

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第 32 卷 第 10 期 Vol.32 No.10 **2012**

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 32 卷 第 10 期

2012 年 5 月 (半月刊)

目次

基于系统动力学的城市住区形态变迁对城市代谢效率的影响.....	李旋旗,花利忠 (2965)
居住-就业距离对交通碳排放的影响	童抗抗,马克明 (2975)
经济学视角下的流域生态补偿制度——基于一个污染赔偿的算例	刘涛,吴钢,付晓 (2985)
旅游开发对上海滨海湿地植被的影响.....	刘世栋,高峻 (2992)
汶川地震对大熊猫主食竹——拐棍竹竹笋生长发育的影响.....	廖丽欢,徐雨,冉江洪,等 (3001)
江西省森林碳蓄积过程及碳源/汇的时空格局.....	黄麟,邵全琴,刘纪远 (3010)
伊洛河流域草本植物群落物种多样性.....	陈杰,郭屹立,卢训令,等 (3021)
新疆绿洲农田不同连作年限棉花根际土壤微生物群落多样性.....	顾美英,徐万里,茆军,等 (3031)
荒漠柠条锦鸡儿 AM 真菌多样性.....	贺学礼,陈杰,郭辉娟,等 (3041)
彰武松、樟子松光合生产与蒸腾耗水特性	孟鹏,李玉灵,尤国春,等 (3050)
中亚热带常绿阔叶林粗木质残体呼吸季节动态及影响因素.....	刘强,杨智杰,贺旭东,等 (3061)
盐土和沙土对新疆常见一年生盐生植物生长和体内矿质组成的影响	张科,田长彦,李春俭 (3069)
长白山北坡林线灌木草本植物与岳桦的动态关系.....	王晓东,刘惠清 (3077)
不同生态条件对烤烟形态及相关生理指标的影响.....	颜侃,陈宗瑜 (3087)
基于因子分析的首蓿叶片叶绿素高光谱反演研究	肖艳芳,官辉力,周德民 (3098)
三峡库区消落带水淹初期土壤种子库月份动态.....	王晓荣,程瑞梅,唐万鹏,等 (3107)
三种利用方式对羊草草原土壤氨氧化细菌群落结构的影响.....	邹雨坤,张静妮,陈秀蓉,等 (3118)
西洋参根残体对自身生长的双重作用	焦晓林,杜静,高微微 (3128)
不同程度南方菟丝子寄生对入侵植物三叶鬼针草生长的影响	张静,闫明,李钧敏 (3136)
山东省部分水岸带土壤重金属含量及污染评价.....	张菊,陈诗越,邓焕广,等 (3144)
太湖蓝藻死亡腐烂产物对狐尾藻和水质的影响.....	刘丽贞,秦伯强,朱广伟,等 (3154)
不同生态恢复阶段无瓣海桑人工林湿地中大型底栖动物群落的演替.....	唐以杰,方展强,钟燕婷,等 (3160)
江西鄱阳湖流域中华秋沙鸭越冬期间的集群特征.....	邵明勤,曾宾宾,尚小龙,等 (3170)
秦岭森林鼠类对华山松种子捕食及其扩散的影响	常罡,王开锋,王智 (3177)
内蒙古草原小毛足鼠的活动性、代谢特征和体温的昼夜节律	王鲁平,周顺,孙国强 (3182)
温度和紫外辐射胁迫对西藏飞蝗抗氧化系统的影响.....	李庆,吴蕾,杨刚,等 (3189)
“双季稻-鸭”共生生态系统 C 循环	张帆,高旺盛,隋鹏,等 (3198)
水稻籽粒灌浆过程中蛋白质表达特性及其对氮肥运筹的响应.....	张志兴,陈军,李忠,等 (3209)
专论与综述	
海水富营养化对海洋细菌影响的研究进展	张瑜斌,章洁香,孙省利 (3225)
海洋酸化效应对海水鱼类的综合影响评述.....	刘洪军,张振东,官曙光,等 (3233)
入侵种薇甘菊防治措施及策略评估.....	李鸣光,鲁尔贝,郭强,等 (3240)
研究简报	
渭干河-库车河三角洲绿洲土地利用/覆被时空变化遥感研究	孙倩,塔西甫拉提·特依拜,张飞,等 (3252)
2009 年冬季东海浮游植物群集	郭术津,孙军,戴民汉,等 (3266)
新疆野生多伞阿魏生境土壤理化性质和土壤微生物.....	付勇,庄丽,王仲科,等 (3279)
塔里木盆地塔里木沙拐枣群落特征	古丽努尔·沙比尔哈孜,潘伯荣,段士民 (3288)
矿区生态产业共生系统的稳定性.....	孙博,王广成 (3296)
期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 338 * zh * P * ¥70.00 * 1510 * 36 * 2012-05	



封面图说: 哈巴雪山和金沙江——“三江并流”自然景观位于青藏高原南延部分的横断山脉纵谷地区,由怒江、澜沧江、金沙江及其流域内的山脉组成。它地处东亚、南亚和青藏高原三大地理区域的交汇处,是世界上罕见的高山地貌及其演化的代表地区,也是世界上生物物种最丰富的地区之一。哈巴雪山在金沙江左岸,与玉龙雪山隔江相望。图片反映的是金沙江的云南香格里拉段,远处为哈巴雪山。哈巴雪山主峰海拔 5396 m,而最低江面海拔仅为 1550 m,山脚与山顶的气温差达 22.8℃,巨大的海拔差异形成了明显的高山垂直性气候。

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

DOI: 10.5846/stxb201104220529

黄麟, 邵全琴, 刘纪远. 江西省森林碳蓄积过程及碳源/汇的时空格局. 生态学报, 2012, 32(10): 3010-3020.

Huang L, Shao Q Q, Liu J Y. Forest carbon sequestration and carbon sink/source in Jiangxi Province. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(10): 3010-3020.

江西省森林碳蓄积过程及碳源/汇的时空格局

黄 麟, 邵全琴*, 刘纪远

(中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

摘要: 森林碳蓄积是研究森林与大气碳交换以及估算森林吸收或排放含碳气体的关键参数, 不同年龄森林的碳源/汇功能差异则体现出森林生态系统碳蓄积过程的时间特征。以森林资源清查的样方数据作为数据源, 通过刻画主要树种的林分蓄积生长曲线、林龄与净初级生产力(NPP)之间的关系, 驱动区域碳收支模型(InTEC)模拟江西省 1950—2008 年的森林碳蓄积过程, 了解山江湖工程实施以来的森林碳源/汇状况。结果表明, 20 世纪 80 年代以前, 江西省森林年平均 NPP 波动于 450 — 813 gC m⁻² a⁻¹ 之间, 年净增生物量碳 26.55—36.23 TgC/a, 年净增木质林产品碳 0.01—0.3 TgC/a; 80 年代初, NPP 和年净增生物量碳分别降至 307.39 gC m⁻² a⁻¹ 和 17.31 TgC/a, 而年净增木质林产品碳却高达 0.6 TgC/a, 说明森林被大量砍伐进入林产品碳库; 1985 年山江湖工程实施后, 大面积造林使得年净增碳蓄积呈现急剧上升趋势, 生物量和木质林产品碳蓄积分别上升至目前的 42.37 TgC/a 和 0.79 TgC/a, 而平均 NPP 值增加缓慢、碳汇功能降低, 说明林分质量有待提高; 90 年代后碳汇功能开始稳步增强, 说明造林面积的迅速增加是引起江西省森林碳增汇的主要驱动因素, 但未来森林增汇潜力应源于森林生长和有效的经营管理。

关键词: 江西省; 森林碳蓄积; 碳源/汇; 木质林产品碳

Forest carbon sequestration and carbon sink/source in Jiangxi Province

HUANG Lin, SHAO Quanzhen*, LIU Jiyuan

The Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

Abstract: Forest carbon sequestration is one of the key parameters in research of carbon exchange between forest and atmosphere, also in estimation of the carbonaceous gas that absorbed or released by forest. The variation of forest carbon source and sink patterns presented the temporal characters of forest carbon sequestration. The study applied regional carbon budget model (InTEC), and scale transformation from plot to region, based on forest inventory data, to depict the growth curve of main tree species and the relationships among forest age and net primary production (NPP), and to simulate and analyze the carbon sequestration of forest biomass, soil organic carbon and wood products from 1950 to 2008 in Jiangxi Province, considering forest age and disturbances. Furthermore, the spatial and temporal patterns of forest carbon sink and sources during the period of 1980—2008 were estimated, since the implementation of Mountain-River-Lake Program were revealed to assess the ecological effectiveness of the program, and to promote forest ecosystem restoration and conservation in Jiangxi Province. The results showed that forest annual average NPP, annual net increased carbon sequestration of biomass and wood products were estimated to ranges of 450 — 813 gC m⁻² a⁻¹, 26.55—36.23 TgC/a and 0.01—0.3 TgC/a before 1980s respectively. And the annual average NPP and annual net increased biomass carbon sequestration declined rapidly to lowest value of 307.39 gC m⁻² a⁻¹ and 17.31 TgC/a respectively, however, the annual net increased carbon sequestration of wood products reached to highest value of 0.6 TgC/a. Since the beginning of the Mountain-River-Lake Program in 1985,

