

ISSN 1000-0933  
CN 11-2031/Q

# 生态学报

## Acta Ecologica Sinica



第34卷 第11期 Vol.34 No.11 **2014**

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 34 卷 第 11 期 2014 年 6 月 (半月刊)

## 目 次

### 前沿理论与学科综述

土壤大孔隙流研究现状与发展趋势..... 高朝侠,徐学选,赵娇娜,等 (2801)

### 能源基地生态修复

我国大型煤炭基地建设的生态恢复技术研究综述..... 吴 钢,魏 东,周政达,等 (2812)

国家大型煤电基地生态环境监测技术体系研究——以内蒙古锡林郭勒盟煤电基地为例.....

..... 魏 东,全 元,王辰星,等 (2821)

基于 DPSIR 模型的国家大型煤电基地生态效应评估指标体系 ..... 周政达,王辰星,付 晓,等 (2830)

西部干旱区煤炭开采环境影响研究..... 雷少刚,卞正富 (2837)

露天煤矿区生态风险受体分析——以内蒙古平庄西露天煤矿为例..... 高 雅,陆兆华,魏振宽,等 (2844)

草原区矿产开发对景观格局和初级生产力的影响——以黑岱沟露天煤矿为例.....

..... 康萨如拉,牛建明,张 庆,等 (2855)

三七对土壤中镉、铬、铜、铅的累积特征及健康风险评价 ..... 林龙勇,阎秀兰,廖晓勇,等 (2868)

某焦化场地土壤中多环芳烃分布的三维空间插值研究..... 刘 庚,毕如田,权 腾,等 (2876)

### 个体与基础生态

杉木人工混交林对土壤铝毒害的缓解作用 ..... 雷 波,刘 彬,罗承德,等 (2884)

基于  $\delta^{15}\text{N}$  稳定同位素分析的人工防护林大型土壤动物营养级研究 ..... 张淑花,张雪萍 (2892)

铅镉抗性菌株 JB11 强化植物对污染土壤中铅镉的吸收 ..... 金忠民,沙 伟,刘丽杰,等 (2900)

陕北地区石油污染土壤中不动杆菌属的筛选、鉴定及降解性能 ..... 王 虎,吴玲玲,周立辉,等 (2907)

祁连山高山植物根际土放线菌生物多样性..... 马爱爱,徐世健,敏玉霞,等 (2916)

新疆沙冬青 AM 和 DSE 真菌的空间分布 ..... 姜 桥,贺学礼,陈伟燕,等 (2929)

聚糠茶水剂对不同积温带玉米花后叶片氮同化的影响..... 高 娇,董志强,徐田军,等 (2938)

内蒙古河套灌区玉米与向日葵霜冻的关键温度..... 王海梅,侯 琼,云文丽,等 (2948)

四种类型栓皮栎栲胶含量..... 尹艺凝,张文辉,何景峰,等 (2954)

食物胁迫对翅二型丽斗蟋飞行肌和繁殖发育的影响..... 吴红军,赵吕权,曾 杨,等 (2963)

颜色对梨小食心虫产卵选择性的影响..... 杨小凡,马春森,范 凡,等 (2971)

缓释单萜类挥发物对落叶松毛虫行为及落叶松主要防御蛋白的影响..... 林 健,刘文波,孟昭军,等 (2978)

### 种群、群落和生态系统

黄土丘陵沟壑区不同植被恢复格局下土壤微生物群落结构 ..... 胡婵娟,郭 雷,刘国华 (2986)

刺参池塘底质微生物群落功能多样性的季节变化..... 闫法军,田相利,董双林,等 (2996)  
基于 DGGE 技术的茯砖茶发花过程细菌群变化分析 ..... 刘石泉,胡治远,赵运林 (3007)

### 景观、区域和全球生态

中国区域间隐含碳排放转移..... 刘红光,范晓梅 (3016)  
西南地区退耕还林工程主要林分 50 年碳汇潜力 ..... 姚 平,陈先刚,周永锋,等 (3025)  
青海湖流域草地植被动态变化趋势下的物候时空特征..... 李广泳,李小雁,赵国琴,等 (3038)  
黑龙江省温带森林火灾碳排放的计量估算..... 魏书精,罗碧珍,孙 龙,等 (3048)  
三峡库区森林植被气候生产力模拟..... 潘 磊,肖文发,唐万鹏,等 (3064)  
三峡水库支流拟多甲藻水华的形成机制..... 朱爱民,李嗣新,胡 俊,等 (3071)  
流域库坝工程开发的生物多样性敏感度分区..... 李亦秋,鲁春霞,邓 欧,等 (3081)

### 城乡与社会生态

基于集对分析的京津冀区域可持续发展协调能力评价..... 檀菲菲,张 萌,李浩然,等 (3090)  
江西省自然保护区发展布局空缺分析 ..... 黄志强,陆 林,戴年华,等 (3099)  
鄱阳湖生态经济区生态经济指数评价 ..... 黄和平,彭小琳,孔凡斌,等 (3107)  
基于有害干扰的中国省域森林生态安全评价..... 刘心竹,米 锋,张 爽,等 (3115)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q \* 1981 \* m \* 16 \* 328 \* zh \* P \* ¥90.00 \* 1510 \* 35 \* 2014-06



**封面图说:** 三峡库区森林植被——三峡地区属亚热带区域,山高坡陡、地形复杂、物种丰富,森林是其最重要的自然资源之一,其面积占到库区总面积的 37%左右,库区内现有森林可初步分为 2 个植被型组,8 个植被型,18 个群系组,44 个群系,102 个群丛,主要树种有马尾松、杉树、柏树等,低海拔处多为落叶阔叶林、常绿阔叶林,较高海拔分布有针阔混交林、针叶混交林、灌木林等,人工林主要有经济林、竹林等。对三峡库区森林气候生产力进行模拟,分析库区森林植被的生产力并进行预测,可以为三峡库区的生态建设决策提供科学依据。

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/stxb201305191106

姚平, 陈先刚, 周永锋, 赵文军, 陆梅, 涂璟. 西南地区退耕还林工程主要林分 50 年碳汇潜力. 生态学报, 2014, 34(11): 3025-3037.

Yao P, Chen X G, Zhou Y F, Zhao W J, Lu M, Tu J. Carbon sequestration potential of the major stands under the Grain for Green Program in Southwest China in the next 50 years. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(11): 3025-3037.

## 西南地区退耕还林工程主要林分 50 年碳汇潜力

姚平<sup>1</sup>, 陈先刚<sup>1,\*</sup>, 周永锋<sup>1</sup>, 赵文军<sup>2</sup>, 陆梅<sup>1</sup>, 涂璟<sup>1</sup>

(1. 西南林业大学环境科学与工程学院, 昆明 650224; 2. 云南省新平县营林站, 新平县 653400)

**摘要:**为评估西南地区退耕还林工程主要林分未来 50a 碳汇潜力, 调查收集该地区 2011 年以前退耕还林工程主要造林树种及其造林面积等相关数据资料, 利用国家森林资源清查资料中人工林历史数据建立生长模型, 结合文献调研获得的相关林分碳计量参数, 预测出本区域退耕还林工程 7 种主要林分碳储量和年碳储量未来变化。结果表明: 西南地区退耕还林工程主要林分总碳储量在 2020、2030、2040、2050 和 2060 年分别为 52.98、73.88—80.57、73.62—102.16、88.41—115.17 和 77.15—123.36TgC, 年总碳储量则分别为 3.15、-1.11—2.45、-3.92—1.95、2.08—0.96 和 0.25—0.73TgC, 到 2060 年华山松、马尾松、柳杉、杉木、柏树、杨树和桉树 7 种林分碳汇潜力在无采伐情景下分别达到: 13.01、15.01、13.44、24.13、28.05、15.63 和 14.09TgC, 可对本地区森林碳汇功能产生明显影响。

**关键词:**森林; 碳汇; 退耕还林工程; 西南地区

## Carbon sequestration potential of the major stands under the Grain for Green Program in Southwest China in the next 50 years

YAO Ping<sup>1</sup>, CHEN Xiangang<sup>1,\*</sup>, ZHOU Yongfeng<sup>1</sup>, ZHAO Wenjun<sup>2</sup>, LU Mei<sup>1</sup>, TU Jing<sup>1</sup>

1 School of Environmental Science and Engineering, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China

2 Afforestation Station of Xinping County in Yunnan Province, Xinping County 653400, China

**Abstract:** Vegetation growth, through photosynthesis, takes up carbon dioxide from the atmosphere and converts to organic carbon into biomass thereby forms a carbon sink. Research on carbon sequestration potential of forests has become a key content to slow down global warming by forestry. To assess carbon sequestration potential in stands under the Grain for Green Program (GGP) in Southwest China, the carbon storages and their annual changes in the GGP-stands in the region were estimated based on: (1) collected data on annual planted area of each tree species under the GGP in Southwest China from 1999 to 2010; (2) empirical growth curves developed for each species of the GGP-stands using growth data about plantation from the National Forest Inventory; (3) parameters associated with stand such as wood density, biomass expansion factor, carbon fraction, the change rate in soil organic carbon content. Two scenarios for forest management option were schemed: scenario A for no harvesting and scenario B for logging at the time of maturity followed by replanting. The results showed that there are seven tree species with over 100,000 hm<sup>2</sup> of planted area in Southwest- China throughout the recent goal period of strategic planning for the GGP, and their total acreage account for 40.7% of that of all species of the GGP-stands. The expected carbon stocks in these major stands under the Grain for Green Project in Southwest China are 52.98TgC, 73.88—80.57TgC, 73.62—102.16TgC, 88.41—115.17TgC and 77.15—123.36TgC (T=10<sup>12</sup>) by the year of 2020, 2030, 2040, 2050 and 2060, and the estimated relevant annual carbon stock changes are 3.15TgC, -1.11—2.45TgC, -3.92—

基金项目: 国家自然科学基金(41263008); 云南省应用基础研究基金(2009ZC082M)

收稿日期: 2013-05-19; 网络出版日期: 2014-02-24

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: ch-x-g@vip.sina.com

1.95TgC, 2.08—0.96TgC and 0.25—0.73TgC, respectively. In 2060, the carbon stocks in forests of *Pinus armandii*, *Pinus massoniara*, *Cryptomeria fortunei*, *Cunninghamia laceolata*, *Cupressus* spp., *Populus deltoides* and *Eucalyptus* spp. under the Grain for Green Project in Southwest China will be 13.01TgC, 15.01TgC, 13.44TgC, 24.13TgC, 28.05TgC, 15.63TgC 和 14.09TgC, respectively, indicating a significant contribute to forest carbon sinks in this region. The *Cupressus* spp. species play a leading role in carbon sequestration potential in stands under the Grain for Green Project due to highest area proportion in Sichuan province, Chongqing municipality and even Southwest China. The *Cryptomeria fortunei* and *Cunninghamia laceolata* species play a leading role in Guizhou province; the *Eucalyptus* spp. and *Pinus armandii* species in Yunnan province; the *Populus deltoides* species in Tibet autonomous region.

