192)

不同土地利用方式土下岩溶溶蚀速率及影响因素..... 蓝家程,傅瓦利,彭景涛,等 (3205)

农地保护的外部效益测算——选择实验法在武汉市的应用 陈 竹,鞠登平,张安录 (3213)

研究简报

温度、投饵频次对白色霞水母无性繁殖与螅状体生长的影响 孙 明,董 婧,柴 雨,等 (3222)

内蒙古达赉湖西岸地区大鸕巢穴特征和巢址选择..... 张洪海,王 明,陈 磊,等 (3233)

红外相机技术在鼠类密度估算中的应用..... 章书声,鲍毅新,王艳妮,等 (3241)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 304 * zh * P * ¥90.00 * 1510 * 33 * 2013-05



封面图说: 色季拉山的长苞冷杉和高山杜鹃林——色季拉山高海拔处的植被主要有长苞冷杉、林芝云杉和高山杜鹃等,再高海拔地区则分布有高山灌丛、草甸等。长苞冷杉为我国特有种,属松科常绿乔木,分布于西藏东南部高山地带。树高可达 40m,树皮暗褐色,针叶较短;其球果圆柱形,直立。长苞冷杉的形态独特,与分布区内多种冷杉有密切的亲缘关系,和云杉、杜鹃的分布也彼此交叠。随着色季拉山体海拔的升高,区域气候对于山地土壤从黄壤至棕色森林土、直至高山草甸土的完整发育,以及对森林生态系统类型的形成都产生直接而深刻的影响。

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

DOI: 10.5846/stxb201203060303

齐麟, 于大炮, 周旺明, 周莉, 赵福安, 王长海, 代力民. 采伐对长白山阔叶红松林生态系统碳密度的影响. 生态学报, 2013, 33(10): 3065-3073.

Qi L, Yu D P, Zhou W M, Zhou L, Zhao F, Wang C H, Dai L M. Impact of logging on carbon density of broadleaved-Korean pine mixed forests on Changbai Mountains. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(10): 3065-3073.

采伐对长白山阔叶红松林生态系统碳密度的影响

齐 麟^{1,2}, 于大炮¹, 周旺明¹, 周 莉¹, 赵福安³, 王长海³, 代力民^{1,*}

(1. 森林与土壤生态国家重点实验室, 中国科学院沈阳应用生态研究所, 沈阳 110016;

2. 中国科学院研究生院, 北京 100049; 3. 吉林森工集团露水河林业局, 白山 134506)

摘要: 采伐对森林生态系统碳密度和固碳能力有重要的影响, 且影响的程度因采伐强度和方式不同而有巨大差异。以长白山地区原始阔叶红松林在不同采伐方式、采伐强度干扰后形成的次生林为研究对象, 通过对 2007 至 2009 年建立的 11 块 1 hm² 永久样地中植被层、凋落物层和土壤层碳密度在采伐前后变化特征的分析, 研究了采伐强度与恢复时间对阔叶红松林生态系统碳密度的影响。结果表明: 在短期内, 采伐导致了植被层和土壤表层(0—20cm)碳密度值的减少, 其中植被碳密度与采伐强度有显著的线性负相关关系($y = -0.9x + 91.17$, $R^2 = 0.626$, $P < 0.01$), 而后, 随着植被的恢复, 生态系统碳密度增加, 其中植被、土壤层碳密度呈显著线性正相关关系。根据植被碳密度与恢复时间之间的相关关系, 确定以生态系统恢复、木材生产与固碳三者兼顾的合适采伐强度为 30%, 轮伐期为 45a。

关键词: 阔叶红松林; 采伐; 碳密度; 长白山

Impact of logging on carbon density of broadleaved-Korean pine mixed forests on Changbai Mountains

QI Lin^{1,2}, YU Dapao¹, ZHOU Wangming¹, ZHOU Li¹, ZHAO Fu'an³, WANG Changhai³, DAI Limin^{1,*}

1 State Key Laboratory of Forest and Soil Ecology, Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China

2 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3 Jilin Forest Industry Group, Lushuihe forestry bureau, Baishan 134506, China

Abstract: Forest harvest practice is essential in influencing forest carbon density. Different logging methods, logging intensity, recovery methods, and recovery time have a profound impact on the forest ecosystem carbon density. Mixed broadleaf Korean pine (*Pinus koraiensis*) forest is an important component of temperate forest in China. Recent years, with the increase of forest harvest practice in broadleaved Korean pine forest, it is necessary to the study the impact of logging on broadleaved Korean pine forest ecosystem carbon density.

We established 1 hm² × 11 permanent sites from 2007 to 2009 including primary and secondary broadleaved-Korean pine mixed forests after logging based on different logging intensity and recovery time on Changbai mountains, northeast China and use the method of replacement between time and space to find out the impacts of logging intensity and recovery time on forest ecosystem carbon density. We investigate aboveground vegetation (DBH > 2cm), collect litter layer and sampled soil samples of each site. We use allometric equation and transforming relationship between biomass and carbon content to estimate aboveground vegetation carbon density, use dry matter per unit area of litter layer and carbon content to estimate the litter layer carbon density and use soil bulk density, per unit mass of carbon content to estimate soil carbon density.

基金项目: 国家林业公益性行业专项(201104070); 国家科技支撑计划项目(2012BAD22B04)

收稿日期: 2012-03-06; **修订日期:** 2012-08-29

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lmdai@126.com

Our results show that carbon density of vegetation and soil declined after logging, and the impact of logging on vegetation carbon density is mainly reflected in the main forest layer (DBH>20cm), and in the soil surface (0—20cm). We also found an increase in both vegetation (30% logging intensity: $y = 2.17x + 64.01$, $R^2 = 0.801$, $P < 0.01$; 40% logging intensity: $y = 2.46x + 37.87$, $R^2 = 0.783$, $P < 0.01$) and soil carbon density ($y = 2.34x + 76.91$, $R^2 = 0.847$, $P < 0.01$) with recovery time increasing. There is no significant impact of logging intensity or recovery time on litter layer carbon density, but different recovery methods has a significant impact on litter carbon density (larch plantation > Mixed broadleaf Korean pine forest > birch forest). There is a negative linear correlation between vegetation carbon density and logging intensity ($y = -0.9x + 91.17$, $R^2 = 0.626$, $P < 0.01$).

