

DOI: 10.5846/stxb201306051342

黄麟, 邵全琴, 刘纪远. 江西省人工造林碳蓄积的时空过程. 生态学报, 2015, 35(7): 2105-2118.

Huang L, Shao Q Q, Liu J Y. The spatial and temporal patterns of carbon sequestration by forestation in Jiangxi Province. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(7): 2105-2118.

## 江西省人工造林碳蓄积的时空过程

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:** 人工造林被认为是吸收 CO<sub>2</sub>、减缓气候变暖最有效且最具生态效应的碳增汇方法之一。以江西省作为南方红壤丘陵区人工造林的典型研究区, 综合应用树轮生态分析、模型模拟、尺度融合、文献整合分析、遥感反演和 GIS 空间分析等方法, 基于树木年轮信息、森林样方资料和人工林分布数据等, 驱动树木材积生长量模型和区域碳通量模型, 从样地到区域模拟分析了人工林生产力和碳蓄积的时空变化规律。结果表明, 1) 1980 年至 2007 年, 江西省人工林净初级生产力 (NPP) 呈现先迅速下降而后缓慢增加的趋势, 至今仍未恢复到之前的人工林质量水平, 2) 碳蓄积年变化在前 8a 处于平稳状态, 而后变化速率增快, 从 2.19 TgC/a 迅速增至 8.02 TgC/a, 此后增速减缓; 3) 人工林 NPP 与降水量、温度的关系不明显, 海拔对 NPP 值的影响较大而对 NPP 变化趋势的影响较小, NPP 值随着坡度增加而增大; 4) 造林方式比较, 人工造林碳增汇潜力最大, 而封山育林在碳蓄积效应方面不具优势。

**关键词:** 江西省; 人工造林; 碳蓄积; TGTRing 模型; InTEC 模型

## The spatial and temporal patterns of carbon sequestration by forestation in Jiangxi Province

HUANG Lin\*, SHAO Quanqin, LIU Jiyuan

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

**Abstract:** Forestation was considered as one of the most effective and ecological approaches for increasing carbon sink, and then to promoting atmospheric CO<sub>2</sub> absorption and mitigating climate change. It was also one of the key measures in forestry engineering and ecological restoration. In this paper, Jiangxi Province was selected as the typical study area of red soil hilly region — one of the primary plantation areas — in Southern China. The Mountain-River-Lake program since 1980s in Jiangxi Province is a typical successful program of ecological restoration in red soil hilly region, which increased the forest coverage of Jiangxi by 28.55% through implementation of greening barren hill, reforestation, and the Grain for Green Program. This study applied TGTRing and InTEC model simulation, scale transformation from plot to transect and region, field investigation and sampling, dendrochronology method based on tree-ring information, forest inventory data, and carbon budget model, to discuss the effects of forest age and human activities on net primary production (NPP) and carbon sequestration, and then to analysis the annual variation of plantation NPP and carbon sequestration. We try to depict the relations among forest age and NPP through the growth curves of main planting tree species, and then the carbon sequestration of plantation were simulated. The purpose of this paper is to evaluate the carbon effects of forestation, and the carbon regulation service of ecological restoration. The results showed that: 1) The NPP simulations for main planting tree species by tree-ring suggested that the NPP value of Masson pine (*P. massoniana*), Slash pine (*P. elliotii*) and Chinese

基金项目: 国家自然科学基金 (41001366, 41371019)

收稿日期: 2013-06-05; 网络出版日期: 2014-05-08

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: huanglin@igsnr.ac.cn

fir (*Cunninghamia lanceolata*) rises rapidly with the increased forest age and reaches to the peak value in 10a ( $1058 \text{ g m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ ), 10a ( $901.09 \text{ g m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ ) and 11a ( $1305.67 \text{ g m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ ) respectively, and then decreased to stable level in 42a ( $87.2 \text{ g m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ ), 42a ( $156.0 \text{ g m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ ) and 40a ( $33.0 \text{ g m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ ); 2) The NPP trend of plantation from 1980 to 2007 in Jiangxi Province were decreased rapidly before and then increased slowly, which responded the lower quality of plantation. Although the forest coverage increased from 26.98% to 60.05% mainly contributed by the enlarged plantation area, the forest volume per hectare were relatively lower especially for the plantations, because the forest is dominated by secondary natural forest, and middle- aged even young-aged plantation; 3) The variation of carbon sequestration presented as steady trend in the first 8 years before 1988 ( $2.19\text{--}2.37 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ ) since the beginning of Mountain-River-Lake Program. It then increased rapidly reach to  $8.02 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$  at the thirteen years, and followed by relatively lower increasing rate; 4) The influences of precipitation and temperature on plantation NPP were showed unobvious. However, the elevation greatly impacts the absolute value of NPP, but not the variation trend. In addition, the NPP increased with higher slope; 5) Validated by tree-ring estimated carbon sequestration value and station observed net ecosystem production (NEP) value, we found that modeled NEP shows good consistency than annual net increasing carbon sequestration; 6) The potential carbon sink thorough tree planting is higher than other planting patterns. Furthermore, closing for reforestation showed unobvious advantage in carbon sequestration service.

**Key Words:** Jiangxi Province; plantation; carbon sequestration; TGTRing model; InTEC model

造林被认为是增加陆地碳汇、减缓大气  $\text{CO}_2$  浓度最有效且最具生态效应的碳增汇方法之一。造林可以蓄积碳、保持土壤和提高水质<sup>[1-2]</sup>, 是潜在的碳汇, 也是碳源/汇转换的主要原因<sup>[3-6]</sup>。造林对陆地碳汇最显著的影响是在生物量碳库中积累碳<sup>[2, 7]</sup>, 而通过造林提高土壤吸收  $\text{CO}_2$  的能力比用活的生物量临时吸收  $\text{CO}_2$  更持久<sup>[1-2, 8]</sup>。关于造林对碳蓄积影响的研究多集中在美国、欧洲等区域<sup>[9-10]</sup>, Woodbury 等<sup>[11]</sup> 得出美国在 1990—2004 年间造林导致的碳蓄积平均增量为  $17 \text{ TgC/a}$ 。在我国, Fang 等<sup>[6]</sup> 估算造林导致的森林碳吸收在 1973—1998 年间增加了  $0.45 \text{ Pg}$ , Huang 等<sup>[12]</sup> 估算得出 1950—2010 年人工造林碳蓄积净增量为  $1.686 \text{ PgC}$ 。造林树种、气候、土壤、地形及人类活动等都会影响人工林的生物量碳蓄积过程和碳汇大小。造林后碳蓄积速率和最终达到稳态的时间取决于生产力水平和土壤条件<sup>[13]</sup>, 也与造林前的土地利用历史、土壤准备方式、造林树种、人工林年龄和造林后的森林管理等诸多因子有关<sup>[8, 14-15]</sup>。有些研究发现造林后土壤碳含量增加<sup>[16]</sup>, 也有研究发现造林后土壤碳含量减少<sup>[15]</sup>, 而多数研究认为, 造林后土壤碳储量通常是先下降, 然后才开始积累<sup>[14, 17-18]</sup>。当然, 造林也会对环境和社会经济造成影响, 如削弱粮食安全、减少径流量、丧失生物多样性、减少地方收入等<sup>[9, 19]</sup>。因此, 通过林业活动可持续的缓解气候变化面临的挑战是巨大的。

我国人工林保存面积约占世界人工林面积的三分之一, 人工林是我国陆地碳汇的主要来源<sup>[6]</sup>。尽管来自各方面的证据表明我国人工林生态系统确实为碳汇, 但直接的观测证据仍然比较零散和缺乏<sup>[6, 20]</sup>, 对其碳吸收量的具体估计仍存在较大的争议, 这与我国人工林面积和国家应对气候变化的需求不符。随着造林面积的逐步扩大和人工林龄级的增加, 加强对造林碳汇机理及其动态的研究, 准确评估我国人工造林的碳吸收量和吸收潜力, 是我国陆地碳循环研究和国家环境气候外交谈判的需要。本文收集了树木年轮信息、森林样方资料、人工林分布数据、模型参数等, 综合应用树轮生态分析、模型模拟、尺度融合、遥感反演和 GIS 分析等, 刻画了马尾松、湿地松和杉木的林龄与净初级生产力 (NPP) 的关系, 从样地到区域驱动树木材积生长量模型 TGTRing 和区域碳通量模型 InTEC, 分析人工林生产力和碳蓄积的时空变化规律。本文拟解决如何在区域尺度上用模型方法并考虑林龄和干扰来刻画人工林生产力和碳蓄积过程的问题, 目的是探讨适合我国人工林碳蓄积时空动态估算的方法技术体系, 用于评估人工造林的碳蓄积效应。