**Key Words:** forest; carbon sink; Grain for Green Program; Southwest China

森林植被的生长可将大气中二氧化碳(CO<sub>2</sub>)转化为有机碳并储存在森林生态系统之中而形成碳汇。为解决因大气中以二氧化碳为主的温室气体浓度大幅度增加而导致全球气候变暖所引发的严重生态环境问题,森林生态系统碳汇功能研究已成为环境科学领域的重点和热点问题。有研究表明,森林再生是陆地碳汇形成的主要原因之一<sup>[1-2]</sup>,美国陆地 从 1945 年由“碳源”转为“碳汇”,其主要原因是弃耕农田的森林再生和森林防火<sup>[3]</sup>,中国陆地 从“碳源”转为“碳汇”的主要原因也是森林面积扩大和林木再生<sup>[4]</sup>。本世纪初中国大范围实施的退耕还林工程,是目前世界上最大的区域性造林再造林活动,使森林面积大幅度增加,将对陆地生态系统碳汇能力产生重大影响。20 世纪末期以来有学者预测,造林和再造林可使全球在 2040 年之前 50a 内产生碳汇 52—104 Pg C<sup>[5]</sup>、中国在 2050 年之前 50a 内产生碳汇 2.86 Pg C<sup>[6]</sup>,但这些预测存在较大不确定性。提高森林碳汇估算精度需采用由下而上的方法,即从生态系统单元到区域尺度,然后再到大区乃至全球

尺度<sup>[7]</sup>。此前国内一些学者已从局部生态系统单元角度对退耕还林工程林碳汇能力进行了一些有益的探索<sup>[8-14]</sup>,本文选择西南地区退耕还林工程主要林分作为区域尺度生态系统单元开展研究,力图为准确估算区域造林再造林碳汇潜力做些基础性探索。

## 1 研究数据

我国西南地区包括云南、贵州、四川、重庆和西藏 5 省(直辖市、自治区),地处长江、珠江等主要大江大河的上游,是国内的第二大林区。选取本地区造林面积超过 100000 hm<sup>2</sup>的华山松(*Pinus armandii*)、马尾松(*Pinus massoniara*)、柳杉(*Cryptomeria fortunei*)、杉木(*Cunninghamia lanceolata*)、柏树(*Cupressus* spp.)、杨树(*Populus deltoides*)和桉树(*Eucalyptus* spp.) 7 个主要树种林分为研究对象,通过调查收集退耕还林工程初期试点阶段(1999—2000)和战略规划近期目标阶段(2001—2010)<sup>[15]</sup>相关资料,获取这些主要树种林分在各省(市、区)造林面积数据(表 1)。

表 1 西南地区退耕还林工程试点和战略规划近期目标阶段主要树种造林面积/hm<sup>2</sup>

Table 1 Afforestation area of some major tree species under the Grain for Green Project in southwest China during the pilot phase and early goal stage of strategic planning

树种 Species	云南 Yunnan	贵州 Guizhou	四川 Sichuan	重庆 Chongqing	西藏 Tibet	合计 Total
华山松 <i>Pinus armandii</i>	81081	45214	36278	0	0	162573
马尾松 <i>Pinus massoniara</i>	0	91224	29990	104823	0	226037
杉木 <i>Cunninghamia lanceolata</i>	28601	149871	102724	93104	0	374300
柳杉 <i>Cryptomeria fortunei</i>	11793	152044	41310	0	0	205147
柏树 <i>Cupressus</i> spp.	26787	73983	197882	178071	0	476723
杨树 <i>Populus deltoides</i>	2408	38754	80181	0	60996	182339
桉树 <i>Eucalyptus</i> spp.	103332	2861	81179	0	0	187372
合计 Total	254000	553952	569544	375998	60996	1814489

表中数据为逐年面积之和,分别来源于云南、贵州、四川、重庆和西藏退耕还林工程年度复查报告

## 2 研究方法

### 2.1 碳库划分

根据《IPPC 土地利用、土地利用变化和林业优良做法指南》<sup>[16]</sup>,将森林生态系统分成 5 个碳库:地上生物质碳库(包括树杆、树枝、树皮、树叶和种子);地下生物质碳库(包括所有活根生物质);枯落物碳库(包括凋落物和腐殖质);枯死木碳库(包括枯立木以及直径大于 10cm 或其它规定直径的枯倒木、树桩和死根)和土壤有机质碳库(一定深度内的土壤有机质和经验上不能从地下生物量中区分出来的活细根)

为便于计算,本研究中将上述前两个碳库合为一个,称为活生物质碳库(包括树杆、树枝、树皮、树叶、种子和活根)。鉴于本文的研究对象基本属于成熟以降(林龄<60a)的人工林,是在退耕或者荒芜的山地上造林,林分中凋落物和腐殖质虽是只增不减,但其变化率相对于活生物量来讲非常之小,且大部分将逐渐分解转化为土壤有机质而被并入土壤有机质碳库增量估算中,遵循《IPCC 优良做法指南》中保守性原则可不把枯落物碳库计入林分的碳汇。与此同理,林分中枯死木碳库也可不计入林分的碳汇。于是退耕还林工程林的碳汇潜力可以用林分的活生物质碳库和土壤有机质碳库两部分的新增碳储量来表示。

### 2.2 活生物质碳库碳储量

借鉴有关学者预测退耕还林工程林碳储量的方法和思路<sup>[17]</sup>,采取分树种林分计算活生物质库碳储量变化,公式如下:

$$LBC_i = \sum_j \sum_k S_{jk} \cdot V_{ijk} \cdot WD_j \cdot BEC_j \cdot CF_j \quad (1)$$

式中, $LBC_i$ 代表第  $i$  目标年活生物质碳库碳储量(Mg C); $S_{jk}$ 代表  $j$  树种在第  $k$  年造林面积( $hm^2$ ); $V_{ijk}$ 表示第  $k$  年造林  $j$  树种到第  $i$  目标年时林分蓄积量( $m^3/hm^2$ ); $WD_j$ 表示  $j$  树种生物质密度( $Mg/m^3$ ); $BEC_j$ 表示  $j$  树种由林分蓄积量之生物量到林分全部活生物量(包含地上和地下)的扩展系数(无量纲); $CF_j$ 表示  $j$  树种林木含碳率( $g/g$ )。

#### 2.2.1 各树种林分蓄积量( $V_{ijk}$ )估算

在(1)式中  $V_{ijk}$  是时间的函数,引入常用生物生长曲线-理查德函数(Richards Equation) 作为其计算模型:

$$V_{ijk} = a(1 - \exp(-b \cdot A))^c \quad (2)$$

式中, $A$  代表林龄( $A = i - k$ ); $a$ 、 $b$  和  $c$  为拟合参数。林分生长曲线用国家森林资源清查的本地人工林蓄积量历史数据经“SPSS”拟合求得(图 1)。

#### 2.2.2 林分碳计量参数采集

公式(1)中的  $WD_j$ 和  $BEC_j$ 是采用中国初始国家信息通报中土地利用变化和林业温室气体排放清单中相应数据, $CF_j$ 则通过文献调研获得(表 2)<sup>[18-24]</sup>。

#### 2.2.3 考虑不同经营方式

在西南地区退耕还林工程林中,90%以上林分属于生态公益林<sup>[15,25]</sup>,通常不进行采伐。但如果从减排增汇角度考虑,依据《生态公益林技术规程》实施过熟林轮伐,采伐物可用于替代能源或高排放材料。于是设置两种经营情景:情景 A 不采伐;情景 B 在最小采伐林龄采伐。对于采伐情景,假设所有采伐迹地在采伐当年便完成更新造林,且地上采伐残留物全部移出。

表 2 不同树种林分的 WD、BEC、CF 和 MR 参数值

Table 2 Values of WD, BEC, CF and MR for different species of stand

林分树种 Species	木材密度(WD)/ ( $Mg/m^3$ )	生物量扩展系数 (BEC)	木质碳含量 (CF)	最小采伐周期 (MR)/a
华山松 <i>Pinus armandi</i>	0.396	2.29	0.50*	51
马尾松 <i>Pinus massoniana</i>	0.380	1.80	0.54	51
柳杉 <i>Cryptomeria fortunei</i>	0.294	1.91	0.50*	36
杉木 <i>Cunninghamia lanceolata</i>	0.307	1.92	0.49	36
柏树 <i>Cupressus spp.</i>	0.478	2.11	0.50	101
杨树 <i>Populus deltoides</i>	0.378	2.16	0.51	26
桉树 <i>Eucalyptus spp.</i>	0.578	1.65	0.50*	26

WD: Wood density; BEC: Biomass expansion factor; CF: Carbon fraction; HR: Harvest rotation; \* 用政府间气候变化专业委员会(IPCC)认可替代值