These results imply that although deforestation causes the reduction of forest ecosystem carbon density, the appropriate logging intensity and recovery time may solve the contradiction of timber production and carbon sequestration. Base on the relationship between carbon density and recovery time and logging intensity, we believe 30% logging intensity and 45 years' rotation are better for forest ecological recovery, timber production and carbon fixing.

Key Words: Broadleaved-Korean pine mixed forest; logging; carbon density; Changbai Mountains

森林作为陆地生态系统主要的碳库,占据着全球非冰陆地表面的 40%,与其他生态系统相比,其分布面积最大,生产力和生物量积累最高,在全球的碳循环中发挥着重要的作用^[1]。人类干扰对森林生态系统碳循环有重要影响^[2]。研究表明,若植被完全被采伐并进行土地耕种,除地上碳全部损失以外,土壤 1m 深度内土壤有机碳将损失 25%—30%,皆伐后进行耕作 15a 后土壤有机碳将损失 70%^[3-5]。若植被没有被完全采伐,则森林碳密度随采伐强度的变化而有所不同,高强度采伐不仅将导致植被组成和生物量的损失在短期内难以恢复,更会导致采伐迹地裸露面积增大,雨水冲刷严重,使土温升高,从而加速土壤中 C/N 元素的释放和流失^[6];经适当强度采伐的林分,若其结构及功能的变化在稳定、平衡的生态系统阈值内,使既能保持系统的平衡,又能调节林内环境因子,有利于系统内的元素转化利用,促进林木的快速生长和生态系统碳汇功能的增强^[7]。

长白山林区位于我国最大的东北林区。该区森林经营活动频繁,经过多年采伐利用,该区现存的森林主要是少部分的原始阔叶红松林和大部分破坏后恢复的天然次生林。森林经营活动直接使阔叶红松林植被的物种组成和数量产生变化,而对其植被和凋落物碳密度产生巨大影响^[8-10],而植被的改变又会导致微气候的改变,进而影响到土壤碳密度^[11-12]。为了明确森林经营活动对阔叶红松林生态系统各子碳库碳密度的影响,本研究选择长白山地区具有典型代表性的露水河林业局,基于该林业局经营管理资料和野外调查数据,以原始阔叶红松林和经采伐干扰后形成的次生林为研究对象,研究采伐对阔叶红松林植被碳库、枯死物碳库和土壤碳库的影响,并通过研究次生林植被碳密度采伐强度,恢复时间的相关关系,确定生态系统恢复、木材生产与固碳效益综合效益最大化的采伐强度与轮伐期,为制定合理的林业经营措施提供参考。

1 研究地区和研究方法

1.1 研究区域概况

本研究样地均位于露水河林业局(127°29'—128°02'E, 42°20'—42°40'N)。该局位于长白山西北麓的抚松县境内,年平均气温 4.5—7.8℃,年降水量 800—1040 mm,海拔 700—1000m,土壤为山地暗棕色森林土,土壤剖面发育明显,平均深度 50cm。该区地带性植被为阔叶红松林,1970 年开始森林采伐,经营历史较短,经营措施记录清晰。迄今为止,既有未受干扰保护完好的原始阔叶红松林,又有受不同强度采伐,经不同恢复时间而形成的各种次生阔叶红松林。

1.2 数据采集

1.2.1 生态系统碳密度计算

本研究中森林生态系统碳密度指单位面积森林生态系统有机碳储量,它包括植物、凋落物和土壤碳库

(不包括土壤动物碳储量)。

表 1 研究样地情况介绍
Table 1 General information of study sites

样地编号 Plot No.	森林类型 Forest type	设置时间 Survey time	采伐时间 Logging time	采伐强度 Logging intensity /%	乔木密度 Tree intensity /(株/hm ²)	平均胸径 Mean DBH /cm
A	原始阔叶红松林	2007	—	—	928	15.84
B	次生阔叶红松林	2007	1985	40	1819	8.61
B ₂ *	二次采伐	2008	2007	30	541	12.98
C	白桦林(皆伐后自然更新)	2007	1970	100	2556	8.66
D	落叶松林(皆伐后种植落叶松)	2007	1970	100	1496	8.66
E	次生阔叶红松林	2008	1980	30	929	13.56
E ₂	二次采伐	2009	2008	30	672	7.14
F	次生阔叶红松林	2008	1988	40	1975	7.76
F ₂	二次采伐	2009	2008	30	875	7.01
G	次生阔叶红松林	2008	1992	40	1860	7.92
G ₂	二次采伐	2009	2008	40	917	6.9
H	次生阔叶红松林	2007	1980	30	982	15.08
H ₂	二次采伐	2008	2007	40	665	8.13
I	次生阔叶红松林	2009	1985	30	653	14.84
J	次生阔叶红松林	2009	1997	30	1673	8.99
K	次生阔叶红松林	2009	1996	40	1592	8.84

* 样地编号字母有角标“2”的为当年采伐后次年复查

1.2.2 植被调查与碳密度计算

2007 至 2009 年,在露水河林业局东升林场,设置 11 块 100 m×100 m 面积为 1hm² 调查样地,森林类型包括原始阔叶红松林、经过不同干扰强度、恢复时间以及不同恢复措施形成的次生林(表 1)。将 1 hm² 样地分为 25 块 20 m×20 m 的小样方,详细调查、记录和标记 DBH≥2cm 的木本植物的种类、DBH 和树高,将每个小样方植被碳密度作为一个重复,计算 1hm² 样地植被碳密度。

将 2cm≤DBH<8cm 作为下木层、8cm≤DBH<20cm 作为次林层、DBH≥20cm 作为主林层归类,并根据吉林省一元材积表将乔木分 3 类:针叶树、一类阔叶树和二类阔叶树。根据东北主要树种生物量异速生长方程提供的木本植物胸径与各器官生物量的关系与树种在表 2 中所属的种类计算样地中每株木本植物的生物量^[13]。根据生物量与碳储量的转换系数^[14-16]计算每株树木的碳储量(碳储量=生物量×0.5),再根据植被调查结果推算样地尺度植被碳密度。