基金项目: 国家自然科学基金项目(40971281, 41001366); 973 计划项目(2009CB421105)

收稿日期: 2011-04-22; **修订日期:** 2011-09-28

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: shaoqq@lreis.ac.cn

annual net increased carbon sequestration of biomass and wood products both increased rapidly to 42.37 TgC/a and 0.79 TgC/a due to massive forest planting project, however, the increasing rate of annual average NPP showed slower compared than that before. Furthermore, the forest ecosystem in Jiangxi province was a relatively strong carbon sink at the beginning of 1980, and then it decreased because of the lower volume of plantations and most residual secondary natural forests. Since 1990s, the carbon sinks increased steadily responding to the rapidly increasing forest area. Of course, there remained some uncertainties in our estimations of carbon sources and sinks in Jiangxi's forests. The improved inventory-based estimates of forest carbon stocks presented in this paper would help to constrain uncertainties from ecological modeling. In addition, most estimates of forest carbon stocks have neglected or seldom considered the effects of economic forest, bamboo and understory etc., which led to underestimate. However, the limited forest land reminded that forest growth and efficient management would be effective to potential carbon gains in the future. Therefore, we should focus on the effects of forest management, to solve the demand of increased terrestrial carbon sinks. Furthermore, forest carbon management raises some interesting questions for us. For example, is carbon management compatible with utilization of forest resources? How does carbon management enhance or detract from other ecosystem services such as water conservation and biodiversity? Besides deepening our understanding of increasing carbon sinks by forestation, the limitations and negatives of forestation projects should be realized, and new technologies for forestation and enhancement of carbon stocks should be exploited.

Key Words: Jiangxi Province; forest carbon sequestration; carbon source and sink; wood product

全球植被贮存了(550±100) Pg 的碳,其中面积约占 28% 的森林约蓄积了约 77% 植被碳^[1],每年吸附约 30% 由人类活动产生的碳排放^[2]。森林碳蓄积是研究森林与大气碳交换以及估算森林吸收或排放含碳气体的关键参数,可通过传统收获法、样地调查法、树木年轮方法、遥感估算法、通量观测法、模型模拟法等进行研究^[3]。遥感估算碳蓄积在空间大尺度研究中具有优势,但受到遥感数据本身质量、反演算法等的影响,其精度问题一直是相关研究领域的难题。通量观测的时间分辨率和估计精度皆高,是理解森林碳循环过程、机理以及模型验证的一个有效工具,但仅靠站点尺度的碳通量观测难以在区域上表达^[4]。模型模拟法通过简化生态过程和机理可模拟时空大尺度的碳蓄积过程,但由于模型参数的不确定性、输入数据的质量或对机理过程的简化假设使其精确度受到质疑。传统森林计测法、样地调查法、树木年轮法等可以获得不同时段的第一手资料,在减少不确定性方面具有优势^[5-6],可用于其它方法的精度检验,但是缺乏空间描述。无论点尺度或区域尺度的森林碳蓄积研究,多通过直接或间接测定森林生物量、枯落物量和土壤容重推算而得,其大小决定于研究地点、森林类型、林分面积、立地条件、尺度大小以及测定方法等方面,因此估算结果有一定的差异。

林龄结构的变化是决定森林生态系统碳蓄积的一个关键因素,不同年龄森林的碳源/汇功能差异体现出森林生态系统碳蓄积过程的时间特征,受到生态系统历史干扰和森林管理导致的林分更新的影响^[7-13]。许多研究得出生产力随着林龄而下降^[14-16],土壤碳储量则随着林龄而增加^[17-19]。有研究认为幼龄林的碳汇功能比成熟林高^[20-21],也有认为天然老龄林的维持对陆地碳循环的影响效应远高于幼龄林^[9,22]。然而,由于难以获取林龄空间分布信息,关于大尺度林龄结构对生态系统碳收支影响的研究很少^[16,23]。林分蓄积量是估算生物量、碳蓄积量的一个关键因素,可通过林分生长和收获模型获得^[24],但多针对某一特定样点或小区域,由于树种组成、林分年龄、立地质量和竞争效应等问题,其精度和适用性往往取决于能否描述林分随年龄的动态变化,是否可如实反映某些林分生长的规律性^[25],应用于区域上有所局限。废弃或使用中的木质林产品的碳蓄积对森林碳蓄积的贡献不可忽视,保持和增加森林碳蓄积的同时提供林产品是利用森林生态系统缓解气候的最优选择^[2],然而碳蓄积研究较少关注这部分^[6,26]。

森林碳蓄积研究方法的局限性以及尺度转换的必要性提醒人们,如何改进研究方法、提高数据质量,寻找科学有效的尺度推译方法,并重建历史资料,是研究碳蓄积过程需要解决的首要问题。在空间尺度方面,如何将站点、样地尺度的点观测资料外推到区域水平尺度的模拟以及相互验证^[27-28],是目前碳循环研究中的一个

难点问题。从时间尺度来说,历史数据的重建是区域或全球碳循环研究的基础,多年连续观测数据是准确评价森林生态系统碳收支的重要数据基础^[29-31]。因此,针对前述研究中存在的问题,本文试图解决不同时空尺度森林碳估算中数据与方法的耦合问题。本研究拟对区域尺度的江西省森林碳蓄积过程进行模拟,根据江西森林分布、森林资源清查样方和统计数据、站点观测通量数据等,综合应用模型模拟、生长曲线拟合、遥感反演、尺度扩展和 GIS 等方法,通过刻画主要树种的林分蓄积生长曲线、林龄与净初级生产力的关系,驱动 InTEC 模型模拟江西省 1950—2008 年的森林碳蓄积过程和碳源/汇状况,分析森林碳蓄积和碳源/汇的时空变化规律。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

本研究选择江西省($24^{\circ}07'N$ — $29^{\circ}09'N$, $114^{\circ}02'E$ — $117^{\circ}97'E$)作为南方红壤丘陵区的典型研究区。该省植被类型有针叶林、针阔混交林、常绿阔叶林、常绿落叶阔叶混交林、竹林、矮林和灌丛等。20 世纪 80 年代前因过伐及盲目垦殖,森林覆盖率最低降至 1975 年的 27% (图 1),于 1985 年开始的“山江湖工程”综合开发治理是红壤丘陵区生态恢复、综合开发治理和可持续发展模式的成功典范,工程年均造林面积达到 $5 \times 10^5 \text{ hm}^2$,2006 年江西省森林覆盖率上升到 60.05%。中国科学院千烟洲红壤丘陵综合开发试验区(简称千烟洲)位于江西省泰和县灌溪乡境内($N26^{\circ}44'$ — $26^{\circ}45'30''$, $E115^{\circ}3'$ — $115^{\circ}4'30''$),以人工林为主,在中国红壤丘陵区具有典型的代表性,千烟洲人工林通量观测塔四周的森林覆盖率在 90% 以上,塔西边是湿地松,东南以马尾松为主,东北以杉木为主,平均树高为 12 m,树龄多为 20a 左右^[32]。

1.2 数据及处理

(1) 基础数据

收集了研究区 1:10 万和 1:5 万的地形图、90mDEM 等基础数据。收集了 1950—2008 年江西省 17 个国家台站的逐日气象观测数据,数据项包括降水量、日平均气温、日最高气温和日最低气温等,计算年均温、年降水量、生长季的平均气温和生长季($>10^{\circ}\text{C}$)长度,并利用 ANUSPLINE 进行插值作为生态模型的输入参数。