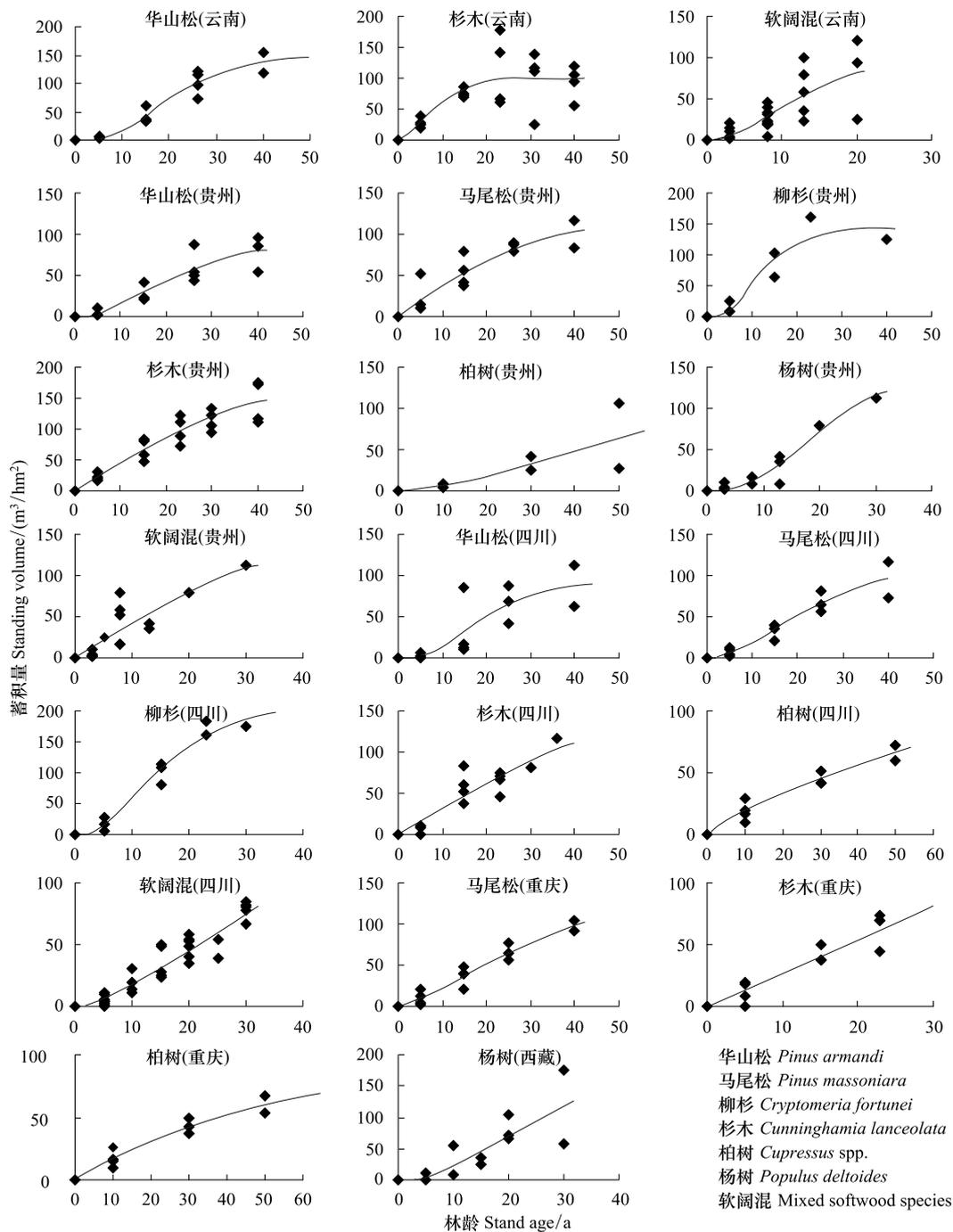


图1 西南地区退耕还林工程主要树种林分蓄积量增长模型

Fig.1 Growth modals of stands volume for some major tree species under the Grain for Green Project in southwest China

2.3 土壤有机质碳库碳储量

有研究表明,长期来看造林后的土壤表现为潜在碳汇<sup>[26-27]</sup>。Paul K.I.等学者根据对森林生长模拟研究及文献调研提出,在草地上造林后前 10a 内土壤有机碳储量  $-0.79\text{Mg C hm}^{-2}\text{a}^{-1}$  的平均递减率减少,10—40a 期间则以  $0.46\text{Mg C hm}^{-2}\text{a}^{-1}$  的平均递增率增加,而 40a 以后再以  $0.06\text{Mg C hm}^{-2}\text{a}^{-1}$  的平均递

增率增加<sup>[28]</sup>。Xianzeng Niu 等在研究美国边缘农地退耕造林后土壤碳储量变化时提出了上述模型的修正型(图 2)<sup>[29]</sup>。

西南地区是中国土壤有机碳储量较少的地区之一<sup>[30]</sup>,退耕还林工程林地绝大部分是退化农耕地或荒山地,初始有机碳含量很低,与美国的边缘农地相类似,可借鉴美国学者牛仙甄提出的修正模型,即工

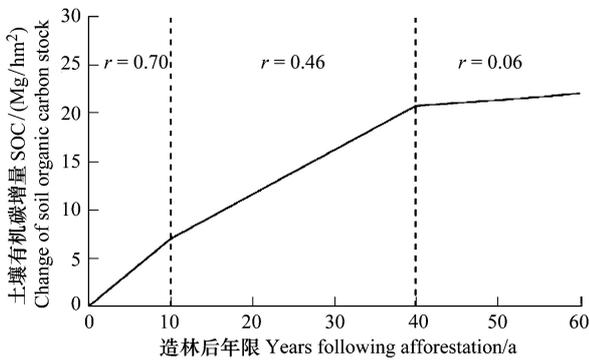


图2 退耕还林后土壤有机碳增长系数<sup>[29]</sup>

Fig.2 Change coefficient of soil organic carbon (SOC) over time following afforestation on arable land<sup>[29]</sup>

r represents the SOC change rate

程林地土壤有机碳增量用以下的公式计算:

$$SOC_i = \sum_j \sum_k r(i - k) S_{jk} \quad (3)$$

式中,  $SOC_i$  表示在第  $i$  目标年的土壤有机物碳库中碳增量;  $S_{jk}$  代表  $j$  树种在第  $k$  年的造林面积;  $r$  为造

林后土壤有机碳增长系数,取图 2 中的对应值。

综合上述,可得出退耕还林工程林碳汇潜力估算公式如下:

$$CSP_i = LBC_i + SOC_i \quad (4)$$

式中,  $CSP_i$  表示退耕还林工程林在第  $i$  目标年的碳汇潜力;等号右边各项已在前面提到,且均为退耕还林工程造林后的新增碳储量。

### 3 结果与分析

#### 3.1 情景 A 下退耕还林工程主要林分碳汇潜力

##### 3.1.1 不采伐情景下总碳储量未来变化

不采伐情景下 云南的主要林分总碳储量在 2040 年前快速增长,之后逐渐趋于缓慢增长;贵州和重庆的在 2050 年前快速增长,之后逐渐趋于缓慢增长;四川和西藏的在 2060 年前几乎都是快速增长;全西南地区的在 2050 年前快速增长,之后逐渐趋于缓慢增长(图 3)。不采伐情景下特定年份总碳储量预测值见表 3。

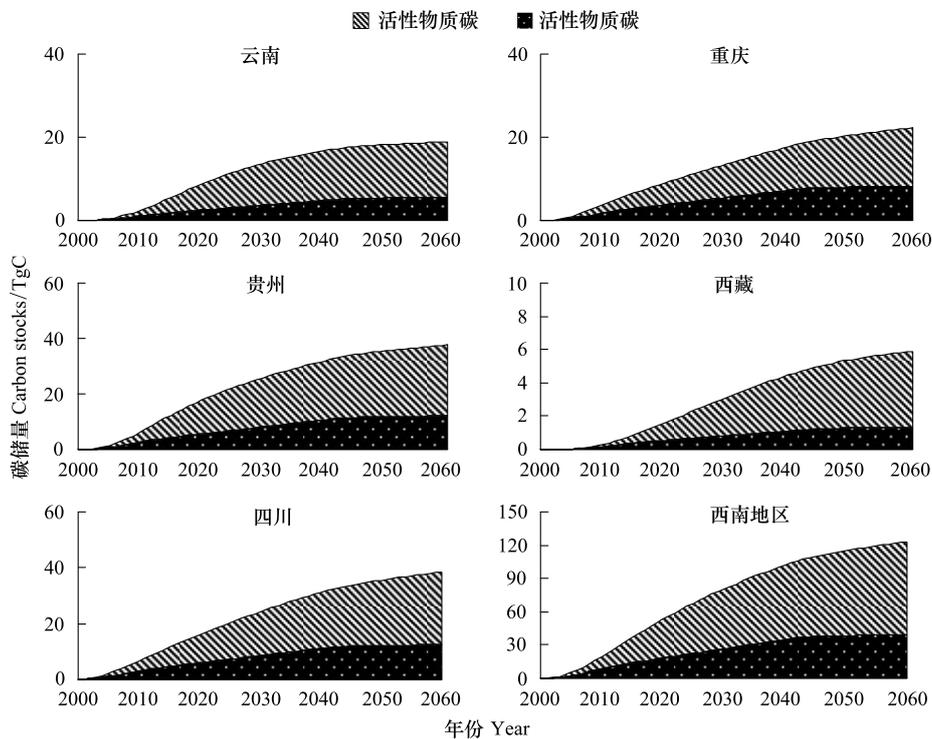


图3 情景 A 下西南地区退耕还林工程主要林分总碳储量未来 50a 变化

Fig.3 Changes of carbon storage in the major stands under the Grain for Green Project to scenario A in Southwest China in the next 50 years

##### 3.1.2 不采伐情景下年总碳储量未来变化

不采伐情景下 云南的主要林分年总碳储量在

2016 年附近出现峰值,在 2040 年后明显减小,在 2050 年后趋近于零;贵州、四川和重庆的在 2012 年

附近出现峰值,在 2040 年后显著减小,到 2060 年仍未趋近于零;西藏的在 2025 年附近出现峰值,在 2050 年后也明显减小,其最大值只与重庆 2060 年的量相当;全西南地区的在 2012 年附近出现峰值,在

2040 年后有显著减小,到 2060 年仍保持明显的年碳汇能力(图 4)。不采伐情景下特定年份年总碳储量预测值见表 3。

表 3 西南地区退耕还林工程主要林分碳储量和年碳储量预测

Table 3 Predication of carbon storage and annual carbon sinks in the major stands under the Grain for Green Project to two scenarios in Southwest China in the given year

