

## 不同林龄尾巨桉人工林碳储量及分配格局

文 丽<sup>1,2</sup>, 王克林<sup>1,2</sup>, 曾馥平<sup>1,2</sup>, 彭晚霞<sup>1,2</sup>, 杜 虎<sup>1,2</sup>, 李莎莎<sup>1,2</sup>, 宋同清<sup>1,2\*</sup>

(1 中国科学院亚热带农业生态研究所 亚热带农业生态过程重点实验室, 长沙 410125; 2 中国科学院环江喀斯特生态系统观测研究站, 广西环江 547100)

**摘 要:** 利用桂东南桉树(*Eucalyptus* spp.)主产区 5 个不同林龄(1a、2a、3a、5a 和 8a) 15 个样点 45 个样地调查数据, 分析桂东南尾巨桉(*Eucalyptus urophylla* × *E. grandis*)人工林的碳格局及其动态变化特征。结果表明: (1) 尾巨桉人工林生态系统总碳储量表现为 3a 林龄(195.25 t · hm<sup>-2</sup>) > 5a 林龄(169.57 t · hm<sup>-2</sup>) > 8a 林龄(166.70 t · hm<sup>-2</sup>) > 2a 林龄(165.00 t · hm<sup>-2</sup>) > 1a 林龄(111.84 t · hm<sup>-2</sup>); 不同林龄碳储量分布格局均为土壤层 > 植被层 > 凋落物层, 地下部分 > 地上部分; 其中植被层为 4.87~80.54 t · hm<sup>-2</sup>, 占总碳储量的 4.36%~48.31%, 随林龄的增加而增加; 凋落物层为 0.92~3.25 t · hm<sup>-2</sup>, 占 0.82%~1.91%, 随林龄增加呈递减趋势; 土壤层为 3a 林龄(162.53 t · hm<sup>-2</sup>, 83.24%) > 2a 林龄(141.55 t · hm<sup>-2</sup>, 85.79%) > 5a 林龄(112.26 t · hm<sup>-2</sup>, 60.22%) > 1a 林龄(106.05 t · hm<sup>-2</sup>, 94.82%) > 8a 林龄(84.50 t · hm<sup>-2</sup>, 50.69%)。 (2) 植被层碳储量以乔木层最大(3.10~78.97 t · hm<sup>-2</sup>), 占 63.64%~99.25%, 其中乔木层各器官碳储量以树干最大(1.58~68.84 t · hm<sup>-2</sup>), 占乔木层碳储量的 50.90%~87.18%, 随林龄的增加而增加, 枝、叶、根分别占 4.97%~12.17%、1.97%~22.36% 和 5.87%~14.57%, 均随林龄而下降。 (3) 桂东南尾巨桉人工林生态系统年净固碳量平均为 11.73 t · hm<sup>-2</sup> · a<sup>-1</sup>, 2a 林龄(16.03 t · hm<sup>-2</sup> · a<sup>-1</sup>) 最大, 3a 林龄的固碳能力也很高, 8a 林龄年净固碳量与 5a 林龄持平, 高达 11.96 t · hm<sup>-2</sup> · a<sup>-1</sup>, 是较好的碳汇林业树种。提高桉树林的生态服务功能、降低其负面效应将有利于桉树人工林生产的发展。

**关键词:** 尾巨桉人工林; 碳储量; 年净固碳量; 林龄; 桂东南

中图分类号: Q948.11

文献标志码: A

## Carbon Storage and Its Distribution in *Eucalyptus urophylla* × *E. grandis* Plantations at Different Stand Ages

WEN Li<sup>1,2</sup>, WANG Kelin<sup>1,2</sup>, ZENG Fuping<sup>1,2</sup>, PENG Wanxia<sup>1,2</sup>,  
DU Hu<sup>1,2</sup>, LI Shasha<sup>1,2</sup>, SONG Tongqing<sup>1,2\*</sup>

(1 Key Laboratory of Agro-ecological Processes in Subtropical Region, Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, China; 2 Huanjiang Observation and Research Station of Karst Ecosystem, Chinese Academy of Sciences, Huanjiang, Guangxi 547100, China)

**Abstract:** Based on the data of 45 plantation stand plots (1 000 m<sup>2</sup>) with five different stand ages (1a, 2a, 3a, 5a, and 8a) collected from 50 sample sites in the main eucalyptus production areas in Guangxi, southwest in China, we studied the carbon storage and its characteristics of dynamic change. The result showed that: (1) The total carbon storage of *Eucalyptus urophylla* × *E. grandis* plantation ecosystem in the order of 3a

收稿日期: 2014-03-27; 修改稿收到日期: 2014-05-05

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(XDA05070404, XDA05050205); 中国科学院西部行动计划(KZCX2-XB3-10); 国家科技支撑计划(2011BAC09B02); 国家自然科学基金(Nos. 31370485, 31370623, 31100329); 广西科技攻关项目(桂科合 1346011, 桂科攻 1355007)

作者简介: 文 丽(1990—), 女, 在读硕士研究生, 主要从事森林生态研究。E-mail: xiaoyao350@163.com

\* 通信作者: 宋同清, 研究员, 主要从事植物生态研究。E-mail: songtongq@isa.ac.cn

(195.25 t · hm<sup>-2</sup>) > 5a(169.57 t · hm<sup>-2</sup>) > 8a(166.70 t · hm<sup>-2</sup>) > 2a(165.00 t · hm<sup>-2</sup>) > 1a(111.84 t · hm<sup>-2</sup>), respectively; Carbon storage of different ages in different layers appeared: soil layer > vegetable layer > litter layer, underground > aboveground; Carbon storage of vegetable layer is 4.87–80.54 t · hm<sup>-2</sup>, contributed 4.36%–48.31% to the total carbon storage of the ecosystems, and grew with ages; The carbon storage of litter layer is 0.92–3.25 t · hm<sup>-2</sup>, only contributed 0.82%–1.91% to the total carbon storage, appears descend trend with ages; The order of carbon storage of soil layer is 3a(162.53 t · hm<sup>-2</sup>, 83.24%) > 2a(141.55 t · hm<sup>-2</sup>, 85.79%) > 5a(112.26 t · hm<sup>-2</sup>, 60.22%) > 1a(106.05 t · hm<sup>-2</sup>, 94.82%) > 8a(84.50 t · hm<sup>-2</sup>, 50.69%). (2) Tree layer stored the highest carbon storage(3.10–78.96 t · hm<sup>-2</sup>) and comprised 63.64%–99.25% of carbon storage in vegetable layer. The carbon storage of tree layer in different organs was positively different, stem stored the highest carbon storage(1.58–68.84 t · hm<sup>-2</sup>), and accounted to 50.90%–87.18%, which also increased with ages, the other organs distributing sequence of the carbon storage in tree layer is branch(4.97%–12.17%), leaf(1.97%–22.36%), root(5.87%–14.57%), all decreased with ages. (3) The average annual net carbon fixation of *Eucalyptus urophylla* × *E. grandis* plantation is 11.73 t · hm<sup>-2</sup> · a<sup>-1</sup>, where 2a(16.03 t · hm<sup>-2</sup> · a<sup>-1</sup>) forest stored the highest, respectively, 3a forest is a better species of carbon sequestration forestry with high capability of carbon deposition, 8a annual net carbon fixation up to 11.96 t · hm<sup>-2</sup> · a<sup>-1</sup>, and flat with 5a. Therefore, to improve the eucalyptus forest ecological service function and reduce its negative effect will be conducive to the development and growth of eucalyptus plants.