1.2.3 凋落物碳密度计算

凋落物碳库包括所有地表枯枝落叶和粗木质残体两部分,在上述 11 块样地中沿样地对角线(东北—西南方向)的 5 个小样方中进行凋落物调查。凋落物碳密度计算:将凋落物分为基部直径大于 10cm 的粗木质残体和小于 10cm 的枯枝落叶。调查粗木质残体两头直径,长度和腐烂级,根据圆台体积公式和腐烂级与碳储量的转换系数^[17]计算每个粗木质残体的碳储量。在每个小样方中,随机选择 3 块面积为 1m×1m 的样方,将所有样方内所有枯枝落叶装袋回实验室分析,根据烘干重和测定碳含量,计算凋落物碳密度。

1.2.4 土壤碳密度计算

在上述 11 块样地中每块样地对角线(东北—西南方向)的 5 个小样地中挖 50cm 深的土壤剖面,分为 10 cm 深的土壤共 5 层,用 100 cm³ 的环刀在每层土壤中取土样 1 份,装袋回实验室分析。根据土壤容重和碳含量计算土壤碳密度。

在上述取样与调查中碳含量分析均采用常规测定方法^[18]。

1.3 数据分析

采用 EXCEL 2010, Origin 8.5 和 SPSS16.0 软件进行数据统计分析和绘图, 采用回归方法进行采伐强度、恢复时间与碳密度关系方程拟合, 并以均方根误差 (RMSE) 和相对均方根误差 (RMSEr) 为指标进行拟合效果验证。采用单因素方差分析 (One way ANOVA) 和 Duncan 法进行差异性比较各样地碳密度。

2 结果与分析

2.1 样地植被、凋落物、土壤和生态系统碳密度

在 11 块样地中, 原始阔叶红松林 (A) 的植被层碳密度最大, 为 $152.87 \text{ MgC}/\text{hm}^2$, 显著高于其他各样地 ($P < 0.01$); 采伐时间距调查时间较短的样地碳密度最小, 值为 $64.52 \text{ MgC}/\text{hm}^2$ (B_2), $77.4 \text{ MgC}/\text{hm}^2$ (E_2), $62.21 \text{ MgC}/\text{hm}^2$ (F_2), $45.14 \text{ MgC}/\text{hm}^2$ (G_2) 和 $60.18 \text{ MgC}/\text{hm}^2$ (H_2), 显著低于其他各样地 ($P < 0.01$) (表 2)。

表 2 各样地生态系统碳密度
Table 2 Carbon density in 11 sites

样地编号 Plot No.	植被碳密度 Vegetation carbon density/ (MgC/hm^2)	凋落物碳密度 Litter layer carbon density /(MgC/hm^2)	土壤碳密度 Soil carbon density /(MgC/hm^2)	生态系统碳密度 Ecosystem carbon density/ (MgC/hm^2)
A	152.87 ± 20.90	18.61 ± 6.22	155.3 ± 6.92	326.78 ± 22.11
B	103.12 ± 12.88	15.73 ± 4.31	129.86 ± 5.08	235.71 ± 17.95
B_2	64.52 ± 7.24			
C	73.54 ± 7.13	10.29 ± 3.01	149.77 ± 7.16	233.6 ± 14.33
D	95.85 ± 6.95	58.01 ± 12.78	141.58 ± 4.32	295.44 ± 16.19
E	122.65 ± 16.17	17.5 ± 3.77	142.56 ± 5.21	289.71 ± 20.01
E_2	77.4 ± 6.72			
F	98.45 ± 8.84	22.85 ± 4.65	124.16 ± 6.14	251.46 ± 21.47
F_2	62.21 ± 7.29			
G	82.95 ± 7.02	19.97 ± 3.92	114.17 ± 7.66	223.09 ± 15.33
G_2	45.14 ± 6.44			
H	121.68 ± 13.91	26.26 ± 7.17	139.87 ± 6.51	284.81 ± 17.97
H_2	60.18 ± 5.13			
I	114.37 ± 10.87	21.08 ± 6.39	132.42 ± 5.91	267.87 ± 13.17
J	93.89 ± 8.26	18.24 ± 4.09	105.33 ± 7.09	222.46 ± 19.36
K	80.72 ± 8.01	17.97 ± 5.13	107.26 ± 3.22	211.95 ± 17.14

原始阔叶红松林植被碳库主要集中于主林层 (DBH $\geq 20\text{cm}$) 乔木层中, 其中下木层 (DBH $< 8\text{cm}$)、次林层 ($8\text{cm} \leq \text{DBH} < 20\text{cm}$)、主林层乔木碳密度分别占植被碳密度的 1.73%、6.87% 和 91.4%。白桦林与落叶松林中次林层与较主林层乔木碳密度相差不大 (白桦林: 林下层占 2.90%, 次林层占 41.52%, 主林层占 55.57%; 落叶松林: 林下层占 2.46%, 次林层占 31.26%, 主林层占 66.27%) (图 1)。皆伐后次生阔叶红松林中林下层乔木碳密度所占植被碳密度的比例要高于原始阔叶红松林, 而主林层乔木碳密度所占植被碳密度的比例远低于原始阔叶红松林 (表 2)。

在 11 块调查样地中, 凋落物碳密度值显著分为 3 个水平, $D > A, B, E, F, G, H, I, J, K > C$, 即落叶松林 $>$ 阔叶红松林 $>$ 白桦林 ($P < 0.01$) (表 2)。各样地凋落物碳密