区域 Region	情景 Scenario	分类 Category	年份 Years				
			2020	2030	2040	2050	2060
云南	情景 A	碳储量/TgC	8.72	13.70	16.77	18.25	18.90
		年碳储量/(TgC/a)	0.62	0.40	0.25	0.09	0.05
	情景 B	碳储量	8.72	11.98	12.39	15.98	9.61
		年碳储量	0.62	-0.83	0.16	0.32	-0.18
贵州	情景 A	碳储量	17.63	25.84	31.94	35.52	37.69
		年碳储量	1.00	0.70	0.55	0.25	0.20
	情景 B	碳储量	17.63	24.51	22.14	25.32	24.75
		年碳储量	1.00	0.03	-3.79	0.82	0.35
四川	情景 A	碳储量	16.04	24.29	31.23	35.53	38.53
		年碳储量	0.90	0.76	0.63	0.34	0.27
	情景 B	碳储量	16.04	21.10	21.67	26.43	24.46
		年碳储量	0.90	-0.45	0.02	0.57	0.12
重庆	情景 A	碳储量	9.00	13.60	17.75	20.48	22.33
		年碳储量	0.48	0.44	0.40	0.21	0.17
	情景 B	碳储量	9.00	13.60	16.02	17.96	16.01
		年碳储量	0.48	0.44	-0.41	0.23	0.24
西藏	情景 A	碳储量	1.59	3.14	4.47	5.39	5.91
		年碳储量	0.15	0.15	0.12	0.07	0.04
	情景 B	碳储量	1.59	2.69	1.41	2.72	2.32
		年碳储量	0.15	-0.30	0.10	0.14	-0.28
西南地区(合计) Southwest China(Total)	情景 A	碳储量	52.98	80.57	102.16	115.17	123.36
		年碳储量	3.15	2.45	1.95	0.96	0.73
	情景 B	碳储量	52.98	73.88	73.63	88.41	77.15
		年碳储量	3.15	-1.11	-3.92	2.08	0.25

### 3.1.3 不采伐情景下各树种林分碳储量未来变化

图 5 给出了不采伐情景下 7 个树种林分碳储量变化。比较可知:柏树是四川、重庆乃至全西南地区碳汇潜力最大林分;杉木和柳杉是贵州碳汇潜力最大林分;桉树和华山松是云南碳汇潜力最大林分;扬

树是西藏碳汇潜力最大的林分;杉木是西南地区碳汇潜力第二大林分,与柏树接近。此外,柏树由于生长年限较长而使得四川、贵州以及重庆在 2060 年后还有明显年碳汇量。不采伐情景下特定年份各主要树种碳储量预测值见表 4。

表 4 两种情景下西南地区退耕还林工程主要树种林分碳储量和年碳储量预测

Table 4 Predication of carbon storage and annual carbon storages in the major tree species of stands under the Grain for Green Project to two scenarios in Southwest China in the given year

树种 Species	情景 Scenario	年份 Years				
		2020	2030	2040	2050	2060
华山松 <i>Pinus armandi</i>	情景 A	5.28	9.10	11.54	12.59	13.01
	情景 B	5.28	9.10	11.54	12.59	4.16
马尾松 <i>Pinus massoniana</i>	情景 A	6.65	9.85	12.48	14.05	15.01
	情景 B	6.65	9.85	12.48	14.05	6.30
柳杉 <i>Cryptomeria fortunei</i>	情景 A	8.22	11.21	12.72	13.27	13.44

续表

树种 Species	情景 Scenario	年份 Years				
		2020	2030	2040	2050	2060
杉木 <i>Cunninghamia lanceolata</i>	情景 B	8.22	11.21	6.41	7.29	11.51
	情景 A	10.57	15.46	19.68	22.35	24.13
柏树 <i>Cupressus</i> spp.	情景 B	10.57	15.46	11.31	11.97	15.94
	情景 A	11.12	16.57	21.72	25.32	28.05
桉树 <i>Eucalyptus</i> spp	情景 A	4.95	8.87	12.17	14.33	15.63
	情景 B	4.95	5.62	4.61	8.00	5.32
杨树 <i>Populus deltoides</i>	情景 A	6.18	9.49	11.85	13.27	14.09
	情景 B	6.18	6.07	5.55	9.19	5.87

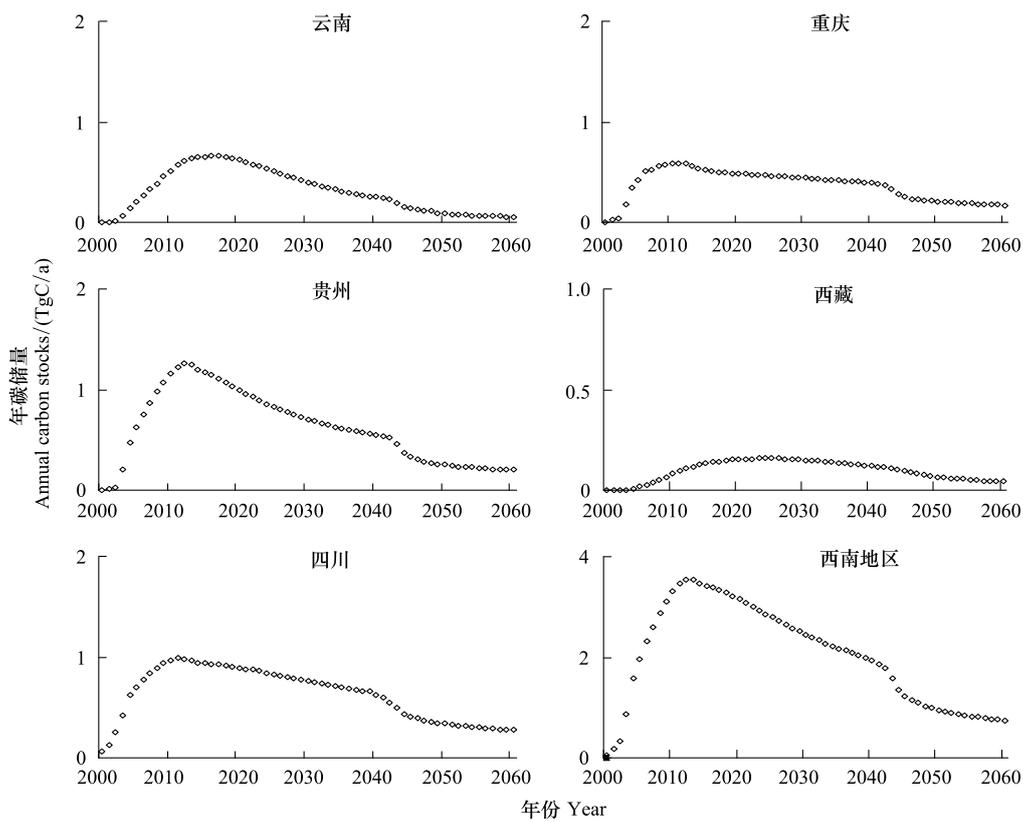
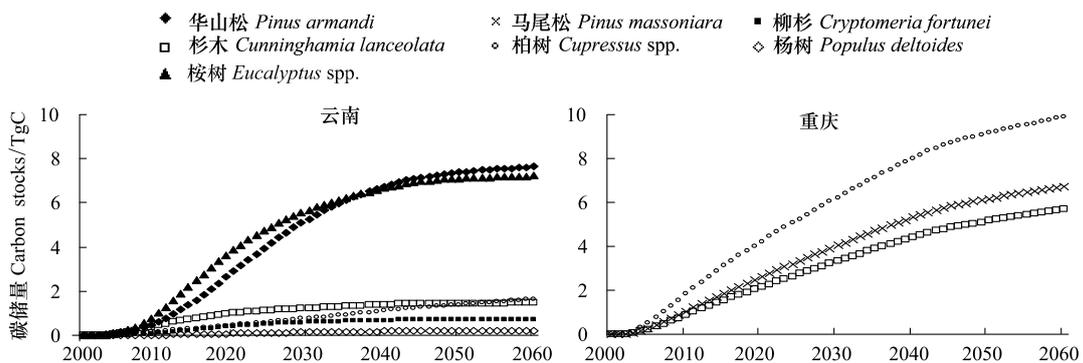


图 4 情景 A 下西南地区退耕还林工程主要林分年总碳储量未来 50a 变化

Fig.4 Changes of annual carbon storage in the major stands under the Grain for Green Project to scenario A in Southwest China in the next 50 years



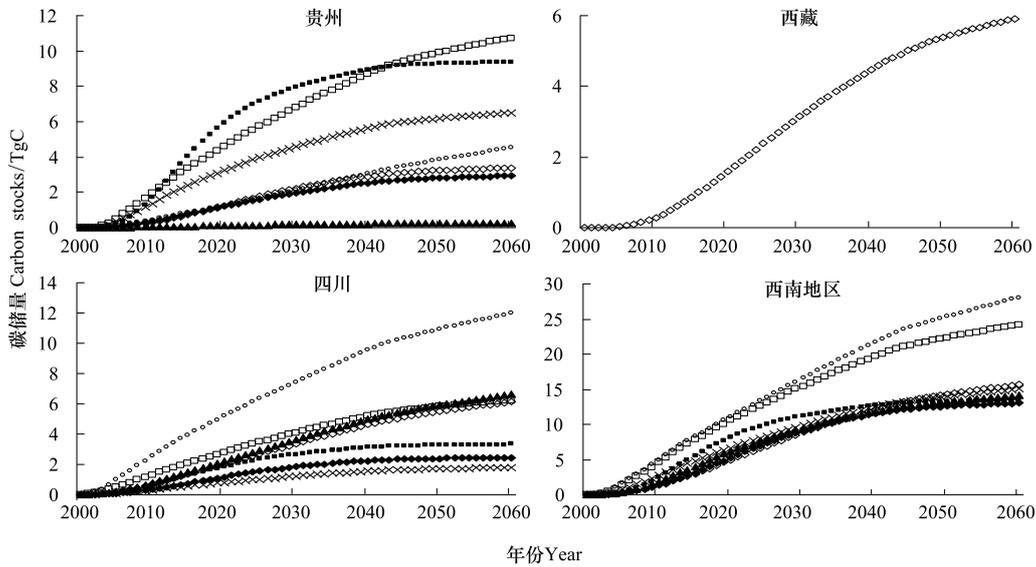


图5 情景 A 下未来 50a 西南地区退耕还林工程各主要树种林分碳储量变化

Fig.5 Changes of carbon storage in every major tree species of stands under the Grain for Green Project to scenario A in Southwest China in the next 50 years