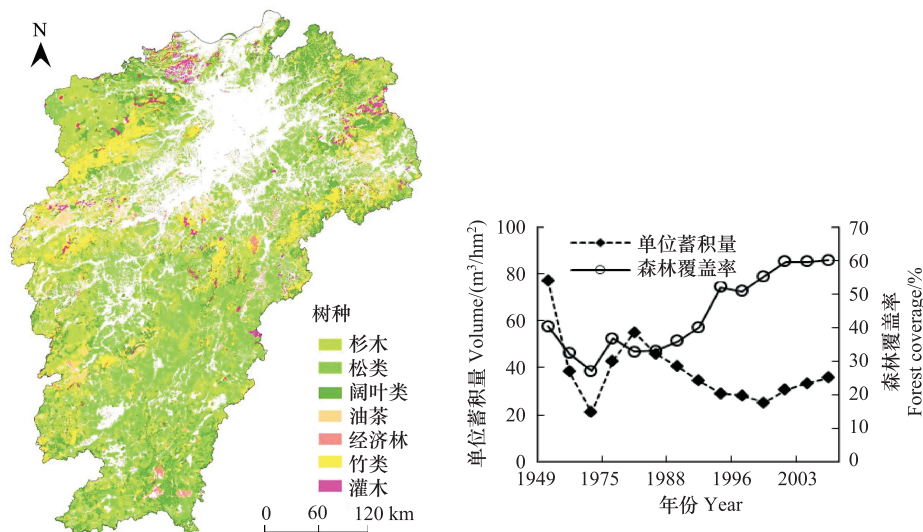


图1 江西省森林类型分布和森林覆盖率、林分蓄积变化曲线

Fig. 1 The distribution of forest types, the forest coverage and stand volume per unit in Jiangxi Province

(2) 林业数据

收集了江西省森林资源分布(图1)、林龄分布图、木质林产品产量、1973—2003 年历次森林资源二类清查统计数据及部分样方资料、历年森林覆盖率和单位蓄积量(图1)等。利用 ArcGIS 将 2003 年 1:1 万的江西省森林资源分布图进行矢量化,其中森林类型包括杉木、松类、阔叶类、经济林、竹类、灌木和油茶。森林清查

样方数据包括样方的位置、林龄和蓄积等,用于林分蓄积生长曲线及各树种生物量扩展因子(BEF)随林龄变化的拟合,同时,根据森林清查统计数据得到江西省不同时期的主要树种及其所占面积的比例。历年有林地面积数据源自《江西省林业志》、《江西省林业统计资料 1950—1978》、《中国林业统计年鉴》及历次森林资源清查数据。根据林业统计年鉴可以得到 1959—2007 年的各类木质林产品产量数据。

(3)输入参数

对公开发表的论文和出版专著中关于江西省各主要树种(松类、杉木、栎类、软阔类和硬阔类)的生物量扩展因子(BEF)、木材密度(WD)、含碳率(CF)以及生物量乔木各个器官(树干、树枝、树叶、树根)间的分配规律等,进行了文献数据、参数整理^[33-36]。收集了中国科学院资源环境科学数据中心 1980s、1995、2000、2005 年的土地覆被数据,利用 2008 年 MODIS 的 1kmNPP、LAI 数据作为参考年值,土壤结构数据源自 Wang 等^[37],详见表 1。此外,木质素含量、木质部分燃烧率(0.25)、地表枯落物燃烧率(1.00)、氮沉降初始值(0.05600)、温室气体初始值(3.66400)、参考年温室气体值(168.156)等未见报道的参数采用模型通用值^[38-39]。木质林产品碳库估算参数源于阮宇等^[40](表 2)。收集千烟洲人工林通量观测站的 CO₂ 通量数据,利用 2003—2005 年的年度、生长季和非生长季 NEP 观测值进行模型模拟结果的点尺度验证。

表 1 InTEC 模型模拟所需的主要输入参数
Table 1 The primary input parameters InTEC model

碳库 Carbon pools	参数 Parameters	松类 Pine	杉木 Fir	栎类 Oak	阔叶类 Braod-leaf
生物量碳库 Biomass carbon pool	木质部分配比例 Allocation coefficient to wood	0.6554	0.7724	0.667	0.4624
	树叶分配比例 Allocation coefficient to leaf	0.2281	0.1099	0.204	0.1190
	粗根分配比例 Allocation coefficient to coarse root	0.1184	0.1262	0.075	0.2226
	细根分配比例 Allocation coefficient to fine root	0.0051	0.0126	0.054	0.1960
	木质部分周转率 Wood turnover rate/a	0.0279	0.0279	0.0288	0.0288
	粗根周转率 Coarse root turnover rate/a	0.0269	0.0269	0.0448	0.0448
	细根周转率 Fine root turnover rate/a	1.433	1.433	1.0000	1.0000
	树叶周转率 Leaf turnover rate/a	0.7463	0.7463	0.5948	0.5948
土壤碳库 Soil carbon pool	木质残体分解率 Woody litter decomposition rate/a			2.88LcA	
	地表结构性树叶残体分解率 Surface structural leaf litter decomposition rate/a			3.9LcA	
	地表代谢性树叶残体分解率 Surface metabolic leaf litter decomposition rate/a			14.8A	
	土壤结构性残体分解率 Soil structural litter decomposition rate/a			4.8LcA	
	土壤代谢性残体分解率 Soil metabolic litter decomposition rate/a			18.5A	
	地表微生物分解率 Surface microbe decomposition rate/a			6.0A	
	土壤微生物分解率 Soil microbe decomposition rate/a			7.3ATm	
	缓效碳分解率 Slow carbon decomposition rate/a			0.2A	
	惰效碳分解率 Passive carbon decomposition rate/a			0.0045A	

L_c 是结构性木质素含量对物质结构分解的影响, A 是土壤温度和湿度对土壤有机质分解速率的影响, T_m 是土壤结构对活性 SOM 转移的影响

表 2 木质林产品碳蓄积计算参数
Table 2 The calculation parameters for carbon sequestration of wood products

产品名 Wood products	密度 (Mg/m ³) Density	含碳率 (MgC/Mg) Carbon fraction	产品名 Wood products	碳保持率 Carbon sequestration rate	木材利用率 Wood use efficiency
原木 Timber log	0.485	0.500	长周期产品 Long-period	0.977—0.979	0.63 (1979 年以前)
锯材 Panel	0.450	0.500	短周期产品 Short-period	0.707—0.891	0.66 (1979 年以后)
人造板 Wood based panel	0.628	0.468			0.20 (1979 年以前)
纸类 Paper	0.900	0.500			0.56 (1979 年以后)
薪材 Firewood	0.485	0.500			

1.3 研究方法

(1) 林分蓄积生长拟合

林分蓄积生长量因树种、立地条件、年龄、造林密度、管理措施等而异,由于缺乏不同条件下的造林面积和生长数据,因此难以区分不同树种、不同立地条件和管理措施进行计算。森林资源清查提供了不同林龄的蓄积量样方数据,这些数据基本可以代表各地区的平均生长状况。根据形式各异的林分生长和收获模型,基于一定的生物学理论或假设可以推导出一些适应性较强的生长方程,总体上可分为经验方程及理论生长方程。理论生长方程由于逻辑性强、适用性广、机理性好,方程参数具有明确的生物学意义而广泛应用于林分生长模型研究中。目前应用较多的理论生长方程主要有 Richards、Logistic、Korf、Gompertz 和 Mitscherlich 方程^[41-43]。为了避免出现因子间相互预测的问题,应尽可能减少假设和自变量,简化模型结构提高对林分总量的预估精度,仅考虑不同海拔梯度上林龄与蓄积的关系。因此,本研究根据样方数据、利用空间代替时间的方法,分别利用上述 5 种理论生长方程拟合了不同树种不同海拔的蓄积量与林龄关系,通过优选得到不同树种不同海拔的蓄积量与林龄之间最适宜的生长方程以及回归方程参数。回归参数的拟合通过 Matlab 编程实现。根据林分蓄积生长回归方程和生物量扩展因子推算生物量随林龄的变化趋势(式(1)),从而拟合林龄与净初级生产力的关系(图 2)。

$$B = V \times WD \times BEF \quad (1)$$

式中, B 表示生物量, V 是林分蓄积, WD 为木材密度, BEF 是生物量扩展因子。

(2) 模型模拟碳蓄积和碳源/汇状况

利用 InTEC 模型^[38-39]估算江西省森林 1950—2008 年的净初级生产力和 1980—2008 年的碳源/汇状况,它是目前唯一考虑了林分年龄及森林扰动对碳循环影响的、基于过程的生物地球化学模型,主要用于模拟森林生态系统每年的碳氮通量和库容大小,已成功地用于模拟加拿大北部森林过去 100 a 的碳源/汇时空变化特征^[38]。模型采用 CENTURY 模型的方法模拟土壤碳、氮动力学过程,通过对 Farquhar 叶片尺度光化学模型进行时空尺度转换模拟气候、 CO_2 浓度和氮沉降变化导致的光合作用吸收碳量的年际变化,结合森林年龄对 NPP 的影响,迭代计算森林的实际 NPP 和碳通量。模型将生态系统碳储量分四个生物量碳库(木质、叶、粗根和细根碳库)和六个土壤碳库(粗结构物质、细结构物质、代谢物质、微生物活性、慢性和惰性碳库)。输出数据包括 NPP、净群落生产力(NBP)、碳密度等。