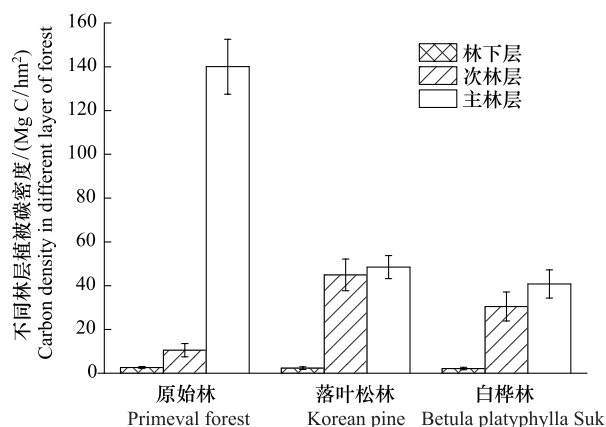


图 1 不同类型森林各径级乔木碳密度

Fig. 1 Carbon stocks of forest each diameter class in three types of forest

度值与采伐强度和恢复时间无显著相关关系 ($P>0.05$)。

各样地中的土壤碳密度均值在 $100\text{--}160\text{ MgC/hm}^2$ 之间,且无显著差异 ($P>0.05$)。原始林样地中的土壤碳密度与植被碳密度相当。而样地 B、C、D、F、G、H、I、J 和 K 的土壤层碳密度均大于样地植被层碳密度,即经采伐干扰对样地植被碳密度的影响要高于对照样地中土壤层碳密度的影响(表 2)。各样地的植被、凋落物和土壤的碳密度汇总得到生态系统碳密度。原始林样地的生态系统碳密度最大,其余各经采伐干扰的样地的生态系统碳密度均小于原始林样地(表 2)。

2.2 采伐强度与恢复时间对植被碳密度的影响

采伐干扰对样地植被碳密度的影响规律性较强,即采伐强度越小,植被恢复时间越长(采伐时间越早),调查时样地的植被层碳密度越大(图 2)。其中采伐强度与植被碳密度呈显著的线性负相关关系 ($R^2=0.726$, $P<0.05$)。植被层碳密度则随着时间呈显著线性增长(图 2)。

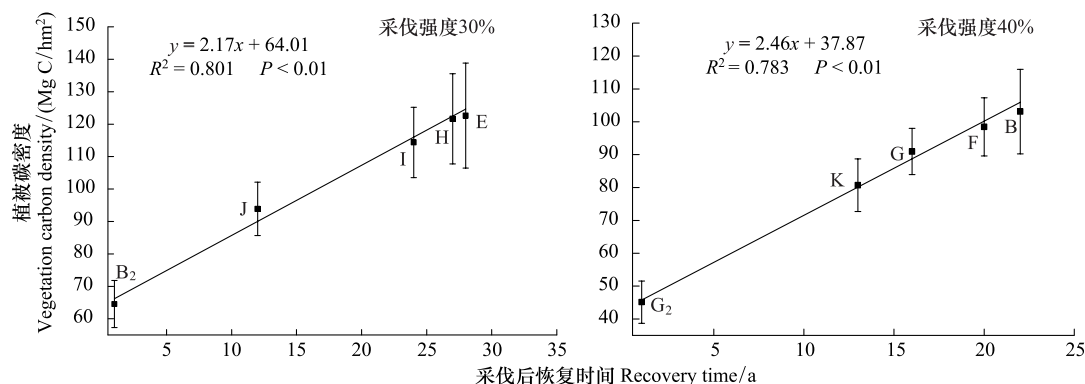


图 2 恢复时间与植被碳密度相关关系

Fig. 2 Relationship between vegetation carbon density and recovery time

曲线上字母为样地编码

经采伐形成的次生阔叶红松林中不同径级乔木碳密度随恢复的时间而发生改变。林下层乔木碳密度随着恢复时间的增加而降低,主林层乔木碳密度随着恢复时间的增加而增加,次林层乔木碳密度随时间的增加变化不大(图 4)。

2.3 采伐对土壤碳密度的影响

各样地的土壤碳密度均随深度的增加而减少,不同类型样地在土壤表层($0\text{--}10\text{cm}$ 和 $10\text{--}20\text{cm}$) 的碳密度有较大差异:在 $0\text{--}10\text{cm}$ 层,原始阔叶红松林土壤碳密度最高,为 65.18 MgC/hm^2 ,落叶松林土壤碳密度最低,为 51.48 MgC/hm^2 ;在 $10\text{--}20\text{cm}$ 层,原始阔叶红松林土壤碳密度最高,为 49.01 MgC/hm^2 择伐后的从次生林最低,为 36.22 MgC/hm^2 。20—50cm 各层中不同类型样地土壤碳密度差异很小(图 5)。

经过采伐干扰的次生林土壤碳密度均低于原始阔叶红松林土壤碳密度。其中恢复时间较长的白桦林与落叶松林土壤碳密度与原始阔叶红松林土壤碳密度较为接近(表 1)。各择伐后次生林样地土壤碳密度与采伐强度无显著相关关系 ($R^2=-0.073$, $P>0.05$),但与恢复年限有显著相关性 ($R^2=0.847$, $P<0.01$) (图 3)。

