

岳麓山枫香风景林碳汇效应研究

刘 洁¹,石青松²,沈守云¹,王利宝^{1*}

(1.中南林业科技大学,湖南 长沙 410004;2.古丈县林业局,湖南 古丈 416300)

摘 要:岳麓山枫香林既是长沙市城市森林主要的组成部分,又是我国四大观赏红叶的风景林之一。开展岳麓山枫香风景林碳汇效应研究对系统评价和科学管理长沙城区重要风景林资源意义重大。采用样地实测结合相对生长模型的方法对岳麓山枫香风景林碳汇效应进行研究,建立枫香风景林各器官生物量的最优模型,估算根、干、枝、叶的碳储量及总碳储量和碳密度。结果表明,枫香林分林木径阶在 6.1~46 cm 时,各器官碳储量大小依次为树干>树根>树枝>树叶;林木径阶>46 cm 时,各器官碳储量大小依次为树干>树枝>树根>树叶。岳麓山枫香风景林最优碳汇量生长拟合方程为 $C=0.124D^{2.258}$ ($R^2=0.985$)。平均碳汇速率随胸径增大而增大。岳麓山枫香风景林的碳汇效应较大,样地平均碳储量为 8.70 t,平均碳密度为 96.69 t/hm²,对改善城区人居环境作用明显。

关键词:岳麓山风景林;枫香;碳汇效应

中图分类号:S731.3

文献标志码:A

文章编号:1001-7461(2016)02-0103-06

Carbon Sink Effect of *Liquidambar formosana* in Yuelu Mountain

LIU Jie¹,SHI Qing-song²,SHEN Shou-yun¹,WANG Li-bao^{1*}

(1. Central South University of Forestry & Technology, Changsha, Hunan 410004, China;

2. Forestry Bureau of Guzhang County, Guzhang, Hunan 416300, China)

Abstract: *Liquidambar formosana* forest occurring in Yuelu Mountain, Changsha, the capital of Hunan Province is known as the main component of the forest system of the city, it is also one of the four red-leaf scenic forests in China. It is of great importance to study the carbon sink effects of *L. formosana* forest in Yuelu Mountain for scientifically evaluating and managing scenic forest resources in Changsha. The carbon sink effects of *L. formosana* in Yuelu Mountain were investigated and analyzed by using field investigation and relative growth models. Optimal models describing biomasses of different organs of *L. formosana* forest were established. Carbon storages of the root, trunk, branch, and leaf, as well as the total storage were estimated by using the established models. For the *L. formosana* forest with the diameter range of 6.1–46 cm, the carbon storages of different organs were in the order of trunk> root> branch> leaf. For those with diameter above 46 cm, the order was trunk> branch> root> leaf. Fitting equation of carbon sinks in the study area was $C=0.124D^{2.258}$, ($R^2=0.985$). The average carbon sequestration rate increased with diameter. *L. formosana* forest in Yuelu Mountain demonstrated a large carbon sink capacity, the average carbon storage in each sampling plot was about 8.70 t, the average carbon density was 96.69 t/hm², indicating that the forest significantly improved the urban living environment.

Key words: scenic forest in Yuelu Mountain; *Liquidambar formosana*; carbon sink effect

收稿日期:2015-05-05 修回日期:2015-09-25

基金项目:学校启动基金项目(104-0325)。

作者简介:刘 洁,女,硕士研究生,研究方向:城市风景园林建设。E-mail:301053507@qq.com

* 通信作者:王利宝,男,博士,讲师,研究方向:森林培育、风景林抚育。E-mail:libaowang@126.com

森林是构成陆地生态系统的重要部分,在全球变化研究中具有重大的现实意义^[1]。作为陆地生态系统的主体,森林植物通过光合作用吸收了大气中大量的 CO₂,释放出 O₂,将碳储存在森林生物量中,调节全球碳的动态平衡,减缓了温室效应和气候变暖的速度,这就是森林的碳汇作用。森林汇聚着全球植被碳库 86%以上以及土壤碳库 73%的碳,在全球气候与环境变化中具有十分重要的地位^[2-6]。城市森林是城市森林生态网络体系的重要组成部分,有着城市“肺脏”之称^[7]。城市森林的固碳释氧作用,保持着城市碳氧平衡,对缓解城市热岛效应,改善城市生态环境有着举足轻重的作用。开展城市森林碳汇效应的研究,对了解森林碳汇能力、发挥生态服务功能、改善城市生态环境具有重要意义。