本研究的生物量和土壤碳库初始化参照 Wang 等^[37],历年大气 CO_2 与温室气体浓度变化、氮固定等数据利用模型缺省值,碳分配系数采用表 2 的生物量分配比例,最大 LAI 设为 6.00。土壤结构数据是根据 20 世纪 80 年代的全国第二次土壤普查数据进行插值得到,研究区 2003 年的林龄分布图源于 1:10000 森林资源清查矢量化小班数据, CO_2 浓度、生长季温度、叶片氮含量、生长季长度和 LAI 的变化可反映为 NPP 的年际变化。林火对碳平衡的影响分为碳转移和碳释放两种,计算方法参考 Huang 等^[33]。模型输出结果包括:生态系统碳密度、总的土壤碳密度、土壤有机碳密度、总的植被碳密度、地上植被碳密度、模拟的每年 NPP 与 NEP。

(3) 碳蓄积量估算

根据 InTEC 模型模拟得到的 NPP 结果与当年森林面积可估算得到江西省森林历年的年净增碳蓄积量。木质林产品碳蓄积估算仅考虑中间产品的碳贮量及其变化情况,中间产品根据使用寿命分为长周期产品和短周期产品。江西省木质林产品根据加工过程中产品的规格和用途可分为原木、锯材、人造板、木质品、纸类、家具、木片和其它。本文采用碳贮量变化法计算木质林产品的碳贮量变化,该方法是指森林碳贮量变化在产地国计算,而木质林产品碳贮量的变化在产品使用国计算,即国内消费的木质林产品碳贮量的变化,包括本国生产且在本国使用的木质林产品和从国外进口的木质林产品。

2 结果与分析

2.1 林龄与净初级生产力之间的关系

本文拟合得到的林龄与净初级生产力的关系如图 2 所示,不同树种、不同海拔的 NPP 随林龄变化的趋势

具有明显差异。马尾松的 NPP 值,海拔越高,生长速率越低,到达生长顶峰所需的时间越长,生长顶峰的 NPP 值越低,达到顶峰之后生长开始下降的速率较慢。杉木的 NPP 值,生长速率中海拔越高、低海拔居中、高海拔越低,到达生长顶峰所需的时间中、高海拔越短而低海拔越长,生长顶峰的 NPP 值高海拔越低、低海拔越高,达到顶峰之后生长开始下降的速率高海拔越慢、低海拔约快。阔叶类的 NPP 值与海拔的关系不明显,但不同海拔阔叶的 NPP 皆于 30 a 左右到达生长顶峰。栎类的 NPP 值,海拔越高,生长速率越高,到达生长顶峰所需的时间越短,生长顶峰的 NPP 值越高,达到顶峰之后生长开始下降的速率越快。

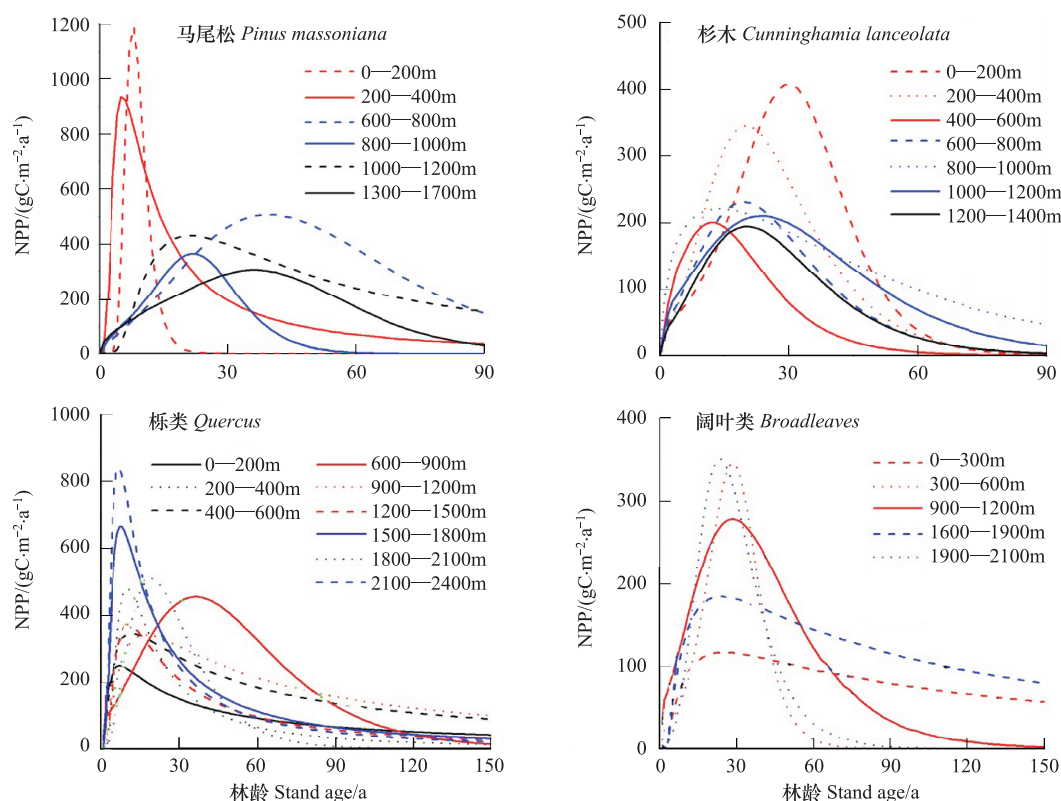


图2 江西省主要树种不同海拔的林分 NPP 与林龄关系拟合曲线

Fig. 2 Mean relationships between age and NPP of stands

2.2 江西省森林碳蓄积过程分析

江西省森林的年平均净初级生产力和年净增生物量碳蓄积变化可分为两个阶段(图3),20世纪80年代以前处于波动下降阶段,而后处于急剧上升趋势,最低降至1985年的 $307.39 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 和1984年的 17.31 TgC/a 。1959—1979年,年平均NPP值介于 $450 \sim 813 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 之间,年净增生物量碳蓄积 $26.55 \sim 36.23 \text{ TgC/a}$,产生波动的主要原因是乱砍滥伐和植树造林活动的不断循环,如1957—1958年造林面积水分大、质量差;1965年开始的飞播造林、1966—1969年的 $8.68 \times 10^5 \text{ hm}^2$ 造林和1970—1978年的 $22.14 \times 10^5 \text{ hm}^2$ 造林可能是形成1968年、1973年和1979年是3个年平均NPP峰值年的主因。80年代初,年平均NPP值和年净增生物量碳蓄积骤降,突降的原因主要归于80年代前后开始为了稳定山林权属掀起的“包山热”,受林业政策多变影响出现分而不治、砍而不造的缘故。1984年后,“山江湖工程”开始实施,多种形式的联合造林、育林使得森林面积大幅度提高,年平均NPP值和年净增生物量碳蓄积开始稳步上升,2007年分别约为 $396.35 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 和 42.37 TgC/a ,森林生产力渐渐恢复,但仍低于前一阶段的总体水平,说明有待加强森林管理和质量提升。

根据估算的1959—2007年木质林产品的年净增碳蓄积量(图3)可以看出,20世纪80年代之前,木质林产品年净增碳蓄积量处于波动中平稳增长阶段,约为 $0.01 \sim 0.3 \text{ TgC/a}$;其后木质林产品碳蓄积量持续上升,

至 1984 年达到最大值 0.60 TgC/a ; 1985 年开始下降至 1989 年的 0.15 TgC/a , 与山江湖工程保护森林、减少砍伐的政策相对应; 2000 年以后, 木质林产品年净增碳蓄积急速上升至目前的 0.79 TgC/a 。