3.2 情景 B 下退耕还林工程主要林分碳汇潜力

3.2.1 采伐情景下总碳储量未来变化

采伐情景下 云南、贵州和四川的主要林分总碳储量在 2027 年前快速增长,之后出现减增波动;重庆的在 2037 年前快速增长,之后出现减增波动;西藏的

在 2029 年前快速增长,之后出现减增波动;云南、贵州和西藏的波幅较大、四川和重庆的波幅较小;全西南地区总碳储量变化趋势与云南、贵州和四川三省类似 (图 6)。采伐情景下特定年份总碳储量预测值见表 3。碳储量的减少是因采伐物从林分中移走所致。

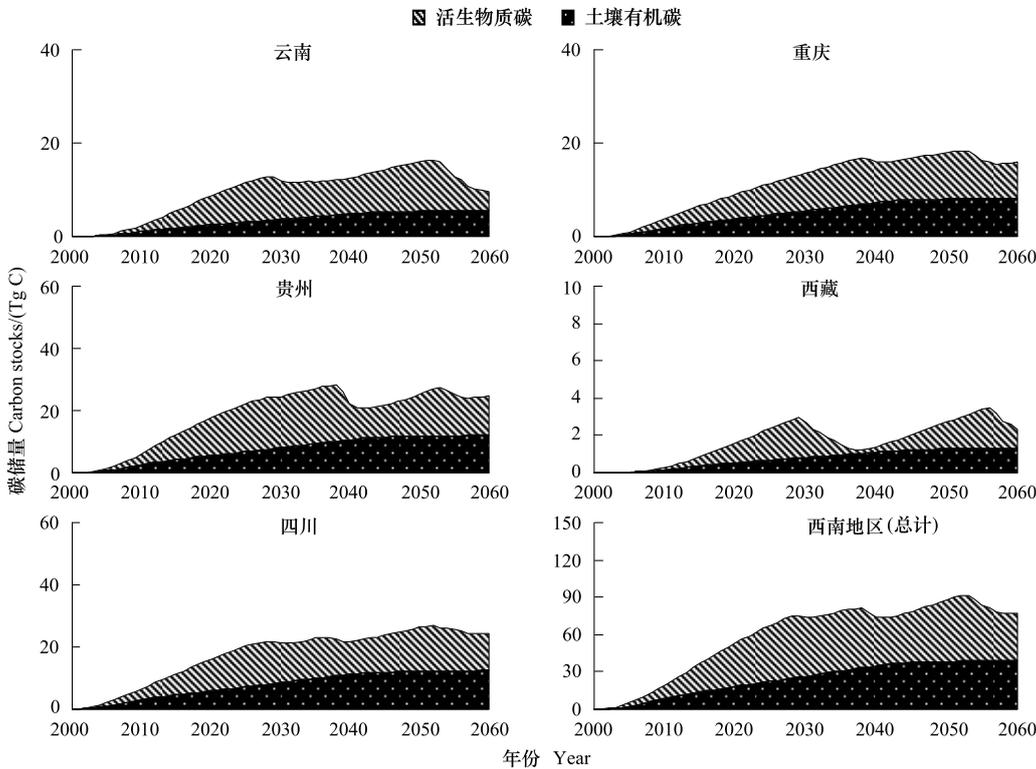


图 6 情景 B 下西南地区退耕还林工程主要林分总碳储量未来 50a 变化

Fig.6 Changes of carbon storage in the major stands under the Grain for Green Project to scenario B in Southwest China in the next 50 years

### 3.2.2 采伐情景下年总碳储量未来变化

采伐情景下 云南的主要林分年总碳储量在 2014 年附近出现最大值,在 2027 年后出现大的减增波动,并分别在 2030 和 2057 年附近出现负值;贵州和四川的在 2012 年附近出现最大值,在 2025 年后出现大的减增波动,并分别在 2030、2040 和 2057 年附近出现负值;重庆的在 2011 年附近出现最大值,

2038 年后出现小幅减增波动,并分别在 2040 和 2056 年附近出现负值;西藏的在 2025 年附近出现最大值,2029 年后出现大的减增波动,并分别在 2034 和 2059 年附近出现负值;全西南地区年总碳储量变化趋势与贵州和四川两省类似(图 7)。采伐情景下特定年份年总碳储量预测值见表 3。年碳储量的减少或出现负值也是因当年林分中有采伐物移走所致。

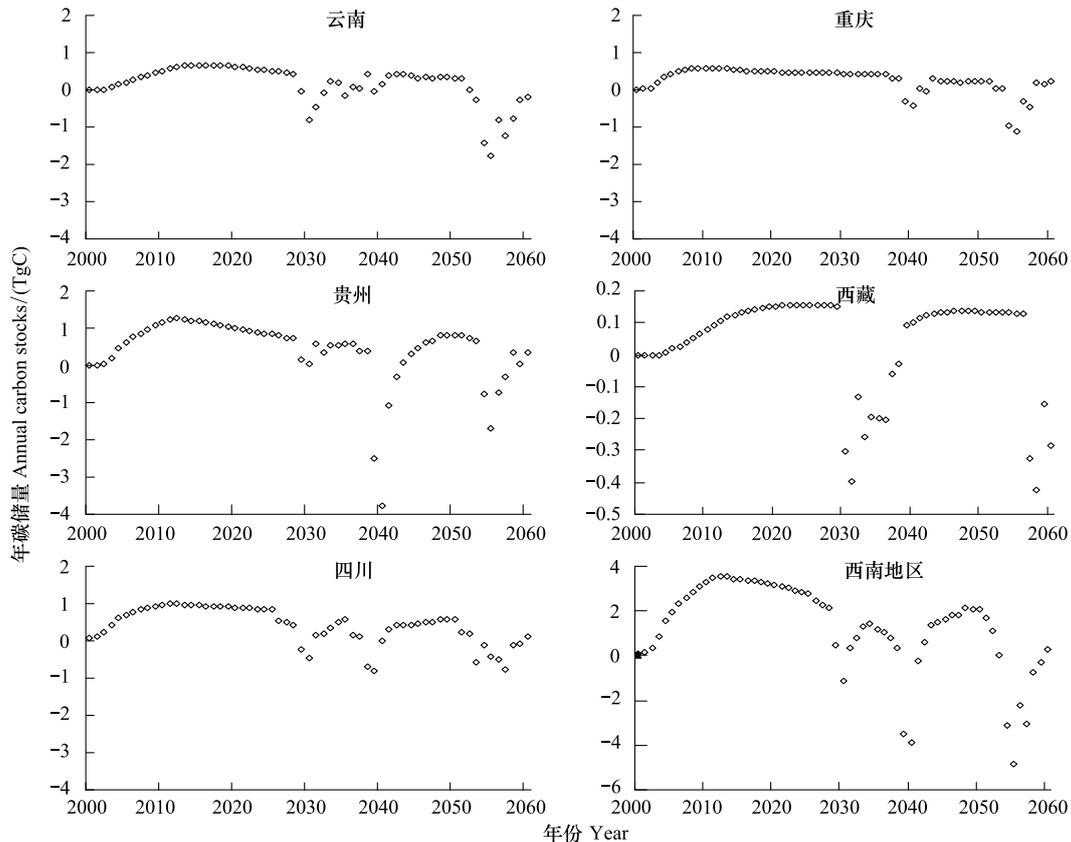


图 7 情景 B 下西南地区退耕还林工程主要林分年总碳储量未来 50a 变化

Fig.7 Changes of annual carbon storage in the major stands under the Grain for Green Project to scenario B in Southwest China in the next 50 years

### 3.2.3 采伐情景下各树种碳储量未来变化

图 8 给出了采伐情景下 7 个树种林分碳储量变化。在采伐情景下的未来 50a 内,除柏树外其它树种林分的碳汇潜力都会受采伐的影响;桉树和杨树受影响最早并出现两次,初始时间分别在 2030 和 2057 年附近;柳杉和杉木受影响延后,初始时间在 2040 年附近;华山松和马尾松受影响最晚,初始时间在 2053 年附近。采伐情景下特定年份各主要树种碳储量预测值见表 4。

## 4 讨论

### 4.1 生长曲线的适用性

历次国家森林资源清查提供了各省(市、区)若干主要树种人工林所对应 5 个龄级的蓄积量数据,它们基本上代表各省(市、区)范围内主要树种人工林在不同气候及立地条件下的平均生长状况。而各省(市、区)退耕还林工程造林均采用本地适生树种<sup>[25]</sup>。因此,用这些数据拟合的生长曲线分别用于计算各省(市、区)退耕还林工程林生长变化无疑是适用的。由于个别省分有少量树种因缺乏历史数据