**Key words:** *Eucalyptus urophylla* × *E. grandis* plantation; carbon storage; annual net carbon fixation; stand ages; southeastern Guangxi

随着工业化进程加快,大量化石燃料燃烧和土地利用方式改变等人为因素导致大气 CO<sub>2</sub> 浓度持续升高、气候不断变暖,全球气候环境日益恶化局面在很长时间内因不可能实现 CO<sub>2</sub> 零排放而得到逆转<sup>[1-3]</sup>。森林作为陆地生态系统的主体,其存储的有机碳占了整个陆地生态系统的 2/3 以上<sup>[4]</sup>,其碳汇功能成为温室气体减排的手段越来越受到人们的重视,成为了后京都时代应对气候变化的温室气体减排的重要途径之一。准确估算森林碳储量是研究碳循环的基础工作,通过量化森林碳储量可以评价不同森林类型对陆地生态系统的碳汇贡献率,为森林管理和植树造林提供数据依据,在理论和实践上都具有重要意义<sup>[5]</sup>。研究人工林碳贮量及其固碳功能,对于评价森林生态系统碳汇潜力,提供碳汇林业对策具有重要意义。近年来,随着“退耕还林”、“防护林建设”等林业工程的实施,中国人工林面积快速增加,人工林在生物量及 CO<sub>2</sub> 吸收和固定等方面的作用越来越得到重视<sup>[6-8]</sup>,国内外的相关研究取得了重大进展<sup>[9-10]</sup>,但多限于林木和某一林龄下的碳储量研究,对森林生态系统碳储量随林龄变化的积累和分布的综合性系统研究并不多见<sup>[11-13]</sup>。

桉树(*Eucalyptus* spp.)原产于澳大利亚、印度尼西亚等热带地区,是目前世界上最重要的纸浆原材料之一,同时可直接作为薪材、用于生物质发电及生产生物柴油等。中国桉树人工林是 20 世纪 80 年

代以后开始迅速发展起来的,目前是中国华南地区最重要的速生商品林造林树种和林木生物质能源的重要组成部分,面积已经超过 3 000 000 hm<sup>2</sup><sup>[14]</sup>,对生态环境的影响特别引人关注,许多学者对其生物多样性、水分消耗及土壤肥力等做了大量研究<sup>[15-16]</sup>。桉树人工林具有速生性和高生产力,理论上存在巨大的固碳速率和潜力,但有关方面的研究较少。本研究基于广西东南部尾巨桉(*Eucalyptus urophylla* × *E. grandis*)5 个不同林龄 45 块样方的调查资料,分析广西桉树人工林的碳格局及其动态变化特征,不仅为人工林“高碳吸存”的经营管理模式、林业碳汇评估以及碳交易的计量提供基础数据、实例和参考,也为科学评价桉树人工林生态系统的碳汇功能及其对全球气候变化贡献提供科学依据。

## 1 研究区概况与研究方法

### 1.1 研究区概况

据第八次森林资源清查结果统计,广西桉树面积达 1 712 968 hm<sup>2</sup>,蓄积 67 626 071 m<sup>3</sup>,主要分布在广西东南部,该区域属亚热带季风气候区,具有热带向亚热带过渡的特点,年平均气温 21.5 °C~22 °C,1 月平均气温 12.8 °C~13.5 °C,7 月平均气温 27.9 °C~28.3 °C,年总积温 7 190 °C~8 030 °C。年降雨量 1 300~1 800 mm,主要集中在 4~9 月,占全年降雨量的 80%,年总日照 1 600~1 800 h,年

蒸发量 1 600 mm,相对湿度 74.8%。土壤主要为砂页岩发育的赤红壤。

## 1.2 研究方法

**1.2.1 样方设置与调查** 参照《IPCC 优良做法指南》对系统随机抽样的建议和广西桉树人工林的分布特征,基于广西第八次森林资源清查数据和广西桉树人工林林龄、林组划分标准<sup>[17]</sup>,计算桉树人工林 1a、2a、3a、5a、8a 5 个不同林龄在广西各县(市)的面积、蓄积综合权重,在广西东南桉树主产区选择权重最大的县(市)分别建立 15 个不同林龄尾巨桉人工林样点,每个样点建立同一林龄的 3 块重复样地,各样地的立地条件基本一致,相互距离>100 m,样地大小为 1 000 m<sup>2</sup> (50 m×20 m) 共计 45 个样地。将每块样地进一步划分为 10 个 10 m×10 m 的样方。乔木层调查包括胸径(D)≥2 cm 尾巨桉的数量、胸径、树高、冠幅和成活状态,并进行每木调查;灌木层按“品”字型在样地内各设置 3 个 2 m×2 m 的小样方,调查所有灌木种类、株丛数、高度、地径、覆盖度;草本层在灌木层样框内各建立 1 个 1 m×1 m 的小样方,调查草本种类、株丛数、平均高度、覆盖度。同时用 GPS 定位。

**1.2.2 生物量测定** 乔木层:在每木调查的基础上,以 2 cm 为径阶,根据中央径阶多、两端逐次少的原则,选择不同林龄和径阶的尾巨桉共 18 株作为样木,测定其基径、胸径、树高和冠幅,并按 2 m 区分段锯断称量,在树干基部、胸径、中部及顶端分别锯取一个圆盘测定含水量;并分别称取枝条、叶片和花果的鲜质量;根的生物量采用全挖法,分小根(<2 cm)、中根(2~5 cm)、大根(>5 cm)3 组分别称重;然后对各部分器官分别取样 300 g 带回实验室,将样品在 105 ℃烘箱内杀青 2 h,调至 75 ℃下烘干至恒重,求出各器官干鲜质量之比,由此换算出样木各器官的干质量及总干质量。利用样木各器官(干、枝、叶、根)的干质量和总干质量,建立各器官及生物量与样木胸径(D)的幂回归方程( $W=aD^b$ )或指数方程( $W=ae^{bD}$ ),方程的相关系数在 0.873~0.989 之间(表 1),*t* 检验均达到极显著水平( $P<0.01$ ),表明模型可用来计算尾巨桉林的生物量。根据样地每木调查的结果及相应的回归方程计算乔木层各个体的生物量,求和即为乔木层的总生物量。

灌木层、草本层和地上凋落物:在灌木层样方内按全收获法收获样框内所有灌木的枝、叶、花、果、根,测定各器官生物量,并以 3 个样方的平均值来推算样地中灌木层的总生物量。按同样方法在草本层

表 1 尾巨桉人工林生物量估算模型

Table 1 Regression models of biomass for *Eucalyptus urophylla* × *E. grandis*

| 器官<br>Organ          | 拟合方程<br>Fitting equation | 相关系数<br><i>r</i> | 残差平方和<br>Sum of squared residuals |
|----------------------|--------------------------|------------------|-----------------------------------|
| 叶 Leaf               | $W_L=1.182e^{0.003D^2}$  | 0.873 **         | 0.690                             |
| 枝 Branch             | $W_B=0.042D^{1.835}$     | 0.946 **         | 1.530                             |
| 干 Stem               | $W_B=0.028D^{2.996}$     | 0.989 **         | 0.811                             |
| 根 Root               | $W_R=0.06D^{1.771}$      | 0.922 **         | 1.831                             |
| 全株 Total single-tree | $W_T=0.138D^{2.436}$     | 0.988 **         | 0.556                             |

注: \*\* .  $P<0.01$ ;下同。

Note: \*\* .  $P<0.01$ ; The same as below.