## 1 数据与方法

### 1.1 研究区概况

南方红壤丘陵区是我国主要的人工林区之一,亦是我国仅次于黄土高原的水土流失严重区。江西省(24°07′—29°09′ N, 114°02′—117°97′ E)全省土地总面积  $1.67 \times 10^7 \text{ hm}^2$ , 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, 该省于 20 世纪 80 年代初开始实施了山江湖工程, 以生态恢复、红壤丘陵综合开发治理和可持续发展为主要目的, 人工造林是山江湖工程的一项主要措施, 使得江西全省森林覆盖率由 36% 提升至目前的 60.05%。中国科学院千烟洲红壤丘陵综合开发试验区位于江西省泰和县境内(26°44′—26°45′ N, 115°3′—115°4′ E), 年平均气温 17.9 °C, 多年平均降水量 1489 mm, 土壤类型以红壤为主, 林地面积占土地总面积的 60%, 森林类型以湿地松、马尾松和杉木人工林为主。千烟洲红壤丘陵立体开发治理模式是江西省乃至南方红壤丘陵区人工林种植的参照模式。

### 1.2 研究方法与数据源

本文通过树木年轮生态学方法获得实测的树木年轮数据, 重建人工林单木的逐年生物量和碳蓄积量; 结合文献参数与树木年轮信息, 分析林龄与 NPP 之间的关系; 采用森林计测学方法调查测定样方生物量; 空间替代时间方法用于拟合林下植被层、枯枝落叶层碳蓄积随林龄变化的关系; 利用森林二类调查资料获取林龄数据, 并结合地面调查资料进行验证; 基于树木年轮模型和碳收支模型, 模拟不同年龄人工林的 NPP 和碳蓄积量。

#### (1) 地面采样

于 2007 年 4 月和 2008 年 3 月在千烟洲设置典型样方, 分别采集了湿地松、马尾松和杉木人工林的树芯共计 333 个, 搜集了 3 个树种的树干解析木数据各 1 组, 用于站点尺度的碳蓄积过程分析和模型模拟结果的验证。三类主要造林树种各设 3 个样方, 样方大小为  $10 \text{ m} \times 10 \text{ m}$ ; 根据样方内林木径阶比例选取标准木, 每个样方 3 株; 对胸径  $\geq 10 \text{ cm}$  的树木在距树干底部 0.5 m、1.3 m、2.5 m 处用生长锥钻取树芯, 直径 6 mm; 树芯采集后, 进行室内样芯干燥, 在显微镜下从外围向髓心进行定年, 通过树轮宽度量测仪(VELMEX 和 LINTAB)测量树木年轮的宽度, 数据存储后利用 SPSS 统计软件进行数据处理, 树木年轮观测的精度为 0.01 mm; 根据逐年年轮宽度值, 利用基于树木年轮信息动态估算树木材积生长量模型(TGTRing)<sup>[22]</sup>估算逐年材积, 通过材积-生物量转换公式和生物量分配比例, 可以获得标准木每年的 NPP。

#### (2) 数据、资料收集与处理

收集了江西省森林资源二类清查的部分小班数据、260 个人工林样方数据、造林面积统计数据, 森林资源分布、人工林分布和林龄分布图<sup>[21]</sup>等。样方数据包括样方的位置、林龄和蓄积量等, 用于区域尺度人工林林分蓄积生长及各树种生物量扩展因子(BEF)随林龄变化的拟合。江西省 1980—2007 年造林面积统计数据作为碳蓄积估算的输入数据。利用 ArcGIS 矢量化各类分布图。其中, 森林资源分布图包含树种分布信息, 叠加人工林分布范围, 可以得到人工林树种分布图。在已有林龄分布图的基础上, 利用样方数据和部分小班数据订正得到细化的 1 km 江西省人工林林龄分布图。利用研究区的 1 km 地形(DEM)数据提取海拔和坡度信息用于分析地形因子对人工林碳蓄积的影响。根据江西省地形特点, 将海拔划分为  $< 50 \text{ m}$ 、 $50—100 \text{ m}$ 、 $100—300 \text{ m}$ 、 $300—500 \text{ m}$ 、 $500—700 \text{ m}$ 、 $700—900 \text{ m}$ 、 $> 900 \text{ m}$  七类, 将坡度分为平坡、缓坡、斜坡、陡坡、急坡五类。

#### (3) 文献参数整理

对文献中关于各主要造林树种(马尾松、杉木、湿地松)的生物量扩展因子、木材密度、含碳率、乔木各个器官(木质部分、树叶、粗根、细根)间的分配规律, 以及林下植被层、凋落物层的碳蓄积量等参数进行了收集整理。基于样方数据, 利用空间替代时间方法计算不同林龄林分的 BEF 值( $\text{BEF} = a + b/V$ ), 建立林龄与 BEF 的关系式, 其中各树种的  $a$  和  $b$  参数(表)源于文献<sup>[6]</sup>。树种的含碳率是研究森林碳蓄积的关键因子, 也是引起碳蓄积量估算差异的不容忽视因素, 国际上常用的树木含碳率值为 0.45—0.50, 本文的含碳率值源自文

献<sup>[22-23]</sup>。木材密度源于文献<sup>[24]</sup>。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通用值。

#### (4) 生长模型模拟和 NPP-age 关系的拟合

林分生长模型是研究森林生长变化规律及预估林分生长量、生产力收获量及潜力的基础手段,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。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。目前应用较多的理论生长方程主要有 Richards、Logistic、Korf、Gompertz 等。本研究根据样方数据、利用空间代替时间的方法,得到不同树种不同海拔的蓄积量与林龄之间最适宜的回归方程参数。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。

$$\text{Biomass} = V \times WD \times \text{BEF} \quad (1)$$

#### (5) 单木模型模拟

基于树木年轮信息动态估算树木材积生长量模型(TGTRing)可获得从器官到个体再到林分的较高时间分辨率的树木逐年生长量序列信息<sup>[22]</sup>。鉴于利用胸高处树木年轮数据估算森林生物量存在的不确定性,尤其在干旱年份存在较大误差的问题,该模型设计在树干的3个不同高度处(0.5、1.3、2.5 m)各取6个方向(南、北、东北、西南、东南、西北,相隔60°)的树芯,根据不同高度6个点的树木年轮信息模拟相应高度的树木年轮盘,再利用3个高度的轮盘结合树高拟合立体树干、树体,并计算出单株材积、生物量、NPP和碳蓄积量。本研究利用TGTRing模型模拟分析了千烟洲3种人工造林树种的碳蓄积过程。

#### (6) 区域模型模拟

陆地生态系统碳循环综合集成模型(InTEC)是目前唯一考虑林分年龄及森林干扰对碳循环影响的、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100a的碳源/汇时空变化特征<sup>[25]</sup>。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<sub>2</sub>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6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、净生物群区生产力(NBP)、碳密度等。本研究中,年净增CS量定义为每年人工林生长和新造林增加的碳蓄积量,等于NBP与人工林面积的乘积。

模型输入数据:气象插值数据、人工林类型和林龄分布数据,同时收集了2007年MODIS的1 km NPP、叶面积指数(LAI)数据,氮沉降分布以及土壤结构数据<sup>[21]</sup>(包括粘粒含量、粘壤粒含量、土壤蒸散系数)作为区域碳通量模型(InTEC)的输入数据。

气象数据插值:收集了1980—2007年江西省(17个)及其周边省份(54个)的国家气象台站逐日气象观测数据,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℃)天数,并利用ANUSPLINE进行插值作为模型输入数据,插值的空间分辨率为1 km。

#### (7) 时空统计分析

利用ArcGIS空间统计模块分析江西省人工林年平均NPP、NBP的时间变化过程。同时,模型估算得到的时间序列NPP、NBP空间数据根据最小二乘法曲线拟合,进行增长斜率的空间变化趋势统计分析,斜率公式表示为:

$$S = \frac{\sum_{i=1}^n m_i X_i \frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n m_i \times \sum_{i=1}^n X_i}{\sum_{i=1}^n m_i^2 \frac{1}{n} \times (\sum_{i=1}^n m_i)^2} \quad (2)$$

