

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

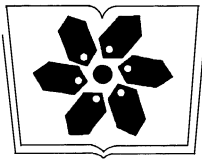
Acta Ecologica Sinica



第 32 卷 第 23 期 Vol.32 No.23 **2012**

中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 32 卷 第 23 期

2012 年 12 月 (半月刊)

目 次

中国石龙子母体孕期调温诱导幼体表型:母体操纵假说的实验检测	李 宏,周宗师,吴延庆,等 (7255)
同种或异种干扰对花鼠分散贮藏点选择的影响	申 圳,董 钟,曹令立,等 (7264)
曝气充氧条件下污染河道氨挥发特性模拟	刘 波,王文林,凌 芬,等 (7270)
贵州草海越冬斑头雁日间行为模式及环境因素对行为的影响	杨延峰,张国钢,陆 军,等 (7280)
青藏高原多年冻土区积雪对沼泽、草甸浅层土壤水热过程的影响	常 娟,王根绪,高永恒,等 (7289)
长沙城市斑块湿地资源的时空演变	恭映璧,靖 磊,彭 磊,等 (7302)
基于模型数据融合的干烟洲亚热带人工林碳水通量模拟	任小丽,何洪林,刘 敏,等 (7313)
农田氮素非点源污染控制的生态补偿标准——以江苏省宜兴市为例	张 印,周羽辰,孙 华 (7327)
用 PFU 微型生物群落监测技术评价化工废水的静态毒性	李朝霞,张玉国,梁慧星 (7336)
京郊农业生物循环系统生态经济能值评估——以密云尖岩村为例	周连第,胡艳霞,王亚芝,等 (7346)
基于遥感的夏季西安城市公园“冷效应”研究	冯晓刚,石 辉 (7355)
海南岛主要森林类型时空动态及关键驱动因子	王树东,欧阳志云,张翠萍,等 (7364)
不同播种时间对吉林省西部玉米绿水足迹的影响	秦丽杰,靳英华,段佩利 (7375)
黄土塬区不同品种玉米间作群体生长特征的动态变化	王小林,张岁岐,王淑庆,等 (7383)
密植条件下种植方式对夏玉米群体根冠特性及产量的影响	李宗新,陈源泉,王庆成,等 (7391)
沙地不同发育阶段的人工生物结皮对重金属的富集作用	徐 杰,敖艳青,张璟霞,等 (7402)
增强 UV-B 辐射和氮对谷子叶光合色素及非酶促保护物质的影响	方 兴,钟章成 (7411)
不同产地披针叶茴香光合特性对水分胁迫和复水的响应	曹永慧,周本智,陈双林,等 (7421)
芦芽山林线华北落叶松径向变化季节特征	董满宇,江 源,王明昌,等 (7430)
地形对植被生物量遥感反演的影响——以广州市为例	宋巍巍,管东生,王 刚 (7440)
指数施肥对楸树无性系生物量分配和根系形态的影响	王力朋,晏紫伊,李吉跃,等 (7452)
火烧伤害对兴安落叶松树干径向生长的影响	王晓春,鲁永现 (7463)
山地梨枣树耗水特征及模型	辛小桂,吴普特,汪有科,等 (7473)
两种常绿阔叶植物越冬光系统功能转变的特异性	钟传飞,张运涛,武晓颖,等 (7483)
干旱胁迫对银杏叶片光合系统 II 荧光特性的影响	魏晓东,陈国祥,施大伟,等 (7492)
神农架川金丝猴栖息地森林群落的数量分类与排序	李广良,丛 静,卢 慧,等 (7501)
碱性土壤盐化过程中阴离子对土壤中镉有效态和植物吸收镉的影响	王祖伟,弋良朋,高文燕,等 (7512)
两种绣线菊耐弱光能力的光合适应性	刘慧民,马艳丽,王柏臣,等 (7519)
闽楠人工林细根寿命及其影响因素	郑金兴,黄锦学,王珍珍,等 (7532)
旅游交通碳排放的空间结构与情景分析	肖 潇,张 捷,卢俊宇,等 (7540)
北京市妫水河流域人类活动的水文响应	刘玉明,张 静,武鹏飞,等 (7549)
膜下滴灌技术生态-经济与可持续性分析——以新疆玛纳斯河流域棉花为例	范文波,吴普特,马枫梅 (7559)
高温胁迫及其持续时间对棉蚜死亡和繁殖的影响	高桂珍,吕昭智,夏德萍,等 (7568)
桉树枝瘿姬小蜂虫瘿解剖特征与寄主叶片生理指标的变化	吴耀军,常明山,盛 双,等 (7576)
西南桦纯林与西南桦×红椎混交林碳贮量比较	何友均,覃 林,李智勇,等 (7586)
长沙城市森林土壤 7 种重金属含量特征及其潜在生态风险	方 晰,唐志娟,田大伦,等 (7595)
专论与综述	
城乡结合部人-环境系统关系研究综述	黄宝荣,张慧智 (7607)
陆地生态系统碳水通量贡献区评价综述	张 慧,申双和,温学发,等 (7622)



封面图说: 麋鹿群在过河——麋鹿属于鹿科,是中国的特有动物。历史上麋鹿曾经广布于东亚地区,到 19 世纪时,只剩下在北京南海子皇家猎苑内一群。1900 年,八国联军攻陷北京,麋鹿被抢劫一空。1901 年,英国的贝福特公爵用重金从法、德、荷、比四国收买了世界上仅有的 18 头麋鹿,以半野生的方式集中放养在乌邦寺庄园内,麋鹿这才免于绝灭。在世界动物保护组织的协调下,1985 年起麋鹿从英国分批回归家乡,放养到北京大兴南海子、江苏省大丰等地。这是在江苏省大丰麋鹿国家级自然保护区放养的麋鹿群正在过河。

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

DOI: 10.5846/stxb201205160722

何友均,覃林,李智勇,邵梅香,梁星云,谭玲. 西南桦纯林与西南桦×红椎混交林碳贮量比较. 生态学报, 2012, 32(23): 7586-7594.

He Y J, Qin L, Li Z Y, Shao M X, Liang X Y, Tan L. Carbon storage capacity of a *Betula alnoides* stand and a mixed *Betula alnoides* × *Castanopsis hystrix* stand in Southern Subtropical China: a comparison study. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(23): 7586-7594.