小样方内获取草本层地上与地下、凋落物生物量及总生物量。

**1.2.3 土样采集** 在每个样地中挖取一个典型剖面,用环刀按 0~10 cm(I 层)、10~20 cm(II 层)、20~30 cm(III 层)、30~50 cm(IV 层)、50~100 cm(V 层)分层测容重。在样地的 4 个角和中间按土壤机械分 5 层取样,5 个点同一层次的土样混合成一个土样。样品取完后带回实验室置于阴凉处自然风干,用四分法取土样过筛,供分析测定用,同时测定石砾含量。

**1.2.4 样品分析** 植物碳和土壤碳均采用重铬酸钾—浓硫酸氧化外加加热法测定全碳含量<sup>[18]</sup>。

**1.2.5 碳贮量计算** 乔木层、林下植被(灌木层、草本层)和凋落物层的碳贮量以其生物量现存量乘以相应的碳含量求得。土壤层碳贮量的计算采用以下公式:

$$SOC_n = \sum_{i=1}^n (1-G_i) \times D_i \times C_i \times T_i / 10$$

式中, $SOC_n$  为分  $n$  层调查的土壤单位面积碳贮量( $t \cdot hm^{-2}$ ); $G_i$  为第  $i$  层直径≥2 mm 的石砾含量(%); $D_i$  为第  $i$  层土壤容重( $g \cdot cm^{-3}$ ); $C_i$  为第  $i$  层土壤有机碳含量( $g \cdot kg^{-1}$ ); $T_i$  为第  $i$  土层的厚度(cm)。

**1.2.6 植被层净生产力与年净固碳量** 估算确定系统同化  $CO_2$  的能力是森林生态系统生产力研究的重要内容之一。人工林林分净生产量( $\Delta P_m$ )为  $t_1-t_2$  期间植物的生产量( $Y_n$ )、植物的凋落物及枯损物量( $\Delta L_n$ )、被动物吃掉的损失量( $\Delta G_n$ )3 个分量之和,即  $\Delta P_m=Y_n+\Delta L_n+\Delta G_n$ 。但是,测定  $\Delta G_n$  非常困难,通常多以平均净生产量  $NPP$  衡量林分生产力的高低,计算公式为: $NPP=W/a$ ,式中, $NPP$  为年平均净生产力, $W$  为林分各部分生物量, $a$  为林分年龄或器官年龄。本研究中干材、枝和根系的平均

净生产量按林分的实际年龄计算;树叶、灌木、草本、地被物以 2 年来计算<sup>[18]</sup>。根据尾巨桉人工林各组分净生产力和相应组分碳含量的积计算出各组分年净固碳量。

**1.2.7 数据处理** 所有桉树人工林碳贮量数据及多重比较分析、人工林生物量回归方程模型建立均在 Excel 2003 和 SPSS 18.0 中进行处理。

2 结果与分析

2.1 植物碳储量

**2.1.1 乔木层碳储量** 尾巨桉人工林 1a、2a、3a、5a 和 8a 乔木层碳储量分别为 3.11、20.50、27.67、51.63 和 78.97 t·hm<sup>-2</sup>(表 2),随着林龄的增加而显著增加。除 2a 和 3a 之间碳储量差异显著外,其它均达到极显著水平。各器官碳储量除 3a、5a 阶段叶碳储量略有下降外,其余各器官碳储量均随林龄的增大而增加。不同林龄尾巨桉乔木层各器官中碳储量的分配比例略有不同,1a 为:干>叶>根>枝,其余 4 个林龄级均为:干>根>枝>叶,各个林龄阶段树干的碳储量均最大,占整个碳储量的 50.90%~87.18%,且随着林龄的增长而增加。1a 尾巨桉

叶的碳储量大于根和枝,3a 后根均大于枝和叶,且根、枝、叶占总碳储量的比例与其他树种不同,均表现出了随林龄增加而下降的趋势。表明随着尾巨桉林龄的增长越来越多的碳储存在树干中,干材随着林龄的增长是一个碳净积累的过程,根、枝、叶在积累的同时却因部分的衰老组织脱落,具有比较强烈的碳循环过程。

**2.1.2 林下植被碳储量** 尾巨桉人工林由 1a 发展至 2a 阶段林分郁闭度增加,灌木层碳储量随生物量急剧减少而减少(表 3),至 3a 阶段时由于林分保存率下降,灌木层生物量急剧增加达到最大值,其碳储量也达到最大值,后又随林分保存率的相对稳定、林分不断生长和郁闭度的增加,灌木层碳储量又呈下降趋势。灌木层各器官碳的分配比例除 2a 为根>枝>叶外,其余各阶段为根>叶>枝,均以根的比例最大,达 38.36%~57.47%,各器官碳储量所占的比重随林龄发生波动性变化。其中灌木叶在 1a 至 2a 阶段显著下降,2a 发展至 5a 阶段呈增加趋势,8a 时期又下降;灌木枝与叶的变化相似,只是在 3a 至 8a 阶段一直都显著下降;灌木根在 1a~2a 阶段极显著下降,3a~8a 阶段呈上升增加趋势,8a 阶段达