式中,  $X_i$  是林龄为  $i$  时的 NPP 或碳蓄积量,  $i=1, 2, 3, \dots, n$ ;  $m_i$  是林龄序列,  $m_1=1, m_2=2, m_3=3, \dots, m_n=n$ 。

## 2 结果与分析

### 2.1 主要造林树种的净初级生产力模拟

InTEC 区域碳收支模型模拟的一个关键输入参数是林龄与 NPP 的关系。在样点尺度, 本文根据树木年轮宽度, 应用 TGTRing 模型模拟了人工马尾松、湿地松和杉木单株 NPP 随林龄变化曲线。如图 1 所示, 马尾松的 NPP 在生长初期急速增加, 平均每年递增  $102.62 \text{ g m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ , 至第 10 年达到顶峰, 约  $1058 \text{ g m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ , 此后生长速率急剧下降, 第 32 年后降至  $100 \text{ g m}^{-2} \text{ a}^{-1}$  以下, 第 42 年达到生长稳定态; 杉木的 NPP 在生长初期以每年  $117.51 \text{ g m}^{-2} \text{ a}^{-1}$  的速率急速增长, 至第 11 年达到顶峰, 约  $1305.67 \text{ g m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ , 此后至第 27 年, 生长速率急剧降至  $100 \text{ g m}^{-2} \text{ a}^{-1}$  以下, 第 40 年达到稳定态; 湿地松的 NPP 于第 10 年达到生长顶峰, 约  $901.09 \text{ g m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ , 此后下降, 第 40 年后降至  $150 \text{ g m}^{-2} \text{ a}^{-1}$  左右, 第 42 年达到稳定态。

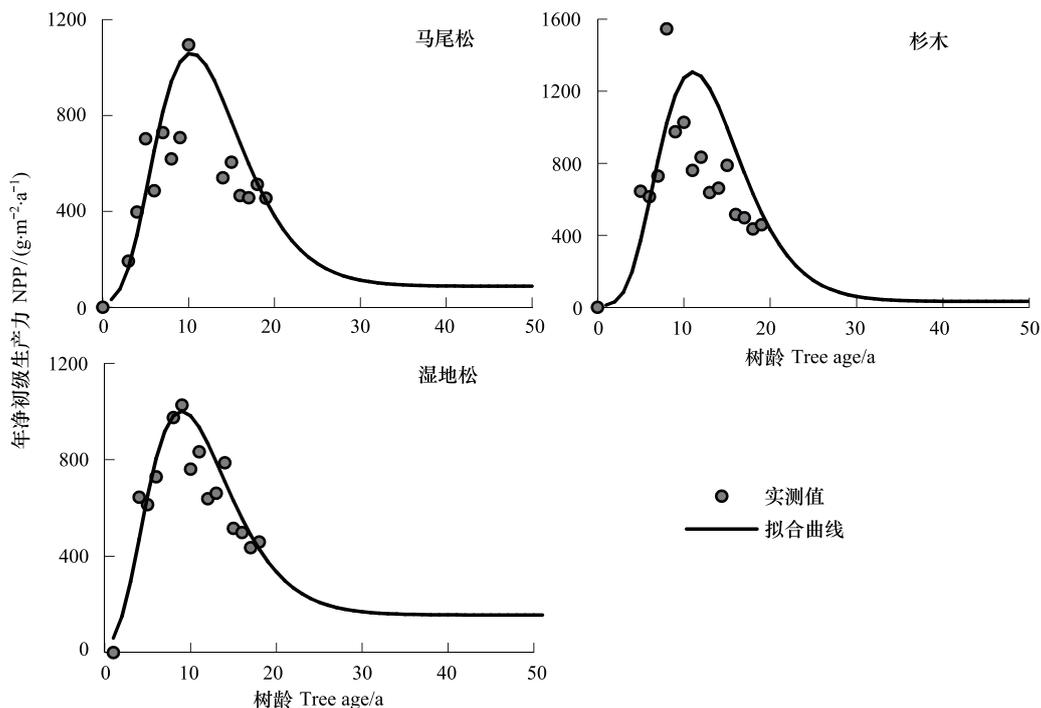


图 1 基于树轮模拟的马尾松、杉木和湿地松的净初级生产力(NPP)与林龄关系

Fig.1 Relationships between net primary production (NPP) and stand age for Masson pine, Chinese fir, Slash pine based on tree ring

在区域尺度, 利用拟合得到的人工林蓄积量生长过程, 分别得到了江西省三类主要人工林的 NPP 与林龄的平均关系式, 作为区域碳通量模型的输入参数(表 1)。

### 2.2 样点尺度的人工林碳蓄积估算

#### (1) 乔木层碳蓄积

就三类造林树种的碳蓄积速率而言(图 2), 马尾松林的碳蓄积速率最慢, 其增长斜率为  $2.44 \times 10^3 \text{ gC/株}$ ; 湿地松林的碳蓄积速率远高于马尾松林、略低于杉木林, 其增长斜率为  $3.41 \times 10^3 \text{ gC/株}$ ; 杉木林碳蓄积速率最快, 增长斜率为  $3.98 \times 10^3 \text{ gC/株}$ 。从三类造林树种的年碳蓄积量与林龄关系可以看出: 马尾松林年碳蓄积量在林分年龄 18a 左右开始出现拐点, 增长速率放慢, 其拐点处切线斜率为  $0.69 \times 10^3 \text{ gC/株}$ ; 湿地松林年碳蓄积也在林分年龄 15a 左右开始出现拐点, 增长速率放慢, 其拐点处切线斜率为  $0.47 \times 10^3 \text{ gC/株}$ ; 杉木林年碳蓄积量也在林分年龄 15a 左右开始出现拐点, 增长速率放慢, 其拐点处切线斜率为  $0.56 \times 10^3 \text{ gC/株}$ 。拟合得到的

碳蓄积量随林龄变化的公式如下。

表 1 江西省主要造林树种林分的 NPP、碳蓄积与林龄的拟合关系式

Table 1 The fitted equations between stand age and NPP, carbon sequestration for main planting tree species in Jiangxi Province

造林树种 Planting species	NPP-age 关系式 NPP-age relation formula	碳蓄积-林龄关系式 Carbon sequestration relation formula
马尾松 <i>P. massoniana</i>	$NPP(\text{age})_{\text{马尾松}} = 78.876 \times \left[ 1 + \frac{5.241 \times \left[ \frac{\text{age}}{20.083} \right]^{0.616} - 1}{\exp \left[ \frac{\text{age}}{20.083} \right]} \right]$	$V_C = 52.396 \times (1 - \exp(-0.092x))^{1.892}$
杉木 <i>Cunninghamia lanceolata</i>	$NPP(\text{age})_{\text{杉木}} = 33.831 \times \left[ 1 + \frac{16.311 \times \left[ \frac{\text{age}}{11.042} \right]^{1.455} - 1}{\exp \left[ \frac{\text{age}}{11.042} \right]} \right]$	$V_C = 65.841 \times (1 - \exp(-0.089x))^{2.245}$
湿地松 <i>P. elliotii</i>	$NPP(\text{age})_{\text{湿地松}} = 155.395 \times \left[ 1 + \frac{2.014 \times \left[ \frac{\text{age}}{2.483} \right]^{3.591} - 1}{\exp \left[ \frac{\text{age}}{2.483} \right]} \right]$	$V_C = 77.363 \times (1 - \exp(-0.095x))^{1.937}$