西南桦纯林与西南桦×红椎混交林碳贮量比较

何友均¹, 覃林^{2,*}, 李智勇¹, 邵梅香², 梁星云², 谭玲²

(1. 中国林业科学研究院林业科技信息研究所, 北京 100091; 2. 广西大学林学院, 南宁 530004)

摘要:用乡土树种培育优质大径材已成为亚热带满足林产品需求和生态保护的重要途径, 如何通过优化森林经营模式提高人工林生态系统碳储量已成为关注的重点。对广西凭祥伏波林场 13 年生西南桦纯林、12 年生西南桦×红椎混交林生态系统的碳素密度、碳贮量及其分布特征进行了比较研究。结果表明: (1) 西南桦与红椎不同器官碳素密度变化范围分别为 481.11—600.79 g/kg 和 451.24—543.42 g/kg, 与中国亚热带地区其他树种的碳素密度接近。相同树种不同器官之间以及不同树种相同器官之间的碳素密度差异显著 ($P < 0.05$)。西南桦纯林与西南桦×红椎混交林灌木层的平均碳素密度分别为 437.15 g/kg 和 436.98 g/kg, 混交林草本层平均碳素密度比纯林高, 差异性显著 ($P < 0.05$)。西南桦纯林土壤各层碳素密度均高于西南桦×红椎混交林, 但差异不显著 ($P > 0.05$)。 (2) 西南桦×红椎混交林乔木层碳贮量 (29.144 t/hm²) 略高于西南桦纯林 (28.541 t/hm²), 混交林生态系统碳储量 (276.486 t/hm²) 比纯林生态系统碳储量 (305.514 t/hm²) 低。西南桦纯林、西南桦×红椎混交林植被层碳贮量分别占其生态系统碳贮量的 9.64% 和 10.58%, 凋落物层分别占生态系统碳贮量的 0.19% 和 0.56%。 (3) 西南桦纯林和西南桦×红椎混交林土壤碳贮存主要集中在 0—20 cm 土层, 且随土层深度增加而减少。西南桦纯林土壤层 (0—60 cm) 碳贮量 (275.488 t/hm²) 明显高于西南桦×红椎混交林土壤层 (0—60 cm) 碳贮量 (245.688 t/hm²), 分别占其生态系统碳贮量的 90.17% 和 88.86%。 (4) 西南桦×红椎混交林乔木层碳素年净固定量 (2.428 t·hm⁻²·a⁻¹) 高于西南桦纯林乔木层碳素年净固定量 (2.196 t·hm⁻²·a⁻¹), 表明混交林比纯林的碳固定速度快。

关键词:西南桦; 红椎; 碳素密度; 碳贮量; 碳素年净固定量; 人工林业; 亚热带

Carbon storage capacity of a *Betula alnoides* stand and a mixed *Betula alnoides* × *Castanopsis hystrix* stand in Southern Subtropical China: a comparison study

HE Youjun¹, QIN Lin^{2,*}, LI Zhiyong¹, SHAO Meixiang², LIANG Xingyun², TAN Ling²

1 Research Institute of Forestry Policy and Information, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China

2 College of Forestry, Guangxi University, Nanning 530004, China

Abstract: We made a comparative study of the carbon content, carbon storage, and carbon accumulation of a 13-year-old stand of *Betula alnoides* and a 12-year-old stand of mixed *Betula alnoides* × *Castanopsis hystrix* located at the Fubo experimental farm of the Experimental Centre of Tropical Forestry in Pingxiang, Guangxi, China. The purpose was to evaluate the potential carbon storage and content of large-sized trees in plantations, and to provide more perspective about commercial forest plantations that are being adaptively managed for timber production objectives in conjunction with carbon storage and biodiversity conservation objectives.

The variation in mean carbon content of all components ranged from 481.11 to 600.79 g/kg for *Betula alnoides*, and from 451.24 to 543.42 g/kg for *Castanopsis hystrix*. These results are similar to the carbon content found in other tree species in China's southern subtropical area. The carbon content of the understorey vegetation was ranked as trees >

基金项目: 林业公益性行业科研专项 (200904005); 引进国际先进林业科学技术项目 (2012-4-69)

收稿日期: 2012-05-06; 修订日期: 2012-09-21

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: nilniq@gxu.edu.cn

shrubs. The average carbon content of the shrub layer was 437.15 g/kg in the *Betula alnoides* stand and 436.98 g/kg in the mixed *Betula alnoides* × *Castanopsis hystrix* stand. The average carbon content of the herbaceous layer in the mixed *Betula alnoides* × *Castanopsis hystrix* stand was higher than that in *Betula alnoides* stand; the difference was significant ($P < 0.05$). The carbon content of the soil decreased as the depth of soil increased. The average carbon content of the soil in the *Betula alnoides* stand was more than that in the mixed *Betula alnoides* × *Castanopsis hystrix* stand; the difference was not significant ($P > 0.05$).

The carbon storage of the tree layer in the mixed *Betula alnoides* × *Castanopsis hystrix* stand (29.144 t/hm^2) was a little higher than that in the *Betula alnoides* stand (28.541 t/hm^2). The total carbon storage in the mixed *Betula alnoides* × *Castanopsis hystrix* stand (276.486 t/hm^2) was less than in the *Betula alnoides* stand (305.514 t/hm^2). The carbon storage in the vegetation of the *Betula alnoides* stand was 29.444 t/hm^2 , and in the mixed *Betula alnoides* × *Castanopsis hystrix* stand it was 29.265 t/hm^2 , comprising 9.64% and 10.58% of total carbon storage respectively. The litterfall plays a very important role in the carbon cycle, although in this study litterfall stored relatively little carbon, accounting for only 0.19% in the single-species stand and 0.56% in the mixed stand.

In the case of the soil, the carbon was stored mainly in the 0 to 20 cm layer, which accounted for 38.05 to 45.76% of the carbon stored in all the soil. Carbon storage declined as the depth of soil increased. The carbon storage in the 0 to 60 cm soil layer of the *Betula alnoides* stand (275.488 t/hm^2) was greater than that in the mixed *Betula alnoides* × *Castanopsis hystrix* stand (245.688 t/hm^2), accounting for 90.17 and 88.86% of the carbon stored in the respective stands.

The annual carbon accumulation rates in the tree layer of the *Betula alnoides* stand and the mixed *Betula alnoides* × *Castanopsis hystrix* stand were $2.196 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ and $2.428 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ respectively, which indicates that the rate of carbon accumulation was greater in the mixed stand than in single-species stand.

Key Words: *Betula alnoides*; *Castanopsis hystrix*; carbon content; carbon storage; carbon accumulation rate; plantation forestry; subtropical China

目前,世界近 $4 \times 10^9 \text{ hm}^2$ 森林中储存了 860Pg 碳,而且每年可从大气中吸收 2.4Pg 碳,折合 8.8 PgCO_2 ,因而森林在储存 CO_2 ,适应和减缓气候变化过程中发挥着十分重要的作用^[1-5]。通过造林、再造林和森林管理等活动来增加陆地生态系统中的碳贮量,已成为调节与控制大气 CO_2 浓度的一个重要途径^[6-7]。为了更好地利用森林保护和可持续经营的新机制(REDD+) 执行减缓气候变化的政策和行动,需要对不同管理模式的人工林固碳能力与潜力有很好地认识和评估^[8-9]。