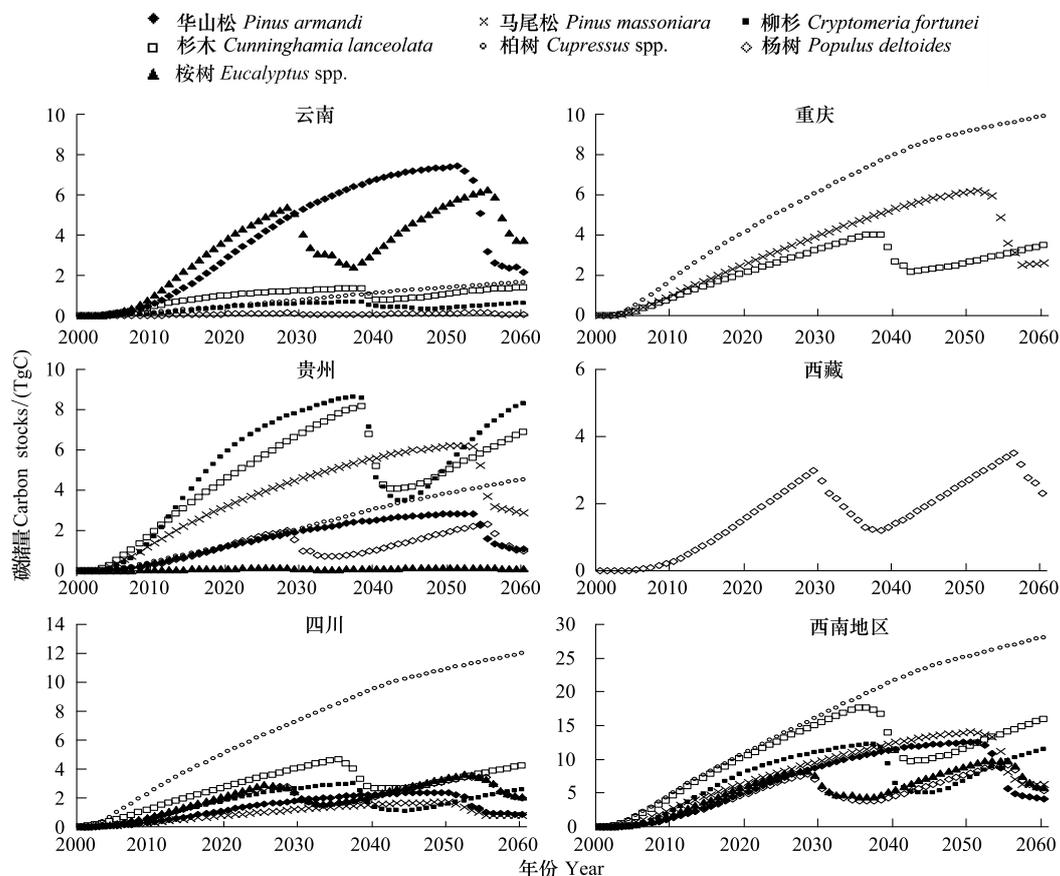


图8 情景B下未来50a西南地区退耕还林工程各主要树种林分碳储量变化

Fig.8 Changes of carbon storage in every major tree species of stands under the Grain for Green Project to scenario B in Southwest China in the next 50 years

而不能建模的情况,采用省内相邻树种或邻省同一树种的模型作为替代,如:云南、贵州和四川的桉树用本省软阔叶林模型代替;云南的柳杉、柏树和杨树用贵州的相同树种模型代替;四川的杨树也用省内软阔叶林模型代替。当然,此类替代会增大活生物质碳储量计算误差。

#### 4.2 土壤碳储量变化评估

在之前有关研究中乐观估算得出,耕地造林后50—100年间的土壤碳增长率为 $0.6\text{--}0.7\text{Mg C hm}^{-2}\text{a}^{-1}$ <sup>[31-32]</sup>。通常情况下,土壤有机碳储量与造林后的时间存在非线性关系<sup>[27,30,33-34]</sup>,特别是在中、幼林期间,土壤有机碳储量随时间的变化既可能是增加,也可能是减少。造林初期土壤有机碳储量减少的主要原因是由于造林整地引起较多碳排放和幼龄林对土壤有机质输入较少两方面影响,因而有机碳初始含量较高土壤造林后5—10a内表现为碳损失<sup>[10,27,35]</sup>,而初始含量较低土壤造林后则立即表现为碳收获<sup>[36-38]</sup>。故本研究借用美国学者Niu等的退耕造林

地土壤有机碳变化模型是适宜的。需要指出的是本文中表述的土壤碳储量实质为造林后土壤中有有机碳的增量,因而小于林分中的活生物质碳储量,这一点须区别于其他多数关于森林生态系统中土壤碳储量大于活生物质碳储量的研究结论。

#### 4.3 工程林碳汇潜力分布

对比西南5省(市、区)估算结果,碳汇潜力大小排序与其造林面积大小相对应,即:四川>贵州>重庆>云南>西藏,表明退耕还林工程林碳汇潜力主要受造林面积影响,造林面积大的省份碳汇潜力也大。同时也发现造林树种生长速率也是影响碳汇潜力的重要因素,比如四川造林面积多于贵州,但在2040年之前四川的碳汇潜力却小于贵州,其原因就在于生长慢的柏树在四川面积比重大,削弱了前期的碳汇潜力(表3)。但另一方面生长慢的树种却能延长林分的碳汇潜力,比如四川、贵州和重庆又都因有较多柏树面积而使得年碳汇潜力到2060年仍然较为明显。西藏的年碳汇最大值出现时间也因为高寒地

区植物生长缓慢而滞后四川、云南、贵州和重庆 10 多年(图 5)。

#### 4.4 工程林碳汇潜力可信度

造林和再造林项目碳汇可信度除与预测模型精确度有关外,还与工程项目的碳基线与碳泄漏有关。碳基线是指在无造林和再造林项目时项目边界内碳库中碳储量变化之和;碳泄漏则指发生在造林和再造林项目边界之外因项目活动而引起的可测定碳排放增量<sup>[39]</sup>。根据国际规则,碳汇计量中须扣减碳基线与碳泄漏<sup>[39]</sup>。我国退耕还林工程是在退化或者坡度大于 25° 的耕地以及荒山上恢复森林植被<sup>[25]</sup>,如果没有此项工程,这些土地只会持续退化或者顶多维持现状,因而工程项目边界内的碳储量变化也只会持续减少或者基本不变,于是根据《IPCC 土地利用、土地利用变化和林业优良做法指南》中的保守性原则,将项目碳基线看成零。此外,造林地都分布在偏远或者居民稀少的山区,造林活动基本上由人工完成,同时政府为当地居民提供粮食补助<sup>[25]</sup>,避免了工程实施可能引起碳泄漏的两个主要因素——化石能源消耗和新开耕地,因而也可将碳泄漏看作零。由此可知,在预测模型的误差范围内工程林碳汇潜力是可信的。

#### 4.5 工程林对当地森林植被碳汇影响力

已有研究表明本世纪初西南地区森林植被碳储量分布为云南 461.43TgC、贵州 175.50 TgC、四川 457.29TgC、重庆 443.98TgC、西藏 329.64TgC<sup>[40-42]</sup>。与此相比,退耕还林工程主要林分 2060 年碳储量可占其比例为:云南 2.1—4.1%;贵州 14.1%—21.5%;四川 5.3—8.4%;重庆 3.6—5.0%;西藏 0.7—1.8%。由此可见,本地区各省(市、区)退耕还林工程林对森林生态系统碳汇功能影响力为:在贵州影响显著;在四川、重庆和云南影响明显;在西藏影响较弱。

#### 4.6 需引起关注的问题

当研究时间尺度增大时,在无采伐情景下林分枯落物碳库经长期积累,其碳储量所占比例会明显增加,应予以计量而不是被忽略;随着林龄的增长,林分中就会出现死立木、枯倒木、大直径枯落枝、采伐遗留物等粗木质残体且不断增加,使得枯死木碳库成为森林生态系统中重要碳库,其碳储量的变化将会明显影响退耕还林工程林碳汇潜力。此外,随着人们对木质原料的利用越来越充分以及循环经济

活动的不断发展,森林采伐物一般都不会立即转为碳排放,而是衍生出另外的存在形式,如建筑木料、装饰用材、家具、纸张等林产品碳库,具有较长的存留期,研究表明其碳储量可占总采伐生物质碳储量的 14.1—32.0%<sup>[29,43]</sup>。所以,在大时间尺度的森林碳汇研究中上述 3 个碳库应是不可或缺的内容。当然在此方面的研究难度比较大,任何突破都将具有重大意义。

## 5 结论

(1) 在中国退耕还林工程战略规划近期目标阶段(2000—2010),西南地区造林面积超过 100000 hm<sup>2</sup> 的树种有 7 个,其面积之和占该地区整个工程林总面积的 40.7%。

(2) 对应于 2020、2030、2040、2050 和 2060 年,西南地区在战略规划近期目标阶段的退耕还林工程主要树种林分总碳汇潜力:在不采伐情景下分别为 52.98、80.57、102.16、115.17 和 123.36TgC,相应年碳汇量分别为 3.15、2.45、1.95、0.96 和 0.73TgC;有采伐前景下分别为 52.98、73.88、73.63、88.41 和 77.15TgC,相应年碳汇量分别为 3.15、-1.11、-3.92、2.08 和 0.25TgC。

(3) 到 2060 年,战略规划近期目标阶段的退耕还林工程 7 个主要树种林分碳汇潜力可分别达到:华山松 4.16—13.01TgC;马尾松 6.30—15.01TgC;柳杉 11.51—13.44TgC;杉木 15.94—24.13 TgC;柏树 28.05TgC;杨树 5.32—15.63TgC;桉树 5.87—14.09TgC(下限对应采伐前景)。

(4) 柏树在四川、重庆乃至全西南地区造林面积比例最大,对工程林碳汇潜力起主导作用,并因生长年限较长致使 50a 后四川和重庆以及贵州仍有较为明显年碳汇量;柳杉和杉木在贵州、桉树和华山松在云南、杨树在西藏都因面积比例较大而对碳汇潜力起主导作用。

**致谢:** 云南、贵州、四川、重庆和西藏 5 省(市、区)林业厅(局)退耕还林办公室、资源处等对资料收集提供帮助,特此致谢。

#### References:

- [1] Fan S, Gloor M, Mahlman J, Pacala S, Sarmiento J, Takahashi T, Tans P. A large terrestrial carbon sink in North America implied by atmospheric and oceanic carbon dioxide data and