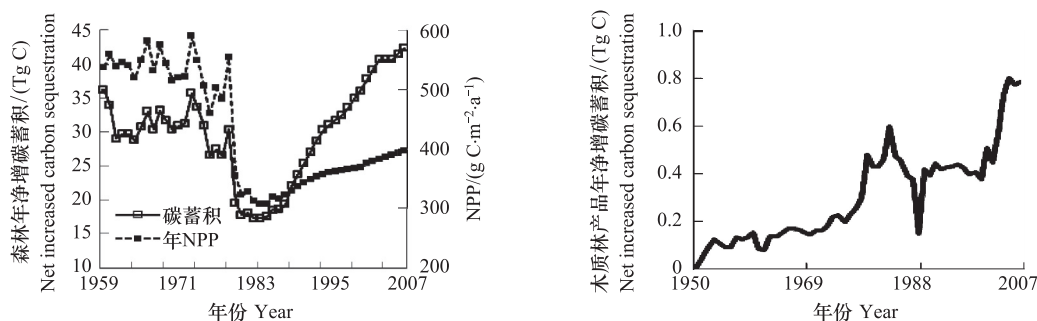


图3 江西省森林生态系统净初级生产力和碳蓄积过程与木质林产品的年净增碳蓄积量

Fig. 3 NPP and annual net increase carbon sequestration in forest and wood products in Jiangxi province

2.3 江西省森林碳源/汇状况分析

分析江西省森林 20 世纪 80 年代至今的碳源/汇变化可以得出(图 4), 江西省森林在 80 年代初是一个较强的碳汇(4.86 MgC/a), 而后, 虽然造林面积逐年增多, 森林覆盖率稳步上升, 但由于林分以中、幼龄林为主, 人工林单位蓄积量偏低, 天然林多为天然残次林且由于属于粗放经营与管理导致林分蓄积持续下降, 因此, NEP 降至 1984 年的 0.16 MgC/a , 碳汇功能逐渐降低, 江西森林成为一个持续 6 年的弱碳汇; 20 世纪 90 年代初开始, 江西森林的碳汇功能稳步增强, 升至 2007 年的 12.14 MgC/a 。2008 年初, 我国南方大范围出现特大雨雪冰冻灾害天气, 江西森林损毁最为严重, 森林受灾面积 $35.7 \times 10^5 \text{ hm}^2$, 占全省森林面积的 40.8% [44], 导致森林碳蓄积严重受损, 森林碳汇功能陡降。

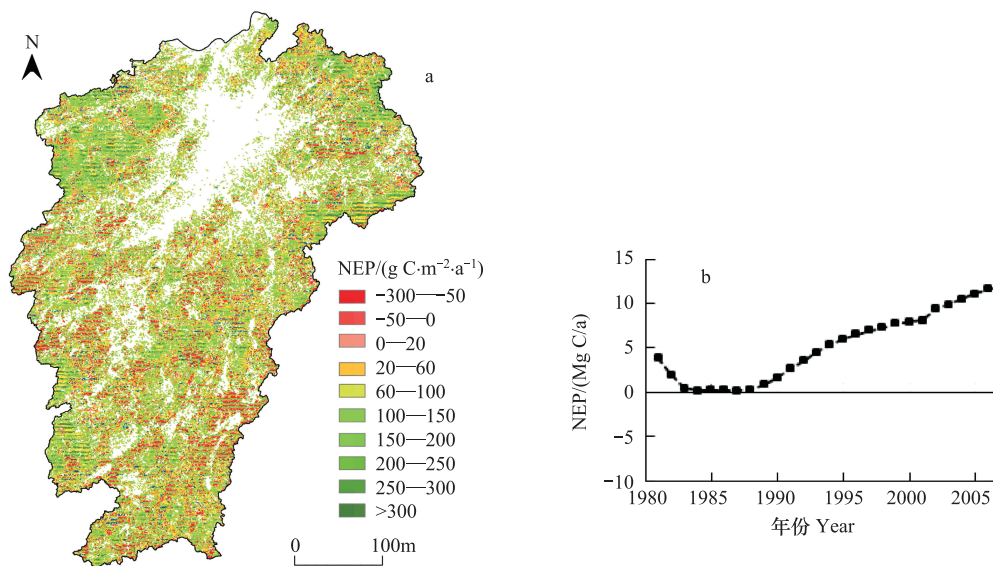


图4 1980 年以来江西省 NEP 年空间格局(a) 与际变化(b)

Fig. 4 The spatial pattern (a) and temporal variations (b) of NEP in Jiangxi since 1980

2.4 不确定性分析

利用通量观测的 NEP 数据与模型模拟结果验证比较表明, InTEC 模型模拟的年度 NEP 值与观测值的趋势具有较好的一致性, 但模拟值偏低 $7\% - 20\%$ (表 3)。

林分蓄积生长曲线是林龄与 NPP 关系拟合时的一个关键因素, 选择不同时长拟合出的林分蓄积生长结果差异较大(图 5), 特别是栎类和松类。栎类林分蓄积拟合时, 仅拟合到第 30 年的结果低于拟合到第 150 年

的;松类和阔叶类林分蓄积拟合时,拟合到第 30 年的结果则均高于拟合到第 150 年的;此外,杉木林分蓄积生长曲线拟合时,拟合年龄的选择对结果的影响不大。

表 3 模型模拟 NEP 结果与千烟洲站观测值的比较

Table 3 Comparison of simulated NEP and observed value at Qianyanzhou

年份 Year	InTEC 模拟值/(gC/m ²) Simulated value by InTEC	千烟洲观测值 Observed value in Qianyanzhou/(gC/m ²)		
		年度 Annual	生长季 Growing season	非生长季 Non-growing season
2003	341.32	387.45	229.28	123.45
2004	390.99	422.22	249.18	103.83
2005	540.66	683.28	404.35	121.91

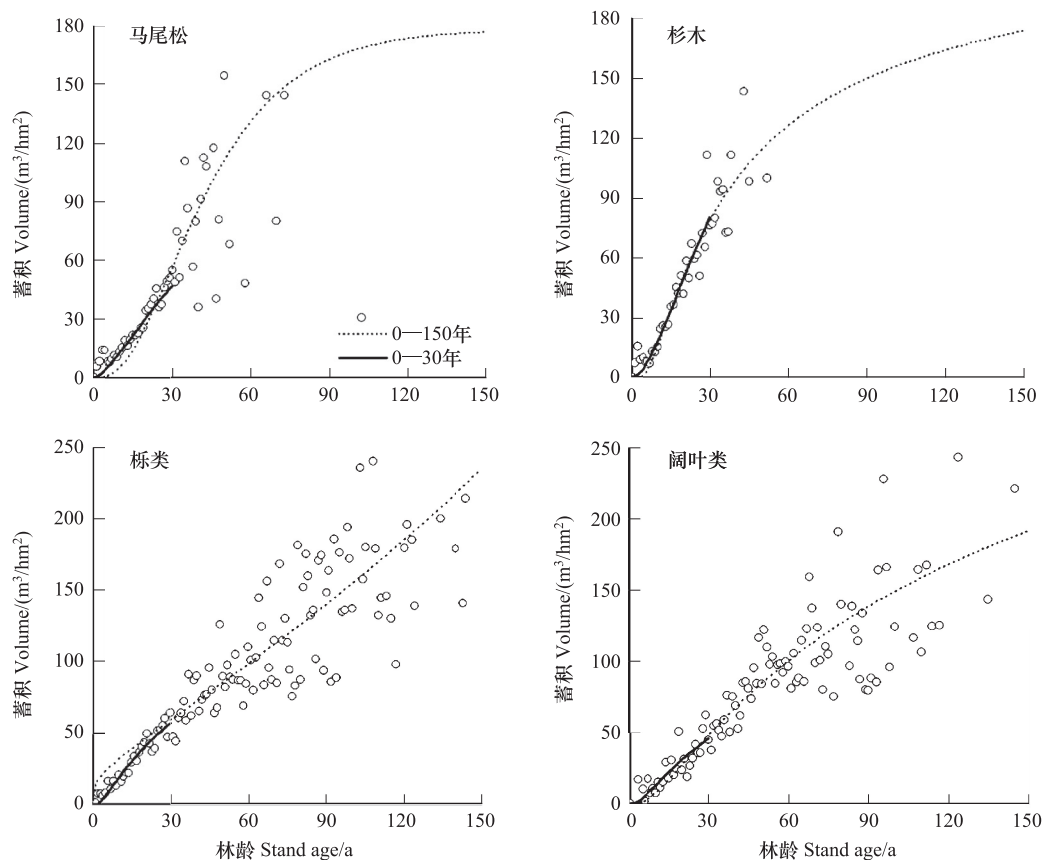


图 5 拟合不同时段林分蓄积生长曲线的差异比较

Fig. 5 The variations of fitted stand volume growth curves for the five primary forests due to the length of fitting periods

