

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

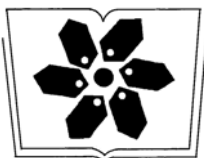
Acta Ecologica Sinica



第34卷 第10期 Vol.34 No.10 **2014**

中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 34 卷 第 10 期 2014 年 5 月 (半月刊)

目 次

前沿理论与学科综述

- 景观可持续性与景观可持续性科学..... 赵文武,房学宁 (2453)
- 生态系统服务付费的诊断框架及案例剖析 朱文博,王 阳,李双成 (2460)
- 湿地植物根表铁膜研究进展..... 刘春英,陈春丽,弓晓峰,等 (2470)
- 水生生态环境中捕食信息素的生态学效应..... 覃光球,卢豪良,唐振柱,等 (2481)
- 脊椎动物传播植物肉质果中的次生物质及其生态作用 潘 扬,罗 芳,鲁长虎 (2490)

个体与基础生态

- 中亚热带天然林土壤 CH_4 吸收速率对模拟 N 沉降的响应 陈朝琪,杨智杰,刘小飞,等 (2498)
- 塔里木盆地南缘早生芦苇生态特征与水盐因子关系..... 贡 璐,朱美玲,塔西甫拉提·特依拜,等 (2509)
- 黄刺玫叶片光合生理参数的土壤水分阈值响应及其生产力分级..... 张淑勇,夏江宝,张光灿,等 (2519)
- 亚热带杉木和米老排人工林土壤呼吸对凋落物去除和交换的响应..... 余再鹏,万晓华,胡振宏,等 (2529)
- 施钾提高蚜害诱导的小麦茉莉酸含量和叶片相关防御酶活性..... 王 伟,张月玲,苏建伟,等 (2539)
- 高浓度 O_3 及太阳辐射减弱对冬小麦 PS II 光合活性及光能耗散的影响 孙 健,郑有飞,吴荣军,等 (2548)
- 蜡样芽孢杆菌 B3-7 在大田小麦根部的定殖动态及其对小麦纹枯病的防治效果 黄秋斌,张 颖,刘凤英,等 (2559)
- 有限供水下冬小麦全程耗水特征定量研究..... 张兴娟,薛绪掌,郭文忠,等 (2567)
- 抗真菌转基因水稻生态适合度评价..... 李 伟,郭建夫,袁红旭,等 (2581)
- 花生叶片蛋白组对 UV-B 辐射增强的响应 杜照奎,李钧敏,钟章成,等 (2589)
- 南海南部悬浮颗粒物脂肪酸组成..... 刘华雪,柯常亮,李纯厚,等 (2599)
- 年龄、集群、生境及天气对鄱阳湖白鹤越冬期日间行为模式的影响..... 袁芳凯,李言阔,李凤山,等 (2608)
- [树]麻雀羽再生的能量预算和水代谢散热调节 杨志宏,吴庆明,杨 渺,等 (2617)
- 低剂量杀虫剂对星豹蛛捕食效应的影响及其机理 李 锐,李 娜,刘 佳,等 (2629)
- 空心莲子草叶甲对越冬保护的响应与控害效能..... 刘雨芳,王秀秀,李 菲,等 (2638)
- ### 种群、群落和生态系统
- 气候变化对鄱阳湖白鹤越冬种群数量变化的影响..... 李言阔,钱法文,单继红,等 (2645)
- 不同退耕年限下菜子湖湿地土壤磷素组分特征变化..... 刘文静,张平究,董国政,等 (2654)

查干湖湿地浮游植物与环境因子关系的多元分析	李然然,章光新,张 蕾 (2663)
闽江河口区淡水和半咸水潮汐沼泽湿地土壤产甲烷菌多样性.....	曾志华,杨民和,余晨兴,等 (2674)
环境及遗传背景对延河流域植物叶片和细根功能性状变异的影响.....	郑 颖,温仲明,宋 光,等 (2682)
衡阳紫色土丘陵坡地植被恢复阶段土壤特性的演变.....	杨 宁,邹冬生,杨满元,等 (2693)
海平面上升影响下广西钦州湾红树林脆弱性评价.....	李莎莎,孟宪伟,葛振鸣,等 (2702)
中国南方3种主要人工林生物量和生产力的动态变化.....	杜 虎,曾馥平,王克林,等 (2712)
杉木人工林土壤真菌遗传多样性.....	何苑擘,周国英,王圣洁,等 (2725)
科尔沁固定沙地植被特征对降雨变化的响应.....	张腊梅,刘新平,赵学勇,等 (2737)
黄土丘陵区退耕还林地刺槐人工林碳储量及分配规律.....	申家朋,张文辉 (2746)
景观、区域和全球生态	
南亚热带森林演替过程中小气候的改变及对气候变化的响应.....	刘效东,周国逸,陈修治,等 (2755)
黄淮海平原典型站点冬小麦生育阶段的干旱特征及气候趋势的影响.....	徐建文,居 辉,刘 勤,等 (2765)
资源与产业生态	
基于GIS的山西省矿产资源规划环境影响评价	刘 伟,杜培军,李永峰 (2775)
基于效益分摊的水电水足迹计算方法——以密云水库为例	赵丹丹,刘俊国,赵 旭 (2787)
学术信息与动态	
全球土地计划第二次开放科学大会(GLP 2 nd Open Science Meeting)会议述评	段宝玲,卜玉山 (2796)
期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 348 * zh * P * ¥ 90.00 * 1510 * 36 * 2014-05	



封面图说: 鄱阳湖越冬的白鹤群——白鹤为国家一级保护动物,世界上白鹤东部种群的迁徙路线是从俄罗斯西伯利亚的雅库特,向南迁飞 5100km 到中国长江下游的鄱阳湖越冬,其中途经俄罗斯的雅纳河、印迪吉尔卡河和科雷马河流域,进入中国后主要停歇地有扎龙、林甸、莫莫格以及双台河口、滦河口、黄河三角洲和升金湖等地。多年的监测表明,世界 90% 以上的白鹤种群都在鄱阳湖越冬。越冬初期和末期是白鹤补充能量的关键阶段,因此,研究鄱阳湖国家级自然保护区越冬白鹤种群数量和当地气候变化的相关性具有重要意义。

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

DOI: 10.5846/stxb201212121788

杜虎, 曾馥平, 王克林, 宋同清, 温远光, 李春干, 彭晚霞, 梁宏温, 朱宏光, 曾昭霞. 中国南方 3 种主要人工林生物量和生产力的动态变化. 生态学报, 2014, 34(10): 2712-2724.

Du H, Zeng F P, Wang K L, Song T Q, Wen Y G, Li C G, Peng W X, Liang H W, Zhu H G, Zeng Z X. Dynamics of biomass and productivity of three major plantation types in southern China. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(10): 2712-2724.

中国南方 3 种主要人工林生物量和生产力的动态变化

杜 虎^{1,2,5}, 曾馥平^{1,2}, 王克林^{1,2}, 宋同清^{1,2,*}, 温远光³, 李春干⁴,
彭晚霞^{1,2}, 梁宏温³, 朱宏光³, 曾昭霞^{1,2}

(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, 环江 547100; 3. 广西大学林学院, 南宁 530004;

4. 广西林业勘测设计院, 南宁 530011; 5. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 基于中国南方杉木、马尾松、桉树 3 种主要人工林的幼龄林、中龄林、近熟林、成熟林、过熟林 5 个不同年龄各 3 块 1000 m² 样地 (共计 45 块) 的建立和调查, 采用样木回归分析法 (乔木层) 和样方收获法 (灌木层、草本层、地上凋落物) 获取不同林型不同林龄径级样木和其它基本数据, 探讨了 3 种人工林各组分各层次林分生物量和生产力的分配特征及随林龄的变化规律, 结果表明, 林分生物量和生产力与林龄密切相关, 增长模型的拟合度均较高, 相关显著; 杉木、马尾松、桉树人工林的生物量随林龄的增长呈增加趋势, 成熟林的生物量分别为 192.30、191.53、105.77 Mg/hm², 其中活体植物分别占 95.76%—98.39%、75.01%—99.14%、85.60%—97.61%; 生物量的层次分配乔木层占绝对优势, 并随年龄而增加, 其它层次所占比例较小, 总体趋势为凋落物 > 草本层 > 灌木层; 乔木层的器官分配以干所占比例最高, 杉木、马尾松、桉树分别占 54.89%—75.97%、49.93%—83.10%、51.07%—98.48%, 随年龄的增加而增加, 根的比例次之, 枝叶所占比例较小, 随林龄而下降; 灌木层器官分配以枝的相对生物量较大, 草本层的地上和地下分配规律不明显; 与其它森林类型相比, 杉木和马尾松的生物量处于中上游水平, 桉树的生物量较低, 但 3 种人工林的生产力均很高, 分别为 12.37、8.98、21.10 Mg hm⁻² a⁻¹, 均是光合效率高、固碳潜力大的中国南方速生丰产优良造林树种。

关键词: 生物量; 生产力; 林龄; 人工林; 中国南方

Dynamics of biomass and productivity of three major plantation types in southern China

DU Hu^{1,2,5}, ZENG Fuping^{1,2}, WANG Kelin^{1,2}, SONG Tongqing^{1,2,*}, WEN Yuanguang³, LI Chungan⁴, PENG Wanxia^{1,2}, LIANG Hongwen³, ZHU Hongguang³, ZENG Zhaoxia^{1,2}

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 547100, China

3 Forestry College, Guangxi University, Nanning 530004, China

4 Guangxi Forest Inventory & Planning Institute, Nanning 530011, China

5 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: Forests form the main body of terrestrial ecosystems and play an important role in mitigating global climate change through carbon dioxide sequestration in forest biomass. Biomass and productivity are essential characteristics of forest

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项 (XDA05050205, XDA05070404); 中国科学院西部行动计划项目 (KZCX2-XB3-10); 国家科技支撑计划 (2011BAC09B02); 国家自然科学基金项目 (31370623, 31370485, U1033004); 中国科学院“西部之光”人才培养计划