表 2 不同林龄尾巨桉人工林乔木层碳贮量及在各器官分配百分比  
Table 2 Carbon storage and its allocation in organs of tree layer with different stand ages  
for *Eucalyptus urophylla* × *E. grandis*/(t·hm<sup>-2</sup>)

| 林龄<br>Stand<br>age/a | 叶 Leaf                   |                         | 枝 Branch                 |                         | 干 Stem                   |                         | 根 Root                   |                         | 总计 Total                 |                         |
|----------------------|--------------------------|-------------------------|--------------------------|-------------------------|--------------------------|-------------------------|--------------------------|-------------------------|--------------------------|-------------------------|
|                      | 碳贮量<br>Carbon<br>storage | 百分比<br>Percentage<br>/% | 碳贮量<br>Carbon<br>storage | 百分比<br>Percentage<br>/% | 碳贮量<br>Carbon<br>storage | 百分比<br>Percentage<br>/% | 碳贮量<br>Carbon<br>storage | 百分比<br>Percentage<br>/% | 碳贮量<br>Carbon<br>storage | 百分比<br>Percentage<br>/% |
| 1                    | 0.70Cc                   | 22.36                   | 0.38Dd                   | 12.17                   | 1.58De                   | 50.90                   | 0.45Dd                   | 14.57                   | 3.11De                   | 100                     |
| 2                    | 1.28Bb                   | 6.23                    | 1.83Cc                   | 8.93                    | 15.23Cd                  | 74.30                   | 2.16Cc                   | 10.54                   | 20.50Cd                  | 100                     |
| 3                    | 1.12Bb                   | 4.06                    | 2.10Cc                   | 7.60                    | 21.91Cc                  | 79.18                   | 2.54Cc                   | 9.16                    | 27.67Cc                  | 100                     |
| 5                    | 1.23Bb                   | 2.39                    | 2.99Bb                   | 5.79                    | 43.84Bb                  | 84.92                   | 3.57Bb                   | 6.91                    | 51.63Bb                  | 100                     |
| 8                    | 1.56Aa                   | 1.97                    | 3.93Aa                   | 4.97                    | 68.84Aa                  | 87.18                   | 4.64Aa                   | 5.87                    | 78.97Aa                  | 100                     |

注:不同大小写字母分别表示不同林龄间碳储量差异达极显著和显著水平;下同。  
Note: Different capital and normal letters in the different stand ages mean significant difference at 0.01 and 0.05 level, respectively; The same as below.

表 3 不同林龄尾巨桉人工林灌木层碳贮量及在各器官分配百分比  
Table 3 Carbon storage and its allocation in organs of shrub layer with different stand ages  
for *Eucalyptus urophylla* × *E. grandis*/(t·hm<sup>-2</sup>)

| 林龄<br>Stand<br>age/a | 叶 Leaf                |                     | 枝 Branch              |                     | 根 Root                |                     | 总计 Total              |                     |
|----------------------|-----------------------|---------------------|-----------------------|---------------------|-----------------------|---------------------|-----------------------|---------------------|
|                      | 碳贮量<br>Carbon storage | 百分比<br>Percentage/% | 碳贮量<br>Carbon storage | 百分比<br>Percentage/% | 碳贮量<br>Carbon storage | 百分比<br>Percentage/% | 碳贮量<br>Carbon storage | 百分比<br>Percentage/% |
| 1                    | 0.10ABab              | 34.20               | 0.17BCbc              | 24.96               | 0.14ABab              | 40.84               | 0.41ABbc              | 100                 |
| 2                    | 0.03Bb                | 18.59               | 0.04Cc                | 37.72               | 0.02Bb                | 43.70               | 0.09Bc                | 100                 |
| 3                    | 0.14ABab              | 26.04               | 0.48Aa                | 16.49               | 0.22ABa               | 57.47               | 0.83Aa                | 100                 |
| 5                    | 0.22Aa                | 32.78               | 0.30ABb               | 28.85               | 0.25Aa                | 38.36               | 0.78Aa                | 100                 |
| 8                    | 0.14ABab              | 38.28               | 0.30ABb               | 20.18               | 0.27Aa                | 41.54               | 0.72Aab               | 100                 |

到最大值  $0.27\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。

不同林龄尾巨桉草本层碳储量为:  $5a>1a>3a>8a>2a$ (表 4)。尾巨桉 5a 年间进入生长高峰期且林分密度偏高,草本层碳储量随生物量逐渐增大而增加。发展至 8a 阶段时尾巨桉林过度密闭草本层碳储量又急剧下降。除 8a 阶段地下碳储量大于地上外,其余阶段的均是地上大于地下。

2.2 地被物层碳储量

随着尾巨桉林龄的增加凋落物碳储量逐渐增加(表 4),至 5a 阶段时尾巨桉人工林凋落物的碳储量最高( $3.25\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ ),5a 阶段伴随更新换代能力的急剧下降,凋落物碳储量反而减小。

2.3 尾巨桉人工林土壤碳

尾巨桉人工林不同林龄、不同土壤深度土壤碳

储量和碳含量不同,均随土壤深度的增加极显著降低,且降低程度与土壤深度呈极显著的线性关系(表 5),土壤碳含量  $R^2$  在  $0.666\sim0.858$ ,土壤碳储量  $R^2$  在  $0.748\sim0.969$ ( $Y=aX+b$ ,式中, $Y$  为土壤碳含量或碳贮量, $X$  为土壤层次, $a$  和  $b$  为拟合参数)。由表 6 可知,1a 生尾巨桉 10~20 cm、20~30 cm、30~50 cm 和 50~100 cm 土层有机碳含量分别比 0~10 cm 土层降低 19.40%、42.55%、55.48% 和 64.95%,2a 生尾巨桉则分别相应降低了 40.18%、51.08%、62.94% 和 75.15%,3a 生尾巨桉则分别降低了 43.75%、57.11%、56.08% 和 66.50%,5a 生尾巨桉则分别降低了 37.79%、49.74%、64.54%。不同林龄同一土层的土壤碳含量存在差异,各层平均土壤碳含量的总趋势表现为:  $3a>2a>5a>1a>8a$ ,

表 4 不同林龄尾巨桉人工林草本层及凋落物碳贮量器官分配

Table 4 Carbon storage and its allocation in organs of herb layer and litter with different stand ages for *Eucalyptus urophylla* × *E. grandis*/( $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$ )

| 林龄<br>Stand age/a | 草本地上 Herb ground      |                     | 草本地下 Herb underground |                     | 总计 Total              |                     | 凋落物 Litter            |
|-------------------|-----------------------|---------------------|-----------------------|---------------------|-----------------------|---------------------|-----------------------|
|                   | 碳贮量<br>Carbon storage | 百分比<br>Percentage/% | 碳贮量<br>Carbon storage | 百分比<br>Percentage/% | 碳贮量<br>Carbon storage | 百分比<br>Percentage/% | 碳贮量<br>Carbon storage |
| 1                 | 0.78ABa               | 56.51               | 0.60Aa                | 43.49               | 1.37Aab               | 100                 | 0.92Bc                |
| 2                 | 0.05Cb                | 76.94               | 0.02Bb                | 23.22               | 0.06Bc                | 100                 | 2.79Aab               |
| 3                 | 0.76ABa               | 61.35               | 0.48ABa               | 38.63               | 1.24Aab               | 100                 | 2.98Aa                |
| 5                 | 0.99Aa                | 59.29               | 0.68Aa                | 40.71               | 1.66Aa                | 100                 | 3.25Aa                |
| 8                 | 0.34BCb               | 39.86               | 0.52ABa               | 60.14               | 0.86ABb               | 100                 | 1.66ABbc              |