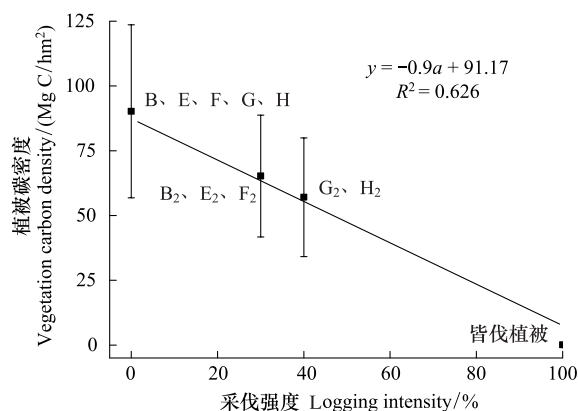


图 3 碳密度与采伐强度相关关系

Fig. 3 Relationship between carbon density and logging intensity

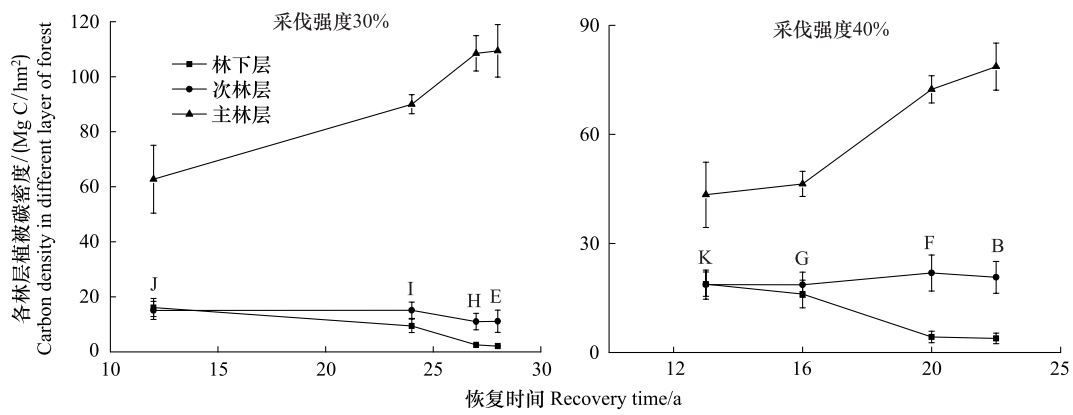


图4 不同径级植被碳密度变化与的关系

Fig. 4 Vegetation carbon stocks changes of different diameter classes along recovery time

3 讨论

3.1 阔叶红松林生态系统碳密度特征

作为东北地区典型森林生态系统之一,阔叶红松林生态系统有着较高的碳密度。在本研究中,11 块样地的平均地上碳密度为 98.02 MgC/hm^2 ,高于全国植被平均碳密度 57.07 MgC/hm^2 ^[10] 41.32 MgC/hm^2 ^[19]、 41.00 MgC/hm^2 ^[20] 的估计值,低于李文华等人对阔叶红松林地上碳密度 134.50 MgC/hm^2 的估算 ^[21]。唐凤德等人通过(Sim-cycle)模型,估算长白山原始阔叶红松林植被碳密度 182.5 MgC/hm^2 ,与本研究原始阔叶红松林植被碳密度相当 ^[22],而凋落物碳密度为 8.7 MgC/hm^2 ,仅为本研究中凋落物碳密度 21.1 MgC/hm^2 的一半。土壤碳密度为 358.3 MgC/hm^2 ,远高于本研究原始林土壤碳密度 157.1 MgC/hm^2 。闫平等人对阔叶红松林土壤碳密度的研究结果为 220.30 MgC/hm^2 ,与本研究相近 ^[23]。造成这种差异的原因可能是:(1)研究方法,本研究与闫平等人的研究均为在样地调查的基础上得出,而唐等人的结果为模型推算,且与本研究的研究尺度不同。(2)生态系统起源不同,原始林在地上部分达到碳

平衡后,土壤碳储量依旧上升,因此,不同林龄的同一类型的原始林在土壤碳储量上也可能存在较大差异。(3)样地本底异质性,土壤碳储量不仅仅受到地上植被的影响,土壤发育,地形的因素也会对土壤碳密度造成加大影响,因此,由于研究区域的不同也会造成研究结果的较大差异。

在原始的阔叶红松林中,植被碳密度与土壤碳密度相当,两者占生态系统碳密度的 90% 以上。其余各次生林的植被碳库与土壤碳库均小于原始林,说明采伐造成了植被碳库与土壤碳库的流失,而土壤碳库的变化范围低于植被碳库,说明采伐对植被碳库的影响要高于对土壤碳库的影响(表 3)。

3.2 经营方式对阔叶红松林植被、凋落物、土壤碳密度的影响

采伐直接导致植被碳库碳密度减少,且采伐方式与强度直接影响植被碳库减少的程度(图 2,图 3),由于采伐所选择的乔木皆为主林层中的乔木,所以采伐后主林层乔木碳密度占植被总植被碳密度的比例也随之降低。由于主林层乔木的去除,森林中乔木竞争压力的减少,林下层乔木生长旺盛,故其碳密度所占比例要高于

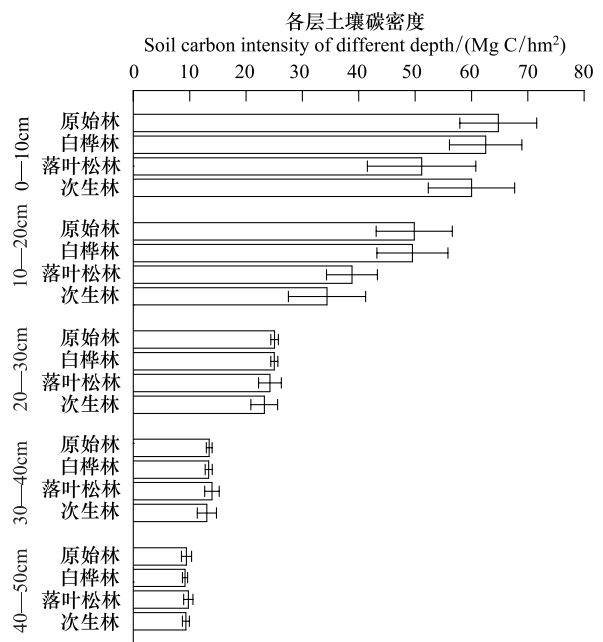


图5 各类型样地土壤碳密度垂直分布

Fig. 5 Vertical distribution of soil organic carbon in each type of site

原始阔叶红松林。随着恢复时间的增加,林下层乔木生长至次林层,而次林层乔木生长至主林层,主林层乔木碳密度所占的比例增加,而由于竞争压力的增加,小径级乔木碳密度所占的比例下降(图4)。另一方面,采伐后,恢复的方式对森林群落更新和演替有重要的影响,恢复的乔木种类直接影响到植被碳密度恢复的速度。在本研究中,C、D两块样地尽管是皆伐,但因其恢复树种是白桦和落叶松这样的速生先锋物种,其植被碳密度在30a的增量远远高于择伐后自然恢复的次生阔叶红松林30a的植被碳密度增量(表2)。总体来说,采伐导致了森林生物量的下降,而在较长时间尺度上,植被生物量应该呈逻辑斯蒂增长,植被碳密度得变化也应该与之相符,而本研究中各样地植被碳密度随时间呈线性增长,是本研究的时间跨度为40a左右,植被碳密度尚未达到顶级群落的稳定状态所致。