西南桦(*Betula alnoides*)和红椎(*Castanopsis hystrix*)是适宜我国南亚热带地区培养大径材的珍优造林树种^[10-11]。为了大面积推广种植,不同学者对西南桦、红椎的遗传改良、繁殖与造林技术等进行了研究^[12-17]。为了培育优质大径材,中国林业科学研究院热带林业实验中心自从 20 世纪 80 年代初起,对西南桦和红椎等珍优乡土树种实施了不同经营管理模式的试验^[18]。近年来,有学者就不同经营管理模式对西南桦、红椎生长效果和生物量分配格局开展了研究^[19-20]。也有学者对南亚热带地区杉木(*Cunninghamia lanceolata*)、秃杉(*Taiwania flousiana*)、马占相思(*Acacia mangium*)、厚荚相思(*Acacia crassicarpa*)、观光木(*Tsoongiodendron odorum*)、擎天树(*Parashorea chinensis*)、山白兰(*Paramichelia bailonii*)和柳杉(*Cryptomeria fortunei*)等人工林生态系统碳贮量进行了研究^[21-29]。但是关于西南桦纯林和西南桦×红椎混交林生态系统碳储存能力的研究尚未见报道。本文对中国林业科学研究院热带林业实验中心伏波试验场的 13 年生西南桦人工纯林及 12 年生西南桦×红椎混交林生态系统的碳储存能力进行比较研究,旨在揭示纯林、混交林对人工林生态系统碳储量的影响机制,为正确评价南亚热带地区大径材人工林生态系统的碳储量提供基础数据,对于科学评估人工林生态系统碳汇服务功能和林业碳汇对减缓全球气候变化的贡献具有重要的意义。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于广西凭祥市的中国林业科学研究院热带林业实验中心伏波试验场(106°51′—106°53′E, 22°02′—22°04′N)。该地区属亚热带季风型半湿润—湿润气候,干湿季节明显(10—次年3月为干季,4—9月为湿季)。年均气温20.5—21.7℃, $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 的活动积温6000—7600℃。年均降雨量1200—1500 mm,年均蒸发量1261—1388 mm,相对湿度80%—84%。地貌类型以低山丘陵为主,海拔430—680 m,地带性土壤为花岗岩发育的山地红壤,土层厚度 $> 80\text{ cm}$ 。

伏波试验场于1999年4月营造了西南桦纯林(初植密度1667株/hm²),2000年2月营造了西南桦×红椎混交林(初植密度1667株/hm²,西南桦与红椎混交比例为1:1)。2011年1月调查时,西南桦林已于2005年进行了间伐(间伐强度35%),郁闭度0.6,保留密度1100株/hm²,林分平均树高11.5m,平均胸径10.8cm;林下灌木主要是裂叶榕(*Ficus laceratifolia* Levl et van)、三叉苦(*Euodia lepta*)九节(*Psychotria rubra*)等,草本主要是五节芒(*Miscanthus floridulus*)、粽叶芦(*Thysanolaena maxima*)和扇叶铁线蕨(*Adiantum flabellulatum*)等,盖度约80%,凋落物层厚约1 cm。西南桦×红椎混交林经历了2005和2009年两次间伐(间伐强度分别为45%和30%),郁闭度0.7,保留密度650株/hm²,林分平均树高17.7m,平均胸径17.7cm;林下植物稀少且分布不均,林下灌木主要是九节和杜茎山(*Maesa japonica*)等,草本主要是弓果黍(*Cyrtococcum patens*)和扇叶铁线蕨等,盖度约10%,凋落物层厚约2 cm。

1.2 研究方法

1.2.1 植物样品采集及碳素密度测定

2011年1月,在试验地立地条件基本一致的西南桦纯林、西南桦×红椎混交林中,每种林分共设9块20m×20m的标准地(上、中和下坡各设3块),并实测标准地内每株林木的胸径与树高。根据标准地林木胸径和树高的测定结果,在西南桦林分中分2cm径阶选取生物量实测样木6株,并采用收获法测定样木的生物量,地上部分按2m区分段树干解析法^[30]截取圆盘样品,并分段称干材和干皮鲜重,分别收集枝和叶测定其鲜重并采集样品;地下部分采用全挖法,按根兜、粗根(根系直径 $> 2.0\text{ cm}$)、中根(0.5—2.0cm)和细根($< 0.5\text{ cm}$)测定鲜重,采集各器官样品。同时,在各标准地内沿对角线设置3个2m×2m灌木样方、3个1m×1m草本样方和3个1m×1m凋落物样方,采用样方收获法测定灌木层与草本层的地上和地下生物量,同时收集凋落物层(包括未分解和半分解凋落物)的现存量。所有样品于室内以80℃恒温下烘至恒重,计算含水率和干物质量,并采用重铬酸钾氧化-水合加热法^[31]测定碳素密度,每个样品3个重复。

1.2.2 土壤层样品采集与碳素密度测定

在各标准地中分别设置3个代表性采样点,按0—20,20—40和40—60cm分层采集土壤样品,并把相同标准地同一层次土壤按质量比例混合,带回实验室于室内自然风干和粉碎过筛后,采用重铬酸钾氧化-水合加热法^[31]测定碳素密度,每个样品3个重复。同时用环刀(100 cm³)采集各层土壤的原状土,带回实验室用环刀法测定土壤密度。

1.2.3 生物量测定与计算

根据西南桦各样木生物量实测数据,通过多模型比较分析,结果表明该树种的干材、干皮、枝、叶和根的生物量均以 $W=a(D^2H)^b$ 拟合时效果最佳,其确定系数(R^2)在0.7462—0.9793之间,F检验的相关性均达到极显著($P<0.01$)或显著水平($P<0.05$)。据此建立了西南桦单木各器官生物量 $W(\text{kg})$ 与胸径 $D(\text{cm})$ 和树高 $H(\text{m})$ 的估测模型 $W=a(D^2H)^b$ (表1)。红椎单木各器官生物量模型采用覃林等^[32]在同一试验区6株样木(胸径范围10.2—28.0cm,涵盖了红椎×红椎混交林中红椎的径级范围)建立的估测模型(表1)。据此推算各林分标准地平均木各器官的生物量,用平均木各器官生物量乘以该标准地的林木株数得到人工林各组分(干材、干皮、枝、叶、根)的生物量。灌草层和凋落物层采取实地收获生物量通过换算获得。

表 1 6 株西南桦与 6 株红椎样木各器官生物量估测模型

Table 1 Biomass model in different organs of 6 sample trees of *Betula alnoides* and *Castanopsis hystrix* respectively

器官 Organs	西南桦 <i>Betula alnoides</i>			红椎 <i>Castanopsis hystrix</i>		
	估测模型 Estimated models	R^2	F	估测模型 Estimated models	R^2	F
干材 Stem	$W_S=0.13752(D^2H)^{0.7658}$	0.8511	22.869 *	$W_S=0.06411(D^2H)^{0.8699}$	0.9968	462.287 **
干皮 Bark	$W_{BA}=0.02360(D^2H)^{0.7939}$	0.7462	11.758 *	$W_{BA}=0.01050(D^2H)^{0.8246}$	0.9606	47.767 **
枝 Branch	$W_{BR}=0.00016(D^2H)^{1.3460}$	0.9793	189.523 **	$W_{BR}=0.00011(D^2H)^{1.3949}$	0.9001	17.070 *
叶 Leaf	$W_L=0.00154(D^2H)^{0.9352}$	0.8703	26.837 **	$W_L=0.0000028(D^2H)^{1.6052}$	0.9523	38.961 **
根 Root	$W_R=0.01100(D^2H)^{0.8393}$	0.9099	40.381 **	$W_R=0.12098(D^2H)^{0.6495}$	0.9022	17.507 *

* $P<0.05$; ** $P<0.01$

1.2.4 碳贮量计算

根据植物各器官的平均碳素密度乘以对应林分组分的生物量就可得到各组分的碳贮量,相加得到人工林植被层碳贮量。

土壤碳贮量计算: $C_s = \sum_{i=1}^n 0.1 \times H_i \times B_i \times O_i$, 式中 C_s 为土壤有机碳贮量(t/hm^2); H_i 为第 i 层土壤的厚度(cm); B_i 为第 i 层土壤的平均容重(g/cm^3); O_i 为第 i 层土壤的平均有机碳密度(g/kg); n 为土壤分层数。