表 5 不同林龄尾巨桉人工林土壤碳与土壤深度的关系

Table 5 Relationship between soil carbon and soil depth

| 林龄<br>Stand age/a | 土壤碳含量 SOC content/( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) |         | 土壤碳贮量 Carbon stock/( $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$ ) |         |
|-------------------|-----------------------------------------------------|---------|------------------------------------------------------|---------|
|                   | 方程 Equation                                         | $R^2$   | 方程 Equation                                          | $R^2$   |
| 1                 | $Y=13.431-0.104X$                                   | 0.858** | $Y=16.158-0.116X$                                    | 0.845** |
| 2                 | $Y=26.853-0.301X$                                   | 0.826** | $Y=34.299-0.296X$                                    | 0.748** |
| 3                 | $Y=20.032-0.246X$                                   | 0.666** | $Y=1824-220.853X$                                    | 0.813** |
| 5                 | $Y=29.359-0.377X$                                   | 0.790** | $Y=1771-373.072X$                                    | 0.841** |
| 8                 | $Y=15.600-0.1114X$                                  | 0.848** | $Y=2303-479.474X$                                    | 0.969** |

表 6 不同林龄尾巨桉人工林土壤有机碳含量

Table 6 The content of soil organic carbon/( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )

| 土壤层次<br>Soil depth/cm | 林龄 Stand age/a |            |           |             |           |
|-----------------------|----------------|------------|-----------|-------------|-----------|
|                       | 1a             | 2a         | 3a        | 5a          | 8a        |
| 0~10                  | 17.32a(bc)     | 25.96a(ab) | 30.24a(a) | 21.49a(abc) | 13.08a(c) |
| 10~20                 | 13.96ab(a)     | 15.53b(a)  | 17.01b(a) | 13.37b(a)   | 8.98b(a)  |
| 20~30                 | 9.95bc(a)      | 12.70bc(a) | 12.97b(a) | 10.80bc(a)  | 6.91b(a)  |
| 30~50                 | 7.71c(b)       | 9.62bc(ab) | 13.28b(a) | 7.62c(b)    | 6.15b(b)  |
| 50~100                | 6.07c(a)       | 6.45c(a)   | 10.13b(a) | 6.89c(a)    | 5.53b(a)  |
| 平均 Average            | 8.70(b)        | 10.57(ab)  | 13.60(a)  | 9.65(ab)    | 6.89(b)   |

注:括号内为同一层次不同林龄的比较,括号外为同一林龄不同层次的比较;下同。  
Note: Brackets for the same layer of different stand ages, outside brackets for the same stand age of different layers; The same as below.

但仅有 0~10 cm、土层的 3a 与 8a、1a 及 30~50 cm 土层的 3a 与 8a、5a、1a 有显著的差异。尾巨桉同一林龄土壤不同层次、同一层次不同林龄的碳储量除 20~30 cm 土层以 2a 最高外,其余所有变化趋势与碳含量相同(表 7)。

2.4 尾巨桉人工林生态系统的总碳储量组成及其分配

广西桉树人工林生态系统碳储量主要由乔木层、林下植被、枯落物和土壤的碳储量 4 部分组成。由表 8 可知,尾巨桉人工林生态系统总碳储量在 111.84~195.25 t·hm<sup>-2</sup>之间,其变化规律与植被随林龄的增加及土壤的变化趋势均不同,受植被和土壤碳储量的共同制约,变化趋势为 3a>5a>8a>2a>1a,以 3a 最高,之前逐步增加,之后逐渐减少。其中 3a 显著高于 5a,5a 显著高于 1a、8a,2a、8a 差异极小,但均显著高于 1a。

不同林龄阶段尾巨桉森林生态系统碳储量分布格局均表现为土壤>植物>地被物,地下>地上。其中土壤碳储量高达 84.50~162.53 t·hm<sup>-2</sup>,占整个生态系统碳储量的 50.69%~94.82%,地被物占的比例相当小。随着林龄的增加,土壤和地下部

分所占的比例逐渐减少,植物和地上部分逐渐提高,8a 时土壤和地下部分所占比例分别为 50.69%和 48.31%,植物和地下部分所占比例则分别为 56.19%和 43.81%,二者接近平衡状态。

2.5 尾巨桉人工林年净固碳量

表 9 显示,尾巨桉人工林 2a 林年净固碳量最大,3a 略高于 5a 和 8a,差异很小,但均极显著高于 1a(5.81 t·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>)。乔木层的年净固碳量为 3.10~12.58 t·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>,分别占总净固碳量的 53.33%~79.53%,其中 2a 乔木层年净固碳量分别比 1a、3a、5a 和 8a 大 9.48、1.86、3.73 和 3.26 t·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>,分别占总差异的 92.76%、72.90%、80.20%和 79.98%,表明不同发育阶段间年净固碳量差异主要由乔木层年净固碳量差异所引起;凋落物年净固碳量为 0.90~2.42 t·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>,也以 2a 最大,占净固碳量的 9.05%~15.50%;草本层的年净固碳量为 0.72~1.41 t·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>,1a 最大,分别占总净固碳量的 4.49%~24.28%;灌木层的年净固碳量很小,只有 0.26~0.52 t·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>,仅占净固碳量的 1.93~6.89%。

乔木层年净固碳量占林分总净固碳量的比重以

表 7 不同林龄尾巨桉人工林土壤有机碳密度  
Table 7 The density of soil organic carbon/(t·hm<sup>-2</sup>)

| 土壤层次<br>Soil depth/cm | 林龄 Stand age/a |             |            |             |           |
|-----------------------|----------------|-------------|------------|-------------|-----------|
|                       | 1a             | 2a          | 3a         | 5a          | 8a        |
| 0~10                  | 18.31a(b)      | 29.88a(a)   | 34.34a(a)  | 24.40a(ab)  | 14.96a(b) |
| 10~20                 | 16.50ab(a)     | 20.79b(a)   | 19.98b(a)  | 17.28b(a)   | 11.05b(a) |
| 20~30                 | 12.72bc(ab)    | 17.30bc(a)  | 15.94b(ab) | 13.90bc(ab) | 8.47b(b)  |
| 30~50                 | 9.92c(b)       | 13.54bc(ab) | 16.42b(a)  | 10.02c(b)   | 7.98b(b)  |
| 50~100                | 7.73c(b)       | 9.30c(ab)   | 12.65b(a)  | 8.79c(b)    | 7.30b(b)  |