岳麓山风景名胜区以岳麓书院、爱晚亭、橘子洲等景点闻名于海内外,2002 年被批准为国家级风景名胜。景区景观优美,森林资源与碳储量丰富,对维持区域性碳平衡、调节长沙市区小气候起着重要的作用。岳麓山风景名胜区也是中国四大赏枫胜地之一,爱晚亭的枫香(*Liquidambar formosana*)群落是享誉世界的著名天然林景观。枫香群落是岳麓山风景林分布最广的风景资源,西坡、东坡、南坡都有分布,主要集中于爱晚亭-清风峡-麓山寺一带,树龄从十几年至 100 a 以上都有,平均年龄为 40 a 左右^[8-9]。枫香与其他乔木混交风景林主要集中在湖南师范大学南院后山等向阳地带,枫香纯林分布在爱晚亭至蒋公墓一带。近年来,对关于岳麓山风景名胜区内动植物资源调查以及风景美学价值评价等方面已经进行了相关的研究,目前尚缺乏对岳麓山主要风景林碳汇效应的研究。通过研究岳麓山枫香风景林的碳汇效应,系统全面地评价风景林的价值,为科学合理地经营城市风景林提供科学依据。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

本研究区位于湖南省长沙市岳麓山风景名胜区爱晚亭至蒋公墓之间,地理位置为 112°44′-112°48′E、28°20′-28°27′N,主要土类为山地红壤,表土多为腐殖质土。属亚热带湿润气候区,夏季因海洋暖湿气团盘踞,高温多雨。春夏之际阴湿多雨,秋末冬初雨量较少,冬季则受西伯利亚冷气团控制,气候冷湿,年平均气温为 17.2℃,年平均最低气温 4.7℃(1 月份),年平均最高气温 29.5℃(7、8 月份),年较差 24.8℃,极端最高温可达 40.6℃,极端最低温为-9.5℃。年降雨量 1 411.4 mm,年平均相对湿度

为 80%,为全国多雨区之一。森林植物以典型的亚热带常绿阔叶林和亚热带暖性针叶林为主^[10]。

1.2 研究方法

1.2.1 样地设置及调查

1.2.1.1 踏查和样地选择 在进行具体采样之前首先要进行林地踏查和林地调查,调查初期要求对岳麓山风景区枫香林木资源状况及群落类型进行踏查核实与初步掌握,确定标准地。

1.2.1.2 样地调查与数据记录 此次调查按照亚热带常绿阔叶林监测样地标准,在岳麓山风景名胜区内不同立地条件、海拔高度分别设置 6 个标准地(30 m×30 m),对各样地林分中的枫香进行每木检尺,以测取枫香的树高、胸径、枝下高、冠幅等因子。

1.2.2 枫香风景林各器官生物量估算方法 以 2008 年岳麓山遭遇大雪灾害后进行林相改造恢复而砍伐的受损严重的枫香林各器官生物量数据为基础,采用不同的相对生长模型 $W=a(D^2H)^b$ 、 $W=aD^b$ 、 $W=ae^{D^b}$ 、 $W=aD^aH^b$,其中各器官的生物量(w)为因变量,胸径(D)和树高(H)为自变量,对已有枫香各器官的生物量分别进行拟合,对拟合方程相关系数进行寻优,利用最优拟合方程和样地实测值(每株枫香的树高、胸径)计算出样地内枫香各器官的生物量和总生物量^[11-12]。

1.2.3 碳储量和碳密度估算方法 森林生态系统碳储量是林地空间内碳元素的质量,通常按照植物有机物中碳所占的比重将植物生物量转化为它的碳储量^[13]。碳储量与树种组成、年龄、群落结构及碳含率有关。采用重铬酸钾-水合加热法^[14]测定枫香树干、树枝、树叶和树根的碳含率。各器官碳储量=碳含率×对应各器官生物量。碳密度=碳储量/面积。

1.2.4 碳汇速率估算方法 碳汇速率是指光合作用下碳在植物中储存的速度。本研究定义在各径阶范围内胸径每增长 1 cm 所增长碳储量的平均值为平均碳汇速率,即平均碳汇速率=某径阶范围内增长的碳储量/径阶差。