1.2.5 数据分析

同树种各器官之间以及不同树种同器官之间的碳素密度差异采用单因素方差分析法进行显著性比较。两种林分灌木层间、草本层间、凋落物层间和土壤层间的碳素密度差异显著性采用单因素方差分析法。数据采用 Excel 2007 及 SPSS 17.0 进行处理。

2 结果与分析

2.1 碳素密度

2.1.1 乔木层各器官碳素密度

西南桦各器官碳素密度由样木实测,红椎各器官碳素密度依据覃林等^[32]研究时获得的样木实测数据(表 2)。从表 2 看出,西南桦和红椎各器官平均碳素密度分别为在 481.11—600.79 g/kg 和 451.24—543.42 g/kg ,变异系数分别在 3.36%—7.56% 和 2.68%—5.33%。方差分析表明,同树种各器官之间以及不同树种同器官之间的碳素密度差异显著($P<0.05$) (红椎干材与叶的碳素密度差异显著性例外)。西南桦各器官碳素密度由高到低分别为:叶>干材>干皮>枝>根,红椎各器官碳素密度由高到低分别为:干皮>叶>干材>枝>根;可见,不同树种各器官碳素密度间排列顺序各异,这可能与各树种不同的生理和生态特性有关。从整体上看,西南桦和红椎均表现为地上器官的碳素密度大于地下器官,西南桦碳素密度均值(521.29 g/kg)略高于红椎(509.67 g/kg)。

表 2 各器官碳素密度/ (g/kg)

Table 2 Carbon content rate in different tree organs

树种 Species	干材 Stem	干皮 Bark	枝 Branch	叶 Leaf	根 Root
西南桦 <i>Betula alnoides</i>	529.70±20.18Aa	501.65±24.73Bb	493.18±17.96Cc	600.79±45.45Dd	481.11±16.16Ee
红椎 <i>Castanopsis hystrix</i>	523.40±14.02Ff	543.42±26.43Gg	506.11±27.00Hh	524.18±15.55Mf	451.24±16.83Nn

①同一行不同小写字母表示差异显著($P<0.05$); ②同一列不同大写字母表示差异显著($P<0.05$)

2.1.2 林下植被层和凋落物层碳素密度

两种人工林林下植被层及凋落物层碳素密度的测定结果见表 3。从表 3 可以看出,西南桦纯林与西南桦

×红椎混交林灌木层的平均碳素密度接近,分别为 437.15 g/kg 和 436.98 g/kg;西南桦×红椎混交林草本层平均碳素密度比西南桦纯林高,二者之间的差异性显著 ($P<0.05$)。无论灌木层还是草本层,同一林分中其地上部分碳素密度均高于地下部分,与乔木层碳素密度分配规律一致,并且灌木层平均碳素密度高于草本层。2 种林分凋落物层碳素平均密度表现为西南桦纯林 (531.18 g/kg) > 西南桦×红椎混交林 (469.51 g/kg),且两者之间的差异达显著性水平 ($P<0.05$)。

表 3 林下植被、凋落物和土壤碳素密度/(g/kg)

Table 3 Carbon content rate in the understory vegetation, litterfall and soil component

层次 Layer	组分 Component	西南桦纯林 PBS	西南桦×红椎混交林 MBC
灌木层 Shrub layer	地上部分 Aboveground	525.44±18.31a	530.36±15.94a
	地下部分 Underground	348.87±22.22a	343.60±7.22a
	平均 Mean	437.15±20.26a	436.98±11.58a
草本层 Herb layer	地上部分 Aboveground	448.12±30.33a	514.40±13.36b
	地下部分 Underground	355.16±8.09a	346.44±15.99a
	平均 Mean	401.64±19.21a	430.42±14.67b
凋落物层 Litterfall layer		531.18±19.64a	469.51±11.09b
土壤层 Soil layer	0—20cm	34.78±4.02a	34.28±3.22a
	20—40cm	29.47±3.61a	22.95±3.22a
	40—60cm	21.33±7.21a	15.93±3.91a
	平均 Mean	28.53±4.95a	24.39±3.59a

①PBS: 西南桦纯林 pure *Betula alnoides* stand, MBC: 西南桦×红椎混交林 mixed stand of *Betula alnoides* and *Castanopsis hystrix*; ②同一行不同字母表示差异显著 ($P<0.05$)

2.1.3 土壤碳素密度

从表 3 可知,2 种人工林土壤碳素密度明显低于其植被层及凋落物层,且土壤各层次碳素密度随着土层加深而降低。表土层(0—20cm)碳素密度是底土层(40—60cm)的 1.6 倍以上,主要是因为地表上的凋落物和植物根系分解所形成的有机碳首先进入土壤表层,从而使得表层土壤的碳素密度明显高于深层土壤^[33],同时也表明西南桦和红椎对林地土壤碳素密度的影响主要表现在 0—20 cm 土层范围。西南桦纯林土壤各层碳素密度均高于西南桦×红椎混交林,但差异不显著 ($P>0.05$);特别是在 0—20 cm 土层范围内,西南桦纯林的土壤碳素密度 (34.78 g/kg) 与西南桦×红椎混交林 (34.28 g/kg) 差异甚微,说明 2 种林分具有相同的林地养分固持效应。

2.2 碳贮量及其空间分布

植被层碳贮量由乔木层、灌木层和草本层的碳贮量构成。从表 4 可知,西南桦纯林、西南桦×红椎混交林植被层碳贮量分别是 29.444 t/hm² 和 29.265 t/hm²,并且乔木层碳贮量均占植被层的 96% 以上,灌木层和草本层合计碳贮量不足其植被层碳贮量的 4%。2 种林分干材碳贮量分别占其乔木层碳贮量的 69.58% 和 63.10%。西南桦×红椎混交林凋落物层碳贮量为 1.534 t/hm²,高于西南桦纯林 (0.582 t/hm²)。西南桦纯林土壤层(0—60cm)碳贮量 (275.488 t/hm²) > 西南桦×红椎混交林 (245.688 t/hm²),且同一林分各层土壤碳贮量表现为随土层深度增加而递减的趋势,与土壤碳素密度的变化趋势一致。2 种林分中,0—20cm 土层碳贮量最高,占土壤层碳贮量的 38.05%—45.76%,说明南亚热带人工林表层土壤(0—20cm)碳贮量较高,任何引起水土流失的活动都容易导致土壤碳损失,这也反映了南亚热带地区人工林土壤的脆弱性。西南桦纯林和西南桦×红椎混交林生态系统碳贮量分别为 305.514 和 276.486 t/hm²,其中乔木层分别占 9.34% 和 10.54%,灌草层分别占 0.30% 和 0.04%,凋落物层分别占 0.19% 和 0.55%,土壤层分别占 90.17% 和 88.87%。可见,林地土壤是非常重要的碳库。由于凋落物现存量少,凋落物层碳贮量较低,但它在保持水土、提高土壤有机碳贮量和维持地力等方面有着重要作用。

表 4 两种人工林生态系统生物量、碳贮量及其分布/(t/hm²)