表 8 不同林龄尾巨桉人工林生态系统不同组分碳储量分配  
Table 8 Carbon storage and its allocation among different layers with different stand ages for *Eucalyptus urophylla*×*E. grandis*

|                                                 | 林龄<br>Stand age/a | 植被层 Vegetable layer |                    |                   |                | 凋落物<br>Litter | 土壤<br>Soil | 地上<br>Above ground | 地下<br>Under ground | 总计<br>Total |
|-------------------------------------------------|-------------------|---------------------|--------------------|-------------------|----------------|---------------|------------|--------------------|--------------------|-------------|
|                                                 |                   | 乔木层<br>Tree layer   | 灌木层<br>Shrub layer | 草本层<br>Herb layer | 小计<br>Subtotal |               |            |                    |                    |             |
| 碳储量<br>Carbon storage<br>/(t·hm <sup>-2</sup> ) | 1                 | 3.10De              | 0.40ABbc           | 1.37Aab           | 4.87Ee         | 0.92Bc        | 106.05ABbc | 4.62Ee             | 108.25Aab          | 111.84Bb    |
|                                                 | 2                 | 20.05Cd             | 0.09Bc             | 0.06Bc            | 25.00Dd        | 2.79Aab       | 141.55ABab | 24.78Dd            | 144.19Aa           | 165.00ABa   |
|                                                 | 3                 | 27.67Cc             | 0.83Aa             | 1.24Aab           | 29.74Cc        | 2.98Aa        | 162.53Aa   | 33.47Cc            | 167.88Aa           | 195.25Aa    |
|                                                 | 5                 | 51.63Bb             | 0.78Aa             | 1.66Aa            | 54.07Bb        | 3.25Aa        | 112.26ABbc | 43.33Bb            | 119.00Aab          | 169.57ABa   |
|                                                 | 8                 | 78.96Aa             | 0.72Aab            | 0.86ABb           | 80.54Aa        | 1.66ABbc      | 84.50Bc    | 70.09Aa            | 89.91Ab            | 166.70ABab  |
| 百分比<br>Percentage<br>/%                         | 1                 | 63.64               | 8.21               | 28.15             | 4.36           | 0.82          | 94.82      | 4.09               | 95.91              |             |
|                                                 | 2                 | 99.25               | 0.45               | 0.30              | 12.52          | 1.69          | 85.79      | 17.19              | 87.39              |             |
|                                                 | 3                 | 93.04               | 2.79               | 4.17              | 15.23          | 1.53          | 83.24      | 16.62              | 83.38              |             |
|                                                 | 5                 | 95.49               | 1.44               | 3.08              | 31.88          | 1.91          | 60.22      | 26.69              | 73.31              |             |
|                                                 | 8                 | 98.04               | 0.89               | 1.07              | 48.31          | 1.00          | 50.69      | 43.81              | 56.19              |             |

表 9 不同林龄尾巨桉人工林各组分年净固碳量

Table 9 The annual net carbon fixation of each component in *Eucalyptus urophylla* × *E. grandis*

|                                                                                     | 林龄<br>Stand<br>ages/a | 乔木层 Tree layer |             |           |           |                | 灌木层<br>Shrub layer | 草本层<br>Herb layer | 凋落物<br>Litter | 总计<br>Total |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|----------------|-------------|-----------|-----------|----------------|--------------------|-------------------|---------------|-------------|
|                                                                                     |                       | 叶<br>Leaf      | 枝<br>Branch | 干<br>Stem | 根<br>Root | 小计<br>Subtotal |                    |                   |               |             |
| 年净固碳量<br>Annual net<br>carbon fixation<br>(t · hm <sup>-2</sup> · a <sup>-1</sup> ) | 1                     | 0.69bB         | 0.37cC      | 1.58cB    | 0.45cC    | 3.10cB         | 0.40abA            | 1.41aA            | 0.90bA        | 5.81bB      |
|                                                                                     | 2                     | 1.19aA         | 0.96aA      | 9.28abA   | 1.15aA    | 12.58aA        | 0.31cB             | 0.72aA            | 2.42aA        | 16.03aA     |
|                                                                                     | 3                     | 0.60bBC        | 0.76bAB     | 8.43bA    | 0.93bAB   | 10.72abA       | 0.52aA             | 0.78aA            | 1.47abA       | 13.48aA     |
|                                                                                     | 5                     | 0.56cC         | 0.52bB      | 7.12aA    | 0.64bB    | 8.85bA         | 0.47aA             | 1.04aA            | 1.03bA        | 11.38aA     |
|                                                                                     | 8                     | 0.75bB         | 0.44bBC     | 7.60aA    | 0.53bBC   | 9.32bA         | 0.26cC             | 1.22aA            | 1.17abA       | 11.96aA     |
| 百分比<br>Percentage<br>/%                                                             | 1                     | 22.43          | 11.92       | 51.04     | 14.61     | 53.33          | 6.89               | 24.28             | 15.50         |             |
|                                                                                     | 2                     | 9.46           | 7.64        | 73.74     | 9.16      | 78.48          | 1.93               | 4.49              | 15.10         |             |
|                                                                                     | 3                     | 5.62           | 7.08        | 78.59     | 8.71      | 79.53          | 3.82               | 5.78              | 10.86         |             |
|                                                                                     | 5                     | 6.36           | 5.93        | 80.46     | 7.26      | 77.77          | 4.08               | 9.09              | 9.05          |             |
|                                                                                     | 8                     | 8.00           | 4.73        | 81.53     | 5.74      | 77.96          | 2.13               | 10.16             | 9.74          |             |

1a 最小,其他差别不大,各器官中以干的年净固碳量最大,是乔木层年净固碳量的主体;凋落物在林分总净固碳量的比重差异较小,以 1a 和 2a 最大;灌木层和草本层在林分总净固碳量的比重差异很大,均以 1a 最大。

3 讨 论

森林组成、年龄结构、密度、林分起源以及森林经营活动对生态系统的碳贮量有明显影响<sup>[19-21]</sup>,植被和土壤碳储量是评价人工林生态系统吸收和固定 CO<sub>2</sub> 功能的重要指标<sup>[22]</sup>。本研究发现尾巨桉人工林植被碳储量随林龄的增加而增加,1a、2a、3a、5a 和 8a 分别为 4.87、25.00、29.74、54.07、80.54 t · hm<sup>-2</sup>,虽然平均碳储量(37.98 t · hm<sup>-2</sup>)低于中国森林植被平均碳储量(57.07 t · hm<sup>-2</sup>)<sup>[23]</sup>,但 3a 生的植被碳储量远高于 2.8a 生海南尾细桉(24.03 t · hm<sup>-2</sup>)<sup>[24]</sup>和广西东门林场 3.6a 生尾细桉(20.42 t · hm<sup>-2</sup>)<sup>[25]</sup>。5a 生的植被碳储量接近中国平均水平,8a 生高于中国森林植被平均碳储量和广西大青山马尾松(*Pinus massoniana*, 53.91 t · hm<sup>-2</sup>)<sup>[26]</sup>、低于湖南会同杉木(*Cunninghamia lanceolata*)—火力楠(*Michelia macclurei*)混交林(85.28 t · hm<sup>-2</sup>)<sup>[27]</sup>和四川彭州柳杉(*Cryptomeria fortunei*)林(275.00 t · hm<sup>-2</sup>)<sup>[28]</sup>。尾巨桉植被碳储量主要分布在乔木层,乔木层占植被碳储量 63.64%~99.25%,乔木层中主要分布在树干,树干占乔木层总碳储量 50.90%~87.18%,且树干占总乔木层碳储量的比例随林龄的增加而增加,而根、枝、叶呈下降趋势,表明干材具有明显的碳净积累效应,而根、枝、叶在积累的同时具有较强的碳循环能力。