3 结论与讨论

江西省由于历史原因导致森林覆盖率从 1949 年的 40.3% 下降至 1971 年的 26.98%, 而后逐渐升至目前的 60.05%, 单位面积的林分蓄积随之从 77.08 m³/hm² 降至 20.99 m³/hm², 之后恢复至目前的 35.83 m³/hm² (图 1)。虽然造林面积逐年增多, 但单位蓄积特别是人工林单位蓄积偏低, 天然林多为天然残次林以及人工林的粗放经营与管理是单位蓄积不能提高的主要原因。本研究利用森林资源清查的样方数据, 选择最适用的理论生长方程拟合了江西省主要树种在不同海拔的林分蓄积生长曲线及林龄与 NPP 之间的关系, 采用本地化的生物量分配系数及其它计算参数, 驱动 InTEC 模型模拟了江西省森林生态系统的碳蓄积过程和碳源/汇状况。模拟过程中的一个关键步骤是拟合林龄与 NPP 之间的关系, 拟合结果表明, 不同树种、不同海拔的 NPP 随林龄变化的趋势具有明显差异, 差异主要体现在生长速率、到达生长顶峰所需时间、生长顶峰的 NPP

值、达到顶峰之后生长开始下降的速率等方面。

森林碳源/汇研究中很有必要对森林的碳蓄积过程进行准确的了解。目前,更多地研究结果表明,幼龄林没有达到同化和呼吸的平衡因而无法起到碳汇的作用^[9],而林龄较大的林分具有显著的碳汇作用^[45],成熟林地 0—20 cm 土壤层也可以 $0.61 \text{ t hm}^{-2} \text{ h}^{-1}$ 的平均速度持续积累有机碳^[22]。本文利用 InTEC 模型,考虑了林分年龄及森林扰动的影响,分析了主要树种 NPP 与林龄的关系,模拟了江西省森林的碳蓄积过程。模拟结果显示:江西省森林的年平均净初级生产力和年净增碳蓄积变化在 20 世纪 80 年代以前处于波动下降阶段,而后处于急剧上升趋势,产生波动的主要原因是乱砍滥伐和植树造林活动的不断循环;“山江湖工程”实施多种形式的联合造林、育林使得森林 NPP 值和年净增碳蓄积逐渐上升,但仍低于前一阶段的总体水平,说明有待加强森林管理和质量提升。

对于是否将木质林产品碳贮量变化纳入碳计量清单存在很大争议,争议的焦点是由于木质林产品使用寿命、碳降解速率、木质林产品循环利用次数和废旧产品的处理方式等不同,以及木质林产品生产国和使用国的不同,计量方法和结果存在很大的不确定性。但是,木质林产品既可替代能源密集型产品从而减少温室气体排放,又可长期保存,部分发达国家如美国、澳大利亚和欧盟的国家温室气体清单已经包括了木质林产品碳储量及其变化。本研究利用 IPCC 指南中关于计算木质林产品碳贮量的方法估算了江西省木质林产品的碳蓄积过程,结果显示,20 世纪 80 年代之前,木质林产品年净增碳蓄积量约为 $0.1—0.22 \text{ TgC/a}$,其后持续上升至目前的 0.8 TgC/a 。但是,由于估算木质林产品碳降解的参数估测值及采用模型的不同,导致计算结果具有不确定性,深入研究中需要选择适合江西省木质林产品的计算模型和本地化参数,精确估算木质林产品的碳蓄积。

引起陆地碳汇形成的各个因素和作用机制是不同的,可能与全球气候变化、生长季节延长、大气 CO_2 施肥、氮沉降、森林再生及林业管理等作用过程有关。NEP 对气候不敏感,主要由更新阶段、管理措施、立地历史和干扰等非气象因素决定^[46]。区域碳平衡同时取决于碳增汇和碳失汇,前者即碳净吸收的过程是缓慢的,基本上表现为与林龄有关的树木生长和微弱的土壤碳增加,而后者即碳释放则由于自然衰弱(树木死亡、竞争)、干扰、木材收获等快速过程^[4]。本研究模拟了山江湖工程实施以来江西省森林生态系统的碳源/汇状况,得出江西省森林在 20 世纪 80 年代初是一个较强的碳汇,但由于人工林单位蓄积量偏低、天然林多为天然残次林等原因,导致碳汇功能逐渐降低,90 年代初碳汇功能才开始稳步增强。由此说明造林面积的迅速增加是引起江西省过去森林碳增汇的主要驱动因素,但森林面积增加有限、增汇功能也有限,未来森林增汇潜力应源于森林生长和有效的经营管理。

毋庸置疑,森林管理增加碳蓄积是一种比减少碳排放成本更低的抵消化石燃料燃烧碳排放途径,也是在如今可造林的土地资源紧张情况下一种更为可行的方式。森林管理导致的碳源/汇变化的量化对于准确估计国家碳排放和核证减排量市场的透明机能具有基础性作用,有助于各国达到温室气体减排的目标^[47]。但是,目前很难准确界定多少森林碳汇和碳库能够通过何种管理以缓解大气 CO_2 的增加^[2],且由于高温等外部因素导致的碳汇减少使得 CO_2 浓度远高于预期,如果必需解决陆地碳源增加和碳汇减少的问题,碳管理也将面临着巨大的挑战^[1]。森林碳库的管理仍有许多问题有待解答,如碳管理与森林资源可持续发展是否能兼容?森林碳管理如何增强或抑制森林的其他生态服务功能如蓄水、生物多样性等^[48]?因此,森林的管理需要根据不同区域的特点选择适合的措施,同时考虑碳蓄积管理的生态、经济和社会作用。此外,不可预测的自然干扰和管理活动使得森林的碳汇功能在很大程度上具有风险性。因此,未来的森林碳蓄积和碳源/汇研究应该在造林增汇的基础上,关注森林经营管理对碳蓄积和源汇格局的影响,明确不同管理措施的碳增汇过程与机理,提炼出具有典型意义的森林优化管理模式。

总而言之,本研究通过林分蓄积生长模拟和碳收支模型探讨了不同林龄的林分生物量、生产力和碳蓄积差异,揭示了山江湖生态工程实施 20 多年来的江西省森林碳源/汇格局时空变化。研究结果可用于评估该区域山江湖工程的林业生态效益,同时有助于进一步推进江西省森林生态的恢复和保护。上述研究结果的不确

定性和缺陷提示我们,在下一步的研究中需要考虑由于未考虑经济林、灌木、油茶、竹林以及林下植被等而导致的低估,需要考虑大尺度林龄空间分布、土壤质地等的参数本地化问题,需要考虑木质林产品碳估算的准确性,需要重点关注森林经营管理对森林碳循环的影响特别是碳增汇作用。

References:

- [1] Houghton R A. Balancing the global carbon budget. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2007, 35(1): 313-347.
- [2] Canadell J G, Raupach M R. Managing forests for climate change mitigation. *Science*, 2008, 320(5882): 1456-1457.
- [3] Shao Q Q, Huang L, Liu J Y, Yang H J, Chen Z Q. Dynamic analysis on carbon accumulation of a plantation in Qianyanzhou based on tree ring data. *Journal of Geographical Sciences*, 2009, 19(6): 1-16.
- [4] Körner C. Slow in, rapid out-carbon flux studies and Kyoto targets. *Science*, 2003, 300(5623): 1242-1243.
- [5] 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*, 2007a, 241(1/3): 14-27.
- [6] Woodbury P B, Heath L S, Smith J E. Effects of land use change on soil carbon cycling in the conterminous United States from 1900 to 2050. *Global Biogeochemical Cycles*, 2007b, 21: GB3006, doi: 10.1029/2007GB002950.
- [7] Turner D P, Koerper G J, Harmon M E, Lee J J. Carbon sequestration by forests of the United States: current status and projections to the year 2040. *Tellus B*, 1995, 47(1/2): 232-239.
- [8] Caspersen J P, Pacala S W, Jenkins J C, Hurtt G C, Moorcroft P R, Birdsey R A. Contributions of land-use history to carbon accumulation in U. S. forests. *Science*, 2000, 290(5494): 1148-1151.
- [9] Schulze E, Wirth C, Heimann M. Managing forests after Kyoto. *Science*, 2000, 289(5487): 2058-2059.
- [10] Law B E, Thornton P E, Irvine J, Anthoni P M, Tuyl S V. Carbon storage and fluxes in ponderosa pine forests at different developmental stages. *Global Change Biology*, 2001, 7(7): 755-777.
- [11] Pregitzer K S, Euskirchen E S. Carbon cycling and storage in world forests: biome patterns related to forest age. *Global Change Biology*, 2004, 10(12): 2052-2077.
- [12] Masek J G, Collatz G J. Estimating forest carbon fluxes in a disturbed southeastern landscape: Integration of remote sensing, forest inventory, and biogeochemical modeling. *Journal of Geophysical Research*, 2006, 111: G01006, doi: 10.1029/2005JG000062.
- [13] Kurz W A, Stinson G, Rampley G J, Dymond C C, Neilson E T. Risk of natural disturbances makes future contribution of Canada's forests to the global carbon cycle highly uncertain. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2008, 105(5): 1551-1555.
- [14] Gower S T, McMurtrie R E, Murty D. Aboveground net primary production decline with stand age: potential causes. *Trends in Ecology and Evolution*, 1996, 11(9): 378-382.
- [15] Murty D, McMurtrie R E. The decline of forest productivity as stands age: a model-based method for analyzing causes for the decline. *Ecological Modelling*, 2000, 134(2/3): 185-205.
- [16] Song C H, Woodcock C E. A regional forest ecosystem carbon budget model: impacts of forest age structure and land-use history. *Ecological Modelling*, 2003, 164(1): 33-47.
- [17] Zinn Y L, Resck V S, da Silva J E. Soil organic carbon as affected by afforestation with *Eucalyptus* and *Pinus* in the *Cerrado* region of Brazil. *Forest Ecology and Management*, 2002, 166(1/3): 285-294.
- [18] Wang C K, Bond-Lamberty B, Gower S T. Carbon distribution of a well- and poorly-drained black spruce fire chronosequence. *Global Change Biology*, 2003, 9(7): 1066-1079.
- [19] Thuille A, Schulze E. Carbon dynamics in successional and afforested spruce stands in Thuringia and the Alps. *Global Change Biology*, 2006, 12(2): 325-342.
- [20] Ryan M G, Binkley D, Fownes J H. Age-related decline in forest productivity: pattern and process. *Advances in Ecological Research*, 1997, 27: 213-262.
- [21] Alexandrov G A. Carbon stock growth in a forest stand: the power of age. *Carbon Balance and Management*, 2007, 2:4, doi: 10.1186/1750-0680-2-4.
- [22] Zhou G Y, Liu S G, Li Z A, Zhang D Q, Tang X L, Zhou C Y, Yan J H, Mo J M. Old-growth forests can accumulate carbon in soils. *Science*, 2006, 314(5804): 1417-1417.
- [23] Zhang Q F, Pavlic G, Chen W J, Latifovic R, Fraser R, Cihlar J. Deriving stand age distribution in boreal forests using SPOT VEGETATION and NOAA AVHRR imagery. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 91(3/4): 405-418.
- [24] Peng C H. Growth and yield models for uneven-aged stands: past, present and future. *Forest Ecology and Management*, 2000, 132(2/3): 259-279.
- [25] Boris Z. Analysis of growth equations. *Forest Science*, 1993, 39(3): 594-616.
- [26] Dias A C, Louro M, Arroja L, Capela I. The contribution of wood products to carbon sequestration in Portugal. *Annals of Forest Science*, 2005, 62(8): 902-909.
- [27] Running S W, Baldocchi D D, Turner D P, Gower S T, Bakwin P S, Hibbard K A. A global terrestrial monitoring network integrating tower

- fluxes, flask sampling, ecosystem modeling and EOS satellite data. *Remote Sensing of Environment*, 1999, 70(1): 108-127.
- [28] Houghton R A. Why are estimates of the terrestrial carbon balance so different?. *Global Change Biology*, 2003, 9(4): 500-509.
- [29] Carrara A, Kowalski A S, Neirynck J, Janssens I A, Yuste J C, Ceulemans R. Net ecosystem CO₂ exchange of mixed forest in Belgium over 5 years. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2003, 119(3/4): 209-227.
- [30] Zha T S, Kellomäki S, Wang K Y, Rouvinen I. Carbon sequestration and ecosystem respiration for 4 years in a Scots pine forest. *Global Change Biology*, 2004, 10(9): 1492-1503.
- [31] Saigusa N, Yamamoto S, Murayama S, Kondo H. Inter-annual variability of carbon budget components in an Asia Flux forest site estimated by long-term flux measurements. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2005, 134(1/4): 4-16.
- [32] Liu Y F, Song X, Yu G R, Sun X M, Wen X F. Seasonal variation of CO₂ flux and its environmental factors in evergreen coniferous plantation. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2005, 48(Supp 1): 123-132.
- [33] Huang L, Shao Q Q, Liu J Y. Carbon losses from forest fires in Jiangxi Province, China in 1950—2008. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(9): 2236-2241.
- [34] 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.
- [35] Research Institute of Wood Industry, Chinese Academy of Forestry. *Physical and Mechanical Properties of Primary Tree Species in China*. Beijing: Chinese Forestry Press, 1982.
- [36] Ma Z Q, Liu Q J, Xu W J, Li X R, Liu Y C. Carbon storage of artificial forest in Qianyanzhou, Jiangxi province. *Scientia Silvae Sinicae*, 2007, 43(11): 1-7.
- [37] Wang S Q, Chen J M, Ju W M, Feng X F, Chen M, Chen P, Yu G. Carbon sinks and sources in China's forests during 1901—2001. *Journal of Environmental Management*, 2007, 85(3): 524-537.
- [38] Chen J M, Chen W J, Liu J, Cihlar J, Gray S. Annual carbon balance of Canada's forests during 1895—1996. *Global Biogeochemical Cycles*, 2000, 14: 839-849.
- [39] Ju W M, Chen J M, Harvey D, Wang S. Future carbon balance of China's forests under climate change and increasing CO₂. *Journal of Environmental Management*, 2007, 85(3): 538-562.
- [40] Ruan Y, Zhang X Q, Du F. Carbon stock of harvested wood products in China. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(12): 4212-4218.
- [41] Duan A G, Zhang J G, Tong S Z. Application of six growth equations on stands diameter structure of Chinese fir plantations. *Forest Research*, 2003, 16(4): 423-429.
- [42] Zhang J G, Duan A G. Approach to theoretical growth equations for modelling stands diameter structure of Chinese fir plantations. *Scientia Silvae Sinicae*, 2003, 39(6): 55-61.
- [43] Li C M, Du J S, Zhang H R. The effects of thinning on forest growth and model study. *Forest Research*, 2003, 16(5): 636-641.
- [44] Shao Q Q, Huang L, Liu J Y, Kuang W H, Li J. Analysis of forest damages caused by the snow and ice chaos in transect of Southern China in 2008 Spring. *Journal of Mountain Science*, 2009, 27(2): 177-187.
- [45] Buchmann N, Schulze E D. Net CO₂ and H₂O fluxes of terrestrial ecosystems. *Global Biogeochemical Cycles*, 1999, 13(3): 751-760.
- [46] Luyssaert S, Inglima I, Jung M, Richardson A D, Reichstein M, Papale D, Piao S L, Schulze E D, Wingate L, Matteucci G, Aragao L, Aubinet M, Beer C, Bernhofer C, Black K G, Bonal D, Bonnefond J M, Chambers J, Ciais P, Cook B, Davis K J, Dolman A J, Gielen B, Goulden M, Grace J, Granier A, Grelle A, Griffiths T, Grünwald T, Guidolotti G, Hanson P J, Harding R, Hollinger D Y, Hutyrá L R, Kolarik P, Kruijt B, Kutsch W, Lagergren F, Laurila T, Law B E, Le Maire G, Lindroth A, Loustau D, Malhi Y, Mateus J, Migliavacca M, Misson L, Montagnani L, Moncrieff J, Moors E, Munger J W, Nikinmaa E, Ollinger S V, Pita G, Rebmann C, Rouspard O, Saigusa N, Sanz M J, Seufert G, Sierra C, Smith M L, Tang J, Valentini R, Vesala T, Janssens I A. CO₂ balance of boreal, temperate, and tropical forests derived from a global database. *Global Change Biology*, 2007, 13(12): 2509-2537.
- [47] Leighty W W, Hamburg S P, Caouette J. Effects of management on carbon sequestration in forest biomass in southeast Alaska. *Ecosystems*, 2006, 9(7): 1051-1065.
- [48] Birdsey R, Pregitzer K, Lucier A. Forest carbon management in the United States: 1600—2100. *Journal of Environmental Quality*, 2006, 35(4): 1461-1469.