Table 4 Biomass, carbon storage and spatial allocation in the two plantation ecosystems					
层次 Layer	组分 Component	西南桦纯林 PBS		西南桦×红椎混交林 MBC	
		生物量 Biomass	碳贮量 Carbon storage	生物量 Biomass	碳贮量 Carbon storage
乔木层 Tree layer	干材	37.492	19.860	34.858	18.389
	干皮	7.878	3.952	6.412	3.274
	枝	2.884	1.422	6.529	3.239
	叶	1.424	0.856	1.389	0.819
	根	5.094	2.451	7.350	3.423
	小计	54.772	28.541	56.538	29.144
灌木层 Shrub layer	地上部分	0.303	0.159	0.083	0.044
	地下部分	0.253	0.088	0.063	0.022
	小计	0.556	0.247	0.146	0.066
草本层 Herb layer	地上部分	0.851	0.381	0.070	0.036
	地下部分	0.775	0.275	0.053	0.018
	小计	1.626	0.656	0.123	0.055
凋落物层 Litterfall layer		1.096	0.582	3.268	1.534
土壤层 Soil layer	0—20cm		104.827		112.438
	20—40cm		97.840		79.407
	40—60cm		72.821		53.843
小计 Subtotal			275.488		245.688
总计 Total		58.050	305.514	60.075	276.486

2.3 乔木层碳素年净固定量

以生物量年平均增长量作为净生产力的估测指标,2 种人工林乔木层不同组分的碳素年净固定量由净生产力和相应碳素密度值乘积推算(表 5)。由表 5 可知,西南桦纯林乔木层净生产力为 4.213 t·hm⁻²·a⁻¹,碳素年净固定量为 2.196 t·hm⁻²·a⁻¹,折合成 CO₂ 的量为 8.046 t·hm⁻²·a⁻¹,低于西南桦×红椎混交林乔木层的碳素年净固定量(8.903 t·hm⁻²·a⁻¹)。同时,2 种林分乔木层不同组分的碳素年净固定量中,以干材最大。

表 5 2 种人工林乔木层的碳素年固定量/(t·hm⁻²·a⁻¹)

Table 5 The carbon accumulation rate of tree in the two plantation ecosystem						
组分 Component	西南桦纯林 PBS			西南桦×红椎混交林 MBC		
	净生产力 Annual net productivity	碳素净固定量 Annual net carbon storage	折合 CO ₂ 量 Equal to the content of CO ₂	净生产力 Annual net productivity	碳素净固定量 Annual net carbon storage	折合 CO ₂ 量 Equal to the content of CO ₂
干材 Stem	2.883	1.528	5.601	2.905	1.533	5.620
干皮 Bark	0.606	0.304	1.113	0.493	0.273	1.002
枝 Branch	0.222	0.110	0.402	0.545	0.269	0.988
叶 Leaf	0.110	0.066	0.240	0.116	0.068	0.248
根 Root	0.392	0.188	0.690	0.631	0.285	1.045
总计 Total	4.213	2.196	8.046	4.690	2.428	8.903

3 结论与讨论

西南桦与红椎不同器官碳素密度变化范围分别为 481.11—600.79 g/kg 和 451.24—543.42 g/kg,与中国亚热带地区其他树种的碳素密度基本一致,例如 13 年生杉木各器官碳素密度变化范围为 462.1—510.5 g/kg^[22]、7 年生厚荚相思(*Acacia crassicarpa*)为 470.1—533.8 g/kg^[25]。本研究 2 种林分的灌木层平均碳素密度变化范围为 436.98—437.15 g/kg,草本层为 401.64—430.42 g/kg。西南桦纯林、西南桦×红椎混交林植被层

碳素密度表现为乔木层>灌木层>草本层,除了与林下植被种类有关外,还与林下光环境条件密切相关,即乔木层叶片能截获较多太阳能,植物的光合作用强,合成、积累有机物多,因而有机碳含量高;而灌木层和草本层叶片利用的林下光照不仅强度弱且生理辐射光少,因此植物光合作用低,有机物合成、积累少,有机碳含量低。就凋落物碳素密度而言,西南桦纯林(531.18 g/kg)>西南桦×红椎混交林(469.51 g/kg),可能与西南桦树叶的碳素密度高于红椎树叶的碳素密度有关。就土壤层(0—60cm)平均碳素密度而言,西南桦纯林与西南桦×红椎混交林差异不显著($P>0.05$),且同一林分各土层碳素密度随着土层深度增加而下降。

抚育经营措施是影响人工林碳储量的重要手段。本研究表明,尽管西南桦×红椎混交林经过两次间伐后保留株数(650 株/hm²)明显低于西南桦纯林仅一次间伐后保留株数(1100 株/hm²),但混交林乔木层碳贮量(29.144 t/hm²)却略高于纯林(28.541 t/hm²),表明混交林的碳储量高于纯林。但是,就生态系统碳储量而言,西南桦纯林(305.514 t/hm²)>西南桦×红椎混交林(276.486 t/hm²),一方面西南桦林地土壤(0—60cm)碳贮量(275.488 t/hm²)明显高于西南桦×红椎混交林(245.688 t/hm²),可能与不同树种形成的土壤环境特征有关;另一方面,西南桦×红椎混交林经历了两次间伐,保留密度远低于西南桦纯林,且间伐过程对林下植被和土壤造成了一定程度的破坏,导致部分碳损失或移除,因此生态系统碳储量偏低。西南桦×红椎混交林凋落物层碳储量为 1.534 t/hm²,高于西南桦纯林(0.582 t/hm²),主要与混交林下凋落物现存量(约 2cm 厚)比纯林的现存量(约 1cm 厚)多有关。

林地土壤是重要的碳贮存库,在全球碳循环中发挥重要的作用。据估计,全世界森林地上部分碳贮量为 40×10^{11} — 7×10^{11} t,林地凋落物和土壤中的碳贮量为森林地上部分碳储量的 2 倍^[34]。凋落物的碳贮量虽为最小,但它是土壤-植物系统碳循环的联结库,对森林生态系统的碳循环起到重要的作用。本研究表明,西南桦纯林与西南桦×红椎人混交林土壤层(0—60cm)碳贮量分别占其生态系统碳储量的 90.17% 和 88.68%,对生态系统的碳储量有重大贡献。西南桦纯林和西南桦×红椎混交林土壤碳贮量高于我国森林土壤碳贮量平均水平(193.55 t/hm²)^[35],也高于同地区 28 年生秃杉人工林土壤层(0—80cm)碳贮量(150.68 t/hm²)^[23],主要是因为西南桦树叶碳素密度较高(600.79 g/kg)且比较容易分解,增加了西南桦纯林和西南桦×红椎混交林地土壤碳的输入量,因而有利于土壤有机碳的积累。2 种林分土壤碳贮量中,碳储量主要集中在 0—20cm 土层(占土壤层碳贮量的 38.05%—45.76%),且随土层厚度增加而减少。可见,保护好土壤结构尤其是表层土壤的完整性,尽量降低人为干扰活动(如林分抚育时对林下植被及凋落物的破坏)对林地土壤的影响,防止地表水土流失,对维持和提高亚热带地区人工林生态系统的碳贮量有非常重要的意义。