土壤是一个十分重要的碳库,中国森林土壤平均碳贮量为 193.55 t · hm<sup>-2</sup>,约为植被碳贮量的 3.4 倍<sup>[23]</sup>。本研究得到尾巨桉人工林 1a、2a、3a、5a 和 8a 5 个林龄段 0~100 cm 土层的土壤碳储量分别为 106.05、141.55、162.53、112.26 和 84.50 t · hm<sup>-2</sup>,1a、2a 至 3a 伴随林分的分化、凋落物归还量增加而不断增加,至 5a 阶段,个体和生物量逐渐庞大,吸收和消耗了大量的土壤养分,特别是有机质,凋落物归还量逐步减少,因而土壤碳储量逐渐降低,至 8a 时仅为 84.50 t · hm<sup>-2</sup>,甚至低于 1a。尾巨桉人工林 0~100 cm 土壤平均碳储量为 121.38 t · hm<sup>-2</sup>,是植被碳储量的 3.19 倍,低于中国平均水平。其主要原因为:(1)桂东南桉树人工林主产区地处亚热带,水热条件相对较好,其生产力较高,有利于植被生物量积累,而土壤呼吸速率较高,凋落物分解速率较快,加之植被对土壤养分的大量吸收,造成土壤碳贮量相对较低<sup>[23]</sup>; (2)尾巨桉人工林主要分布于原农业用地和土壤相对较贫瘠的土地(如沙地、旱地),土壤受人为干扰导致碳贮量较低或本身碳贮量较低; (3)造林时炼山清除前茬采伐剩余物和林下植被,也导致土壤碳大量流失。

尾巨桉人工林内生态系统的总碳储量较低,5 个林龄阶段的总碳储量(111.84、165.00、195.25、169.57、166.70 t · hm<sup>-2</sup>)和平均碳储量(161.67 t · hm<sup>-2</sup>)虽然高于海南尾细桉(88.84 t · hm<sup>-2</sup>)<sup>[24]</sup>、广西大青山尾细桉(127.65 t · hm<sup>-2</sup>)<sup>[26]</sup>,但远低于中国森林生态系统的平均碳储量(258.83 t · hm<sup>-2</sup>)<sup>[29]</sup>和广西大青山马尾松—杉木混交林(178.83 t · hm<sup>-2</sup>)、湖南会同杉木—火力楠混交林(186.90 t · hm<sup>-2</sup>)的碳储量。尾巨桉人工林生态系统总碳储

量随着林龄先增加,在 3a 达到最大值,然后开始减少。与尾巨桉人工林植被碳储量随林龄的增加而增加不同,同时与土壤碳储量(3a>2a>5a>1a>8a)的差异很大。虽然总碳储量与土壤碳储量的最高值均出现在 3a,但 5a 和 8a 因旺盛的生物量累积,吸收和消耗了大量的土壤养分,致使土壤碳储量明显降低,不过因植被碳储量的增加额度大于土壤碳储量的减少量,森林生态系统总碳储量略高于 2a,远高于 1a。可见,桉树人工林生态系统总碳储量与其他森林生态系统主要受土壤碳储量影响不同,它受植被和土壤碳储量的双重调控。不同林龄阶段尾巨桉森林生态系统碳储量分布格局均表现为土壤>植物>地被物,地上>地下,随林龄增加,植物和地上部分的碳储量比重逐渐增大。

桉树是速生树种,生产力很高。尾巨桉人工林

年平均净固碳量高达  $11.73 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ,远高于海南尾细桉( $8.43 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ )<sup>[24]</sup>、11 年生杉木林( $3.489 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ )<sup>[30]</sup>、苏南地区 27 年生杉木( $2.36 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ )<sup>[31]</sup>、重庆 46 年生马尾松林( $4.49 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ )<sup>[32]</sup>、18 年生樟树人工林( $4.48 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ )<sup>[33]</sup>、19 年生湿地松人工林( $4.54 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ )<sup>[34]</sup>和 32 年生楠木人工林( $4.25 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ )<sup>[35]</sup>。尾巨桉不同林龄阶段的净固碳量不同,其中以 2a 净固碳量最高,即使在 8a 时其净固碳量也高达  $11.96 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ,且与 5a 持平,表明尾巨桉人工林固碳能力强,是较好的碳汇林业树种,若能构建以桉树为建群种的复式镶嵌群落,提高尾巨桉人工林的其他生态功能和环境改善能力,降低他感效应、地力消耗强等负面作用,在中国东南沿海地区可以大面积发展。

## 参考文献:

- [1] MARLAND E, MARLAND G. The treatment of long-lived, carbon containing products in inventories of carbon dioxide emissions to the atmosphere[J]. *Environmental Science & Policy*, 2003, **6**(2): 139–152.
- [2] WEST T O, MARLAND G. A synthesis of carbon sequestration, carbon emissions and net carbon flux in agriculture; comparing tillage practices in the United States[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2002, **91**(1/3): 217–232.
- [3] 唐红侠, 韩 丹, 赵由才, 等. 农林业温室气体减排与控制技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2009.
- [4] HOU ZH H(侯振宏), ZHANG X Q(张小全), XU D Y(徐德应), et al. Study on biomass and productivity of Chinese fir plantation[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*(中国农学通报), 2009, **25**(5): 97–103(in Chinese).
- [5] TAO Y H(陶玉华), FENG J CH(冯金朝), MA L Y(马麟英), et al. Carbon storage and its characteristics of dynamic change of Masson pine, Fir and *Eucalyptus* plantation in Guangxi Luocheng[J]. *Ecology and Environmental Sciences*(生态环境学报), 2011, **20**(11): 1 608–1 613(in Chinese).
- [6] FENG R F(冯瑞芳), YANG W Q(杨万勤), ZHANG J(张 健). Artificial forest management for global change mitigation[J]. *Acta Ecological Sinica*(生态学报), 2006, **26**(1): 3 870–3 877(in Chinese).
- [7] CHEN X G(陈先刚), ZHANG Y P(张一平), ZHAN H(詹 卉). Biomass carbon sequestration potential of trees under the grain for green programs in Yunnan Province[J]. *Scientia Silvae Sinicae*(林业科学), 2008, **44**(5): 24–30(in Chinese).
- [8] Department of Forest Resources Management, SFA(国家林业局森林资源管理司). China's forest resources status and dynamic change-based on analysis of the seucnth national forest resource inrentory results[J]. *Forestry Econoics*(林业经济), 2010, **32**(2): 66–72(in Chinese).
- [9] FANG J Y(方精云), CHEN A P(陈安平), et al. Estimating biomass carbon of Chinese forests; supplementary notes on report published in Science(291:2320–2322) by Fang et al(2001)[J]. *Acta Phytoecologica Sinica*(植物生态学报), 2002, **26**(2): 243–249(in Chinese).
- [10] MA Z Q(马泽清), LIU Q J(刘琪璟), XU W J(徐雯佳), et al. Carbon storage of artificial forest in Qianyanzhou, Jiangxi Province[J]. *Scientia Silvae Sinicae*(林业科学), 2007, **43**(11): 1–7(in Chinese).
- [11] DUAN A G(段爱国), ZHANG J G(张建国), HE C Y(何彩云), et al. Study on the change laws of biomass of Chinese Fir plantations[J]. *Forest Research*(林业科学研究), 2005, **18**(2): 125–132(in Chinese).
- [12] QIN W M(秦武明), HE B(何 斌), YU H G(余浩光), et al. Biomass productivity of Acaciamangium plantations of different age classes[J]. *Journal of Northeast Forestry University*(东北林业大学学报), 2007, **35**(1): 22–24(in Chinese).
- [13] DONG J R. Dynamics of Carbon Storage in the Woody Biomass of Northern Forests[M]. Boston: Boston University, 2002.
- [14] Eucalyptus project China Academy of Engineering Group. 2009. scientific planting tail fine eucalyptus and environmental protection(a) [EB/OL]. (2010-10-05). <http://www.gdly.com/mk-direct.php?id=4926>.
- [15] CHA ZH Z(茶正早), LI SH C(黎仕聪), LIN ZH M(林钊沐), et al. Study of Hainan Island eucalyptus forest soil fertility[J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*(热带作物学报), 1999, **20**(2): 37–43(in Chinese).