2 结果与分析

2.1 岳麓山枫香风景林各器官生物量模拟方程的建立

利用测得的伐倒木树高、胸径和树干、树枝、树叶、树根生物量数据,按照 4 种候选生物量生长方程进行拟合,建立了枫香各器官生物量的生长方程(表 1)。

表 1 岳麓山枫香各器官生物量模型比较

Table 1 Biomass model comparison of *L. formosana* in Yuelu Mountain

生物量组分	模型方程	参数 a	参数 b	相关系数 r	显著性测定 $Sig.$	方程序号
树干	$a(D^2 H)^b$	0.046	0.916	0.953a	0.00	1
	aD^b	0.60	2.538	0.933a	0.00	2
	$a e^{Db}$	18.644	0.093	0.916a	0.00	3
	$aD^a H^b$	1.131	0.672	0.927a	0.00	4
树枝	$a(D^2 H)^b$	6.179	1.619	0.775a	0.00	5
	aD^b	0.011	2.507	0.795a	0.00	6
	$a e^{Db}$	2.953	0.095	0.769a	0.00	7
	$aD^a H^b$	1.188	6.414	0.771a	0.00	8
树叶	$a(D^2 H)^b$	0.068	0.550	0.931a	0.00	9
	aD^b	0.377	1.056	0.939a	0.00	10
	$a e^{Db}$	3.404	0.044	0.941a	0.00	11
	$aD^a H^b$	0.051	1.836	0.926a	0.00	12
树根	$a(D^2 H)^b$	0.776	0.491	0.957a	0.00	13
	aD^b	0.667	1.445	0.939a	0.00	14
	$a e^{Db}$	15.034	0.057	0.965a	0.00	15
	$aD^a H^b$	1.017	0.361	0.987a	0.00	16

从表 1 看出,各器官 4 种模型所拟合的回归方程经显著性检验,均呈显著或极显著水平,说明枫香各器官生物量(W)与自变量(D 或 H)之间存在显著以上的相关关系,且各方程的相关系数越大,表示生物量回归方程的精确度越高。因此,枫香风景林生物量估测最优方程分别为序号 1、6、11、16,即 $W_{\text{干}} = 0.046(D^2 H)^{0.916}$ 、 $W_{\text{枝}} = 0.011D^{2.507}$ 、 $W_{\text{叶}} = 3.404e^{0.044D}$ 、 $W_{\text{根}} = 1.017D^{1.017}H^{0.361}$ 。

2.2 岳麓山枫香单株各器官生物量比较分析

根据已建立的各器官生物量估测最优方程,结合样地调查数据进行计算,可得出研究区样地中每株枫香的各器官生物量大小,并对所有调查枫香单株按 10 cm 一个径阶进行径阶划分,取每个径阶的

各器官的平均生物量,计算其各器官生物量在总生物量中所占的比例(表 2)。岳麓山枫香风景林各器官生物量及总生物量均随径阶增大而增大,各器官生物量之间大小排序为:当径阶范围为 6.1~46.0 cm 时,树干>树根>树枝>树叶;当径阶范围为 46.1~86.0 cm 时,树干>树枝>树根>树叶。干生物量在径阶范围为 66.1~76.0 cm 时为 2 746.2 kg,所占分配比例最大,达到 76.07%;枝生物量在 76.1~86.0 cm 时为 701.36 kg,所占分配比例最大,达到 14.25%;而叶生物量则在 6.1~16.0 cm 时为 5.65 kg,分配比例最大,达到 10.40%;根生物量也是在 6~16.0 cm 时分配比值最大,达到 45.16%。

表 2 岳麓山单株枫香各器官生物量分配

Table 2 Biomass distribution of single *L. formosana* in Yuelu Mountain

径阶范围/cm	干生物量/kg	枝生物量/kg	叶生物量/kg	根生物量/kg	总生物量/kg
6.1~16.0	18.51(34.09%)	5.62(10.35%)	5.65(10.40%)	24.52(45.16%)	54.29
16.1~26.0	163.66(60.87%)	25.50(9.48%)	8.90(3.31%)	70.81(26.34%)	268.86
26.1~36.0	361.79(65.94%)	63.23(11.52%)	13.65(2.49%)	109.99(20.05%)	548.66
36.1~46.0	791.50(71.03%)	135.62(12.17%)	22.47(2.02%)	164.79(14.79%)	1 114.38
46.1~56.0	1 241.09(73.54%)	207.69(12.31%)	31.82(1.89%)	206.97(12.26%)	1 687.57
56.1~66.0	1 935.78(75.36%)	324.09(12.62%)	49.19(1.91%)	259.77(10.11%)	2 568.83
66.1~76.0	2 746.20(76.07%)	474.51(13.14%)	76.22(2.11%)	312.99(8.67%)	3 609.91
76.1~86.0	3 720.85(75.62%)	701.36(14.25%)	128.37(2.61%)	369.62(7.51%)	4 920.21