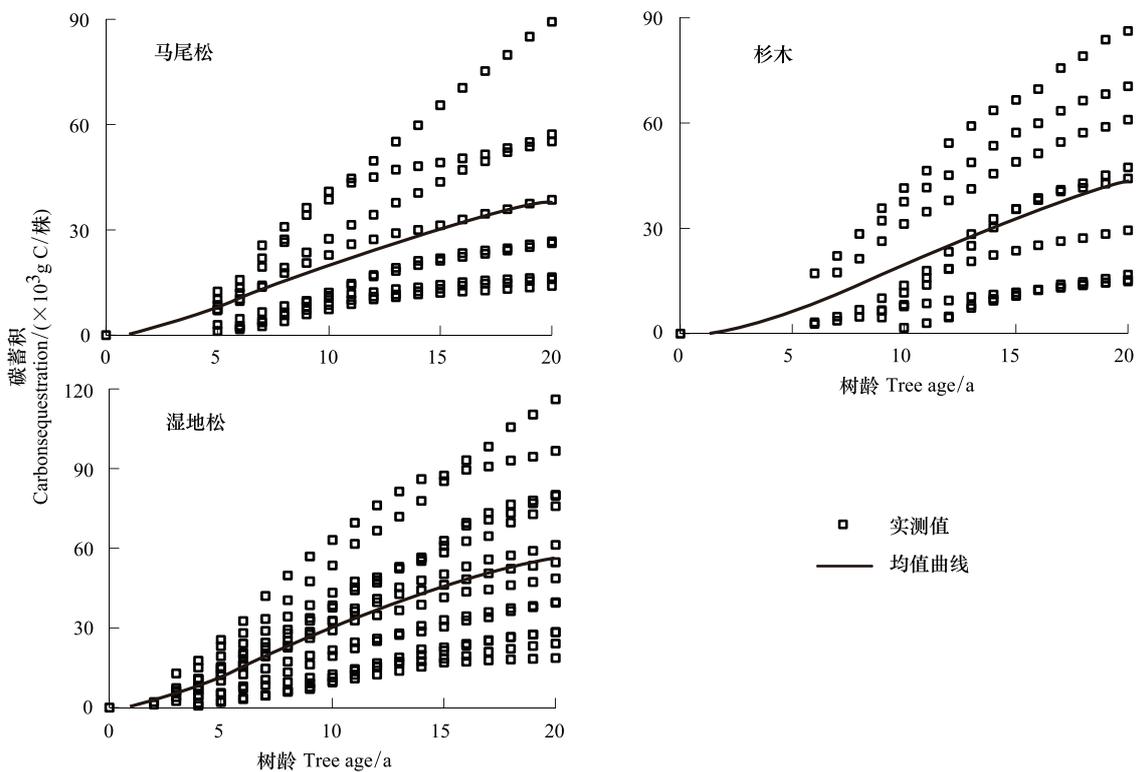


图 2 马尾松林、湿地松林、杉木林的生物量碳蓄积量与林龄的关系

Fig.2 The relationship between carbon sequestration and stand age for Masson pine, Chinese fir, Slash pine

(2) 林下植被层碳蓄积

根据文献参数整理的不同林龄人工马尾松林、杉木林下植被层碳蓄积量或乔木层与林下植被层之比,分析拟合得到林下植被层的逐年碳蓄积变化曲线(图 3)。可以得出,人工林幼龄期由于整地、铲山等造林前期措施,林下植被转入凋落物碳库,因此林下植被碳库接近零值;中龄林期,光照和水热条件充足,林下植被生长

相对茂盛,碳蓄积量迅速升高;随着林分成熟,林分高度郁闭抑制林下植被生长,林下植被层碳蓄积量减少。但是,由于数据样本量少,拟合结果的相关系数较低(0.337)。

### (3) 凋落物层碳蓄积

根据文献参数整理的不同林龄马尾松林、杉木林凋落物层碳蓄积量或乔木层与凋落物量之比,分析拟合得到凋落物碳蓄积的逐年变化曲线(图3),可以看出,造林后,由于造林前期措施导致的地上植被大部分转入凋落物碳库,凋落物碳蓄积快速增加,以30a为转折点,30a后林分接近成熟,凋落物分解速率增大,而活生物量转入凋落物层的部分减少,其碳蓄积量随之减少。

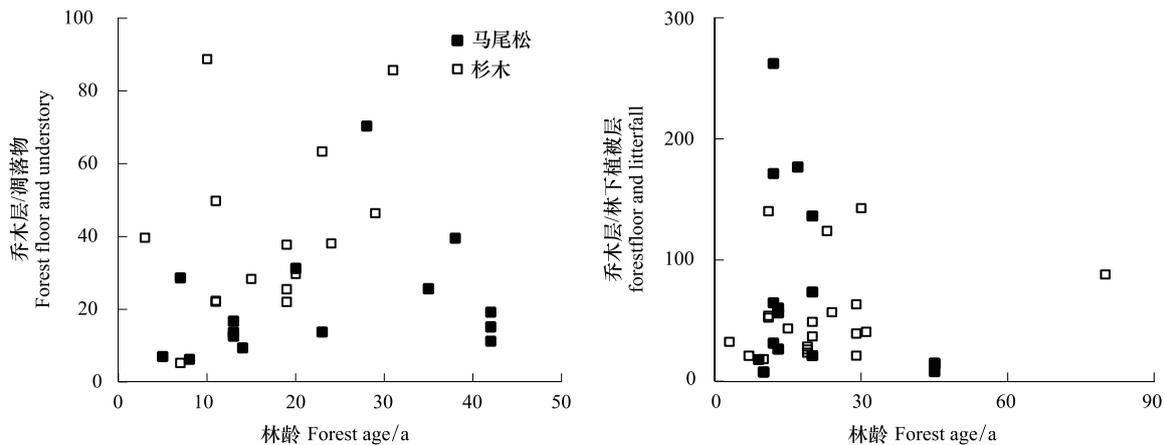


图3 马尾松林下乔木层与植被层和凋落物层碳蓄积比例的变化

Fig.3 The variations of ratios between forest floor and understory, forest floor and litterfall for Masson pine

## 2.3 江西省人工造林的碳蓄积过程

根据 InTEC 模型模拟得到 1980—2007 年江西省人工林多年平均 NPP 与碳蓄积变化量,以及生物量与土壤碳蓄积过程。结果表明(图4),江西省人工林年平均净初级生产力变化可分为两个阶段,1987 年以前处于持续地下降阶段,而后处于较缓地上升趋势。江西省人工林的年平均 NPP 自 1980 年开始有一个迅速下降的过程,从  $405.64 \text{ g m}^{-2} \text{ a}^{-1}$  降至 1987 年的  $316.28 \text{ g m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ , 平均每年减少  $11.17 \text{ g m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ ; 此后缓慢增加至 2007 年的  $393.63 \text{ g m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ , 平均每年减少  $3.87 \text{ g m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 。“山江湖工程”实施多种形式的联合造林、育林使得人工林面积大幅度提高,年平均 NPP 值稳步上升,人工林生产力渐渐恢复,但仍低于前一阶段的总体水平,说明有待加强管理和质量提升。

江西省人工林的碳蓄积变化与每年造林面积有关,虽然 NPP 持续下降,但江西省人工林碳蓄积变化可分为 3 个阶段(图4),碳蓄积年变化量自 1980 年开始至 1987 年一直处于平稳状态,年净增  $2.19\text{--}2.37 \text{ Tg C/a}$ ; 随着山江湖工程大量造林,人工林面积增大,从 1988 年开始迅速增加至 1992 年的  $8.02 \text{ TgC/a}$ , 平均年增速为  $1.13 \text{ TgC/a}$ ; 此后增速减缓至  $0.14 \text{ TgC/a}$ 。碳蓄积变化以生物量碳蓄积的变化为主,因此,总碳蓄积变化趋势与活生物量碳蓄积变化趋势相同(图4)。土壤碳蓄积在造林初期持续下降,而后增加,但相对活生物量而言,其变化量相当小。

从人工林生产力与碳蓄积变化的空间分布来看(图5),江西省人工林生产力高值多分布在该省以湿地松和杉木为主要人工林树种的中部吉泰盆地、以杉木人工林为主的东部资溪县,其次是该省西部以人工杉木林为主的萍乡、宜春一带,生产力低的人工林多位于江西省北部与中部的鄱阳湖、赣江沿岸区域。

## 2.4 模型模拟结果的验证

树木年轮估算值能够较好表现样点尺度林分年净增碳蓄积量,呈现波动性,由于此估算值是根据地面实测数据进行推算的,具有较高精度和可信度。因此,将模型模拟的千烟洲站 NPP 值与树木年轮数据估算的结果进行比较,树轮估算值约等于单株的年 NPP 值与株密度的乘积。模型模拟值能够较好的模拟 NPP 变化趋