- [16] CHEN Q B(陈秋波). Progress in the study of biological diversity of *Eucalyptus* plantation[J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*(热带作物学报), 2001, **22**(4): 82—90(in Chinese).
- [17] DU H(杜 虎), ZENG F P(曾馥平), WANG K L(王克林), *et al.* Dynamics of biomass and productivity of three major plantation types in Southern China[J]. *Acta Ecologica Sinica*(生态学报), 2004, **34**(10): 2 712—2 724(in Chinese).
- [18] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 1988: 33—36.
- [19] XU G L(徐桂林), FANG X(方 晰), TIAN D L(田大伦), *et al.* Soil organic carbon: distribution and storage with five regeneration patterns in *Cunninghamia lanceolata* forests[J]. *Journal of Zhejiang Forestry College*(浙江林学院学报), 2009, **26**(3): 333—340(in Chinese).
- [20] LEVINE J S W R, COFER III D R, CAHOON J E. L. Biomass burning: a driver for global change[J]. *Environmental Science Technology*, 1995, **120**: 120—125.
- [21] SCHULP C J E, NABUURS G J, VERBURG P H, *et al.* Effect of tree species on carbon stocks in forest floor and mineral soil and implications for soil carbon inventories[J]. *Forest Ecology and Management*, 2008, **256**: 482—490.
- [22] WU P F(吴鹏飞), ZHU B(朱 波), LIU SH R(刘世荣), *et al.* Carbon storage and its allocation in mixed alder-cypress plantations at different age stages[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*(应用生态学报), 2008, **19**(7): 1 419—1 424(in Chinese).
- [23] ZHOU Y R(周玉荣), YU ZH L(于振良), ZHAO SH D(赵士洞). Carbon storage and budget of major Chinese forest types[J]. *Acta Phytocologica Sinica*(植物生态学报), 2000, **24**(5): 518—522(in Chinese).
- [24] SHI ZH J(时忠杰), XU D P(徐大平), GAO J X(高吉喜), *et al.* Carbon storage and its distribution of *Eucalyptus urophylla* × *E. grandis* plantations in Hainan Island, Southern China[J]. *Scientia Silvae Sinicae*(林业科学), 2011, **47**(10): 21—28(in Chinese).
- [25] LIANG H W(梁宏温), WEN Y G(温远光), WEN L H(温琳华), *et al.* Effects of continuous cropping on the carbon storage of *Eucalyptus urophylla* × *E. grandis* short-rotations plantations[J]. *Acta Ecologica Sinica*(生态学报), 2009, **29**(8): 4 242—4 250(in Chinese).
- [26] KANG B(康 冰), LIU SH R(刘世荣), ZHANG G J(张广军), *et al.* Carbon accumulation and distribution in *Pinus massoniana* and *Cunninghamia lanceolata* mixed forest ecosystem in Daqingshan, Guangxi of China[J]. *Acta Ecologica Sinica*(生态学报), 2006, **26**(5): 1 320—1 329(in Chinese).
- [27] HUANG Y(黄 宇), FENG Z W(冯宗炜), WANG S L(汪思龙), *et al.* C and N stocks under three plantation forest ecosystems of Chinese-fir, *Michelia macclurei* and their mixture[J]. *Acta Ecologica Sinica*(生态学报), 2005, **25**(12): 3 146—3 154(in Chinese).
- [28] DUAN W X(段文霞), ZHU B(朱 波), LIU R(刘 锐), *et al.* Biomass and soil carbon dynamics in *Cryptomeria formosensis* plantations[J]. *Journal of Beijing Forestry University*(北京林业大学学报), 2007, **29**(2): 55—59(in Chinese).
- [29] WEI H D(尉海东), MA Q X(马祥庆). A study on the carbon storage and distribution in Chinese fir plantation ecosystem of different growing stages in Mid-subtropical Zone[J]. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*(江西农业大学学报), 2006, **28**(2): 239—243, 267(in Chinese).
- [30] FANG X(方 晰), TIAN D L(田大伦), XIANG W H(项文化). Density, storage and distribution of carbon in Chinese fir plantation at fast growing stage[J]. *Scientia Silvae Sinicae*(林业科学), 2002, **38**(3): 14—20(in Chinese).
- [31] RUAN H H(阮宏华), JIANG ZH L(姜志林), GAO S M(高苏铭). Preliminary studies of carbon cycling in three types of forests in the hilly regions of southern Jiangsu Province[J]. *Chinese Journal of Ecology*(生态学杂志), 1997, **16**(6): 17—21(in Chinese).
- [32] ZHANG ZH J(张治军), ZHANG X Q(张小全), WANG Y H(王彦辉), *et al.* Carbon storage and distribution of *Pinus massoniana* forest ecosystem in Tieshanping of Chongqing[J]. *Scientia Silvae Sinicae*(林业科学), 2009, **45**(5): 49—53(in Chinese).
- [33] LEI P F(雷丕锋), XIANG W H(项文化), TIAN D L(田大伦), *et al.* Carbon storage and distribution in *Cinnamomum camphor* plant[J]. *Chinese Journal of Ecology*(生态学杂志), 2004, **23**(4): 25—30(in Chinese).
- [34] TU J(涂 洁), LIU J Q(刘琪璟). Carbon storage and distribution of the *Pinus elliottii* forest ecosystem in subtropical red soil hilly area[J]. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*(江西农业大学学报), 2009, **29**(1): 48—54(in Chinese).
- [35] MA M D(马明东), JIANG H(江 洪), LUO CH D(罗承德), *et al.* Preliminary study of carbon density, net production and carbon stock in natural spruce forests of Northwest subalpine Sichuan, China[J]. *Acta Phytocologica Sinica*(植物生态学报), 2007, **31**(2): 305—312(in Chinese).