参考文献:

- [33] 黄麟, 邵全琴, 刘纪远. 1950—2008 年江西省森林火灾的碳损失估算. *应用生态学报*, 2010, 21(9): 2236-2241.
- [35] 中国林业科学研究院木材工业研究所. 中国主要树种木材物理化学性质的研究. 北京: 中国林业出版社, 1982.
- [36] 马泽清, 刘琪璟, 徐雯佳, 李轩然, 刘迎春. 江西千烟洲人工林生态系统的碳蓄积特征. *林业科学*, 2007, 43(11): 1-7.
- [40] 阮宇, 张小全, 杜凡. 中国木质林产品碳贮量. *生态学报*, 2006, 26(12): 4212-4218.
- [41] 段爱国, 张建国, 童书振. 6 种生长方程在杉木人工林分直径结构上的应用. *林业科学研究*, 2003, 16(4): 423-429.
- [42] 张建国, 段爱国. 理论生长方程对杉木人工林分直径结构的模拟研究. *林业科学*, 2003, 39(6): 55-61.
- [43] 李春明, 杜纪山, 张会儒. 抚育间伐对森林生长的影响及其模型研究. *林业科学研究*, 2003, 16(5): 636-641.
- [44] 邵全琴, 黄麟, 刘纪远, 匡文慧, 李佳. 2008 年春季中国南方冰雪冻害林木物理折损典型样带分析. *山地学报*, 2009, 27(2): 177-187.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 32, No. 10 May, 2012 (Semimonthly)

CONTENTS

Landscape aesthetic assessment based on experiential paradigm assessment technology	LI Xuanqi, HUA Lizhong (2965)
Significant impact of job-housing distance on carbon emissions from transport: a scenario analysis	TONG Kangkang, MA Keming (2975)
The watershed eco-compensation system from the perspective of economics: the cases of pollution compensation	LIU Tao, WU Gang, FU Xiao (2985)
The tourism development impact on Shanghai coastal wetland vegetation	LIU Shidong, GAO Jun (2992)
Effects of the Wenchuan Earthquake on shoot growth and development of the umbrella bamboo (<i>Fargesia robusta</i>), one of the giant panda's staple bamboos	LIAO Lihuan, XU Yu, RAN Jianghong, et al (3001)
Forest carbon sequestration and carbon sink/source in Jiangxi Province	HUANG Lin, SHAO Quanqin, LIU Jiyuan (3010)
Species diversity of herbaceous communities in the Yiluo River Basin	CHEN Jie, GUO Yili, LU Xunling, et al (3021)
Microbial community diversity of rhizosphere soil in continuous cotton cropping system in Xinjiang	GU Meiying, XU Wanli, MAO Jun, et al (3031)
Diversity of arbuscular mycorrhizal fungi in the rhizosphere of <i>Caragana korshinskii</i> Kom. in desert zone	HE Xueli, CHEN Zheng, GUO Huijuan, et al (3041)
Characteristics of photosynthetic productivity and water-consumption for transpiration in <i>Pinus densiflora</i> var. <i>zhangwuensis</i> and <i>Pinus sylvestris</i> var. <i>mongolica</i>	MENG Peng, LI Yuling, YOU Guochun, et al (3050)
Seasonal dynamic and influencing factors of coarse woody debris respiration in mid-subtropical evergreen broad-leaved forest	LIU Qiang, YANG Zhijie, HE Xudong, et al (3061)
Influence of saline soil and sandy soil on growth and mineral constituents of common annual halophytes in Xinjiang	ZHANG Ke, TIAN Changyan, LI Chunjian (3069)
Dynamics change of <i>Betula ermanii</i> population related to shrub and grass on treeline of northern slope of Changbai Mountains	WANG Xiaodong, LIU Huiqing (3077)
Effects of ecological conditions on morphological and physiological characters of tobacco	YAN Kan, CHEN Zongyu (3087)
A study on the hyperspectral inversion for estimating leaf chlorophyll content of clover based on factor analysis	XIAO Yanfang, GONG Huili, ZHOU Demin (3098)
Monthly dynamic variation of soil seed bank in water-level-fluctuating zone of Three Gorges Reservoir at the beginning after charging water	WANG Xiaorong, CHENG Ruimei, TANG Wanpeng, et al (3107)
Effects of three land use patterns on diversity and community structure of soil ammonia-oxidizing bacteria in <i>Leymus chinensis</i> steppe	ZOU Yukun, ZHANG Jingni, CHEN Xiurong, et al (3118)
Autotoxicity and promoting: dual effects of root litter on American ginseng growth	JIAO Xiaolin, DU Jing, GAO Weiwei (3128)
Effect of differing levels parasitism from native <i>Cuscuta australis</i> on invasive <i>Bidens pilosa</i> growth	ZHANG Jing, YAN Ming, LI Junmin (3136)
Heavy metal concentrations and pollution assessment of riparian soils in Shandong Province	ZHANG Ju, CHEN Shiyue, DENG Huanguang, et al (3144)
Effect of decomposition products of cyanobacteria on <i>Myriophyllum spicatum</i> and water quality in Lake Taihu, China	LIU Lizhen, QIN Boqiang, ZHU Guangwei, et al (3154)
Succession of macrofauna communities in wetlands of <i>Sonneratia apetala</i> artificial mangroves during different ecological restoration stages	TANG Yijie, FANG Zhanqiang, ZHONG Yanting, et al (3160)
Group characteristics of Chinese Merganser (<i>Mergus squamatus</i>) during the wintering period in Poyang Lake watershed, Jiangxi Province	SHAO Mingqin, ZENG Binbin, SHANG Xiaolong, et al (3170)
Effect of forest rodents on predation and dispersal of <i>Pinus armandii</i> seeds in Qinling Mountains	CHANG Gang, WANG Kaifeng, WANG Zhi (3177)
Circadian rhythms of activity, metabolic rate and body temperature in desert hamsters (<i>Phodopus roborovskii</i>)	WANG Luping, ZHOU Shun, SUN Guoqiang (3182)
Effects of temperature stress and ultraviolet radiation stress on antioxidant systems of <i>Locusta migratoria tibetensis</i> Chen	LI Qing, WU Lei, YANG Gang, et al (3189)
Carbon cycling from rice-duck mutual ecosystem during double cropping rice growth season	ZHANG Fan, GAO Wangsheng, SUI Peng, et al (3198)
Protein expression characteristics and their response to nitrogen application during grain-filling stage of rice (<i>Oryza Sativa</i> L.)	ZHANG Zhixing, CHENG Jun, LI Zhong, et al (3209)
Review and Monograph	
Advances in influence of seawater eutrophication on marine bacteria	ZHANG Yubin, ZHANG Jiexiang, SUN Xingli (3225)
A review of comprehensive effect of ocean acidification on marine fishes	LIU Hongjun, ZHANG Zhendong, GUAN Shuguang, et al (3233)
Evaluation of the controlling methods and strategies for <i>Mikania micrantha</i> H. B. K.	LI Mingguang, LU Erbei, GUO Qiang, et al (3240)
Scientific Note	
Dynamics of land use/cover changes in the Weigan and Kuqa rivers delta oasis based on Remote Sensing	SUN Qian, TASHPOLAT. Tiyp, ZHANG Fei, et al (3252)
Phytoplankton assemblages in East China Sea in winter 2009	GUO Shujin, SUN Jun, DAI Minhan, et al (3266)
On the physical chemical and soil microbial properties of soils in the habitat of wild Ferula in Xinjiang	FU Yong, ZHUANG Li, WANG Zhongke, et al (3279)
The community characteristics of <i>Calligonum roborowskii</i> A. Los in Tarim Basin	Gulnur Sabirhazi, PAN Borong, DAUN Shimin (3288)
Stability analysis of mine ecological industrial symbiotic system	SUN Bo, WANG Guangcheng (3296)

《生态学报》2012 年征订启事

《生态学报》是中国生态学学会主办的自然科学高级学术期刊,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,280 页,国内定价 70 元/册,全年定价 1680 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 10 期 (2012 年 5 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 32 No. 10 (May, 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:100071	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@csbg.net	Distributed by	Science Press Add: 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel: (010)64034563 E-mail: journal@csbg.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