- models. *Science*, 1998, 282(5388): 442-446.
- [ 2 ] Holland E A, Brown S. North American carbon sink. *Science*, 1999, 283(5409): 1815-1815.
- [ 3 ] Houghton R A, Hackler J L, Lawrence K T. The U. S. carbon budget: contributions from land-use change. *Science*, 1999, 285(5427): 574-578.
- [ 4 ] Fang J Y, Chen A P, Peng C H, Zhao S Q, Ci L J. Changes in forest biomass carbon storage in China between 1949 and 1998. *Science*, 2001, 292(5525): 2320-2322.
- [ 5 ] Winjum J K, Dixon R K, Schroeder P E. Estimating the global potential of forest and agroforest management practices to sequester carbon. *Water, Air, and Soil Pollution*, 1992, 64(1/2): 213-227.
- [ 6 ] Xu B, Guo Z D, Piao S L, Fang J Y. Biomass carbon stocks in China's forests between 2000 and 2050; A prediction based on forest biomass-age relationships. *Science China Life Science*, 2010, 40(7): 587-594.
- [ 7 ] Chen X G, Zhang Y P, Pan C P, Chen B W, Cai L S. Carbon sequestration potential of forest stands under GGP in Chongqing municipality. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2009, 29(4): 7-15.
- [ 8 ] Li Z C, Fu M Y, Xie J Z, Zhou B Z, Xiao T Q, Wu M. Carbon sequestration of 5 ecological reestablishment vegetation types in Muchuan County of Sichuan. *Journal of Zhejiang Forestry College*, 2004, 21(4): 382-387.
- [ 9 ] Li J, Huang C D, Zhang G Q. Density, storage and spatial distribution of carbon in *Pleioblastus amarus* forest returned from farmland. *Journal of Zhejiang Forestry Science and Technology*, 2006, 26(4): 1-5.
- [ 10 ] 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.
- [ 11 ] Bai X S, Hu Y L, Zeng D H, Jiang Z R. Effects of farmland afforestation on ecosystem carbon stock and its distribution pattern in semi-arid region of Northwest China. *Chinese Journal of Ecology*, 2008, 27(10): 1647-1652.
- [ 12 ] Chen X G, Zhang Y P, Zhan H. Biomass carbon sequestration potential of trees under the grain for green programs in Yunnan Province. *Scientia Silvae Sinicae*, 2008, 44(5): 24-30.
- [ 13 ] Chen X G, Zhao X H, Lu M, Tu J, Yao P. Carbon sequestration potential by grain for green programs in Sichuan Province. *Journal of Zhejiang Forestry Science and Technology*, 2009, 29(5): 19-28.
- [ 14 ] Cai L S, Chen X G, Guo Y, Yin Y. Carbon sequestration potential with the grain for green program in Guizhou province. *Journal of Zhejiang Forestry College*, 2009, 26(5): 722-728.
- [ 15 ] Research Group of China Forestry Sustainable Development Strategy (RGCFSDS). *Research on China Forestry Sustainable Development Strategy*. Beijing: China Forestry Publishing House, 2003: 135-177.
- [ 16 ] IPCC. LUCF sector good practice guidance. In: IPCC Good Practice for LULUCF. The Institute for Global Environmental Strategies (IGES) for the IPCC, Hayama, Kanagawa, Japan. ISBN 4-88788-003-0. 2004. 3.1-3. 317.
- [ 17 ] Chen X G, Zhang X Q, Zhang Y P, Wan C B. Carbon sequestration potential of the stands under the Grain for Green Program in Yunnan Province, China. *Forest Ecology and Management*, 2009, 258(3): 199-206.
- [ 18 ] Institute of Forest Ecology, Environment and Protection, CAF. Checklist report of land-use change and forestry greenhouse gas emission in China. 2004: 30-49 (unpublished).
- [ 19 ] Cheng G W, Luo J. The carbon accumulation and dissipation features of sub-alpine woodland in Mt. Gongga. *Acta Geographica Sinica*, 2003, 58(2): 179-185.
- [ 20 ] Liu H, Lei R D. Research methods and advances of carbon storage and balance in forest ecosystems of China. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2005, 25(4): 835-843.
- [ 21 ] Lei P F, Xiang W H, Tian D L, Fang X. Carbon storage and distribution in *Cinnamomum camphor* plantation. *Chinese Journal of Ecology*, 2004, 23(4): 25-30.
- [ 22 ] Ding S Y, Liang G F. Changes of forest vegetation stocks and dynamic change in the past 20 years in Luoning county. *Resources Science*, 2004, 26(3): 105-108.
- [ 23 ] Fang X, Tian D L, Xiang W H, Cai B Y. On carbon accumulation, distribution of different densities in slash pine plantation. *Journal of Zhejiang Forestry College*, 2003, 20(4): 374-379.
- [ 24 ] He Z M, Li L H, Wang Y Q, Zou S Q, Yue Y J, Wang X G. Carbon stock and carbon sequestration of a 33-year-old *Fokienia hodginsii* plantation. *Journal of Mountain Science*, 2003, 21(3): 298-303.
- [ 25 ] Li S D. *Research on Conversion of Farmland to Forests in China*. Beijing: Science Press, 2004.
- [ 26 ] Laclau P. Biomass and carbon sequestration of ponderosa pine plantations and native cypress forests in northwest Patagonia. *Forest Ecology and Management*, 2003, 180(1/3): 317-333.
- [ 27 ] Paul K I, Ploglase P J, Nyakuenguma J G, Khanna P K. Change in soil carbon following afforestation. *Forest Ecology and Management*, 2002, 168(1/3): 241-257.
- [ 28 ] Woodbury P B, Smith J E, Heath L S. Carbon sequestration in the U. S. forest sector from 1990 to 2010. *Forest Ecology and Management*, 2007, 241(1/3): 14-27.
- [ 29 ] Niu X Z, Duiker S W. Carbon sequestration potential by afforestation of marginal agricultural land in the Midwestern U. S. *Forest Ecology and Management*, 2006, 223(1/3): 415-427.
- [ 30 ] Pan G X. Study on carbon reservoir in soils of China. *Bulletin of Science and Technology*, 1999, 15(5): 330-332.
- [ 31 ] Heath L S, Birdsey R A, Williams D W. *Methodology for*

- estimating soil carbon for the forest carbon budget model of the United States, 2001. *Environmental Pollution*, 2002, 116(3): 373-380.
- [32] Post W M, Kwon K C. Soil carbon sequestration and land-use change: processes and potential. *Global Change Biology*, 2000, 6(3): 317-327.
- [33] Bateman I J, Lovett A A. Estimating and valuing the carbon sequestered in softwood and hardwood trees, timber products and forest soils in Wales. *Journal of Environmental Management*, 2000, 60(4): 301-323.
- [34] Paul E A, Morris S J, Six J, Paustian K, Gregorich E G. Interpretation of soil carbon and nitrogen dynamics in agricultural and afforested soils. *Soil Science Society of America Journal*, 2003, 67(5): 1620-1628.
- [35] 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.
- [36] Garten C T Jr. Soil carbon storage beneath recently established tree plantations in Tennessee and South Carolina, USA. *Biomass and Bioenergy*, 2002, 23(2): 93-102.
- [37] Peng W Y, Zhang K L, Yang Q K. Forecast of impact of the returning farms to forests on soil organic carbon of loess plateau. *Areal Research and Development*, 2006, 25(3): 94-99.
- [38] Lima A M N, Silva I R, Neves J C L, Novais R F, Barros N F, Mendonça E S, Smyth T J, Moreira M S, Leite F P. Soil organic carbon dynamics following afforestation of degraded pastures with eucalyptus in southeastern Brazil. *Forest Ecology and Management*, 2006, 235(1/3): 219-231.
- [39] Zhang X Q, Wu S H. *Projects for Forestry Carbon Sink: Theory and Practice*. Beijing: China Forestry Publishing House, 2010: 85-87.
- [40] Tian X L, Xia J, Xia H B, Ni J. Forest biomass and its spatial pattern in Guizhou Province. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(2): 287-294.
- [41] Zhao M, Zhou G S. Carbon storage of forest vegetation and its relationship with climatic factors. *Scientia Geographica Sinica*, 2004, 24(1): 50-54.
- [42] Huang C D, Zhang J, Yang W Q, Tang X, Zhao A J. Dynamics on forest carbon stock in Sichuan Province and Chongqing City. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(3): 967-974.
- [43] Skog K E, Nicholson G A. Carbon sequestration in wood and paper products. *Gen. Tech. Re RMRS- GTR- 59*. USDA. Forest Service, 2000: 79-88.
- 工程林固碳潜力估算. *中南林业科技大学学报*, 2009, 29(4): 7-15.
- [8] 李正才, 傅懋毅, 谢锦忠, 周本智, 肖体全, 吴明. 沐川县退耕还林生态恢复地碳截留效应的研究. *浙江林学院学报*, 2004, 21(4): 382-387.
- [9] 李江, 黄从德, 张国庆. 川西退耕还林地苦竹林碳密度、碳贮量及其空间分布. *浙江林业科技*, 2006, 26(4): 1-5.
- [10] 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.
- [11] 白雪爽, 胡亚林, 曾德慧, 蒋志荣. 半干旱沙区退耕还林对碳储量和分配格局的影响. *生态学杂志*, 2008, 27(10): 1647-1652.
- [12] 陈先刚, 张一平, 詹卉. 云南退耕还林工程林木生物质碳汇潜力. *林业科学*, 2008, 44(5): 24-30.
- [13] 陈先刚, 赵晓惠, 陆梅, 涂璟, 姚平. 四川省退耕还林工程林碳汇潜力研究. *浙江林业科技*, 2009, 29(5): 19-28.
- [14] 蔡丽莎, 陈先刚, 郭颖, 殷瑶. 贵州省退耕还林工程碳汇潜力预测. *浙江林学院学报*, 2009, 26(5): 722-728.
- [15] 中国可持续发展林业战略研究项目组. *中国可持续发展林业战略研究: 战略卷*. 北京: 中国林业出版社, 2003: 135-177.
- [18] 中国林业科学研究院森林生态环境保护研究所. *中国土地利用变化和林业温室气体清单报告*. 2004: 30-49(未发表).
- [19] 程根伟, 罗辑. 贡嘎山亚高山林地碳的积累与耗散特征. *地理学报*, 2003, 58(2): 179-185.
- [20] 刘华, 雷瑞德. 我国森林生态系统碳储量和碳平衡的研究方法及进展. *西北植物学报*, 2005, 25(4): 835-843.
- [21] 雷丕锋, 项文化, 田大伦, 方晰. 樟树人工林生态系统碳素贮量与分布研究. *生态学杂志*, 2004, 23(4): 25-30.
- [22] 丁圣彦, 梁国付. 近 20 年来洛宁县森林植被碳储量及动态变化. *资源科学*, 2004, 26(3): 105-108.
- [23] 方晰, 田大伦, 项文化, 蔡宝玉. 不同密度湿地松人工林中碳的积累与分配. *浙江林学院学报*, 2003, 20(4): 374-379.
- [24] 何宗明, 李丽红, 王义祥, 邹双全, 岳永杰, 王小国. 33 年生福建柏人工林碳库与碳吸存. *山地学报*, 2003, 21(3): 298-303.
- [25] 李世东. *中国退耕还林研究*. 北京: 科学出版社, 2004.
- [30] 潘根兴. *中国土壤有机碳和无机碳库量研究*. *科技通报*, 1999, 15(5): 330-332.
- [37] 彭文英, 张科利, 杨勤科. 退耕还林对黄土高原地区土壤有机碳影响预测. *地域研究与开发*, 2006, 25(3): 94-99.
- [39] 张小全, 武曙红. *林业碳汇项目: 理论与实践*. 北京: 中国林业出版社, 2010: 85-87.
- [40] 田秀玲, 夏婧, 夏焕柏, 倪健. 贵州省森林生物量及其空间格局. *应用生态学报*, 2011, 22(2): 287-294.
- [41] 赵敏, 周广胜. 中国森林生态系统的植物碳贮量及其影响因素分析. *地理科学*, 2004, 24(1): 50-54.
- [42] 黄从德, 张健, 杨万勤, 唐霄, 赵安玖. 四川省及重庆地区森林植被碳储量动态. *生态学报*, 2008, 28(3): 967-974.