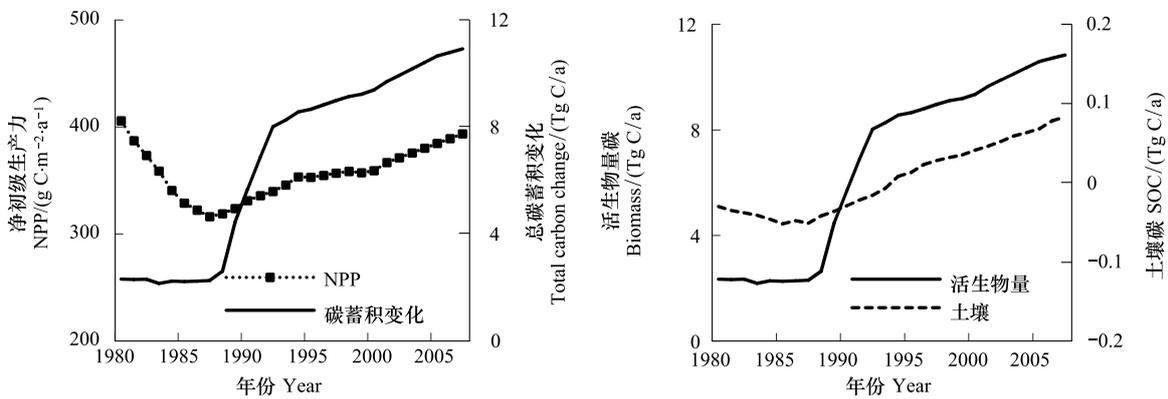


图4 1980-2007年江西省人工林年平均NPP、碳蓄积与生物量、土壤有机碳(SOC)蓄积量变化过程

Fig.4 The temporal variations of NPP, carbon sequestration, biomass carbon and soil organic carbon (SOC) sequestration in Jiangxi Province from 1980 to 2007

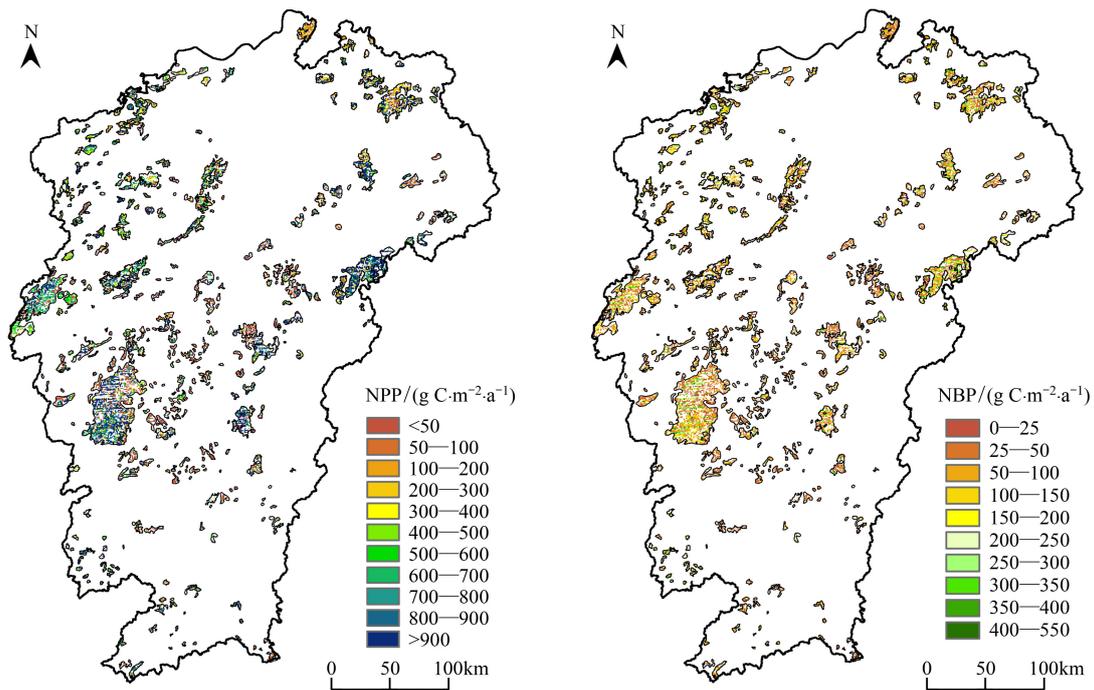


图5 1980-2007年江西省人工林多年平均净初级生产力(NPP)和净生物群落生产(NBP)力空间分布图

Fig.5 The distribution map of plantation NPP and NBP in Jiangxi Province from 1980 to 2007

势,即呈现年 NPP 先快速增加后下降趋势。前一时段模拟值与估算值接近,但未能表现其波动性。后一时段,模拟值与估算值虽然皆呈现下降趋势,但下降幅度相差很大(图6)。说明区域模型由于对过程的假设和简化,加之输入数据的不确定性如拟合的江西省平均 NPP 与林龄关系与点尺度的差异较大,其模拟结果能够较好地表达变化趋势,但在精确性方面需要改进。利用 1:1 特征线分析模型模拟精度(图6b),模型模拟值与树轮估算值的回归直线斜率为 0.587。数据的拟合线与 1:1 线相交,模型模拟值和树轮估算值基于 1:1 线的决定系数  $R^2$  和预测平均相对误差 MSE 分别为 0.3215 和 32.75%。模型的模拟值与实测值的符合度一般。此外,将模型模拟 NBP 值与千烟洲通量观测值做比较发现(表2),模型模拟值偏低 7.4%—20.87%。

### 2.5 人工林碳蓄积与生境的关系

人工造林后,森林蓄积碳的能力取决于森林本身特性、立地环境变化、人类干扰程度等多方面因素。本研究根据模拟结果和辅助数据分析了气候因素、地形因素、造林方式及造林前土地利用类型等对人工林碳蓄积

的影响。

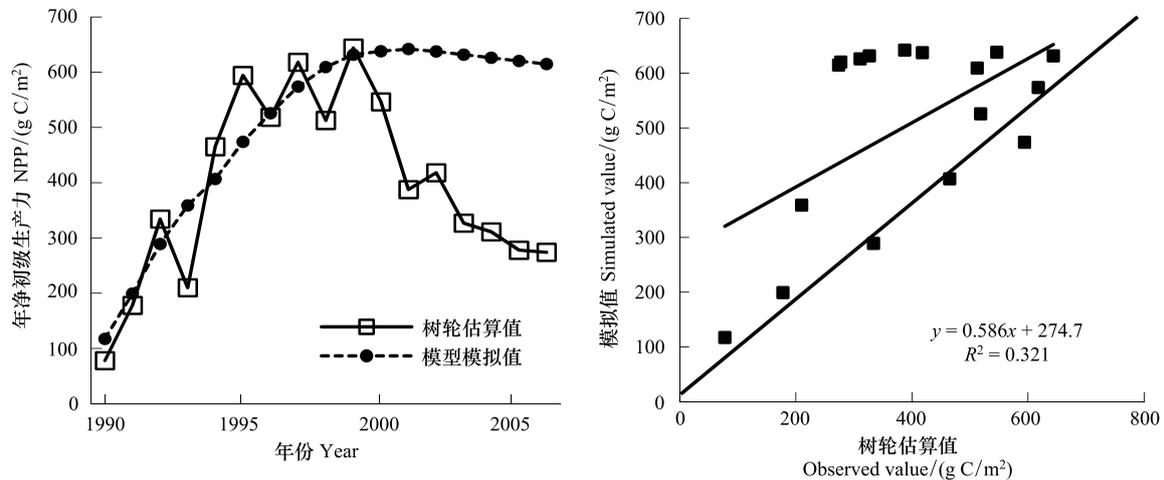


图 6 树木年轮估算年净初级生产力与模型模拟值的比较

Fig.6 The estimated NPP by tree ring compared to simulated NPP

表 2 模型模拟 NBP 值与千烟洲站观测值的比较

Table 2 The simulated NBP compared to observed NPP at Qianyanzhou

年份 Year	模型模拟值/(gC/m <sup>2</sup> ) Simulated value	千烟洲观测值/(gC/m <sup>2</sup> ) Observed value	模拟值的误差百分比/% Percentage error
2003	341.32	387.45	11.91
2004	390.99	422.22	7.4
2005	540.66	683.28	20.87