收稿日期: 2012-12-12; 修订日期: 2014-04-04

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: songtongq@163.com

ecosystem structure and function, and knowledge of both are essential for the study of carbon sink function and carbon sequestration. *Cunninghamia lanceolata*, *Pinus massoniana*, and *Eucalyptus urophylla* × *Eucalyptus grandis* are the primary plantation trees used in southern China, accounting for 90% of the plantation area in ten southern provinces. However, few studies have analyzed the dynamics of forest biomass and productivity of these forest types. Forty-five 20 m × 50 m research plots were established and analyzed using three dominant plantation species (*C. lanceolata*, *P. massoniana*, *E. urophylla* × *E. grandis*) in southern China with the goal of improving our understanding the vertical structure of each community, the distribution of biomass to the various organs, and gaining a better understanding of forest biomass and productivity of differently aged stands. Each plantation type was studied using five age classes: young, middle-aged, near-mature, mature, and over-mature forest, with three replicates of each. Regression models relating tree biomass to diameter at breast height (DBH 1.3 m) were developed to estimate tree biomass. Other biomass components were sampled in quadrats within the same forty-five research plots: shrubs (three 4 m² quadrats), herbs (three 1 m² quadrats), and litterfall (three 1 m² quadrats). This method was used for estimating biomass, productivity, and biomass allocation rates to various organs in the three main plantations types; we also analyzed the relationships between stand age and biomass productivity to determine the biomass allocation rates to various organs. Results showed that a significant relationship exists between stand biomass and stand productivity of the three main plantation types as they relate to stand age, with a high degree of fitting in growth models. The total biomass of *C. lanceolata*, *P. massoniana*, and *E. urophylla* × *E. grandis* plantations increased with stand age and the biomass of mature forest was 192.30, 191.53, 105.77 Mg/ha, respectively. Living biomass made up 95.76%—98.39%, 75.01%—99.14%, 85.60%—97.61% of these three plantation types, respectively. Most of the biomass of the three main plantation types was concentrated in the tree layer and biomass increased with stand age for all three types. The biomass of other layers accounted for only a small percentage of total biomass, and generally litterfall > herb > shrub biomass. The trunk biomass occupied the greatest proportion of the tree layer; for *C. lanceolata*, *P. massoniana*, and *E. urophylla* × *E. grandis* trunk biomass made up 54.89%—75.97%, 49.93%—83.10%, and 51.07%—98.48% of total biomass, respectively, and trunk biomass increased with stand age. Root biomass made up the second largest percent of tree biomass and the percentages of both branch and leaf biomass were lower than root biomass and decreased with stand age. Shrub branches made up the majority of shrub biomass; both the above- and belowground biomass allocation of herbs did not exhibit an obvious trend or pattern of change. Compared with other forest types, the total biomass of *C. lanceolata* plantations and *P. massoniana* plantations were both greater than most and the total biomass of *E. urophylla* × *E. grandis* was lower than most, but the level of productivity of all three plantation types was high, or 12.37, 8.98, 21.10 Mg hm⁻² a⁻¹, respectively. All three are fast growing forest tree species with higher photosynthetic efficiency and potential carbon sequestration than other forest plantation species in South China.

Key Words: biomass; productivity; stand ages; plantation; Southern China

森林生态系统作为陆地生态系统的主体,在维护全球气候系统、调节全球碳平衡、减缓大气温室气体浓度上升等方面具有不可替代的作用^[1]。森林生物量和生产力特征是森林生态系统结构和功能的最基本特征之一,生态系统的能量和营养循环的研究首先依赖于生物量和生产力的数据,因此,世界各国广泛开展了对森林生物量的监测。我国在 20 世纪 70 年末期至 90 年代中期掀起了一股森林生物量研究的热潮,许多学者同时发表了有关森林生物量研究报告^[2-4],但在 90 年代中期之后,因森林生物量野外调查工作的艰难,其研究工作有所停滞,近年来,

大气 CO₂ 等温室气体浓度的持续增加加剧了一系列生态环境问题,CO₂ 减排的呼声日益高涨,森林生态系统是世界上除海洋之外最大的碳库,其生物量的研究在全球碳循环中作用关键,获取准确的森林生物量是研究森林生态系统结构与功能的基础,对深入研究森林生态系统生物地球化学循环、碳汇功能、评价人工林生态系统生产力与环境因子之间的关系具有重要的科学价值^[5]。

在过去的 30 年里,随着中国一系列重点林业工程的实施,如退耕还林工程、三北防护林工程、长江流域防护林体系建设工程等,中国人工面积已接近

全球人工林面积的 3 成^[6]。但人均森林资源占有量远低于世界平均水平,现有人工林已占据了宜林荒山荒地优越的地段,在未来的人工林造林中,数量和立地质量上的增长潜力甚为有限,且人工林地力衰退问题严重^[7-8],因此中国现有人工林生物量监测和生产潜力评估问题已成为事关林业发展战略的重大问题。杉木、马尾松和桉树构成了中国南方人工林的主体,南方 10 省区杉木、马尾松和桉树林分别占该区域全部人工林的近 30%、40% 和 20%^[9],广西的第 8 次森林资源清查资料统计表明,杉木、马尾松和桉树林分别占广西用材林面积的 22.49%、42.34% 和 29.02%,蓄积的 30.78%、47.56% 和 21.59%。有关中国南方 3 种主要人工林生物量和生产力研究的报告较多,但这些研究主要针对某一林分的某一生长阶段、地上乔木层及以森林资源清查资料为对象,缺乏不同生长发育阶段下、不同层次、不同器官生物量的组成及分布规律研究,更加缺乏生物量和生产力的年龄格局在不同森林类型之间的比较分析。本文基于 2011 年底广西杉木、马尾松、桉树 3 个主要人工林 5 个不同林龄阶段(幼龄林、近熟林、中龄林、成熟林、过熟林)生物量的实测调查,探讨了 3 种人工林各层次、各器官的生物量组成、分配、林分生产力及随年龄的变化规律,为制定南方人工林长期林地生产力的维持与有效调控措施、并为该区域碳汇林的选择提供科学依据。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于广西壮族自治区,经纬度范围为 104°26′—112°04′E、20°54′—26°24′N,总面积 23.67 万 km²,处于云贵高原东南边缘,两广丘陵的西部,南边朝向北部湾,整个地势为四周多山地与高原,而中部与南部多为平地,地貌为山地丘陵性盆地地貌,

属于亚热带季风气候区,全区各地极端最高气温为 33.7—42.5 ℃,极端最低气温为 -8.4—2.9 ℃,年平均气温在 16.5—23.1 ℃ 之间,各地年降水量均在 1070 mm 以上,大部分地区为 1500—2000 mm,4—9 月为雨季,其降水量占全年降水量的 70%—85%。研究区植被类型多样,植物物种丰富,以常绿树种为主,植被区域主要为亚热带常绿阔叶林区域。广西全区森林面积达到 1252.50 万 hm²,森林覆盖率 52.71%,活立木总蓄积量为 5.11 亿 m³,其面积和蓄积分别占全国的 6.41% 和 3.42%。全区森林资源主要包括杉类、松类、柏类、桉类、栲类、青冈类、软阔类(火力楠、枫香、桦木、拟赤杨等)、经济林(荔枝、龙眼、柑橘、八角、板栗、李等)、竹类、城市森林、石山灌木林等 11 种类型,其中杉木、马尾松、桉树 3 种林型分别占广西区用材林总面积的 94.43%,蓄积的 99.93%。因此,选择这 3 种林型作为人工林研究对象。

1.2 样方选择与建立

参照《IPCC 优良做法指南》对系统随机抽样的建议和广西杉木、马尾松、桉树人工林的分布特征,基于广西第 8 次森林资源清查数据和广西用材林龄、林组划分标准(表 1),计算 3 种人工林幼龄林、近熟林、中龄林、成熟林、过熟林 5 个不同林龄在广西各县(市)的面积、蓄积综合权重,选择权重最大的县(市)为 5 个不同林龄杉木、马尾松、桉树人工林样点,每个样点建立同一林型、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 1000 m² (50 m × 20 m),每种人工林 15 个样地,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,对样方内胸径(DBH) ≥ 2 cm 林木的胸径、树高、冠幅和坐标进行每木调查。样地分布及概况见图 1 和表 2。

表 1 3 种人工林的林龄划分

Table 1 Division of stand age for three plantations

森林类型 Forest type	林龄 Stand age/a				
	幼龄林(A) Young forest	中龄林(B) Middle-aged forest	近成熟林(C) Near mature forest	成熟林(D) Mature forest	过成熟林(E) Over mature forest
杉木 <i>Cunninghamia lanceolata</i>	≤10	11—20	21—25	26—35	≥36
马尾松 <i>Pinus massoniana</i>	≤10	11—20	21—30	31—50	≥51
桉树 <i>Eucalyptus urophylla</i> × <i>E. grandis</i>	1	2	3	4—5	≥6