#### 参考文献:

- [6] 徐冰, 郭兆迪, 朴世龙, 方精云. 2000—2050 年中国森林生物量碳库: 基于生物量密度与林龄关系的预测. *中国科学: 生命科学*, 2010, 40(7): 587-594.
- [7] 陈先刚, 张一平, 潘昌平, 陈本文, 蔡丽莎. 重庆市退耕还林

**ACTA ECOLOGICA SINICA Vol.34, No.11 June, 2014 (Semimonthly)**  
**CONTENTS**

**Frontiers and Comprehensive Review**

Review on macropore flow in soil ..... GAO Zhaoxia, XU Xuexuan, ZHAO Jiaona, et al (2801)

**Ecological Restoration**

A summary of study on ecological restoration technology of large coal bases construction in China .....  
..... WU Gang, WEI Dong, ZHOU Zhengda, et al (2812)

The ecology and environment monitoring technical systems in national large-scale coal-fired power base: a case study in Xilingol  
League, Inner Mongolia ..... WEI Dong, QUAN Yuan, WANG Chenxing, et al (2821)

Evaluation index system on ecological effect of national large-scale coal-fired power base based on the dpsir conceptual model .....  
..... ZHOU Zhengda, WANG Chenxing, FU Xiao, et al (2830)

Research progress on the environment impacts from underground coal mining in arid western area of China .....  
..... LEI Shaogang, BIAN Zhengfu (2837)

Ecological risk receptors analysis of pingzhuang western open-cut coal mining area in inner mongolia .....  
..... GAO Ya, LU Zhaohua, WEI Zhenkuan, et al (2844)

Impacts of mining on landscape pattern and primary productivity in the grassland of Inner Mongolia; a case study of Heidaigou  
open pit coal mining ..... KANG Sarula, NIU Jianming, ZHANG Qing, et al (2855)

Accumulation of soil Cd, Cr, Cu, Pb by *Panax notoginseng* and its associated health risk .....  
..... LIN Longyong, YAN Xiulan, LIAO Xiaoyong, et al (2868)

3D interpolation of soil PAHs distribution in a coking contaminated site of China ... LIU Geng, BI Rutian, QUAN Teng, et al (2876)

**Autecology & Fundamentals**

Catabatic effect from artificial mixed plantation of *Cunninghamia lanceolata* on soil aluminum toxicity .....  
..... LEI Bo, LIU Bin, LUO Chengde, et al (2884)

Study on the trophic levels of soil macrofauna in artificial protection forests by means of stable nitrogen isotopes .....  
..... ZHANG Shuhua, ZHANG Xueping (2892)

Lead- and cadmium-resistant bacterial strain JB11 enhances lead and cadmium uptake in the phytoremediation of soils .....  
..... JIN Zhongmin, SHA Wei, LIU Lijie, et al (2900)

Identification and oil-degrading performance of *Acinetobacter* sp. isolated from North Shaanxi oil-contaminated soil .....  
..... WANG Hu, WU Lingling, ZHOU Lihui, et al (2907)

Phylogenetic and physiological diversity of actinomycetes isolated from plant rhizosphere soils in the Qilian Mountains .....  
..... MA Aiai, XU Shijian, MIN Yuxia, et al (2916)

Spatial distribution of AM and DSE fungi in the rhizosphere of *Ammopiptanthus nanus* .....  
..... JIANG Qiao, HE Xueli, CHEN Weiyan, et al (2929)

Effects of PASP-KT-NAA on maize leaf nitrogen assimilation after florescence over different temperature gradients .....  
..... GAO Jiao, DONG Zhiqiang, XU Tianjun, et al (2938)

Key temperatures of corn and sunflower during cooling process in Hetao irrigation district, Inner Mongolia .....  
..... WANG Haimei, HOU Qiong, YUN Wenli, et al (2948)

The content of tannin extract in four types of *Quercus variabilis* ..... YIN Yining, ZHANG Wenhui, HE Jingfeng, et al (2954)

Effect of food stress on flight muscle and reproduction development in a wing dimorphic cricket, *Velarifictorus ornatus* .....  
..... WU Hongjun, ZHAO Lüquan, ZENG Yang, et al (2963)

- Effect of colours on oviposition preference of the oriental fruit moth, *Grapholita molesta* Busck ..... YANG Xiaofan, MA Chunsen, FAN Fan, et al (2971)
- Monoterpene volatiles affecting host selection behavior of *Dendrolimus superans* and the activities of defense protein in larch needles ..... LIN Jian, LIU Wenbo, MENG Zhaojun, et al (2978)
- Population, Community and Ecosystem**
- Soil microbial community structure under different vegetation restoration patterns in the loess hilly area ..... HU Chanjuan, GUO Lei, LIU Guohua (2986)
- Seasonal variation of functional diversity of microbial communities in sediment and shelter of sea cucumber (*Apostichopus japonicus*) cultural ponds ..... YAN Fajun, TIAN Xiangli, DONG Shuanglin, et al (2996)
- Analysis of bacterial flora during the fahua-fermentation process of fuzhuan brick tea production based on DGGE technology ..... LIU Shiquan, HU Zhiyuan, ZHAO Yunlin (3007)
- Landscape, Regional and Global Ecology**
- CO<sub>2</sub> emissions transfer embedded in inter-regional trade in China ..... LIU Hongguang, FAN Xiaomei (3016)
- Carbon sequestration potential of the major stands under the Grain for Green Program in Southwest China in the next 50 years ..... YAO Ping, CHEN Xiangang, ZHOU Yongfeng, et al (3025)
- Characteristics of spatial and temporal phenology under the dynamic variation of grassland in the Qinghai Lake watershed ..... LI Guangyong, LI Xiaoyan, ZHAO Guoqin, et al (3038)
- Estimates of carbon emissions caused by forest fires in the temperate climate of Heilongjiang Province, China, from 1953 to 2012 ... WEI Shujing, LUO Bizhen, SUN Long, et al (3048)
- Simulation of the climatic productivity of forest vegetation in Three Gorges Reservoir area ..... PAN Lei, XIAO Wenfa, TANG Wanpeng, et al (3064)
- The mechanism for occurrence of *Peridiniopsis* blooms in the tributaries of Three Gorges Reservoir ..... ZHU Aimin, LI Sixin, HU Jun, et al (3071)
- Biodiversity sensitivity zoning of river dam and reservoir engineering development ... LI Yiqiu, LU Chunxia, DENG Ou, et al (3081)
- Urban, Rural and Social Ecology**
- Assessment on coordinative ability of sustainable development of Beijing-Tianjin-Hebei Region based on set pair analysis ..... TAN Feifei, ZHANG Meng, LI Haoran, et al (3090)
- Vacancy analysis on the development of nature reserves in Jiangxi Province ..... HUANG Zhiqiang, LU Lin, DAI Nianhua, et al (3099)
- Evaluation of ecological economy index in the poyang lake ecological economic zone ..... HUANG Heping, PENG Xiaolin, KONG Fanbin, et al (3107)
- Research on China's provincial forest ecological security appraisal based on the detrimental interferences ..... LIU Xinzhu, MI Feng, ZHANG Shuang, et al (3115)

# 《生态学报》2014 年征订启事

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

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

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,280 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 34 卷 第 11 期 (2014 年 6 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 34 No. 11 (June, 2014)

**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

**主 编** 王如松

**主 管** 中国科学技术协会

**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

**出 版** 科 学 出 版 社  
地址:北京东黄城根北街 16 号  
邮政编码:100717

**印 刷** 北京北林印刷厂

**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

**订 购** 全国各地邮局

**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

**广告经营** 京海工商广字第 8013 号  
**许 可 证**

**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

**Editor-in-chief** WANG Rusong

**Supervised** by China Association for Science and Technology

**Sponsored** by Ecological Society of China  
Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS  
Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China

**Published** by Science Press  
Add: 16 Donghuangchenggen North Street,  
Beijing 100717, China

**Printed** by Beijing Bei Lin Printing House,  
Beijing 100083, China

**Distributed** by Science Press  
Add: 16 Donghuangchenggen North  
Street, Beijing 100717, China  
Tel: (010)64034563  
E-mail: journal@cspg.net

**Domestic** All Local Post Offices in China

**Foreign** China International Book Trading  
Corporation  
Add: P.O.Box 399 Beijing 100044, China



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