### (1) 气候因素

气候变暖不仅可以通过直接影响光合作用来改变生态系统的 NPP,还可以通过改变土壤氮素矿化速率、土壤水分含量而间接影响 NPP<sup>[26]</sup>。本研究利用多年平均气温和降水量的空间插值数据与模型模拟的江西省人工林多年平均 NPP 结果进行叠加分析,探讨了温度和降水量与人工林碳蓄积的相互反馈作用。结果表明(图 7),多年平均降水量介于 1520—1750 mm 区域的人工林 NPP 随着降水增多而略有增加,变化倾向率为 0.5824 gC m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup> mm<sup>-1</sup>,NPP 值域范围介于 512—713 gC m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>,趋势不显著( $R^2 = 0.268$ ,样本数 323);多年平均降水量低于 1520 mm 和高于 1750 mm 的区域,NPP 不受降水量变化的影响。温度与 NPP 的关系不明显,温度介于 15—18 °C 范围区域内的 NPP 与气温呈现不显著的负相关关系,变化倾向率为 -18.926 gC m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup> °C<sup>-1</sup>。

### (2) 地形因素

为了探讨人工林碳蓄积过程的地形差异,本研究分析了不同海拔、坡度等地形因素对人工造林碳蓄积的影响。就人工林 NPP 的海拔差异而言(图 8),500—700 m 的 NPP 年平均值最高,为 622.15 g C m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>,值域范围 437.72—867.85 g C m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>;其次是 300—500 m,介于 390.77—804.56 g C m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>,平均 573.45 g C m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>;海拔低于 100 m 地区的单位面积 NPP 值最低,平均 152.45 g C m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>,介于 96.52—219.34 g C m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>。不同海拔的 NPP 年际变化趋势,除 >900 m 海拔范围的 NPP 波动较大、逐年下降以外,其余海拔的 NPP 遵循 1980 年前平稳波动、而后逐渐增长的趋势。可见海拔对 NPP 值的影响较大,而对 NPP 变化趋势的影响较小。

不同坡度的 NPP 具有较大差异(图 8),结果显示,坡度 45°以下,随着坡度增加,NPP 值增大,平坡、缓坡、斜坡和陡坡的 NPP 均值范围分别为 158.78—240.87 g m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>、304.58—447.55 g m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>、376.59—515.78 g m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>和 435.78—541.58 g m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>,急坡的 NPP 值为 347.81—662.04 g m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>;各坡度的 NPP 值均遵循先下降至最低值而后缓慢上升的趋势;坡度趋陡,达到最低值的时间越早,急坡为 1982 年,陡坡为 1985 年,其

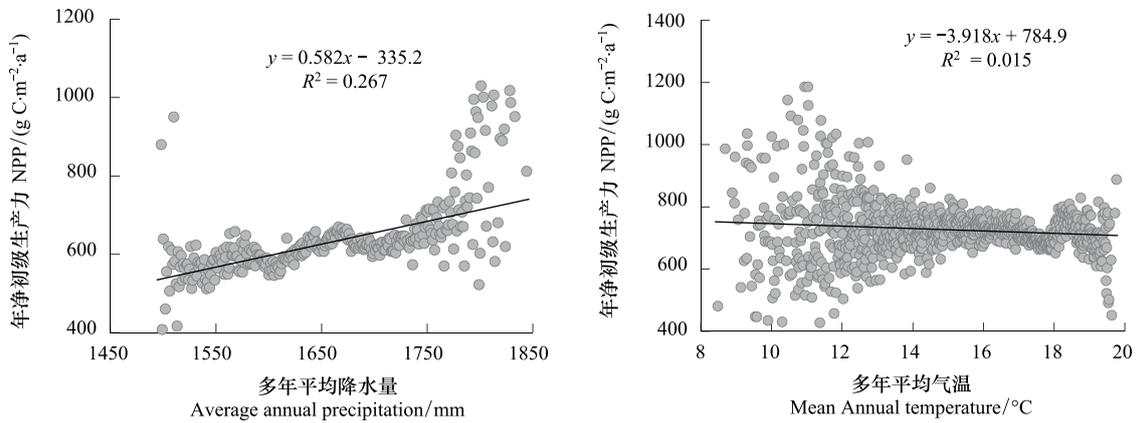


图 7 降水量和气温对人工林生态系统 NPP 的影响

Fig.7 The impacts of precipitation and temperature on plantation NPP

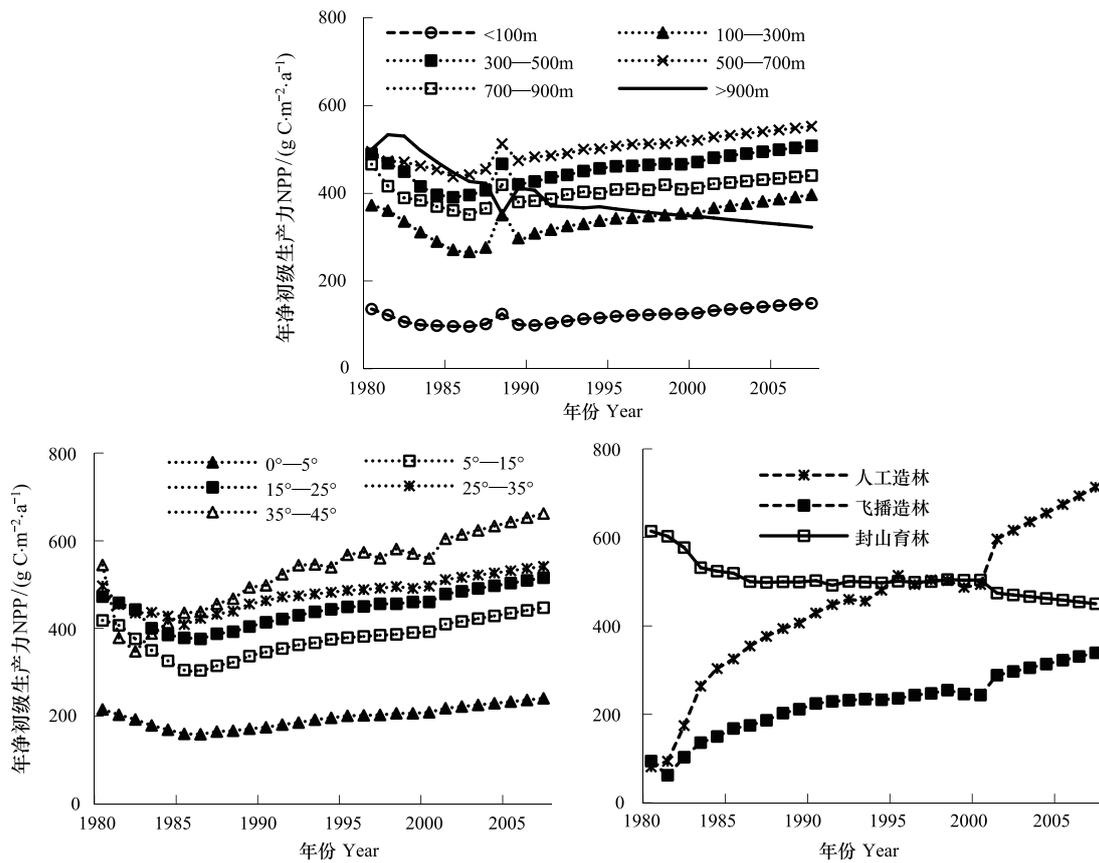


图 8 不同海拔、坡度和造林方式的人工林生态系统 NPP

Fig.8 The plantation NPP varied along elevation, gradient and different stand sources

余为 1986 年;达到最低值后皆呈现稳步上升的趋势,急坡的上升幅度远高于其它坡度。

(3) 造林方式

森林碳蓄积过程因树种组成、林相、林分起源、林龄、年龄结构、郁闭度、株密度等森林本身结构特征的差异而不同。本研究探讨了造林方式差异对人工林碳蓄积的影响,根据造林方式将人工林划分为人工造林、封山育林、飞播造林三类。造林方式差异导致造林后林分生产力不同(图 8),在造林最初的 4a 内 NPP 增长很快,而后增速减缓,第 27 年的 NPP 比造林初期增加了 619.83 g C m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>;飞播造林的人工林 NPP 在造林后最初 2a 内下降,之后缓慢增加,第 27 年的 NPP 比造林初期增加 276.78 g C m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>;而封山育林的林分 NPP 自