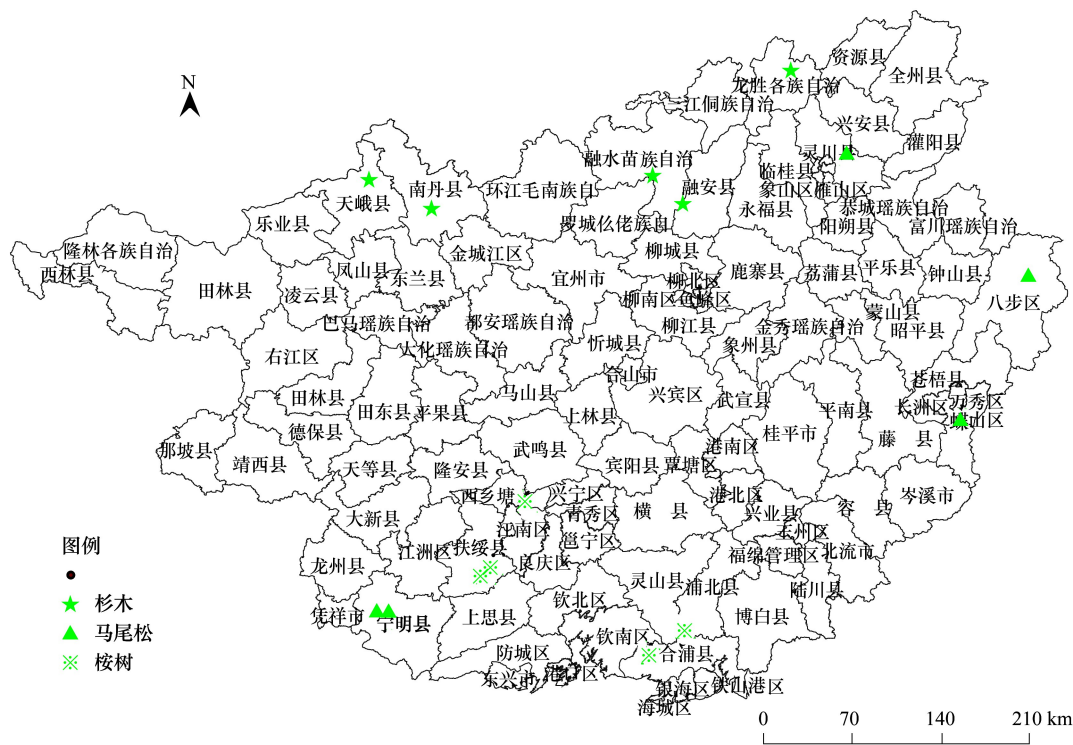


图 1 研究区样地分布图
Fig.1 Map of plots in study area

表 2 3 种人工林不同林龄的样地分布及概况

Table 2 Sample plots distribution and general situation of three plantations at different stand ages								
林型 Forest type	林龄 Stand age	样点 Sample point	经度 Longitude	纬度 Latitude	面积/hm ² Area	蓄积/m ³ Volume	年平均温度/℃ MAT	年均降雨量/mm MAR
杉木	≤10 A	天峨	107°3′	25°11′	43880.4	3008792	20.0	1370
	11—20 B	南丹	107°29′	24°59′	59003.8	3395302	16.9	1498
	21—25 C	融水	109°17′	25°5′	170708.2	13583859	19.4	1824
	26—35 D	融水	109°4′	25°13′	170708.2	13583859	19.4	1824
	≥36 E	龙胜	110°3′	25°54′	37957.3	3597775	18.1	1544
马尾松	≤10 A	灵川	110°27′	25°21′	28188.8	2340150	18.0	1915
	11—20 B	八步	111°17′	23°26′	54982.2	3903713	19.9	1535
	21—25 C	蝶山	111°18′	23°27′	7632.2	345861	21.0	1503
	26—35 D	宁明	107°7′	22°1′	103286.7	7607349	22.1	1200
	≥36 E	宁明	107°8′	22°2′	103286.7	7607349	22.1	1200
桉树	≤10 A	扶绥	107°55′	22°25′	26403.2	873522	21.7	1200
	11—20 B	武鸣	108°10′	22°52′	58461.3	2535523	21.8	1350
	21—25 C	浦北	109°17′	21°58′	37213	1504788	21.9	1671
	26—35 D	合浦	109°3′	21°47′	61225.8	3327748	23.5	1867
	≥36 E	扶绥	107°52′	22° 21′	26403.2	873522	21.7	1200

A:幼龄林;B:中龄林;C:近熟林;D:成熟林;E:过熟林

1.3 生物量获取

1.3.1 乔木层

在每木调查的基础上,充分考虑径级分布,遵循中央径级数量多、两端径级数量少的原则,在样地外

选择不同林龄和胸径的杉木 15 株、马尾松 21 株、桉树 18 株作为样木,进行生物量的测定。测定其基径、胸径、树高和冠幅并按 2 m 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,称鲜重;然后对各部分器官分别取样 500 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)的干重和总干重建立各器官及总生物量与样木胸径(D)的幂回归方程($W=aD^b$)、多项式方程($W=a+bD+cD^2$)或指数方程($W=ae^{bD}$)。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,并由此获得乔木层的总生物量。

1.3.2 灌木层、草本层和地上凋落物

按“品”字型在样地内设置 3 个 2 m×2 m 的小样方,调查所有灌木种类、株丛数、高度、基径、覆盖度,在每个 2 m×2 m 的小样方内各取 1 个 1 m×1 m 的小样框,调查草本种类、株丛数、平均高度、覆盖度。为了不破坏复查样地,在相距各样框 5 m 的范围内选择 1 个与灌木调查样框植被类型、立地条件等基本一致的样框按全收获法收获样框内所有灌木的枝、叶、根,测定各器官生物量,并以 3 个样框的平均值来推算样地中灌木层的总生物量。按同样方法在 1 m×1 m 小样框内获取草本层地上地下生物量、凋落物生物量。

1.4 林分生产力计算

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(ΔP_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(ΔL_n)、被动物吃掉的损失量(ΔG_n)3 个分量之和,即 $\Delta P_m = Y_n + \Delta L_n + \Delta G_n$ 。但是,测定 ΔG_n 非常困难,通常多以平均净生产量 Q_w 衡量林分生产力的高低。各林分乔木层中树干、树

枝和树根的平均净生产量是按各器官生物量被乔木的年龄所除之商,叶的平均净生产量是按叶在树枝上着生的时间所除而得,根据树木生长情况杉木、马尾松按 4a、桉树按 2a 时间计算叶片平均净生产量,灌木按其优势种和次优势种的数量综合考虑平均年龄 10a 估算灌木平均净生产量,草本、地被物取 4 年计算其平均净生产量^[10]。

1.5 数据处理

所有数据及多重比较分析、回归方程模型建立均在 Excel2003 和 SPSS16.0 中进行处理。

2 结果与分析

2.1 乔木层生物量回归模型的建立

大量的森林群落生物量研究表明乔木各器官及总生物量与测树因子间普遍存在着相关关系,这种相关关系可以用数学模型进行拟合,其表达式为: $W=ax^b$, 式中, W 为各器官的生物量。自变量 x 可选用胸径(D)、树高(H)或胸径平方乘以树高(D^2H)等测树因子, a 、 b 为方程中的待估参数。该方程能较真实地反应树木生物量随胸径(D)和树高(H)的变化趋势^[11-14]。因树高估测误差较大,本研究生物量预测方程选择以树木胸径(D)为单变量的、相关系数最大的回归模型,除了杉树叶、尾巨桉叶生物量的回归模型分别为 $W_L = 1.119 + 0.019x + 0.014x^2$, $W_L = 1.182e^{0.003D^2}$ 外,其余器官的回归模型均为 $W = aD^b$ (表 3),经统计学检验各器官干、枝、叶、根和总生物量数学模型的决定系数在 0.732—0.993 之间,经 t 检验均达到极显著水平($P < 0.01$),其中 3 种人工林的总生物量数学模型的决定系数非常高,为 0.977—0.993,表示模型可以对 3 种人工林的生物量进行估测。

表 3 3 种人工林生物量估算模型

Table 3 Regression models for three plantations

器官 Organ	杉木	马尾松	桉树
叶 Leaf	$W_L = 1.119 + 0.019x + 0.014x^2$ ($R^2 = 0.857^{**}$)	$W_L = 0.332D^{0.855}$ ($R^2 = 0.732^{**}$)	$W_L = 1.182e^{0.003D^2}$ ($R^2 = 0.762^{**}$)
枝 Branch	$W_B = 0.025D^{2.171}$ ($R^2 = 0.877^{**}$)	$W_B = 0.07D^{1.920}$ ($R^2 = 0.953^{**}$)	$W_B = 0.042D^{1.835}$ ($R^2 = 0.894^{**}$)
干 Stem	$W_B = 0.026D^{2.720}$ ($R^2 = 0.989^{**}$)	$W_S = 0.172D^{2.203}$ ($R^2 = 0.989^{**}$)	$W_B = 0.028D^{2.996}$ ($R^2 = 0.978^{**}$)
根 Root	$W_R = 0.01D^{2.469}$ ($R^2 = 0.904^{**}$)	$W_R = 0.023D^{2.241}$ ($R^2 = 0.984^{**}$)	$W_R = 0.06D^{1.771}$ ($R^2 = 0.851^{**}$)
全株 Total single-tree	$W_T = 0.096D^{2.410}$ ($R^2 = 0.993^{**}$)	$W_T = 0.428D^{2.009}$ ($R^2 = 0.991^{**}$)	$W_T = 0.138D^{2.436}$ ($R^2 = 0.977^{**}$)

** $P < 0.01$

2.2 不同林龄人工林乔木层生物量及其分配

一般情况下,人工林生物量与其林龄密切相关,总生物量随着林龄的增加迅速增加,但有时也受林分抚育措施的影响而产生变化,本研究表明(表 4),除杉木人工林由中龄林(3500 株/hm²)至近成熟林(1210 株/hm²)因间伐其密度剧降导致生物量有所下降、马尾松人工林由近成熟林至成熟林生物量增加不显著外,其余各林型的生物量均随林龄的增加而显著或极显著增加;不同林龄、不同林型总生物量不同,其中,幼龄林:杉木>桉树>马尾松,桉树和马尾松差异不显著,中龄林:杉木>马尾松>桉树,差异极显著,近熟林:马尾松>杉木>桉树,达到极显著水平,成熟林:杉木>马尾松>桉树,杉木和马尾松差异不显著,过熟林:马尾松>杉木>桉树,差异显著,总的趋势为马尾松>杉木>桉树。

从生物量在林分不同组分(器官)中的分配来看,各林型各器官生物量的大小随不同林龄而变化,其中杉木:幼龄林干>枝>叶>根,中龄林和近熟林干>枝>根>叶,成熟林和过熟林干>根>枝>叶;马尾松:幼龄林干>叶>枝>根,中龄林、近熟和成熟林干>枝>根>叶,过熟林干>根>枝>叶;桉树:幼龄林干>叶>根>枝,其余均为干>根>枝>叶。

从各器官占总生物的分配比例来看,不同林型不同林龄各器官的相对生物量大小不同,其中干的生物量最大,杉木占 54.89%—75.97%,马尾松占 49.93%—83.10%,桉树占 51.07%—98.48%,且随林龄的增加而增加,表明 3 种人工林随着年龄的生长越来越多的干物质储存在树干中,干材随着年龄的增长是个净积累的过程,桉树的干材积累过程更为明显;其它各器官生物量所占的比例较小,其中杉木和马尾松根的相对生物量随年龄的增大有所增加,桉树的叶、枝、根及杉木和马尾松的叶、枝的相对生物量均随年龄的增加呈下降趋势。从各林型各器官的生物量和相对生物量看,随着林龄的增加,枝、叶的地位下降,根的地位上升,表明幼龄林和中龄林是人工林的营养生长旺盛期。