森林生态系统生产力研究的主要内容之一是要确定系统同化 CO₂ 的能力,加强人工林的培育、经营和管理对于提高同化 CO₂ 的功能具有非常重要的意义^[36]。由于林下植被层和凋落物层的生物量占整个生态系统的生物量比例较少,且乔木层作为人工林植被层的主体,因此本文仅以乔木层碳素年净固定量代表生态系统同化 CO₂ 的能力。有研究表明,在亚热带地区,27 年生观光木人工林乔木层年净固碳量为 $3.07 \text{ t}\cdot\text{hm}^2\cdot\text{a}^{-1}$ ^[26]、32 年生擎天树人工林乔木层年净固碳量为 $5.20 \text{ t}\cdot\text{hm}^2\cdot\text{a}^{-1}$ ^[27]、27 年生山白兰人工林乔木层年净固碳量为 $3.50 \text{ t}\cdot\text{hm}^2\cdot\text{a}^{-1}$ ^[28]。本研究西南桦×红椎混交林乔木层碳素年净固定量($2.428 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)高于西南桦纯林乔木层碳素年净固定量($2.196 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$),表明混交林比纯林的碳固定速度快。同时,2 种林分乔木层年净固定量低于上述亚热带地区几种年龄更大林分的年净固定量,说明具有进一步提高固碳的潜力。

致谢: 本研究外业调查得到了中国林业科学研究院热带林业实验中心蔡道雄、贾宏炎、卢立华、郭文福、温恒辉、明安刚、唐继新和伏波林场的帮助,特此致谢。

References:

- [1] Brown S. Present and potential roles of forests in the global climate change debate. *Unasylva*, 1996, 47: 3-10.
- [2] Lun F, Li W H, Liu Y. Complete forest carbon cycle and budget in China 1999—2008. *Forest Ecology and Management*, 2012, 264: 81-89.
- [3] Nabuurs G J, Masera O, Andrasko K, Benitez-Ponce P, Boer R, Dutschke M, Elsiddig E, Ford-Robertson J, Frumhoff P, Karjalainen T, Kurz W A, Matsumoto M, Oyhantcabal W, Ravindranath N H, Sanz Sanchez M J, Zhang X. *Forestry*. In: Metz B, Davidson OR, Bosch P R, Dave

- R, Meyer L A(eds). Climate Change 2007: Mitigation, Contribution of III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. New York: Cambridge University Press, 2007, 541-584.
- [4] Hoover C M, Leak W B, Keel B G. Benchmark carbon stocks from old-growth forests in northern New England, USA. *Forest Ecology and Management*, 2012, 266:108-114.
- [5] Pan Y, Birdsey R A, Fang J, Houghton R, Kauppi P E, Kurz W A, Phillips O L, Shvidenko A, Lewis S L, Canadell J G, Ciais P, Jackson R B, Pacala S W, McGuire A D, Piao S, Rautiainen A, Sitch S, Hayes D. A large and persistent carbon sink in the world's forests. *Science*, 2011, 333: 988-993.
- [6] Zhang X Q, Li N Y, Wu S H. Analysis on feasibility and potentiality of afforestation and reforestation under the Clean Development Mechanism of the Kyoto Protocol. *Scientia Silvae Sinicae*, 2005, 41(5): 139-143.
- [7] Wu S H, Zhang X Q, Li J Q. Baseline issues for forest-based carbon sink project on Clean Development Mechanism (CDM). *Scientia Silvae Sinicae*, 2006, 41(4): 112-116.
- [8] Wang S, Chen J M, Ju W M, Fang X, Chen M, Chen P, Yu G. Carbon sinks and sources in China's forests during 1901—2001. *Journal of Environmental Management*, 2007, 85: 524-537.
- [9] Salimon C I, Putz F E, Menezes-Filho L, Anderson A, Silveira M, Brown I F, Oliveira L C. Estimating state-wide biomass carbon stocks for a REDD plan in Acre, Brazil. *Forest Ecology and Management*, 2011, 262(3): 555-560.
- [10] Zeng J, Zheng H X, Wang B G, Chen Y P, Wang Q H. Fast-growing valuable timber species in tropical and subtropical area; *Betula alnoides*. *Forest Science and Technology*, 1998,(4):18-20.
- [11] Zhou C. Research overview and biological characteristics of precious timber tree species-*Castanopsis hystrix*. *Forest Science and Technology of Jiangxi*, 2007, (5):29-31.
- [12] Zhu J Y. Experimental study on the cultivation technique of the fast growing and high yielding for *Castanopsis hystrix*. *Forest Science and Technology*, 1993, (2): 8-10.
- [13] Wang Q H, Chen Y P, Zheng H S, Zeng J, Wang B G. Study on variability of seedling stage of different *Betula alnoides* provenance. *Journal of Yunnan Forestry Science and Technology*, 1999,(1):41-48.
- [14] Lin J P. Analyses of the planting effects of different patterns of *Castanopsis hystrix*. *Journal of Fujian Forestry Science and Technology*, 2002,29(3):59-61,80.
- [15] Zhu J Y, Jiang Y, Pang W. Study on criterion for plus trees of *Castanopsis hystrix* in Guangxi. *Guangxi Forestry Science*, 2002, 31(3): 109-113.
- [16] Pan J. Breeding and cropping of *Castanopsis hystrix*. *Practical Forestry Technology*, 2003, (2): 29-30.
- [17] Jiang Y, Zhu J Y, Zhang Z R, He C. Study on the provenance test of *Castanopsis hystrix* planted in different sites. *Guangxi Forestry Science*, 2005, 34(4): 196-199.
- [18] Cai D X, Jia H Y, Lu L H, Guo W F, Zhang W X. On Large-size timber plantation forestry of valuable hardwood species in Warm Subtropical Areas of China. *Forest Research*. 2007, 20(2): 165-169.
- [19] Niu C H, Liang H W, Wen Y G, Lu L H, Su J M, Ming A G. Distribution pattern of biomass in a 26-year-old *Castanopsis hystrix* plantation. *China Science & Technology*, 2010,20: 137-138, 147.
- [20] Zhao J L, Liang H W, Wen Y G, Lu L H, Ming A G, Su J M. Distribution pattern of biomass in the mixed uneven-aged stands of *Pinus massoniana* and *Castanopsis hystrix*. *Journal of Central South University of Forestry & Technology (Natural science edition)*, 2011, 31(2): 60-64, 71.
- [21] Wang X K, Feng Z W, Ouyang Z Y. Vegetation Carbon Storage and Density of forest ecosystem in China. *Journal of Applied Ecology*, 2001, 12(1): 13-16.
- [22] Kang B, Liu S R, Cai D X, Lu L H. Characteristics of biomass, carbon accumulation and its spatial distribution in *Cunninghamia lanceolata* forest ecosystem in Low Subtropical Area. *Scientia Silvae Sinicae*, 2009, 45(8): 147-153.
- [23] He B, Huang S X, Zhao L J, Chen Y P, Rong Y, Luo L J. Dynamic characteristics of carbon accumulation in *Taiwania flousiana* plantation ecosystem. *Scientia Silvae Sinicae*, 2009, 45(9): 151-157.
- [24] He B, Liu Y H, Yu H G, Qin W M, Wei S H, Cai S W. Carbon Density and Storage of *Acacia mangium* Plantation Ecosystem in Nanning, Guangxi. *Scientia Silvae Sinicae*, 2009, 45(2): 6-11.
- [25] He B, Yu C H, Wang A W, Li J P, Chen Y P, Rong Y. Carbon storage and distribution in *Acacia crassiparva* plantation ecosystem. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Science Edition)*, 2009, 33(3): 46-50.
- [26] Huang S D, Wu Q B, Liao K B, Mo D X, Qin J. Carbon storage and its allocation in an artificial *Tsoongiodendron odoratum* ecosystem in southern subtropical region of China. *Chinese Journal of Ecology*, 2011, 30(11):2400-2404.
- [27] Su Y, Wu Q B, Shi F J, Liang J, Dan W W. Storage and Distribution Pattern of Carbon in the Ecological System of Man-made Forest of *Parashorea chinensis*. *Journal of Anhui Agriculture Science*, 2011, 39(9): 5271-5273.
- [28] Mo D X, Liao K B, Wu Q B, Qin J. The Carbon Storage Amount and Spatial Distribution Characteristics of *Paramichelia bailonii* Plantations. *Journal of Anhui Agriculture Science*, 2011, 39(23): 14072-14075.