注: * 括号内数据为各器官生物量分配比值。

2.3 岳麓山枫香风景林各器官碳储量分析

按照计算碳储量的公式计算得到不同径阶范围内枫香各器官的碳储量(表 3)。从表 3 看出,岳麓山枫香风景林各器官碳储量及总碳储量均随径阶增

大而增大,各器官碳储量分布大小顺序为:当径阶范围为 6.1~46.0 cm 时,树干>树根>树枝>树叶;当径阶范围为 46.1~86.0 cm 时,树干>树枝>树根>树叶。枫香为落叶树种,每年秋冬季节会损失

一部分掉落树叶的含碳量,因此树叶碳储量一直处于各组分中最少的。树干碳储量在径阶范围为66.1~76.0 cm时为1 409.35 kg,所占分配比例最大,达到75.44%;枝碳储量在76.1~86.0 cm时为

391.50 kg,所占分配比例最大,达到14.18%;而叶碳储量则在6.1~16.0 cm时为3.21 kg,分配比例最大,达到11.36%;根碳储量也是在6~16.0 cm时分配比值最大,达到42.72%。

表3 岳麓山不同径阶范围内单株枫香各器官碳储量分配

Table 3 Organ carbon storage's distribution of *L. formosana* in Yuelu Mountain

径阶范围/cm	干碳储量/kg	枝碳储量/kg	叶碳储量/kg	根碳储量/kg	总碳储量/kg
6.1~16.0	9.50(34.35%)	3.14(11.34%)	3.21(11.36%)	11.81(42.72%)	27.65
16.1~26.0	83.99(61.14%)	14.23(10.36%)	5.05(3.68%)	34.10(24.82%)	137.38
26.1~36.0	185.67(65.91%)	35.29(12.53%)	7.75(2.75%)	52.97(18.81%)	281.69
36.1~46.0	406.20(70.76%)	75.70(13.19%)	12.76(2.22%)	79.37(13.83%)	574.02
46.1~56.0	636.93(73.16%)	115.93(13.32%)	18.07(2.08%)	99.68(11.45%)	870.61
56.1~66.0	993.44(74.84%)	180.91(13.63%)	27.93(2.10%)	125.11(9.42%)	1 327.39
66.1~76.0	1 409.35(75.44%)	264.87(14.18%)	43.28(2.32%)	150.74(8.07%)	1 868.24
76.1~86.0	1 909.54(74.83%)	391.50(15.34%)	72.90(2.86%)	178.01(6.98%)	2 551.96

注: * 括号内数据为各器官碳储量分配比值。

从图1的碳储量分配比值来看,岳麓山枫香风景树胸径<16.0 cm时,干的碳储量占总碳储量的比值不高,但在16.1~46.0 cm快速增长,在胸径>46.1 cm后分配比值趋于稳定在75%左右,说明林木在幼年阶段光合产物优先满足叶、根等营养器官的需要,随着地上和地下营养空间系统的形成,光合产物主要用于树干增长;枝的碳储量分配比值随径阶增大缓慢增加,树干定型后一般稳定在15%左右;叶的碳储量在径阶范围为6.1~16.0 cm时所占的分配比值为11.36%,随径阶增大分配比值逐渐减小,达到成年树时一般稳定在3%左右,叶碳储量在幼龄阶段占比较高,说明在幼龄阶段优先保障叶生长发育所需的能量和营养,相对于干、枝和根的碳储量占比来说,叶碳储量占比最小主要也是因为落叶损失了一部分碳;根的碳储量在径阶范围为6.1~16.0 cm时所占的分配比值为42.72%,随后逐渐减小趋于稳定在7%左右,说明枫香幼龄生长阶段积累的光合产物主要用于根系生长发育。