2.3 不同林龄人工林灌木层生物量及其分配

同一林龄不同林型的灌木层生物量大小不同,除近熟林马尾松和桉树灌木层生物量极显著高于杉木外,其它的差异不显著(表 5);不同林型不同林龄灌木层生物量的大小不同,杉木和马尾松幼龄林个

体小、空间大、阳光充足,有利于灌木的生长,幼龄林灌木层生物量高于其它林龄,杉木大小顺序为幼龄林>成熟林>中龄林>过熟林>近成熟林,马尾松为幼龄林>成熟林>中龄林>近熟林>过熟林,桉树由幼龄林生发展至中龄林林分郁闭度增加,灌木层生物量急剧减少,至近熟林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,伴随林分保存率的相对稳定和林分不断生长,灌木层生物量又呈下降趋势,大小顺序为幼龄林>近熟林>成熟林>过熟林>中龄林;不同林龄各器官的生物量除杉木近熟林和马尾松幼龄林为根>枝>叶、杉木过成熟林为根>叶>枝、桉树中龄林为枝>叶>根外,其余的均为枝>根>叶;不同林型不同林龄灌木层各器官的相对生物量,除马尾松幼龄林根为 62.48%,杉木近熟林根>枝,过熟林根>叶>枝外,其余的均以枝的相对生物量最大,在 37.89%—63.77%。

2.4 不同林龄人工林草本层及凋落物生物量

不同林型不同林龄草本层生物量不同(表 6),总的趋势为马尾松>桉树>杉木,其中马尾松草本层生物量随林龄的增加而减少,但差异不显著,桉树和杉木随林龄的变换规律性不强;凋落物的总趋势为马尾松>杉木>桉树,各林型随林龄的变换规律不同。

2.5 不同林龄人工林总生物量组成及其分配

由表 7 可知,3 种人工林总生物量的总体变化趋势为马尾松>杉木>桉树,其随林龄的变化规律与乔木层一致,除杉木林由中龄林到近熟林略有下降、马尾松由近熟林至成熟林增加不显著外,其余各林型生物量均随林龄增长呈显著或极显著增加,其中活体植物贡献率较大,杉木为 95.76%—98.39%,马尾松为 75.01%—99.14%,桉树为 85.60%—97.61%,地上凋落物杉木为 1.61%—4.24%,马尾松为 0.86%—24.99%,桉树为 2.39%—14.40%;各林型各层次生物量所占比例总体趋势均为乔木层>凋落物层>草本层>灌木层,以乔木层占绝对优势,杉木为 89.77%—96.55%,马尾松幼龄期生长缓慢,乔木层仅占 13.16%,其它林龄段为 90.20%—98.35%,桉树为 54.80%—91.56%,乔木层相对生物量均随林龄的增加而增加,其它各层次生物量占总生物量的比例均很小,杉木的凋落物为 1.61%—4.24%,马尾松为 0.86%—24.99%,桉树为 2.39%—14.40%,杉木的草本层为 0.27%—4.07%,马尾松为 0.47%—

表 4 3 种人工林不同林龄乔木层生物量器官分配
Table 4 Biomass (Mg/hm²) and its allocation in organs of tree layer with different stand ages for three plantations

林龄/a Stand ages	叶 Leaf			枝 Branch			干 Stem			根 Root			小计 Total
	杉木	马尾松	桉树	杉木	马尾松	桉树	杉木	马尾松	桉树	杉木	马尾松	桉树	
≤10	Aa7.41Bb	Bb0.47Cc	Bb1.44Cd	Aa8.55Cd	Bb0.29Cc	Bb0.81Dd	Aa30.91Dd	Bb0.99Dd	Bb3.50De	Aa6.71Dd	Bb0.14Cd	Bb1.02Dd	Bb1.98Cd
11—20	Aa12.60Aa	Bb6.23Aa	Cc2.29ABbc	Aa22.27ABb	Bb16.80Bb	Cc3.49Cc	Aa105.16Bc	Bb78.65Cc	Cc29.70Cd	Aa20.14Bc	Bb11.90Bc	Cc4.23Cc	Bb113.59Bc
21—25	Aa7.44Bb	Bb3.526Bb	Bc2.12Bc	Bb16.79Bc	Aa20.91Bb	Cc4.07Cc	Bb89.82Cc	Aa129.47Bc	Cc41.53Cc	Aa16.30Cc	Aa19.62Bb	Bc4.88Cc	Aa170.75Bb
26—35	Aa8.539Bb	Bb3.577Bb	Bc2.54ABab	Aa22.271ABb	Aa22.366Bb	Bb5.91Bb	Aa137.50Bb	Aa137.67Bb	Bb86.31Bb	Aa23.395Bb	Bb20.833Bb	Bc6.96Bb	Aa182.436Bb
≥36	Aa11.50Aa	Bb5.29Aa	Bc2.83Aa	Bb28.39Aa	Aa46.85Aa	Cc7.53Aa	Bb181.77Aa	Aa331.26Aa	Bb128.87Aa	Bb30.30Aa	Aa51.16Aa	Cc8.79Aa	Bb239.27Aa
													Aa398.64Aa
													Bc130.86Aa

表 5 3 种人工林不同林龄灌木层生物量器官分配
Table 5 Biomass (Mg/hm²) and its allocation in organs of shrub layer with different stand ages for three plantations

林龄/a Stand ages	叶 Leaf			枝 Branch			根 Root			小计 Total		
	杉木	马尾松	桉树	杉木	马尾松	桉树	杉木	马尾松	桉树	杉木	马尾松	桉树
≤10	Aa0.37Aa	Aa0.44Aa	Aa0.20ABab	Aa1.39Aa	Aa1.08Aa	Aa0.33Bc	Aa0.913Aa	Aa2.53Aa	Aa0.28ABab	Aa2.67Aa	Aa4.06Aa	Aa0.81ABbc
11—20	Bb0.07Aab	Aa0.45Aa	Bb0.07Bb	Bb0.23Bb	Aa0.62Aa	Bb0.09Cc	Bb0.11Bb	Aa0.44Aa	Bb0.04Bb	Bb0.41CDd	Bb1.51Aa	Bb0.19Bc
21—25	Bb0.004Ab	Aa0.36Aa	ABa0.27ABab	Bc0.006Bb	ABb0.66Aa	Aa0.93Aa	Bb0.07Bb	Aa0.40Aa	Aa0.44ABa	Bb0.017Dd	Aa1.41Aa	Aa1.64Aa
26—35	Aa0.25Aab	Aa0.28Aa	Aa0.45Aa	Aa1.13Aa	Aa0.83Aa	Aa0.61ABb	Aa0.38ABb	Aa0.53Aa	Aa0.54Aa	Aa1.76Bb	Aa1.65Aa	Aa1.60Aa
≥36	Aa0.26Aab	Aa0.31Aa	Aa0.29ABab	ABb0.26Bb	Aa0.68Aa	ABb0.56ABb	Aa0.37ABb	Aa0.33Aa	Aa0.55Aa	Aa0.887Cc	Aa1.314a	Aa1.40Aab

表 6 3 种人工林不同林龄草本层、凋落物层生物量分配
Table 6 Biomass (Mg/hm²) and its allocation in organs of herb layer and litter with different stand ages for three plantations

林龄/a Stand ages	草地上 Aboveground herb			草地下 Underground herb			凋落物 Litter		
	杉木	马尾松	桉树	杉木	马尾松	桉树	杉木	马尾松	桉树
≤10	ABb0.82Aa	Aa3.73Aa	Aa1.74Aa	Aa0.63Aa	Aa1.50Aa	Aa1.30Aa	ABb1.44Aa	Aa5.24Aa	Aa3.75Aa
11—20	Bb0.19Aa	Aa1.58Aab	Bb0.10Bc	Bb0.28Aa	Aa3.21Aa	Bb0.04Ab	Bb0.46Aa	Aa4.79Aa	Aa6.03Aa
21—25	Aa3.25Aa	Aa1.89Aab	Aa1.51Aab	Aa2.52Aa	Aa2.77Aa	Aa1.12Aa	Aa5.76Aa	Aa4.66Aa	Aa6.68Aa
26—35	Bb0.73Aa	ABb1.17Ab	Aa2.06Aa	Aa1.23Aa	Aa0.80Aa	Aa1.45Aa	Bb1.964Aa	Aa1.97Aa	ABa5.48Aa
≥36	Bb0.26Aa	Aa1.00Ab	ABa0.71ABbc	Aa0.47Aa	Aa0.91Aa	Aa1.26Aa	Bb0.73Aa	Aa1.91Aa	ABb1.97ABa
									ABb3.479Aa
									ABb3.29ABbc

34.85%, 桉树为 0.28%—24.33%, 杉木灌木层为 0.01%—4.26%, 马尾松为 0.32%—27.00%, 桉树为 0.41%—6.47%。

2.6 不同林龄人工林生产力变化

由表 8 可知,不同人工林的乔木层的生产力及随年龄的变化不同,总的趋势为桉树林>杉木林>马尾松林,杉木人工林乔木层生产力的大小顺序为中龄林>过熟林>幼龄林>近熟林>成熟林,马尾松的大小顺序为近熟林>中龄林>过熟林>成熟林>幼龄林,2 种林型的乔木层生产力均呈现先增后降再增的趋势,其中杉木林最大生产力出现在中龄林,马尾松的中龄林、近熟林和过熟林生产力相当,在 $8.48\text{--}8.98\text{ Mg hm}^{-2}\text{ a}^{-1}$,最大生产力出现在近熟林,桉树中龄林至过熟林的生产力变化不大,在 $17.89\text{--}21.10\text{ Mg hm}^{-2}\text{ a}^{-1}$,均极显著高于幼龄林,最大生产力出现在成熟林;同一林龄不同林型之间生产力不同,杉木幼龄林>桉树,均极显著高于马尾松,中龄林、成熟林和过熟林桉树的生产力均极显著高于马尾松和杉木,近熟林桉树林的生产力极显著高于马尾松和杉木,马尾松显著高于杉木;3 种林型的其它各层次的生产力均很小(表 9),总体趋势为凋落物>草本层>灌木层;3 种林型林分总生物量随林龄的变化规律及在同一林龄不同林型之间的差异与乔木层生产力相似。