- [29] Mo D X, Wu Q B, Lin N, Zhuo Y. Carbon and nitrogen storage and their allocation pattern in *Cryptomeria fortunei* plantations in southeastern Guangxi of South China. *Chinese Journal of Ecology*, 2012, 31(4):794-799.
- [30] Meng X Y. *Forest Measurements (the second edition)*. Beijing: China Forestry Publishing House, 1996, 211-213.
- [31] Committee for agricultural chemistry of Chinese society of soil science. *Conventional method of chemical analysis for agricultural soil*. Beijing: Science Press, 1983. 272-273.
- [32] Qin L, He Y J, Li Z Y, Shao M X, Liang X Y, Tan L. Allocation pattern of biomass and productivity for three plantations of *Castanopsis hystrix*, *Pinus massoniana* and their mixture in south subtropical area of Guangxi, China. *Scientia Silvae Sinica*, 2011, 47(12): 17-21.
- [33] Tian D L, Yin G Q, Fang X, Xiang W H, Yan W D. Carbon density, storage and spatial distribution under different 'Grain for Green' patterns in Huitong, Hunan Province. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(22): 6297-6308.
- [34] Houghton R A. Terrestrial sources and sinks of carbon inferred from terrestrial data. *Tellus*, 1996, 48B:420-432.
- [35] Zhou Y R, Yu Z L, Zhao S D. Carbon storage and budget of major Chinese forest types. *Acta Phytocologica Sinica*, 2000, 24(5): 518-522.
- [36] 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.

参考文献:

- [6] 张小全, 李怒云, 武曙红. 中国实施清洁发展机制造林和再造林项目的可行性和潜力. *林业科学*, 2005, 41(5): 139-143.
- [7] 武曙红, 张小全, 李俊清. CDM 造林或再造林项目的基线问题. *林业科学*, 2006, 41(4): 112-116.
- [10] 曾杰, 郑海水, 汪炳根, 陈玉培, 王庆华. 热带南亚热带速生珍贵用材树种——西南桦. *林业科技通讯*, 1998, (4): 18-20.
- [11] 周诚. 珍贵用材树种红锥的生物学特性与研究综述. *江西林业科技*, 2007, (5): 29-31.
- [12] 朱积余. 红锥速生丰产栽培的试验研究. *林业科技通讯*, 1993, (2): 8-10.
- [13] 王庆华, 陈玉培, 郑海水, 曾杰, 汪炳根. 不同西南桦种源的苗期变异性研究. *云南林业科技*, 1999, (1): 41-48.
- [14] 林俊平. 红锥不同模式造林效果分析. *福建林业科技*, 2002, 29(3): 59-61, 80.
- [15] 朱积余, 蒋燧, 潘文. 广西红锥优树选择标准研究. *广西林业科学*, 2002, 31(3): 109-113.
- [16] 潘坚. 红锥的繁育与栽培. *林业实用技术*, 2003, (2): 29-30.
- [17] 蒋燧, 朱积余, 张泽尧, 何春. 红锥种源多点育苗试验研究. *广西林业科学*, 2005, 34(4): 196-199.
- [18] 蔡道雄, 贾宏炎, 卢立华, 郭文福, 张万幸. 我国亚热带珍优乡土阔叶树种大径材人工林的培育. *林业科学研究*, 2007, 20(2): 165-169.
- [19] 牛长海, 梁宏温, 温远光, 卢立华, 苏建苗, 明安刚. 26 年生红锥人工林的生物量及其分配格局. *中国科技纵横*, 2010, (20): 137-138, 147.
- [20] 赵金龙, 梁宏温, 温远光, 卢立华, 明安刚, 苏建苗. 马尾松与红锥混交异龄林生物量分配格局. *中南林业科技大学学报(自然科学版)*, 2011, 31(2): 60-64, 71.
- [21] 王效科, 冯宗炜, 欧阳志云. 中国森林生态系统的植物碳储量和碳密度研究. *应用生态学报*, 2001, 12(1): 13-16.
- [22] 康冰, 刘世荣, 蔡道雄, 卢立华. 南亚热带杉木生态系统生物量和碳素积累及其空间分布特征. *林业科学*, 2009, 45(8): 147-153.
- [23] 何斌, 黄寿先, 招礼军, 陈玉萍, 荣慧, 罗柳娟. 秃杉人工林生态系统碳素积累的动态特征. *林业科学*, 2009, 45(9): 151-157.
- [24] 何斌, 刘运华, 余浩光, 秦武明, 韦善华, 蔡树威. 南宁马占相思人工林生态系统碳素密度与贮量. *林业科学*, 2009, 45(2): 6-11.
- [25] 何斌, 余春和, 王安武, 李就鹏, 陈玉萍, 荣慧. 厚荚相思人工林碳素贮量及其空间分布. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2009, 33(3): 46-50.
- [26] 黄松殿, 吴庆标, 廖克波, 莫德祥, 覃静. 观光木人工林生态系统碳储量及其分布格局. *生态学杂志*, 2011, 30(11): 2400-2404.
- [27] 苏勇, 吴庆标, 施福军, 梁机, 段文雯. 擎天树人工林生态系统碳贮量及分布格局. *安徽农业科学*, 2011, 39(9): 5271-5273.
- [28] 莫德祥, 廖克波, 吴庆标, 覃静. 山白兰人工林生态系统碳储量及空间分布特征. *安徽农业科学*, 2011, 39(23): 14072-14075.
- [29] 莫德祥, 吴庆标, 林宁, 卓宇. 桂东南柳杉人工林碳氮储量及其分配格局. *生态学杂志*, 2012, 31(4): 794-799.
- [30] 孟宪宇. *测树学(第二版)*. 北京: 中国林业出版社, 1996, 211-213.
- [31] 中国土壤学会农业化学专业委员会. *土壤农业化学常规分析方法*. 北京: 科学出版社, 1983. 272-273.
- [32] 覃林, 何友均, 李智勇, 邵梅香, 梁星云, 谭玲. 南亚热带红椎马尾松纯林及其混交林生物量和生产力分配格局. *林业科学*, 2011, 47(12): 17-21.
- [33] 田大伦, 尹刚强, 方晰, 项文化, 闫文德. 湖南会同不同退耕还林模式初期碳密度、碳贮量及其空间分布特征. *生态学报*, 2010, 30(22): 6297-6308.
- [35] 周玉荣, 于振良, 赵士洞. 我国主要森林生态系统碳贮量和碳平衡. *植物生态学报*, 2000, 24(5): 518-522.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 32, No. 23 December, 2012 (Semimonthly)