森林经营对生态系统凋落物碳密度的影响体现在采伐方式和更新方式的不同上。不同的采伐方式和更新方式,导致了凋落物的组成发生了变化,其中择伐没有使凋落物的种类和组成发生改变,皆伐后天然更新使阔叶凋落物(主要是白桦落叶)占据了凋落物的主要储量,而皆伐后人工更新的落叶松林其凋落物的主要组成为针叶。凋落物的种类与组成不同,其C/N也不同,周转速率也不同。阔叶林中凋落物的C/N比较低,因此周转较快,针叶凋落物C/N较高,周转较慢。在本研究中,落叶松林凋落物碳库碳密度远高于择伐后次生林中凋落物碳密度,而采伐强度对次生阔叶红松林生态系统凋落物碳密度的影响并不明显。

森林经营对阔叶红松林生态系统土壤碳库的影响较为复杂,一方面,由于采伐改变了林内植被的组成和微气候,进而改变了土壤微生物的组成与数量,改变了土壤碳循环,使土壤碳库碳密度发生变化。落叶松林中因凋落物难以分解,因此,有大量的有机碳储存在凋落物层中而向表层土壤输入的有机碳较少,导致了土壤表层有机碳低于原始阔叶红松林。另一方面,采伐作业本身也对土壤表层理化及生物结构造成了巨大的破坏,导致了在次生阔叶红松林中表层土壤碳密度远低于其他样地。在本研究中,不同经营方式均导致了土壤碳的流失,且影响的垂直深度在20cm左右,即森林经营对土壤表层碳密度影响较大。土壤碳密度与恢复时间相关性分析的起点是12a,而相关分析的结果是线性正相关说明了样地土壤有机碳流失过程的时间少于12a,且流失的速度远大于积累的速度。

3.3 采伐强度、轮伐期与植被碳密度

由植被碳密度与采伐后恢复时间的相关关系(图1,图2)可以计算出,当采伐强度为40%时,植被碳密度恢复到原始阔叶红松林碳密度 $150\text{MgC}/\text{hm}^2$ 的水平大约需要55a,而采伐强度为30%时,则只需要45a。由此可以确定,当采伐强度为40%时,合理的轮伐期应为55a,而当采伐强度为30%时,合理的轮伐期应为45a。而从有利于森林固碳的采伐经营来看,30%的采伐强度可以减小采伐时带来的植被碳密度损失。另外,从各径级乔木碳密度随恢复时间变化的规律来看,30%采伐强度后,大径级乔木碳密度的恢复速度要远高于40%采伐(图4)。

对于同一个阔叶红松林生态系统,如采用40%的采伐强度,55a的轮伐期,170a左右生态系统经3次采伐后植被碳密度均重新恢复到原始阔叶红松林水平,生产了原始阔叶红松林 $3\times 40\%$ 蓄积量的木材(图3)。而如果采用30%的采伐强度,仅在180a中则会经历4次采伐并恢复到原始状态,并会生产原始阔叶红松林蓄积 $4\times 30\%$ 木材。与同一时间中采伐强度为40%的采伐方式生产的木材数量相当。

4 结论

综上所述,择伐、皆伐以及皆伐后不同的更新方式都对阔叶红松林生态系统中植被、凋落物以及土壤碳密

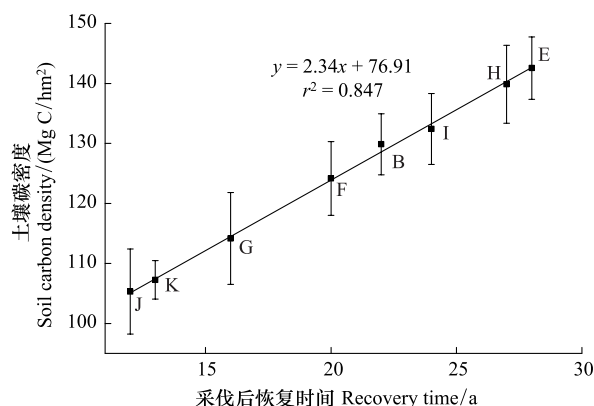


图6 土壤碳密度与采伐后恢复时间的相关关系

Fig.6 Relationship between soil carbon density and recovery time

度产生了不同的、深远的影响。无论从生产力还是从固碳与生态恢复角度,较低的择伐强度,较长的伐期都是有利于阔叶红松林可持续经营的采伐方式。

References:

- [1] Zhao S D, Wang Y X, Forest and carbon cycle. Impact of Science on Society, 2001, 03: 38-41.
- [2] Dixon R K, Solomon A M, Brown S, Houghton R A, Trexler M C, Wisniewski J. Carbon pools and flux of global forest ecosystems. Science, 1994, 263(5144): 185.
- [3] Johnson D W. Effects of forest management on soil carbon storage. Water, Air, & Soil Pollution, 1992, 64(1): 83-120.
- [4] Lee J, Morrison I K, Leblanc J D, Dumas M T, Cameron D A. Carbon sequestration in trees and regrowth vegetation as affected by clearcut and partial cut harvesting in a second-growth boreal mixedwood. Forest Ecology and Management, 2002, 169(1/2): 83-101.
- [5] Saari P, Saarnio S, Kukkonen J V K, Akkanen J, Heinonen J, Saari V, Alm J. DOC and N₂ O dynamics in upland and peatland forest soils after clear-cutting and soil preparation. Biogeochemistry, 2009, 94(3): 217-231.
- [6] Johnson D W, Curtis P S. Effects of forest management on soil C and N storage: meta-analysis. Forest Ecology and Management, 2001, 140(2/3): 227-238.
- [7] Mazzei L, Sist P, Ruschel A, Putz F E, Marco P, Pena W Ferreira J E. Above-ground biomass dynamics after reduced-impact logging in the Eastern Amazon. Forest Ecology and Management, 2010, 259(3): 367-373.
- [8] Fang J Y, Chen P A. Dynamic Forest Biomass Carbon Pools in China and Their Significance. Acta Botanica Sinica, 2001, 09: 967-973.
- [9] Yang L Y, Luo T, Wu S T. Fine root biomass and its depth distribution across the primitive Korean pine and broad-leaved forest and its secondary forests in Changbai Mountain, northeast China. Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(9): 3609-3618.
- [10] Zhou Y R, Yu Z L, Zhao S D. Carbon storage and budget of major Chinese forest types. Acta Phytocologica Sinica, 2000, 05: 518-522.
- [11] Yang L Y, Dai L M. Storage and decomposition of fallen wood in dark coniferous forest on the North Slope of Changbai Mountain. Chinese Journal of Applied Ecology, 2002, 13(9): 1069-1071.
- [12] Zhou L, Dai L M, Gu H Y, Yu D P. Dynamics of soil nutrient contents in cutting forestlands of broad-leaved Korean pine forest on Changbai Mountains. Chinese Journal of Applied Ecology, 2004, 15(10): 1771-1775.
- [13] Jilin Forestry Department, Standing timber volume table of Jilin. Changchun: Jilin Forestry Department. 2003: 185-192.
- [14] Guan N, Chen C. wood density and cutting resistance of Korean pine and *Fraxinus mandshurica*. Scientia Silvae Sinicae, 1990, 26(2): 149-155.
- [15] Guan N. 11 Coniferous wood density and cutting resistance. Scientia Silvae Sinicae, 1991, 27(006): 630-638.
- [16] Guan N. 15 Stella material in the cutting thickness, rake angle and moisture content of wood cutting resistance. Scientia Silvae Sinicae, 1994, 30(2): 134-139.
- [17] Gu H Y, Dai L M. Effect of Human Disturbance on Coarse Woody Debris in Korean Pine and Broad-Leaved Mixed Forest on Changbai Mountain. , 2006, 42(10): 1-5.
- [18] Liu G S. Soil physical and chemical analysis and profile description. 1996. Beijing: Standards Press of China.
- [19] Zhao M, Zhou G S. Carbon Storage of Forest Vegetation and Its Relationship with Climatic Factors. Scientia Geographica Sinica, 2004, 24(1): 50-54.
- [20] Fang J Y, Guo Z D, Piao S L. 1981—2000 Chinese terrestrial vegetation carbon sinks estimating. Science in China(Series D:Earth Sciences), 2007, 37(6): 804-812.
- [21] Li W H, Deng K M, Li F. Changbai Mountain ecosystem biomass production. Forest Ecosystem Research, 1981, 2(34): 22-24.
- [22] Tang F D, Han S J, Zhang J H. Carbon dynamics of broad-leaved Korean pine forest ecosystem in Changbai Mountains and its responses to climate change. Chinese Journal of Applied Ecology, 2009, 20(6): 1285-1292.
- [23] Yan P, Feng X C. Spatial Distribution and Carbon Storage in Primitive Broadleaved Korean Pine Forests. Journal of Northeast Forestry University, 2006, 34(005): 23-25.

参考文献:

- [1] 赵士洞, 汪业勤, 森林与碳循环. 科学对社会的影响, 2001, 03: 38-41.
- [8] 方精云, 陈安平, 中国森林植被碳库的动态变化及其意义. 植物学报, 2001, 09: 967-973.
- [9] 杨丽韞, 罗天祥, 罗松涛. 长白山原始阔叶红松 (*Pinus koraiensis*) 林及其次生林细根生物量与垂直分布特征. 生态学报, 2007, 27(9):

3609-3618.

- [10] 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, 05: 518-522.
- [11] 杨丽韞, 代力民. 长白山北坡暗针叶林倒木贮量和分解的研究. 应用生态学报, 2002, 13(9): 1069-1071.
- [12] 周莉, 代力民, 谷会岩, 于大炮. 长白山阔叶红松林采伐迹地土壤养分含量动态研究. 应用生态学报, 2004, 15(10): 1771-1775.
- [13] 吉林省林业厅. 吉林省一元立木材积表. 长春: 吉林省林业厅, 2003: 185-192.
- [14] 管宁, 陈森. 红松水曲柳木材密度与切削阻力关系的研究. 林业科学, 1990, 26(2): 149-155.
- [15] 管宁. 11 种针叶树木材密度与切削阻力关系的研究. 林业科学, 1991, 27(006): 630-638.
- [16] 管宁. 15 种针叶树材中切削厚度, 刀具前角和木材含水率对切削阻力的影响. 林业科学, 1994, 30(2): 134-139.
- [17] 谷会岩, 代力民. 人为干扰对长白山红松针阔叶混交林粗木质残体的影响. 林业科学, 2006, 42(10): 1-5.
- [18] 刘光崧. 土壤理化分析与剖面描述. 1996: 中国标准出版社.
- [19] 赵敏, 周广胜. 中国森林生态系统的植物碳贮量及其影响因子分析. 地理科学, 2004, 24(1): 50-54.
- [20] 方精云, 郭兆迪, 朴世龙, 陈平安. 1981—2000 年中国陆地植被碳汇的估算. 中国科学: D 辑, 2007, 37(6): 804-812.
- [21] 李文华, 邓坤枚, 李飞. 长白山主要生态系统生物量生产量的研究. 森林生态系统研究, 1981, 2(34): 22-24.
- [22] 唐凤德, 韩士杰, 张军辉. 长白山阔叶红松林生态系统碳动态及其对气候变化的响应. 应用生态学报, 2009, 20(6): 1285-1292.
- [23] 闫平, 冯晓川. 原始阔叶红松林碳素储量及空间分布. 东北林业大学学报, 2006, 34(005): 23-25.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 33, No. 10 May, 2013 (Semimonthly)

CONTENTS

Special Topics in Soil and Water Conservation of County Changting, Fujian Province

- Spatiotemporal dynamics of the bare soil cover in the Hetian basinal area of County Changting, China, during the past 35 years XU Hanqiu (2946)
- Analysis of fractional vegetation cover change and its impact on thermal environment in the Hetian basinal area of County Changting, Fujian Province, China XU Hanqiu, HE Hui, HUANG Shaolin (2954)
- Dynamic of soil organic carbon pool after restoration of *Pinus massoniana* in eroded red soil area HE Shengjia, XIE Jinsheng, ZENG Hongda, et al (2964)
- RUSLE-based quantitative study on the soil erosion of the Hetian basin area in County Changting, Fujian Province, China YANG Ranran, XU Hanqiu, LIN Na, et al (2974)
- Land use changes in a reddish soil erosion region of Southern China: Hetian Basin, County Changting LIN Na, XU Hanqiu, HE Hui (2983)
- Remote-sensing estimate of the carbon storage of subtropical *Pinus massoniana* forest in the Hetian Basin of County Changting, China HUANG Shaolin, XU Hanqiu, LIN Na, et al (2992)
- Mutation of soil fertility quality in the red eroded area of southern China: A case study in Changting County, Fujian Province CHEN Zhiqiang, CHEN Zhibiao (3002)