2.7 人工林生物量、生产力优化增长模型

为了了解 3 种人工林各器官、各层次及林分生物量和生产力随林龄增长的动态变化,以林龄为自变量,以乔木层不同器官、乔木层、灌木层、草本层、凋落物各层及林分生物量和生产力为因变量,采用多种线性与非线性模型进行模拟,并选用相关系数最高者作为优化回归模型,得出如表 10 所示的 3 种人工林乔木层各器官、各层次及林分生物量和生产力的增长模型。经 t 检验,生物量的模拟结果比生产力的理想,其中林分生物量和生产力的拟合效果均较好,3 种人工林林分生物量的决定系数高达 0.898—0.996,均达到极显著水平,3 种人工林林分生产力决定系数为 0.727—0.848,也均达到了显著水平,增长模型能很好的反映林分生物量和生产力随时间变化的动态过程。

3 讨论

3.1 生物量模型的选择

森林生物量的获得可以通过直接或间接两种途

径:前者是将一定面积内的树木皆伐以获取其生物量,准确度高,因其对环境的破坏性大,对森林的主要产品干材的损耗太多,很少使用;后者是确定生物量的主要方法,也叫生物量模型法,根据尺度不同可以分为单木生物量模型和大尺度森林生物量模型,单木生物量模型是通过样木观测建立树木的相对生长方程进行生物量的估测^[14-15],大尺度森林生物量模型利用多种遥感信息参数进行模拟,许多学者利用多种生物量模型来估计林木的生物量^[16-18]。目前相对生长方程的拟合多采用对数形式,常用的模型变量有胸径(D)、树高(H)、密度(S)。常见的预测模型包括以胸径为单变量的模型、以胸径和树高为变量的模型以及以胸径、高度、密度为变量的模型。但在森林群落调查中,各种参数获得的准确性并不一致。胸径在绝大多数的调查中可以较准确的获得,而高度通常会被测量,但其测量均存在着较大的误差^[19-20]。且生物量与胸径之间存在着很好的关系,因此在森林的生物量预测中以胸径为单变量的模型被广泛运用^[21-23]。本研究证明以胸径为单变量的 3 种人工林生物量数学模型具有较高的精度,乔木层各器官、各层次及林分生物量数学模型的决定系数均较高,除少数情况外,均达到了显著或极显著水平,能够对 3 种人工林不同林龄各组分、各层次及林分生物量进行有效预测(表 10)。

3.2 中国南方 3 种主要人工林与其它森林类型生物量的比较

森林生物量与许多生物学因素和非生物学因素密切相关,如区域的水热条件、土壤条件以及森林的类型、年龄、优势种的组成,活立木密度等^[14,24-25],本研究表明,中国南方 3 种人工林生物量与其林龄密切相关,各器官、各层次和林分生物量拟合的模型均能很好的反映随林龄变化的动态过程,其中杉木、马尾松、桉树林生物量分别可用 $W_T = 0.096D^{2.410}$ 、 $W_T = 0.428D^{2.009}$ 、 $W_T = 0.138D^{2.436}$ 生长方程表达,决定系数分别为 0.993、0.991、0.977,达到极显著水平,可应用于生产中预测 3 种人工林不同林龄生物量。3 种人工林林分生物量的大小趋势为马尾松>杉木>桉树,杉木、马尾松和桉树成熟林生物量分别为 192.30、191.53、105.77 Mg/hm^2 ,杉木和马尾人工林高于四川 32a 楠木人工林、四川杉木人工林、广东鹤山马尾松、杉木混交林,与广东 15 年生的马占相思人工林生物

表 7 3 种人工林不同林龄各层次生物量分配

林龄/A Stand age	乔木层 Tree layer						灌木层 Shrub layer						草本层 Herb layer						凋落物 Litter						总计 Total					
	杉木		马尾松		桉树		杉木		马尾松		桉树		杉木		马尾松		桉树		杉木		马尾松		桉树		杉木		马尾松		桉树	
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
≤10	56.31	89.77	1.98	13.16	6.84	54.80	2.67	4.26	4.06	27.00	0.81	6.47	1.44	2.30	5.24	34.85	3.04	24.33	2.30	3.67	3.75	24.99	1.80	14.40	Aa62.73Cd	Bb15.03Cd	Bb12.49Ed			
11—20	164.32	95.25	113.58	90.20	42.11	88.19	0.41	0.24	1.51	1.20	0.19	0.41	0.46	0.27	4.79	3.81	0.13	0.28	7.32	4.24	6.03	4.79	5.31	11.12	Aa172.51Bbc	Bb125.93Bc	Cc47.75Dd			
21—25	131.24	92.65	170.75	93.05	54.12	83.90	0.02	0.01	1.41	0.77	1.64	2.54	5.76	4.07	4.66	2.54	2.63	4.08	4.63	3.27	6.68	3.64	6.11	9.48	Bb141.65Bc	Aa183.51Bb	Cc64.51Cc			
26—35	185.47	96.45	182.44	95.25	94.15	89.01	1.76	0.92	1.65	0.86	1.60	1.52	1.96	1.02	1.97	1.03	3.51	3.32	3.10	1.61	5.48	2.86	6.51	6.15	Aa192.30Bb	Aa191.53Bb	Bb105.77Bb			
≥36	239.27	96.75	398.61	98.35	130.86	95.16	0.89	0.36	1.31	0.32	1.40	1.02	0.73	0.29	1.91	0.47	1.97	1.43	6.43	2.60	3.48	0.86	3.29	2.39	Bb247.32Aa	Aa405.31Aa	Bc137.51Aa			

表 8 3 种人工林不同林龄乔木层生产力

林龄/A Stand age	叶 Leaf						枝 Branch						干 Stem						根 Root						小计 Total					
	杉木		马尾松		桉树		杉木		马尾松		桉树		杉木		马尾松		桉树		杉木		马尾松		桉树		杉木		马尾松		桉树	
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
≤10	Aa1.85Bb	Cc0.12Cc	Bb0.72Cd	Bb0.43Aa	Aa1.43Aa	Bb0.06Cd	ABb0.81Cd	Aa5.15ABab	Bb0.20Cd	ABa3.50 Bc	Aa1.12ABab	Bb0.03Cd	Aa1.02Cc	Aa9.55ABbc	Bb0.40Cc	Aa6.04Bb														
11—20	Aa3.15Aa	Bb1.56Aa	Bb1.14ABbc	ABb1.39Aa	Bb1.12Aa	Aa1.74Aa	Bb6.57Aa	Bb5.24ABb	Aa14.85 Aab	Bb1.26Aa	Bc0.79ABb	Bb12.37Aa	Bb8.71Aa	Aa19.85Aa																
21—25	Aa1.86Bb	Bb0.88Bb	Bb1.06Bc	Cc0.73Bb	Bb1.00Ab	Aa1.36ABb	Cc3.91BCbc	Bb6.17Aa	Aa13.84Ab	Cc0.71BCcd	Bb0.93Aa	Aa1.63ABb	Bc7.20BCcd	Bb8.98Aa	Aa17.89Aa															
26—35	Aa2.13Aa	Bc0.89Bb	Bb1.27ABab	Cc0.45Bb	Bb0.70Bc	Aa1.18BCbc	Bb2.75ABa	Bb4.30Bc	Aa17.26Aa	Bc0.47ABbc	Bb0.65Bc	Aa1.39BCbc	Bb5.80Cd	Bb6.55Bb	Aa21.10Aa															
≥36	Aa2.87Bb	Bb1.32Aa	Bb1.42Aa	Aa0.89Bc	Aa0.78Bc	Aa0.94BCcd	Bb5.68Cc	Bb5.52 Aab	Aa16.11Aab	Aab0.95Cd	ABb0.85Aab	Aa1.10BCc	Bb10.39ABab	Bb8.48Aa	Aa19.57Aa															

表 9 3 种人工林不同林龄各层次生产力

林龄/a Stand age	乔木层 Tree layer						灌木层 Shrub layer						草本层 Herb layer						凋落物 Litter						总计 Total					
	杉木		马尾松		桉树		杉木		马尾松		桉树		杉木		马尾松		桉树		杉木		马尾松		桉树		杉木		马尾松		桉树	
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
≤10	Aa9.55ABbc	Bb0.40Cc	Aa6.04Bb	a0.27Aa	a0.41a	a0.08ABbc	Ab0.36a	Aa1.31a	Aa0.76Aa	a0.58Bb	a0.94a	a0.45Bc	ABa10.75ABCb	Bb3.05Bc	Aa7.33Bb															
11—20	Bb12.37Aa	Bb8.71Aa	Aa19.85Aa	Bb0.04CDd	Aa0.15a	Bb0.02Bc	Bb0.12a	Aa1.20a	Bb0.03Bb	a1.83Aa	a1.51a	a1.33Aab	Bb14.36Aa	Bb11.57Aa	Aa21.23Aa															
21—25	Bc7.20BCcd	Bb8.98Aa	Aa17.89Aa	Bb0.00Dd	Aa0.14a	Aa0.16Aa	a1.44a	a1.17a	a0.66Aa	a1.16ABab	a1.67a	a1.53Aa	Bc9.80BCbc	Bb11.95Aa	Aa20.24Aa															
26—35	Bb5.80Cd	Bb6.55Bb	Aa21.10Aa	a0.18Bb	a0.16a	a0.16Aa	Bb0.49a	Aa1.37a	ABab0.88Aa	Bb0.78ABb	ABa1.37a	Aa1.63Aa	Bb7.24Cc	Bb9.45Ab	Aa23.77Aa															
≥36	Bb10.39ABab	Bb8.48Aa	Aa19.57Aa	a0.09Cc	a0.13a	a0.14Aab	Bb0.18a	Aa0.87a	ABb0.49Aa	Aa1.61ABa	ABb0.87a	ABb0.82ABbc	Bb12.27ABab	Bb10.35Aab	Aa21.02Aa															