2.4 岳麓山枫香风景林的碳汇效应分析

岳麓山枫香风景林碳储量变幅为11.67~2 551.96 kg,平均为805.22 kg。根据对岳麓山枫香胸径与碳储量的拟合方程($C=0.124D^{2.258}$)显著性检验结果($R^2=0.985$)来看,岳麓山枫香风景林的碳储量与枫香风景树胸径生长呈正相关。从图2看出,不同径阶范围内枫香风景树的平均碳汇速率不同,即枫香风景树胸径每增长1 cm相应的碳储量增加量不同,平均碳汇速率随径阶增大而增大,主要是因碳储量与生物量正相关,占树体生物量较大的树干生长量与胸径生长量呈指数级增长。

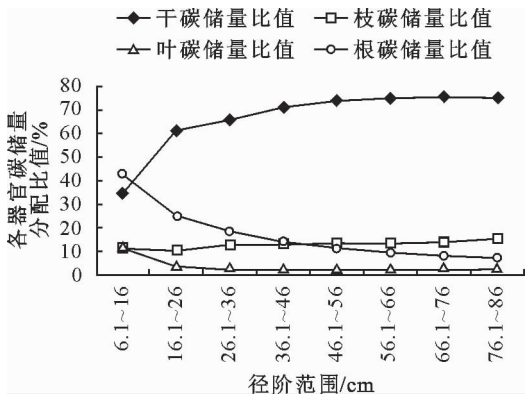


图1 岳麓山枫香各器官碳储量分配比值变化

Fig. 1 Distribution of individual organ carbon storage about *L. formosana* in Yuelu Mountain

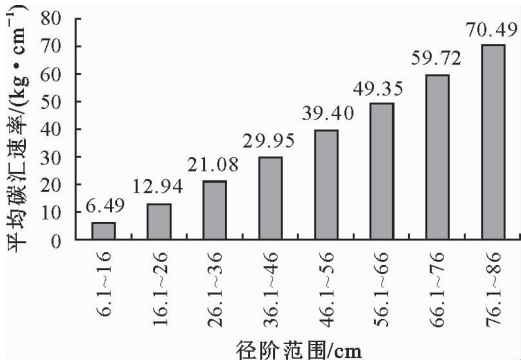


图2 岳麓山枫香风景林平均碳汇速率

Fig. 2 Average rate of carbon sequestration about *L. formosana* in Yuelu Mountain

通过各样地枫香碳储量和碳密度计算得到不同立地条件下各样地的碳储量和碳密度数据(表4)。从表4可看出,在人为干扰度高的样地内枫香风景林碳储量相对较低,分别为7.79 t和7.52 t,而在人为干扰度低或中等的样地内枫香风景林碳储量都高于8 t,可见人为干扰度越低样地内碳储量越高。岳麓山枫香风景林碳储量与海拔高低没有关系,主要是因为岳麓山海拔较低,且枫香集中分布在中山腰。

岳麓山枫香风景林样地平均碳储量为 8.70 t,平均碳密度为 96.69 t/hm²,远高于湖南省枫香林的平均碳密度(20.60 t/hm²)^[15],说明岳麓山风景名胜区管理得当,森林植物保护良好,生长旺盛。岳麓山枫香风景林在美化城区环境和森林碳汇中起着重要作用。

表 4 岳麓山枫香风景林各样地的碳储量和碳密度
Table 4 Carbon storage and carbon density of plots about *L. formosana* in Yuelu Mountain

样地号	样地面积 /hm ²	不同海拔 /m	人为干扰度	碳储量 /t	碳密度 /(t·hm ⁻²)
1	0.09	120	高	7.79	86.55
2	0.09	130	低	9.72	108.01
3	0.09	140	低	9.06	100.68
4	0.09	150	高	7.52	83.60
5	0.09	160	中	8.43	93.68
6	0.09	170	低	9.68	107.60
平均值	—	—	—	8.70	96.69

3 结论与讨论

3.1 结论

岳麓山枫香风景林树种的各器官生物量最优模型分别为: $W_{干} = 0.046(D^2H)^{0.916}$ 、 $W_{枝} = 0.011D^{2.507}$ 、 $W_{叶} = 3.404e^{0.044D}$ 、 $W_{根} = 1.017D^{1.017}H^{0.361}$,且枫香各器官生物量分布大小顺序为:当径阶范围为 6.1~46.0 cm 时,树干>树根>树枝>树叶;当径阶范围为 46.1~86.0 cm 时,树干>树枝>树根>树叶。