封育后持续下降,第 27 年的 NPP 比封育前减少  $152.17 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 。由此可以看出,就碳蓄积效应而言,人工造林的效果最好,碳增汇潜力最大;飞播造林多见于土质瘠薄的荒山,因此成活率低,碳蓄积潜力小;封山育林在碳蓄积方面不具优势。

### 3 讨论

#### 3.1 碳蓄积估算的不确定性分析

本研究中碳蓄积估算不确定性的产生与估算参数、输入数据等有关。模型参数方面,由于缺少相关研究结果,周转率和土壤碳库分解率等模型输入参数采用通用值而没有本地化,导致 NBP 结果具有较大不确定性,这些需要更多地面实验数据进行订正。区域尺度上平均化林龄与净初级生产力关系式,导致 NPP 模拟结果与实测值趋势相同,但绝对值存在差异,需要改进模型中这个部分,实现差异的 NPP-age 关系输入计算。

许多研究忽略了林下植被和凋落物层,使得对森林生态系统的碳收支低估许多倍等<sup>[25]</sup>。本文尝试了利用文献参数整理的数据分析了林下植被和凋落物层的碳蓄积随林龄变化的趋势,但由于数据样本较少,分析结果准确性不够。

我国对于造林前土地利用方式对碳蓄积影响这方面所做的工作很少,这与我国的人工林分布面积和国家经济建设的需求都不相符合。造林前土地利用方式对土壤有机碳的影响最大,而土壤有机碳库组成的复杂性及对各种影响因素变化响应的多样性导致目前国内外对土壤碳库的动态过程和影响因素的认识仍有很大不足<sup>[13]</sup>,造林后土壤碳储量变化的不确定性除与环境因子的空间异质性有关外,也与土壤取样、测定、分析和计算方法的差异性、土壤参数估计的差异(如土壤容重、质地)等有关。比如,过去土壤取样的采样深度从 5—100 cm 不等<sup>[27]</sup>,多数研究采用深度而不是按照自然发生层来测定土壤碳含量,这会给某些深根性树种带来偏差,也可能引起土壤碳测定的偏差。本研究试图利用土地利用变化空间数据分析造林前土地利用方式对造林后碳蓄积的影响差异,然而由于土地利用变化数据难以表达造林的确切时间,对造林导致碳蓄积变化速率的精确性方面存在问题。

虽然陆面模型中的生理学过程机理是正确的,但是大多数忽略了干扰和恢复的随机过程给人工林碳库带来的不确定性<sup>[4,11]</sup>。人工林业管理措施如整地、灌水、施肥、间伐、疏伐等如何影响森林生态系统?各种突发的自然灾害如火灾、病虫害、地震等如何极大地影响人工林生态系统的碳蓄积与碳循环?这些问题目前研究较少且多停留在定性描述阶段。然而,如何深入研究胁迫、干扰因素对森林生态系统碳循环的影响及其机理,是准确评价人工林生态系统碳汇功能急需解决的关键问题。

#### 3.2 与其它研究结果的比较

许多生态过程或机理模型都在不同时空尺度模拟了我国范围内森林的净初级生产力,如 GLO-PEM 模型<sup>[28]</sup>、CASA 模型<sup>[28-29]</sup>、TEM 模型<sup>[30]</sup>、CEVSA<sup>[28, 31]</sup>等,但多针对整个植被层,对森林本身特性考虑较少。而本文利用的 InTEC 模型专门针对森林,考虑了林龄与森林干扰,就森林碳蓄积模拟而言,比其它模型在过程和机理方面更具有优势。同样利用 InTEC 模型,Wang 等<sup>[21]</sup>年模拟了我国森林 1901—2001 年碳源/碳汇情况,但在 InTEC 模型应用 NPP-age 的定量化函数时采用了加拿大实测资料模拟的回归函数,并把不同的森林生态系统采用了相同的回归系数,此外,使用的 2001 年中国林龄分布图较粗,具有较大不确定性。本研究则在其基础上改进了部分关键输入参数和细化了部分关键输入数据,模拟结果的精度有了大幅提高。在江西省范围内,多利用森林清查统计数据 and 传统森林经理学方法估算森林碳储量,目前没有利用模型模拟人工林生产力和碳蓄积过程的研究。在县级尺度上,吴丹等<sup>[32]</sup>利用森林小班数据估算得到泰和县 2003 年人工林碳储量为  $1.90 \text{ TgC}$ 。在千烟洲站的相关研究较多,杨风亭<sup>[33]</sup>估算了千烟洲试验区内 1984、2004 年的平均植被碳密度分别为  $1.25$  和  $74.94 \text{ tC hm}^{-2}$ ,植被碳总量分别为  $259.12$  和  $8182.6 \text{ tC}$ ,林地土壤有机碳密度  $29.67$  和  $63.73 \text{ tC/hm}^2$ ,林地土壤有机碳储量分别为  $140.02$  和  $7784.26 \text{ tC}$ 。沈文清<sup>[34]</sup>估算千烟洲人工针对叶林乔木层年净固碳量以杉木纯林最高为  $61420 \text{ t hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ ,湿地松居中  $51021 \text{ t hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ ,马尾松最低为

31425 t hm<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>, 针叶林平均为 41255 t hm<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>, 1 m 深度土层平均碳储量为 67.85 t hm<sup>-2</sup>。刘琪璟等<sup>[35]</sup>估算千烟洲湿地松林地上生物量为 72.061 t hm<sup>-2</sup>, 生物量积累速率为 8493 kg hm<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup> (折合碳约为 4370 kg hm<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>), 与通量观测得到的净交换量 (NEE) 结果基本一致。

### 3.3 人工林碳蓄积的深入研究

人工林会引起生物多样性降低, 造成土壤肥力下降、土壤板结, 影响当地水循环, 增加林火、病虫害的危险等生态问题。因此, 为了长期缓解气候变化需要仔细选择造林树种<sup>[1]</sup>, 遵循适地适树原则进行人工造林, 营造混交林, 特别是退化土地<sup>[36]</sup>。此外, 如何同时兼顾用材和生态保护、造林占地与粮食安全等是目前存在的制约问题。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, 特别是在土地供给受到高昂价格和其他土地利用方式强烈竞争的区域。虽然由于此类方式导致非常复杂的净碳收益量化而限制了其在全球碳贸易市场的作用, 但其将在国家制定各种目标与措施时占有一席之地, 不仅仅是为了缓解气候, 还可以减少森林火灾, 增加林产品比如清除林下植被和疏伐时的清除物可用作生物能源产品。总的说来, 考虑周全的碳蓄积工程, 同时提供可持续利用的木材产品、纤维和能源, 将产生巨大效益。可持续发展理论必需综合考虑平衡问题, 即同时考虑缓解气候变化和可持续发展的利益最大化<sup>[37]</sup>。

我国是世界上人工林保存面积和年造林面积最多的国家, 然而重造轻管却导致我国人工林质量低、生态功能差。因此, 在增加人工林数量的同时通过森林经营管理提高已有人工林的质量, 是我国林业生态发展面临的一个极为重要的问题, 扩大森林面积和改进森林管理以增加碳蓄积也是一种比减少碳排放成本更低的碳减排途径。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<sup>[38]</sup>。森林管理需要根据不同区域的特点选择适合的措施<sup>[39]</sup>, 同时考虑碳蓄积管理的生态、经济和社会作用。但是, 目前很难确定多少森林碳汇和碳库能够通过何种管理以缓解大气 CO<sub>2</sub> 的增加<sup>[37]</sup>。此外, 由于高温等外部因素导致的碳汇减少使得 CO<sub>2</sub> 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, 碳管理将面临着巨大的挑战<sup>[4]</sup>, 而国家或跨国组织努力平衡其内部经济与外部社会之间关于改变地球气候系统的化石燃料燃烧、土地利用实践的矛盾, 亦使森林碳库的管理成为一个非常具有争议的问题<sup>[40-41]</sup>。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? 森林碳管理是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<sup>[39]</sup>? 因此, 研究森林经营管理与碳蓄积的关系将是未来的工作重点。