量持平,低于热带雨林、季节雨林和湖南会同杉木人工林,8年生桉树的生物量为 137.51 Mg/hm²,与温远光等测定 10 年生桉树林接近(表 11)。

3.3 中国南方 3 种主要人工林与其它森林类型生产力的比较

初级生产力是绿色植物固定能量的速率,以地表单位面积和单位时间内,光合作用所产生的有机物质或干有机物质来表示。总初级生产力是绿色植物在单位面积和单位时间内所固定的总能量,或生产的有机物质,是光合作用固定能量的总结果。将总初级生产力扣除植物呼吸作用消耗的能量即为净初级生产力。森林生态系统的总生产力中 50%—60%用于植物的呼吸,其中大部分(75%—88%)用于维持旧组织的呼吸,小部分用于新组织构建过程中的呼吸^[31]。然而,要测定森林某些组分的净生产力,在技术上还存在一定的困难。为了简便起见,人们往往用它们的年均增长量来代替年净生产量^[32]。据文献报道,广东马占相思人工林平均净生产量为 10.66 Mg hm⁻² a⁻¹^[14];广西米老排(*Mytilaria*

laosensis)、灰木莲(*Manglietia glauca*)、柳杉(*Cryptomeria japonica*)人工林平均净生产量分别为 15.61、10.09 Mg hm⁻² a⁻¹和 7.89 Mg hm⁻² a⁻¹^[33-35];福建楠木人工林平均净生产量为 5.23 Mg hm⁻² a⁻¹^[36];樟树(*Cinnamomum camphora*)人工林平均净生产量 12.1 Mg hm⁻² a⁻¹,乔木层平均净生产量为 9.55 Mg hm⁻² a⁻¹^[37]。本研究表明,与生物量一样,中国南方杉木、马尾松、桉树 3 种人工林的林分生产力均具有随林龄变化、较好的拟合增长模型,3 种人工林不同林龄乔木层最高生产力分别为 12.37、8.98、21.10 Mg hm⁻² a⁻¹,除杉木低于米老排、马尾松低于米老排、马占相思和灰木莲外,其余均高于马占相思、米老排、灰木莲、柳杉、楠木及樟树。3 种人工林生物量的大小顺序为马尾松>杉木>桉树,但林分生产力正好相反,其中桉树的林分生产力高达 23.77 Mg hm⁻² a⁻¹,可见,桉树虽然消耗大量的养分和水分,导致地力严重衰退,但桉树是一种光合作用能力强、碳素固定率高的速生丰产优良树种。

表 10 3 种人工林乔木层不同器官、各层及林分生物量和生产力的增长模型

Table 10 Growth models of different organs in tree layer, shrub, herb, litter and stand biomass and productivity for three plantations

林型 Forest type	器官 Organs	生物量模型 Models	生产力模型 Models
杉木	乔木叶 Tree leaves	$y = 1.823 + 1.3184x - 0.059x^2 + 0.001x^3$ ($R^2 = 0.566$)	$y = 1.044 + 1.393x - 0.403x^2 + 0.032x^3$ ($R^2 = 0.38$)
	乔木枝 Tree branch	$y = \exp(3.379 - 7.329/x)$ ($R^2 = 0.8768^*$)	$y = 2.103 - 0.594x + 0.055x^2$ ($R^2 = 0.87$)
	乔木干 Tree stem	$y = \exp(5.263 - 11.266/x)$ ($R^2 = 0.896^{**}$)	$y = 3.828 + 2.568x - 1.024x^2 + 0.092x^3$ ($R^2 = 0.793$)
	乔木根 Tree root	$y = \exp(3.460 - 9.518/x)$ ($R^2 = 0.87^{**}$)	$y = 1.072 + 0.233x - 0.142x^2 + 0.014x^3$ ($R^2 = 0.844$)
	乔木 Tree	$y = \exp(5.524 - 9.108/x)$ ($R^2 = 0.861^{**}$)	$y = 7.635 + 4.054x - 1.64x^2 + 0.147x^3$ ($R^2 = 0.705^*$)
	灌木 Shrub	$y = 6.765 - 0.868x + 0.035x^2 - 0.000393x^3$ ($R^2 = 0.915^{**}$)	$y = 0.749 - 0.629x + 0.161x^2 - 0.012x^3$ ($R^2 = 1.00^*$)
	草本 Herb	$y = -5.212 + 1.6824x - 0.073x^2 + 0.001x^3$ ($R^2 = 0.914$)	$y = -0.833 - 0.629x - 0.28x^2 + 0.017x^3$ ($R^2 = 0.392$)
	凋落物 Litter	$y = \exp(5.721 - 9.119/x)$ ($R^2 = 0.921^*$)	$y = -1.044 + 2.343x - 0.646x^2 + 0.049x^3$ ($R^2 = 0.748$)
	林分 Stand	$y = \exp(5.551 - 8.485/x)$ ($R^2 = 0.898^{**}$)	$y = 6.475 + 7.062x - 2.414x^2 + 0.023x^3$ ($R^2 = 0.777^*$)
马尾松	乔木叶 Tree leaves	$y = \exp(1.8 - 12.031/x)$ ($R^2 = 0.778^{**}$)	$y = \exp(0.757 - 2.516/x)$ ($R^2 = 0.720$)
	乔木枝 Tree branch	$y = \exp(4.128 - 26.278/x)$ ($R^2 = 0.97^{**}$)	$y = \exp(0.614 - 2.953/x)$ ($R^2 = 0.713$)
	乔木干 Tree stem	$y = \exp(6.089 - 30.137/x)$ ($R^2 = 0.977^{**}$)	$y = \exp(2.646 - 3.798/x)$ ($R^2 = 0.811^*$)
	乔木根 Tree root	$y = \exp(4.224 - 30.643/x)$ ($R^2 = 0.978^{**}$)	$y = \exp(0.767 - 3.819/x)$ ($R^2 = 0.815^*$)
	乔木 Tree	$y = \exp(6.261 - 27.517/x)$ ($R^2 = 0.977^{**}$)	$y = \exp(2.987 - 3.463/x)$ ($R^2 = 0.795^*$)
	灌木 Shrub	$y = 6.349 - 0.574x + 0.021x^2 - 0.000207x^3$ ($R^2 = 0.562$)	$y = \exp(-2.266 + 1.252/x)$ ($R^2 = 0.851^*$)
	草本 Herb	$y = -0.880 + 1.239x - 0.046x^2 - 0.000437x^3$ ($R^2 = 0.242$)	$y = 1.683 - 0.504x + 0.151x^2 - 0.013x^3$ ($R^2 = 0.994$)
	凋落物 Litter	$y = 6.739 - 0.648x - 0.035x^2 - 0.00042x^3$ ($R^2 = 0.199$)	$y = -0.096 + 1.318x - 0.298x^2 + 0.018x^3$ ($R^2 = 0.999$)
	林分 Stand	$y = \exp(5.913 - 16.121/x)$ ($R^2 = 0.96^{**}$)	$y = \exp(2.73 - 1.402/x)$ ($R^2 = 0.727^*$)
桉树	乔木叶 Tree leaves	$y = \exp(7.998 - 0.713/x)$ ($R^2 = 0.921^*$)	$y = \exp(0.398 - 0.714/x)$ ($R^2 = 0.923^*$)
	乔木枝 Tree branch	$y = 913.349 + 3.146E3 \ln x$ ($R^2 = 0.99^{**}$)	$y = -0.3 + 1.557x - 0.388x^2 - 0.027x^3$ ($R^2 = 0.742$)
	乔木干 Tree stem	$y = -1.938E4 + 2.408E4x - 686.345x^2$ ($R^2 = 0.995^{**}$)	$y = \exp(3.219 - 1.802/x)$ ($R^2 = 0.879$)

续表

林型 Forest type	器官 Organs	生物量模型 Models	生产力模型 Models
	乔木根 Tree root	$y = 1.201E3 + 3.626E3 \ln x$ ($R^2 = 0.988^{**}$)	$y = -0.277 + 1.83x - 0.461x^2 - 0.032x^3$ ($R^2 = 0.741$)
	乔木 Tree	$y = \exp(12.139 - 3.281/x)$ ($R^2 = 0.991^{**}$)	$y = \exp(3.340 - 1.393/x)$ ($R^2 = 0.841^*$)
	灌木 Shrub	$y = 672.039 - 202.574x - 162.864x^2 - 15.807x^3$ ($R^2 = 0.541$)	$y = 0.07 - 0.024x - 0.017x^2 - 0.002x^3$ ($R^2 = 0.560$)
	草本 Herb	$y = 6.129E3 - 4.783E34x - 1.418E34x^2 - 110.622x^3$ ($R^2 = 0.581$)	$y = 1.535 - 1.201x + 0.356x^2 - 0.028x^3$ ($R^2 = 0.581$)
	凋落物 Litter	$y = -560.992 + 3.238E3x - 346.602x^2$ ($R^2 = 0.93$)	$y = -0.142 + 0.812x - 0.087x^2$ ($R^2 = 0.93$)
	林分 Stand	$y = -1.693E4 + 3.337E4x - 1.761x^2$ ($R^2 = 0.996^{**}$)	$y = \exp(3.408 - 1.284/x)$ ($R^2 = 0.848^*$)

表 11 3 种人工林生物量与其它森林群落的比较

Table 11 Comparison of biomass between three plantations and the other forest communities

森林类型 Forest types	地点 Location	林龄/a Stand ages	总生物量/(Mg/hm ²) Total biomass	参考文献 References cited
楠木人工林 <i>Phoebe bourmei</i> plantation	四川	32	174.33	[26]
杉木人工林 <i>Cunninghamia lanceolata</i> plantation	四川	26—35	162.49	[27]
马尾松、杉木混交林 <i>Pinus massoniana</i> , <i>Cunninghamia lanceolata</i> mixed forest	广东鹤山	31—35	104.93	[28]
马占相思人工林 <i>Acacia mangium</i> plantation	广东	15	196.94	[13]
杉木人工林 <i>Cunninghamia lanceolata</i> plantation	湖南会同	20	209.5	[29]
热带雨林 Tropical rain forest	巴西	—	372	[23]
季节雨林 Tropical seasonal rain forest	西双版纳	—	424	[11]
桉树人工林 <i>Eucalyptus urophylla</i> plantation	广西	10	144.85	[30]

致谢: 感谢广西壮族自治区林业勘测设计院提供的森林资源清查数据及对样点布置给予的帮助; 样地调查得到了中国科学院亚热带农业生态研究所植物生态学科组及广西大学林学院林学专业、生态专业等老师和学生的大力支持。在此一并致谢。

References:

- [1] Luo J Y, Zhang X Q, Wang X K, Zhu J H, Hou Z H, Zhang Z J. Forest biomass estimation methods and their prospects. *Scientia Silvae Sinicae*, 2009, 45(8): 129-134.
- [2] Zhou Z Z, Zheng H S, Yin G T, Yang Z J, Chen K T. Biomass equations for rubber tree in Southern China. *Forest Research*, 1995, 8(6): 624-629.
- [3] Zhou G Y, Zeng Q B, Lin M X, Chen B F, Li Y D, Wu Z M. Biomass and nutrient allocation in *Manglietia hainanensis* plantation ecosystem at Jianfengling. *Forest Research*, 1997, 10(5): 453-457.
- [4] Feng Z W, Chen Z Y, Zhang J W, Wang S P, Zhao J L, Gao H. Determination of Biomass of *Pinus massoniana* stand in Huitong County, Hunan Province. *Scientia Silvae Sinicae*, 18(2): 127-134.
- [5] Garkoti S C. Estimates of biomass and primary productivity in a high-altitude maple forest of the west central Himalayas. *Ecological Research*, 2008, 23(1): 41-49.
- [6] Xu B, Guo Z D, Piao S L, Fang J Y. Biomass carbon stocks in China's forests between 2000 and 2050: a prediction based on forest biomass-age relationships. *Science China Life Sciences*, 2010, 53(7): 776-783.
- [7] Department of Forest Resources Management, SFA. China's forest resources status and dynamic change—based on analysis of the seventh national forest resource inventory results. *Forestry Economics*, 2010, 32(2): 66-72.
- [8] Sun Z Z, Shen G F. Study on the present condition and the potentialities of the productivity of main tree species forest plantation of China I. Study on the forest plantation productivities of *Cunninghamia lanceolata* and *Pinus massoniana*. *Forest Research*, 2000, 13(6): 613-621.
- [9] State Forestry Administration. Report of Forest Resources in China: the Seventh Check. Beijing: Chinese Forestry Publishing House, 2009.
- [10] Ma M D, Jiang H, Luo C D, Liu X J. Preliminary study of carbon density, net production and carbon stock in natural spruce forests of Northwest subalpine Sichuan, China. *Journal of Plant Ecology*, 2007, 31(2): 305-312.
- [11] Lü X T, Tang J W, He Y C, Duan W G, Song J P, Xu H L,

- Zhu S Z. Biomass and its allocation in tropical seasonal rain forest in Xishuangbanna, Southwest China. *Journal of Plant Ecology*, 2007, 31(1): 11-22.
- [12] Fan H B, Li Y Y, Su B Q, Lin D X, Liu C H, Jiang Z K. Allocation pattern of biomass and productivity in the mixed uneven-aged stands of Masson's pine and hardwood species. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(8): 2463-2473.
- [13] Ren H, Peng S L, Xiang Y C. Biomass and net primary productivity in an *acacia mangium* plantation in Heshan, Guangdong, China. *Acta Phytocologica Sinica*, 2000, 24(1): 18-21.
- [14] Wang W F, Lei Y C, Wang X F, Zhao H Y. A review of forest biomass models. *Journal of Northwest Forest University*, 2008, 23(2): 58-63.
- [15] Foody G M, Boyd D S, Cutler M E J. Predictive relations of tropical forest biomass from Landsat TM data and their transferability between regions. *Remote Sensing of Environment*, 2003, 85(4): 463-474.
- [16] Nelson B W, Mesquita R, Pereira J L G, de Souza S G A, Batista G T, Couto L B. Allometric regressions for improved estimate of secondary forest biomass in the central Amazon. *Forest Ecology and Management*, 1999, 117(1/3): 149-167.
- [17] Ketterings Q M, Coe R, van Noordwijk M, Ambagau Y, Palm C A. Reducing uncertainty in the use of allometric biomass equations for predicting above-ground tree biomass in mixed secondary forests. *Forest Ecology and Management*, 2001, 146(1/3): 199-209.
- [18] Wang H Y, Wang W J, Qiu L, Su D X, An J, Zheng G Y, Zu Y Y. Differences in biomass, litter layer mass and SOC storage changing with tree growth in *Larix gmelinii* plantations in Northeast China. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(3): 833-843.
- [19] Brown S, Gillespie A J R, Lugo A E. Biomass estimation methods for tropical forests with applications to forest inventory data. *Forest Science*, 1989, 35(4): 881-902.
- [20] Chave J, Riéra B, Dubois M A. Estimation of biomass in a neotropical forest of French Guiana: spatial and temporal variability. *Journal of Tropical Ecology*, 2001, 17(1): 79-96.
- [21] Peichl M, Leava N A, Kiely G. Above- and belowground ecosystem biomass, carbon and nitrogen allocation in recently afforested grassland and adjacent intensively managed grassland. *Plant and Soil*, 2012, 350(1/2): 281-296.
- [22] Preece N D, Crowley G M, Lawes M J, van Oosterzee P. Comparing above-ground biomass among forest types in the Wet Tropics: Small stems and plantation types matter in carbon accounting. *Forest Ecology and Management*, 2012, 264: 228-237.
- [23] Keller M, Palace M, Hurr G. Biomass estimation in the Tapajos National forest, Brazil: examination of sampling and allometric uncertainties. *Forest Ecology and Management*, 2001, 154(3): 371-382.
- [24] Li G F, Ren H. Biomass and net primary productivity of the forests in different climatic zones of China. *Tropical Geography*, 2004, 24(4): 306-310.
- [25] Huang C D, Zhang J, Yang W Q, Tang X, Zhao A J. Dynamics on forest carbon stock in Sichuan Province and Chongqing City. *Acta Ecologica Sinica*, 28(3): 966-975.
- [26] Ma M D, Jiang H, Liu Y J. Biomass, carbon content, carbon storage and their vertical distribution of *Phoebe bourmei* artificial stand. *Scientia Silvae Sinicae*, 2008, 44(3): 34-39.
- [27] Hou Z H, Zhang X Q, Xu D Y, Yu P T. Study on biomass and productivity of Chinese fir plantation. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2009, 25(5): 97-103.
- [28] Zeng X P, Cai X A, Zhao P, Rao X Q, Zou B, Zhou L X, Lin Y Q, Fu S L. Biomass and net primary productivity of three plantation communities in hilly land of lower subtropical China. *Journal of Beijing Forestry University*, 2008, 30(6): 148-152.
- [29] Huang Z H, Tian D L, Kang W X, Xiang W H, Yan W D. Dynamics of biomass distribution in first rotation of Chinese fir plantations in Huitong County, Hunan province. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2011, 31(5): 37-43.
- [30] Wen Y G, Liang H W, Zhao L J, Zhou M Y, He B, Wang L H, Wei S H, Zheng B, Liu D J, Tang Z S. Biomass production and productivity of *Eucalyptus urophylla*. *Journal of Tropical and Subtropical Botany*, 2000, 8(2): 123-127.
- [31] Barnes B V, Zak D R, Denton S R, et al. *Forest Ecology*. 4th ed. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1998: 792-792.
- [32] Tian D L, Kang W X, Wen S Z. *Chinese Fir Plantation Ecosystem Ecology*. Beijing: Science Press, 2003.
- [33] Ming A G, Jia H Y, Tao Y, Lu L H, Su J M, Shi Z M. Biomass and its allocation in a 28-year-old *Mytilaria laosensis* plantation in southwest Guangxi. *Chinese Journal of Ecology*, 2012, 31(5): 1050-1056.
- [34] Li J Z, Qin W M, Qin Y, Qin J, Tang K, Duan W W. Studies on the biomass and productivity of *Manglietia glauca*. *Journal of Fujian Forestry Science and Technology*, 2011, 38(1): 1-5.
- [35] Fan J Y, Tan D W, Jiang L, Qin W M. Research on the tree biomass and productivity of *Cryptomeria fortunei* Hooibrenk plantation. *Journal of Fujian Forestry Science and Technology*, 2011, 38(4): 1-5.
- [36] Peng L F. Biomass and productivity in a 35 year old *Phoebe bourmei* Yang plantation. *Journal of Fujian College of Forestry*, 2003, 23(2): 128-131.
- [37] Yao Y J, Kang W X, Tian D L. Study of the biomass and productivity of *Cinnamomum camphora* plantation. *Journal of Central South Forestry University*, 2003, 23(1): 1-5.

参考文献:

- [1] 罗云建, 张小全, 王效科, 朱建华, 侯振宏, 张治军. 森林生

- 物量的估算方法及其研究进展. 林业科学, 2009, 45(8): 129-134.
- [2] 周再知, 郑海水, 尹光天, 杨曾奖, 陈康泰. 橡胶树生物量估测的数学模型. 林业科学研究, 1995, 8(6): 624-629.
- [3] 周光益, 曾庆波, 林明献, 陈步峰, 李意德, 吴仲民. 海南木莲人工林生物量及养分分配. 林业科学研究, 1997, 10(5): 453-457.
- [4] 冯宗炜, 陈楚莹, 张家武, 王开平, 赵吉录, 高虹. 湖南会同地区马尾松林生物量的测定. 林业科学, 1982, 18(2): 127-134.
- [7] 国家林业局森林资源管理司. 中国森林资源第七次清查结果及其分析. 林业经济, 2010, 32(2): 66-72.
- [8] 孙长忠, 沈国防. 我国主要树种人工林生产力现状及潜力的调查研究 I. 杉木、马尾松人工林生产力研究. 林业科学研究, 2000, 13(6): 613-621.
- [9] 国家林业局. 中国森林资源报告——第七次全国森林资源清查. 北京: 中国林业出版社, 2009.
- [10] 马明东, 江洪, 罗成德, 刘跃建. 四川西北部亚高山云杉天然林生态系统碳密度、净生产量和碳贮量的初步研究. 植物生态学报, 2007, 31(2): 305-312.
- [11] 吕晓涛, 唐建维, 何有才, 段文贵, 宋军平, 许海龙, 朱胜忠. 西双版纳热带季节雨林的生物量及其分配特征. 植物生态学报, 2007, 31(1): 11-22.
- [12] 樊后保, 李燕燕, 苏兵强, 林德喜, 刘春华, 蒋宗垲. 马尾松-阔叶树混交异龄林生物量与生产力分配格局. 生态学报, 2006, 26(8): 2463-2473.
- [13] 任海, 彭少麟, 向言词. 鹤山马占相思人工林的生物量和净初级生产力. 植物生态学报, 2000, 24(1): 18-21.
- [14] 王维枫, 雷渊才, 王雪峰, 赵浩彦. 森林生物量模型综述. 西北林学院学报, 2008, 23(2): 58-63.
- [18] 王洪岩, 王文杰, 邱岭, 苏冬雪, 安静, 郑广宇, 祖元刚. 兴安落叶松林生物量、地表枯落物量及土壤有机碳储量随林分生长的变化差异. 生态学报, 2012, 32(3): 833-843.
- [24] 李高飞, 任海. 中国不同气候带各类型森林的生物量和净第一性生产力. 热带地理, 2004, 24(4): 306-310.
- [25] 黄从德, 张健, 杨万勤, 唐宵, 赵安玖. 四川省及重庆地区森林植被碳储量动态. 生态学报, 2008, 28(3): 966-975.
- [26] 马明东, 江洪, 刘跃建. 楠木人工林生态系统生物量、碳含量、碳贮量及其分布. 林业科学, 2008, 44(3): 34-39.
- [27] 侯振宏, 张小全, 徐德应, 于澎涛. 杉木人工林生物量和生产力研究. 中国农学通报, 2009, 25(5): 97-103.
- [28] 曾小平, 蔡锡安, 赵平, 饶兴权, 邹碧, 周丽霞, 林永权, 傅声雷. 南亚热带丘陵3种人工林群落的生物量及净初级生产力. 北京林业大学学报, 2008, 30(6): 148-152.
- [29] 黄志宏, 田大伦, 康文星, 项文化, 闫文德. 湖南会同第1代杉木人工林生物量分配动态. 中南林业科技大学学报, 2011, 31(5): 37-43.
- [30] 温远光, 梁宏温, 招礼军, 周敏毅, 何斌, 王凌晖, 韦善华, 郑白, 刘德杰, 唐再生. 尾叶桉人工林生物量和生产力的研究. 热带亚热带植物学报, 2000, 8(2): 123-127.
- [32] 田大伦, 康文星, 文仕知. 杉木林生态系统学. 北京: 科学出版社, 2003.
- [33] 明安刚, 贾宏炎, 陶怡, 卢立华, 苏建苗, 史作民. 桂西南28年生米老排人工林生物量及其分配特征. 生态学杂志, 2012, 31(5): 1050-1056.
- [34] 李俊贞, 秦武明, 覃毓, 覃静, 唐克, 段文雯. 灰木莲人工林生物量和生产力的研究. 福建林业科技, 2011, 38(1): 1-5.
- [35] 樊吉尤, 覃德文, 蒋林, 秦武明. 柳杉人工林生物量及生产力研究. 福建林业科技, 2011, 38(4): 1-5.
- [36] 彭龙福. 35年生楠木人工林生物量及生产力的研究. 福建林学院学报, 2003, 23(2): 128-131.
- [37] 姚迎九, 康文星, 田大伦. 18年生樟树人工林生物量的结构与分布. 中南林学院学报, 2003, 23(1): 1-5.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol.34, No.10 May, 2014 (Semimonthly)

CONTENTS

Frontiers and Comprehensive Review

- Landscape sustainability and landscape sustainability science ZHAO Wenwu, FANG Xuening (2453)
- A diagnostic framework of payments for ecosystem services and associated case studies
..... ZHU Wenbo, WANG Yang, LI Shuangcheng (2460)
- Progress in research of iron plaque on root surface of wetland plants
..... LIU Chunying, CHEN Chunli, GONG Xiaofeng, et al (2470)
- Ecological effects of predator chemical cues in aquatic ecosystem QIN Guangqiu, LU Haoliang, TANG Zhenzhu, et al (2481)
- Secondary substances and their ecological effects on seed dispersal in vertebrate-dispersed fleshy fruit plants
..... PAN Yang, LUO Fang, LU Changhu (2490)

Autecology & Fundamentals

- Responses of CH₄ uptake rates to simulated N deposition in a nature forest in mid-subtropical China
..... CHEN Chaoqi, YANG Zhijie, LIU Xiaofei, et al (2498)
- Ecological characteristics of *Phragmites australis* and their relationship to water-salt indicators in dry habitats of the southern
marginal zones of the Tarim Basin, China GONG Lu, ZHU Meiling, TASHPOLAT · Tiyp, et al (2509)
- Threshold effect of soil moisture on photosynthetic and physiological parameters in *Rosa xanthina* L. and its photosynthetic
productivity classification ZHANG Shuyong, XIANG Jiangbao, ZHANG Guangcan, et al (2519)
- Contrasting responses of soil respiration to litter manipulation in subtropical *Mytilaria laosensis* and *Cunninghamia lanceolata*
plantations YU Zaipeng, WAN Xiaohua, HU Zhenhong, et al (2529)
- Potassium application for increased jasmonic acid content and defense enzyme activities of wheat leaves infested by aphids
..... WANG Yi, ZHANG Yueling, SU Janwei, et al (2539)
- Combined effects of elevated O₃ concentration and reduced solar irradiance on photosynthetic activity and energy dissipation
of winter wheat SUN Jian, ZHENG Youfei, et al (2548)
- Colonization dynamics of *Bacillus cereus* B3-7 on wheat roots and control efficiency against sharp eyespot of wheat
..... HUANG Qiubin, ZHANG Ying, LIU Fengying, et al (2559)
- Quantitative study of water consumption characteristics of winter wheat under deficit irrigation
..... ZHANG Xingjuan, XUE Xuzhang, GUO Wenzhong, et al (2567)
- Assessment on the ecological fitness of anti-fungal transgenic rice LI Wei, GUO Jianfu, YUAN Hongxu, et al (2581)
- A proteomic analysis of *Arachis hypogaea* leaf in responses to enhanced ultraviolet-B radiation
..... DU Zhaokui, LI Junmin, ZHONG Zhangcheng, et al (2589)
- Composition of fatty acids from suspended particulate matter in southern South China Sea
..... LIU Huaxue, KE Changliang, LI Chunhou, et al (2599)
- The influence of age, flock size, habitat, and weather on the time budget and the daily rhythm of wintering Siberian Cranes
in Poyang Lake YUAN Fangkai, LI Yankuo, LI Fengshan, et al (2608)
- The energy budget and water metabolism heat regulation of tree sparrows *Passer montanus* of toba compensatory regeneration
..... YANG Zhihong, WU Qingming, YANG Miao, et al (2617)
- The effect of low-dose of pesticide on predation of spider and its preliminary mechanisms LI Rui, LI Na, LIU Jia, et al (2629)
- Response of the alligator weed flea beetle, *Agasicles hygrophila* (Coleoptera: Chrysomelidae) to overwintering protection and
its controlling effect on alligator weed *Alternanthera philoxeroides* (Amaranthaceae: Alternanthera)
..... LIU Yufang, WANG Xiuxiu, LI Fei, et al (2638)

Population, Community and Ecosystem

- The effect of climate change on the population fluctuation of the Siberian crane in Poyang Lake LI Yankuo, QIAN Fawen, SHAN Jihong, et al (2645)
- Characteristics of soil phosphorus fractions in wetlands with various restoration age in caizi lake, Anhui Province LIU Wenjing, ZHANG Pingjiu, DONG Guozheng, et al (2654)
- Multivariate analysis of the relations between phytoplankton assemblages and environmental factors in Chagan Lake Wetland LI Ranran, ZHANG Guangxin, ZHANG Lei (2663)
- Diversity of methanogen communities in tidal freshwater and brackish marsh soil in the Min River estuary ZENG Zhihua, YANG Minhe, SHE Chenxing, et al (2674)
- The influence of environment and phylogenic background on variation in leaf and fine root traits in the Yanhe River catchment, Shaanxi, China ZHENG Ying, WEN Zhongming, SONG Guang, et al (2682)
- Changes of soil properties in re-vegetation stages on sloping-land with purple soils in hengyang of Hunan Province, South-central China YANG Ning, ZOU Dongsheng, YANG Manyuan, et al (2693)
- Vulnerability assessment on the mangrove ecosystems in qinzhou bay under sea level rise LI Shasha, MENG Xianwei, GE Zhenming, et al (2702)
- Dynamics of biomass and productivity of three major plantation types in southern China DU Hu, ZENG Fuping, WANG Kelin, et al (2712)
- Fungal diversity in *Cunninghamia lanceolata* plantation soil HE Yuanhao, ZHOU Guoying, WANG Shenjie, et al (2725)
- Response of sandy vegetation characteristics to precipitation change in Horqin Sandy Land ZHANG Lamei, LIU Xinping, ZHAO Xueyong, et al (2737)
- Characteristics of carbon storage and sequestration of *Robinia pseudoacacia* forest land converted by farmland in the Hilly Loess Plateau Region SHEN Jiapeng, ZHANG Wenhui (2746)

Landscape, Regional and Global Ecology

- Forest microclimate change along with the succession and response to climate change in south subtropical region LIU Xiaodong, ZHOU Guoyi, CHEN Xiuzhi, et al (2755)
- Drought variations of winter wheat in different growth stages and effects of climate trend in Huang-Huai-Hai Plain, China XU Jianwen, JU Hui, LIU Qin, et al (2765)

Resource and Industrial Ecology

- A method of environment assessment of mineral resources planning for shanxi provinces base on GIS LIU Wei, DU Peijun, LI Yongfeng (2775)
- A new approach to assess the water footprint of hydropower: a case study of the Miyun reservoir in China ZHAO Dandan, LIU Junguo, ZHAO Xu (2787)

《生态学报》2014 年征订启事

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

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

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,280 页,国内定价 90 元/册,全年定价 2160 元。

国内邮发代号:82-7,国外邮发代号:M670

标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

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

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

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

本期责任副主编 祖元刚

编辑部主任 孔红梅

执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报

(SHENGTAI XUEBAO)

(半月刊 1981 年 3 月创刊)

第 34 卷 第 10 期 (2014 年 5 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 34 No. 10 (May, 2014)

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel: (010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	王如松	Editor-in-chief	WANG Rusong
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717	Published by	Science Press Add: 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail: journal@cspg.net	Distributed by	Science Press Add: 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel: (010)64034563 E-mail: journal@cspg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add: P.O.Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发刊

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 90.00 元