岳麓山枫香各器官碳储量和总碳储量随径阶增大而增加,各器官碳储量分布大小顺序为:当径阶范围为 6.1~46.0 cm 时,树干>树根>树枝>树叶;当径阶范围为 46.1~86.0 cm 时,树干>树枝>树根>树叶。

岳麓山枫香风景林碳汇量与胸径生长呈极显著正相关,平均碳汇速率随年龄增长而增大,随胸径增粗而增大。岳麓山枫香风景林样地平均碳储量为 8.70 t,平均碳密度为 96.69 t/hm²,高于湖南省枫香林的平均碳密度。风景区人为干扰度越低枫香风景林碳储量越高。岳麓山枫香风景林碳储量与海拔无关。

3.2 讨论

许多学者针对用材林进行了碳汇效应方面的研究^[16-17]。本研究对象为城市风景名胜区的风景林,该林分具有不可砍伐、不可破坏景观效果等风景林经营特有的经营特点,作为城市森林的重要组成部分,不仅具有良好的观赏价值,而且保持着城市的

碳氧平衡,有很高的碳汇价值。因此,对其碳汇效应的研究能为经营城市风景林提供科学依据,具有重要的指导意义。

岳麓山枫香风景林各器官的生物量分布大小顺序与很多研究结果相一致^[18]。而枫香风景林各器官碳储量分布的研究较少,本研究得出各器官碳储量分布大小顺序为:当径阶范围为 6.1~46.0 cm 时,树干>树根>树枝>树叶;当径阶范围为 46.1~86.0 cm 时,树干>树枝>树根>树叶。不同径阶枫香林木枝、叶、干和根碳储量分别占总碳储量的比值不同,虽然树干是主要的碳贮存器官,但在树木幼龄阶段有优先满足根、叶营养器官生长的需要,成熟后主要用于树干生长的需要。

黄芳^[15]等 2010 年研究湖南主要森林生态系统碳汇功能得出湖南省枫香林的平均碳密度为 20.60 t/hm²,本研究中岳麓山枫香风景林碳密度大于该值。一是由于随着时间增加,生物量逐渐积累,碳储量也随之增大;二是风景区受社会生产活动或人为干扰影响小,立地条件好,因此碳储量也相对较大。多项研究得出碳储量与海拔之间存在显著相关性^[19-20],本研究中样地所处海拔较低,且均分布在海拔 100~200 m 以内,所以并未呈规律变化。考虑到土壤碳库和碳汇效应分析的重要性,本研究还可对岳麓山枫香风景林土壤碳储量、年平均碳储量、不同风景林碳储量之间的对比进行进一步研究,以提高模型模拟参数与测量结果的准确性,全面有效地评价风景林碳汇效应。

参考文献:

[1] 王棣,余雕,张帆,等.森林生态系统碳储量研究进展[J].西北林学院学报,2014,29(2):85-91.
WANG D,SHE D,ZHANG F,*et al.* Advances in the researches of carbon storage of forest ecosystems[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2014, 29(2): 85-91. (in Chinese)
[2] 徐冰,郭兆迪,朴世龙,等. 2000—2050 年中国森林生物量碳库:基于生物量密度与林龄关系的预测[J]. 中国科学,2010,40(7):587-594.
XU B,GUO Z D,PIAO S L,*et al.* Biomass carbon stocks in China's forests between 2000 and 2050:a prediction based on forest biomass-age relationships[J]. Sci. China Life Sci.,2010,40(7):587-594. (in Chinese)
[3] 刘国华,傅伯杰,方精云.中国森林碳动态及其对全球碳平衡的贡献[J].生态学报,2000,20(5):733-740.
LIU G H,FU B J,FANG J Y. Carbon dynamics of Chinese forests and its contribution to global carbon balance[J]. Acta Ecologica Sinica,2000,20(5):733-740. (in Chinese)
[4] MAHLIY,NOBREA,GRACE J. Carbon dioxide transfer over a central Amazonian rain forest[J]. Journal of Geophysical Re-

search,1998,103:31593-31612.

[5] SKOLE D,TUCKER C. Tropical deforestation and habitat fragmentation in the Amazon:satellite data from 1978 to 1988[J]. Science,1993,260:1905-1910.