Frontiers and Comprehensive Review

- The temperature dependence of soil organic matter decomposition and CO₂ efflux: a review SHEN Zhengtao, SHI Bin, WANG Baojun, et al (3011)
- Progress and prospects on cyanobacteria bloom-forming mechanism in lakes MA Jianrong, DENG Jianming, QIN Boqiang, et al (3020)

Autecology & Fundamentals

- Characteristics of concentrations and carbon isotope compositions of dissolved inorganic carbon in soil water under varying vegetation in karst watershed LIANG Xuan, WANG Zhijun, YUAN Daoxian, et al (3031)
- The traits of diapause development of overwinter eggs in *Rammeacris kiangsu* Tsai (Orthoptera: Arcypteridae) ZHU Daohong, CHEN Yanyan, ZHAO Qin (3039)
- Analysis of gamete compatibility between *Crassostrea hongkongensis* and *C. gigas* ZHANG Yuehuan, WANG Zhaoping, YAN Xiwu, et al (3047)

Population, Community and Ecosystem

- Avifaunal community structure and species diversity in the Mt. Qomolangma National Nature Reserve, Tibet, China WANG Bin, PENG Boyong, LI Jingjing, et al (3056)
- Impact of logging on carbon density of broadleaved-Korean pine mixed forests on Changbai Mountains QI Lin, YU Dapao, ZHOU Wangming, et al (3065)
- Community structure and species diversity of fish assemblage in the coastal waters of Jiaozhou Bay XU Binduo, ZENG Huihui, XUE Ying, et al (3074)
- Assessment of heavy metal contamination in the soil-plant system of the *Suaeda salsa* wetland in the Yellow River Estuary WANG Yaoping, BAI Junhong, XIAO Rong, et al (3083)
- The effects of different original state on grassland community restoration succession YANG Chen, WANG Wei, WANG Shiping, et al (3092)
- Effects of fertilization gradients on plant community structure and soil characteristics in alpine meadow WANG Changting, WANG Genxu, LIU Wei, et al (3103)
- Pattern-controlling mechanics of different age classes of *Stellera chamaejasme* population in degraded alpine grassland GAO Fuyuan, ZHAO Chengzhang (3114)

- Soil organic carbon pool at the western side of the sygera mountains, southeast Tibet, China MA Heping, GUO Qiqiang, LIU Heman, et al (3122)
- Correlation between foliar $\delta^{13}\text{C}$ and foliar trait factors of dominant species in *Castanopsis carlessii* forests in Lingshishan National Forest Park WANG Yingzi (3129)
- Influences of artificial *Kandelia obovata* mangrove forest rehabilitation on the macrobenthos in Ximen Island HUANG Li, CHEN Shaobo, CHOU Jianbiao, et al (3138)
- Responses of soil microbial properties in soil profile to typical vegetation pattern and slope in karst-cluster depression area FENG Shuzhen, SU Yirong, QIN Xinmin, et al (3148)
- Correlation among vegetation characteristics, temperature and moisture of alpine meadow in the Qinghai-Tibetan Plateau XU Manhou, XUE Xian (3158)
- Landscape, Regional and Global Ecology**
- The temporal and spatial variation of the value of ecosystem services of the Naoli River Basin ecosystem during the last 60 years ZHAO Liang, LIU Jiping, TIAN Xuezhi (3169)
- Sensitivity analysis of climate control in the Daisyworld model based on system dynamics CHEN Haibin, TANG Haiping (3177)
- Resource and Industrial Ecology**
- Analysis of key climatic factors influencing on seed cotton yield in cotton-wheat double cropping HAN Yingchun, WAN Guoping, FAN Zhengyi, et al (3185)
- The effect of low-covered sand-fixing forest belts on restoration of the soil and vegetation JIANG Lina, YANG Wenbin, LU Qi, et al (3192)
- Dissolution rate under soil in karst areas and the influencing factors of different land use patterns LAN Jiacheng, FU Wali, PENG Jingtao, et al (3205)
- Measuring external benefits of agricultural land preservation: an application of choice experiment in Wuhan, China CHEN Zhu, JU Dengping, ZHANG Anlu (3213)
- Research Notes**
- Effect of temperature and feeding frequency on asexual reproduction and polyp growth of the scyphozoan *Cyanea nozakii* Kishinouye SUN Ming, DONG Jing, CHAI Yu, LI Yulong (3222)
- The research on *Buteo hemilasius* nest-site selection on the west bank of Dalai Lake in Dalai Lake Natural Reserve ZHANG Honghai, WANG Ming, CHEN Lei, et al (3233)
- Estimating rodent density using infrared-triggered camera technology ZHANG Shusheng, BAO Yixin, WANG Yanni, et al (3241)

《生态学报》2013 年征订启事

《生态学报》是由中国科学技术协会主管,中国生态学学会、中国科学院生态环境研究中心主办的生态学高级专业学术期刊,创刊于 1981 年,报道生态学领域前沿理论和原始创新性研究成果。坚持“百花齐放,百家争鸣”的方针,依靠和团结广大生态学科工作者,探索自然奥秘,为生态学基础理论研究搭建交流平台,促进生态学研究深入发展,为我国培养和造就生态学科人才和知识创新服务、为国民经济建设和发展服务。

《生态学报》主要报道生态学及各分支学科的重要基础理论和应用研究的原始创新性科研成果。特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评价和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,300 页,国内定价 90 元/册,全年定价 2160 元。

国内邮发代号:82-7,国外邮发代号:M670

标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

本期责任副主编 高玉葆

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 10 期 (2013 年 5 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 33 No. 10 (May, 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