CONTENTS

Maternal thermoregulation during gestation affects the phenotype of hatchling Chinese skinks (<i>Eumeces chinensis</i>): testing the maternal manipulation hypothesis	LI Hong, ZHOU Zongshi, WU Yanqing, et al (7255)
Effects of conspecific and interspecific interference competitions on cache site selection of Siberian chipmunks (<i>Tamias sibiricus</i>)	SHEN Zhen, DONG Zhong, CAO Lingli, et al (7264)
Characterization of ammonia volatilization from polluted river under aeration conditions: a simulation study	LIU Bo, WANG Wenlin, LING Fen, et al (7270)
Diurnal activity patterns and environmental factors on behaviors of Bar-headed Geese <i>Anser indicus</i> wintering at Caohai Lake of Guizhou, China	YANG Yanfeng, ZHANG Guogang, LU Jun, et al (7280)
Impacts of snow cover change on soil water-heat processes of swamp and meadow in Permafrost Region, Qinghai-Tibetan Plateau	CHANG Juan, WANG Gengxu, GAO Yongheng, et al (7289)
Spatial-temporal changes of urban patch wetlands in Changsha, China	GONG Yingbi, JING Lei, PENG Lei, et al (7302)
Modeling of carbon and water fluxes of Qianyanzhou subtropical coniferous plantation using model-data fusion approach	REN Xiaoli, HE Honglin, LIU Min, et al (7313)
Ecological compensation standard for controlling nitrogen non-point pollution from farmland: a case study of Yixing City in Jiang Su Province	ZHANG Yin, ZHOU Yuchen, SUN Hua (7327)
Static toxicity evaluation of chemical wastewater by PFU microbial communities method	LI Zhaoxia, ZHANG Yuguo, LIANG Huixing (7336)
Emergy evaluation of an agro-circulation system in Beijing suburb: take Jianyan village as a case study	ZHOU Liandi, HU Yanxia, WANG Yazhi, et al (7346)
Research on the cooling effect of Xi'an parks in summer based on remote sensing	FENG Xiaogang, SHI Hui (7355)
The dynamics of spatial and temporal changes to forested land and key factors driving change on Hainan Island	WANG Shudong, OUYANG Zhiyun, ZHANG Cuiping, et al (7364)
Impact of different sowing dates on green water footprint of maize in western Jilin Province	QIN Lijie, JIN Yinghua, DUAN Peili (7375)
The dynamic variation of maize (<i>Setaria mays</i> L.) population growth characteristics under cultivars-intercropped on the Loess Plateau	WANG Xiaolin, ZHANG Suiqi, WANG Shuqing, et al (7383)
Effect of different planting methods on root-shoot characteristics and grain yield of summer maize under high densities	LI Zongxin, CHEN Yuanquan, WANG Qingcheng, et al (7391)
Heavy metal contaminant in development process of artificial biological Soil Crusts in sand-land	XU Jie, AO Yanqing, ZHANG Jingxia, et al (7402)
Effects of enhanced UV-B radiation and nitrogen on photosynthetic pigments and non-enzymatic protection system in leaves of foxtail millet (<i>Setaria italica</i> (L.) Beauv.)	FANG Xing, ZHONG Zhangcheng (7411)
Photosynthetic response of different ecotype of <i>Illicium lanceolatum</i> seedlings to drought stress and rewating	CAO Yonghui, ZHOU Benzhi, CHEN Shuanglin, et al (7421)
Seasonal variations in the stems of <i>Larix principis-rupprechtii</i> at the treeline of the Luya Mountains	DONG Manyu, JIANG Yuan, WANG Mingchang, et al (7430)
Influence of terrain on plant biomass estimates by remote sensing: a case study of Guangzhou City, China	SONG Weiwei, GUAN Dongsheng, WANG Gang (7440)
Effects of exponential fertilization on biomass allocation and root morphology of <i>Catalpa bungei</i> clones	WANG Lipeng, YAN Ziyi, LI Jiyue, et al (7452)
Effects of fire damages on <i>Larix gmelinii</i> radial growth at Tahe in Daxing'an Mountains, China	WANG Xiaochun, LU Yongxian (7463)
A model for water consumption by mountain jujube pear-like	XIN Xiaogui, WU Pute, WANG Youke, et al (7473)
Specificity of photosystems function change of two kinds of overwintering broadleaf evergreen plants	ZHONG Chuanfei, ZHANG Yuntao, WU Xiaoying, et al (7483)

- Effects of drought on fluorescence characteristics of photosystem II in leaves of *Ginkgo biloba* WEI Xiaodong, CHEN Guoxiang, SHI Dawei, et al (7492)
- Numerical classification and ordination of forest communities in habitat of Sichuan Snub-nosed Monkey in Hubei Shennongjia National Nature Reserve LI Guangliang, CONG Jing, LU Hui, et al (7501)
- Impact of inorganic anions on the cadmium effective fraction in soil and its phytoavailability during salinization in alkaline soils WANG Zuwei, YI Liangpeng, GAO Wenyan, et al (7512)
- Photosynthetic adaptability of the resistance ability to weak light of 2 species *Spiraea* L. LIU Huimin, MA Yanli, WANG Baichen, et al (7519)
- Fine root longevity and controlling factors in a *Phoebe Bournei* plantation ZHENG Jinxing, HUANG Jinxue, WANG Zhenzhen, et al (7532)
- Analysis on spatial structure and scenarios of carbon dioxide emissions from tourism transportation XIAO Xiao, ZHANG Jie, LU Junyu, et al (7540)
- The hydrological response to human activities in Guishui River Basin, Beijing LIU Yuming, ZHANG Jing, WU Pengfei, et al (7549)
- Socio-economic impacts of under-film drip irrigation technology and sustainable assessment: a case in the Manas River Basin, Xinjiang, China FAN Wenbo, WU Pute, MA Fengmei (7559)
- Effects of pattern and timing of high temperature exposure on the mortality and fecundity of *Aphis gossypii* Glover on cotton GAO Guizhen, LÜ Zhaozhi, XIA Deping, et al (7568)
- Physiological responses of *Eucalyptus* trees to infestation of *Leptocybe invasa* Fisher & La Salle WU Yaojun, CHANG Mingshan, SHENG Shuang, et al (7576)
- Carbon storage capacity of a *Betula alnoides* stand and a mixed *Betula alnoides* × *Castanopsis hystrix* stand in Southern Subtropical China: a comparison study HE Youjun, QIN Lin, LI Zhiyong, et al (7586)
- Distribution and ecological risk assessment of 7 heavy metals in urban forest soils in Changsha City FANG Xi, TANG Zhijuan, TIAN Dalun, et al (7595)
- Review and Monograph**
- The relationship between humans and the environment at the urban-rural interface: research progress and prospects HUANG Baorong, ZHANG Huizhi (7607)
- Flux footprint of carbon dioxide and vapor exchange over the terrestrial ecosystem: a review ZHANG Hui, SHEN Shuanghe, WEN Xuefa, et al (7622)

《生态学报》2013 年征订启事

《生态学报》是中国生态学学会主办的生态学专业性高级学术期刊,创刊于 1981 年。主要报道生态学研究原始创新性科研成果,特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评介和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,300 页,国内定价 90 元/册,全年定价 2160 元。

国内邮发代号:82-7,国外邮发代号:M670

标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

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

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

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

编辑部主任 孔红梅 执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报

(SHENGTAI XUEBAO)

(半月刊 1981 年 3 月创刊)

第 32 卷 第 23 期 (2012 年 12 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 32 No. 23 (December, 2012)

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel:(010)62941099 www.ecologica.cn Shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	冯宗炜	Editor-in-chief	FENG Zong-Wei
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:1000717	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

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 70.00 元