[6] GRACE J,LLOYD J,MCINTYRE J,*et al.* Carbon dioxide uptake by an undisturbed tropical rain forest in Southwest Amazonia,1992—1993[J]. Science,1995,270:778-780.

[7] 肖英,刘思华,王光军. 湖南 4 种森林生态系统碳汇功能研究[J]. 湖南师范大学自然科学学报,2010(1):124-128.

XIAO Y,LIU S H,WANG G J. Carbon storage of 4 forest ecosystem in Hunan Province[J]. Journal of Natural Science of Hunan Normal University,2010(1):124-128. (in Chinese)

[8] 张克荣,刘应迪,谭淑端,等. 湖南岳麓山植被演替趋势[J]. 生命科学研究,2009(4):313-319,331.

ZHANG K R,LIU Y D,TAN S D,*et al.* Vegetation succession trend in Yuelu Mountain, Hunan, China[J]. Life Science Research,2009(4):313-319,331. (in Chinese)

[9] 朱晓文,张克荣,刘克明,等. 岳麓山风景名胜区植物群落数量分类[J]. 湖南师范大学自然科学学报,2009(3):89-94.

ZHU X W,ZHANG K R,LIU K M,*et al.* The quantitative classification of plant communities in Yuelu Mountain [J]. Journal of Natural Science of Hunan Normal University,2009(3):89-94. (in Chinese)

[10] 黄宗胜,彭重华,王建兵. 岳麓山风景名胜区枫香群落研究[J]. 湖南林业科技,2005(3):24-26.

HUANG Z S,PENG C H,WANG J B. Research on the liquidambar formosana communities in landscape resort of Yuelu Mountain [J]. Hunan Forestry Science and Technology,2005(3):24-26. (in Chinese)

[11] 王维枫,雷渊才,王雪峰,等. 森林生物量模型综述[J]. 西北林学院学报,2008(2):58-63.

WANG W F,LEI Y C,WANG X F,*et al.* A review of forest biomass models[J]. Journal of Northwest Forestry University,2008(2):58-63. (in Chinese)

[12] 曾伟生. 全国立木生物量方程建模方法研究[D]. 北京:中国林业科学研究院,2011.

[13] 林清山,洪伟,吴承祯,等. 永春县柑橘林生态系统的碳储量及其动态变化[J]. 生态学报,2010(2):309-316.

LIN Q S,HONG W,WU C Z,*et al.* Organic carbon storage and its dynamic change in citrus ecosystem in Yongchun,China[J]. Acta Ecologica Sinica,2010(2):309-316. (in Chinese)

[14] 张萍. 北京森林碳储量研究[D]. 北京:北京林业大学,2009.

[15] 黄方. 湖南主要森林生态系统碳汇功能经济价值及其生态对策研究[D]. 长沙:中南林业科技大学,2007.

[16] 曹小玉,杨文龙,刘悦翠. 马尾松林生态系统碳贮量研究[J]. 西北林学院学报,2012(5):45-49,145.

CAO X Y,YANG W L,LIU Y C. Carbon storage quantity of *Pinus massoniana* ecosystem[J]. Journal of Northwest Forestry University,2012(5):45-49,145. (in Chinese)

[17] 王晓芳,张景群,王蕾,等. 黄土高原油松人工林幼林生态系统碳汇研究[J]. 西北林学院学报,2010(5):29-32,48.

WANG X F,ZHANG J Q,WANG L,*et al.* Analysis of carbon sink in artificial forest ecosystem of young *Pinus tabulaeformis* Plantation in Loess Plateau[J]. Journal of Northwest Forestry University,2010(5):29-32,48. (in Chinese)

[18] 易利萍. 枫香人工林生态系统生物量和养分的积累与分布[D]. 长沙:中南林业科技大学,2008.

[19] 艾泽民. 黄土丘陵区刺槐人工林固碳特征[D]. 陕西杨陵:西北农林科技大学,2014.

[20] 李海涛,王姗姗,高鲁鹏,等. 赣中亚热带森林植被碳储量[J]. 生态学报,2007(2):693-704.

LI H T,WANG S S,GAO L P,*et al.* The carbon storage of the subtropical forest vegetation in central Jiangxi Province [J]. Acta Ecologica Sinica,2007(2):693-704. (in Chinese)