## 4 结论

本文基于树木材积生长量模型和区域碳通量模型, 从样地到区域模拟分析了人工林碳蓄积的时空变化规律。结果表明: 1) 马尾松林年碳蓄积量增长速率在林龄 18a 后减速, 杉木和湿地松林 15a 出现拐点, 林下植被层碳蓄积在造林初期接近零而后迅速升高, 再随着林龄增大而减少, 凋落物层碳蓄积在造林后快速增加至 30a 后随着分解速率增大而减少; 2) 1980 年至 2007 年, 江西省人工林 NPP 从迅速下降至最低值而后缓慢增至 393.63 gC m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>, 碳蓄积年变化在 1987 年前处于平稳状态, 而后变化速率增快, 从 2.19 TgC/a 迅速增至 8.02 TgC/a, 此后增速减缓; 3) 模型模拟值与树轮估算值比较发现, 趋势的一致性较好, 皆呈现先快速增加而后下降的趋势, 但年值和下降幅度相差较大, 说明模型过程简化和假设方面仍需改进, 模型输入参数与数据方面需要根据不同空间尺度进行本地化; 4) 人工林 NPP 与降水量、温度的关系不明显, 海拔对 NPP 值的影响较大而对 NPP 变化趋势的影响较小, NPP 值随着坡度增加而增大; 5) 造林方式比较, 人工造林碳增汇潜力最大, 而封山育林在碳蓄积效应方面不具优势。

### 参考文献 (References):

- [ 1 ] Thuille A, Schulze E D. Carbon dynamics in successional and afforested spruce stands in Thuringia and the Alps. *Global Change Biology*, 2006, 12 (2): 325-342.
- [ 2 ] Farley K A. Grasslands to Tree Plantations; Forest transition in the Andes of Ecuador. *Annals of the Association of American Geographers*, 2007,

- 97(4): 755-771.
- [ 3 ] 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.
- [ 4 ] 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.
- [ 5 ] Schimel D S, House J I, Hibbard K A, Bousquet P, Ciais P, Peylin P, Braswell B H, Apps M J, Baker D, Bondeau A, Canadell J, Churkina G, Cramer W, Denning A S, Field C B, Friedlingstein P, Goodale C, Heimann M, Houghton R A, Melillo J M, Moore B III, Murdiyarso D, Noble I, Pacala S W, Prentice I C, Raupach M R, Rayner P J, Scholes R J, Steffen W L, Wirth C. Recent patterns and mechanisms of carbon exchange by terrestrial ecosystems. *Nature*, 2001, 414(6860): 169-172.
- [ 6 ] 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.
- [ 7 ] Nilsson S, Schopfhauser W. The carbon-sequestration potential of a global afforestation program. *Climatic Change*, 1995, 30(3): 267-293.
- [ 8 ] Richter D D, Markewitz D, Trumbore S E, Wells C G. Rapid accumulation and turnover of soil carbon in a re-establishing forest. *Nature*, 1999, 400(6739): 56-58.
- [ 9 ] Jackson R B, Jobbágy E G, Avissar R, Roy S B, Barrett D J, Cook C W, Farley K A, le Maitre D C, McCarl B A, Murray B C. Trading water for carbon with biological carbon sequestration. *Science*, 2005, 310(5756): 1944-1947.
- [ 10 ] 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.
- [ 11 ] 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*, 2007, 21(3): GB3006.
- [ 12 ] Huang L, Liu J Y, Shao Q Q, Xu X L. Carbon sequestration by forestation across China: Past, present, and future. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2012, 16(2): 1291-1299.
- [ 13 ] 刘纪远, 王绍强, 陈镜明, 刘明亮, 庄大方. 1990—2000 年中国土壤碳氮蓄积量与土地利用变化. *地理学报*, 2004, 59(4): 483-496.
- [ 14 ] Paul K I, Polglase P J, Nyakuengama J G, Khanna P K. Change in soil carbon following afforestation. *Forest Ecology and Management*, 2002, 168(1/3): 241-257.
- [ 15 ] Zinn Y L, Resck D 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.
- [ 16 ] 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.
- [ 17 ] Turner J, Lambert M. Change in organic carbon in forest plantation soils in eastern Australia. *Forest Ecology and Management*, 2000, 133(3): 231-247.
- [ 18 ] Huang M, Ji J J, Li K R, Liu Y F, Yang F T, Tao B. The ecosystem carbon accumulation after conversion of grasslands to pine plantations in subtropical red soil of South China. *Tellus B*, 2007, 59(3): 439-448.
- [ 19 ] Cao S X. Why large-scale afforestation efforts in China have failed to solve the desertification problem. *Environmental Science and Technology*, 2008, 42(5): 1826-1831.
- [ 20 ] Cao M K, Tao B, Li K R, Shao X M, Prience A D. Interannual variation in terrestrial ecosystem carbon fluxes in China from 1981 to 1998. *Acta Botanica Sinica*, 2003, 45(5): 552-560.
- [ 21 ] Wang S, Chen J M, Ju W M, Feng X, Chen M, Chen P, Yu G. Carbon sinks and sources of China's forests during 1901-2001. *Journal of Environmental Management*, 2007, 85(3): 524-537.
- [ 22 ] 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): 691-706.
- [ 23 ] 马泽清, 刘琪景, 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.
- [ 24 ] 中国林业科学研究院木材工业研究所. 中国主要树种的木材物理力学性质. 北京: 中国林业出版社, 1982.
- [ 25 ] 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(3): 839-849.
- [ 26 ] 潘榆德, Melillo J M, Kickiighter D, 肖向明, McGuire A D. 大气 CO<sub>2</sub> 升高及气候变化对中国陆地生态系统结构与功能的制约和影响. *植物生态学报*, 2001, 25(2): 175-189.
- [ 27 ] Polglase P J, Paul K I, Khanna P K. Change in Soil Carbon Following Afforestation or Reforestation: Review of Experimental Evidence and Development of a Conceptual Framework. National Carbon Accounting System Technical Report, No. 20, 2000, Australian Greenhouse Office.

- [28] 高志强, 刘纪远. 中国植被净生产力的比较研究. 科学通报, 2008, 53(3): 317-326.
- [29] 朴世龙, 方精云, 郭庆华. 利用 CASA 模型估算我国植被净第一性生产力. 植物生态学报, 2001, 25(5): 603-608.
- [30] Xiao X M, Melillo J M, Kicklighter D W, Pan Y, McGuire A D, Helfrich J. Net primary production of terrestrial ecosystems in China and its equilibrium responses to changes in climate and atmospheric CO<sub>2</sub> concentration. *Acta Phytocologica Sinica*, 1998, 22(2): 97-118.
- [31] 陶波, 李克让, 邵雪梅, 曹明奎. 中国陆地净初级生产力时空特征模拟. 地理学报, 2003, 58(3): 372-380.
- [32] 吴丹, 邵全琴, 刘纪远, 黄麟. 1985—2030 年江西泰和县森林植被碳储量的时空动态. 应用生态学报, 2011, 22(1): 41-46.
- [33] 杨风亭. Q 中国南方红壤丘陵区土地利用对陆地碳循环的影响——以千烟洲试验为例 [D]. 北京: 中国科学院, 2005.
- [34] 沈文清. 江西千烟洲人工针叶林生态系统碳收支研究 [D]. 北京: 北京林业大学, 2006.
- [35] 刘琪璟, 曾慧卿, 马泽清. 江西千烟洲湿地松人工林碳蓄积及其与水分的关系. 生态学报, 2008, 28(11): 5322-5330.
- [36] Chazdon R L. Beyond deforestation: restoring forests and ecosystem services on degraded lands. *Science*, 2008, 320(5882): 1458-1460.
- [37] Canadell J G, Raupach M R. Managing forests for climate change mitigation. *Science*, 2008, 320(5882): 1456-1457.
- [38] 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.
- [39] Birdsey R, Pregitzer K, Lucier A. Forest carbon management in the United States. *Journal of Environmental Quality*, 2006, 35(4): 1461-1469.
- [40] Schulze E D, Valentini R, Sanz M J. The long way from Kyoto to Marrakesh: implications of the Kyoto Protocol negotiations for global ecology. *Global Change Biology*, 2002, 8(6): 505-518.
- [41] Agrawal A, Chhatre A, Hardin R. Changing governance of the world's forests. *Science*, 2008, 320(5882): 1460-1462.