

DOI: 10.5846/stxb201509221952

余蓉, 项文化, 宁晨, 罗赵慧. 长沙市 4 种人工林生态系统碳储量与分布特征. 生态学报, 2016, 36(12): - .

Yu R, Xiang W H, Ning C, Luo Z H. Carbon storage and sequestration in four urban forest ecosystems in Changsha, Hunan. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(12): - .

长沙市 4 种人工林生态系统碳储量与分布特征

余 蓉^{1,2}, 项文化^{1,2,3,*}, 宁 晨^{1,2}, 罗赵慧^{1,2}

1. 中南林业科技大学, 长沙 410004

2. 南方林业生态应用技术国家工程实验室, 长沙 410004

3. 湖南会同杉木林生态系统国家野外科学观测研究站, 会同 418307

摘要: 采用标准地调查和生物量实测方法, 研究了长沙市区 4 种人工林生态系统生物量、碳储量及其分布特征。结果表明: 马尾松林、杉木林、毛竹林和杨树林生态系统生物量分别为 135.390、100.578、64.497、63.381 t/hm²; 林下植被及死地被物层分别为 18.374、22.321、1.847 t/hm² 和 2.602 t/hm²。乔木层林木各器官含碳率为 0.405—0.551 gC/g, 林下植被层为 0.421—0.518 gC/g, 死地被物层为 0.230—0.545 gC/g, 土壤层有机碳含量为 15.669—19.163 g C/kg。4 种人工林生态系统总碳储量为 208.671、176.723、149.168 t/hm² 和 164.735 t/hm², 其中植被层为 32.789—67.866 t/hm²; 死地被物层为 0.394—6.163 t/hm²; 土壤层为 134.642、116.911、115.985 t/hm² 和 126.860 t/hm²。4 种森林年净固碳量为 15.167 t hm⁻² a⁻¹, 固定 CO₂ 量 55.602 t hm⁻² a⁻¹。研究结果可为深入研究城市森林碳平衡提供基础数据。

关键词: 生物量; 碳含量; 碳储量; 城市人工林; 长沙市

Carbon storage and sequestration in four urban forest ecosystems in Changsha, Hunan

YU Rong^{1,2}, XIANG Wenhua^{1,2,3,*}, NING Chen^{1,2}, LUO Zhaohui^{1,2}

1 Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, China

2 National Engineering Lab for Applied Technology of Forestry & Ecology in South China, Changsha, 410004, China

3 National Key Station for Field Scientific observation & Experiment, Huitong 418307, China

Abstract: Forests are important contributors to the global carbon (C) cycle because they store large quantities of C in the vegetation and soil, and exchange CO₂ actively with the atmosphere through photosynthesis and respiration. Urban forests are a critical part of green infrastructure that not only maintains the health and quality of life in the cities, but also provides many ecosystem services, such as C sequestration in urban areas. In the present study, the quantity and distribution of vegetation biomass, C content and C storage were investigated in four types of forests (Masson pine forests, Chinese fir forests, Bamboo forests, and Poplar forests) in Changsha City, Hunan Province. The C sequestration capacity was also estimated for the four forest ecosystems. The results showed that the biomass of overstory vegetation was 135.390, 100.578, 64.497, and 63.381 t/hm² in masson pine, Chinese fir, bamboo and poplar forests, respectively. Stem had the highest, whereas fine root had the lowest proportion of overstory biomass among the different organs for all examined forests. The biomass was 18.374, 22.321, 1.847, and 2.602 t/hm² in understory vegetation and litter layers in masson pine, Chinese fir, bamboo, and poplar forests, respectively. On average, C content was found in the range of 0.405 – 0.551 gC/g in

基金项目: 国家林业公益性行业科研专项(201104009); 湖南省高校创新平台建设项目(湘财教字[2010]70号); 长沙市科技局能源研发平台建设项目(K1003009-61)

收稿日期: 2015-09-22; 修订日期: 2016-02-29

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: csufttdl@126.com

overstory vegetation with specifically ranging of 0.405—0.516, 0.458—0.509, 0.405—0.527, and 0.454—0.551 gC/g in masson pine, Chinese fir, bamboo, and poplar forests, respectively. Average C content ranged between 0.421—0.518 gC/g in understory vegetation, 0.230—0.545 gC/g in litter layer, and 15.669—19.163 gC/g in the soil. The C content of soils under the four forest types decreased with increasing soil depth. The total C storage was 208.67, 176.723, 149.17 and 164.74 t/hm² in masson pine, Chinese fir, bamboo, and poplar forest ecosystems, respectively. Of which, the largest proportion of the total C storage was found in the soils that contained 134.64, 116.91, 115.99, and 126.86 t/hm² in the corresponding four forest types, respectively. The next was vegetation component that contained 33.976, 47.871, 32.632, and 66.346 t/hm² in the four studied forests. The litter layer accounted for the least percentage of the total C storage for the four examined forest types with a range of 0.39—6.16 t/hm². On average, the annual C sequestration in the four forest ecosystems was 3.969, 3.420, 6.019, and 1.759 t hm⁻² a⁻¹ was in masson pine, Chinese fir, bamboo, and poplar forests, respectively. The total C sequestration capacity in the four forest ecosystems (15.167 t hm⁻² a⁻¹) was roughly equal to 55.602 t hm⁻² a⁻¹ of CO₂ fixation in the study site. Our results demonstrate the significance of urban forest ecosystems in carbon sequestration to mitigate climate change. The results provide a scientific basis and reference for urban forest planning and management and an accurate estimation of C balances in urban forest ecosystems.

Key Words: biomass; carbon content; carbon storage; urban forest; Changsha City

全球气候变化已经威胁到全球生物及其赖以生存的生态环境,影响着人类的生存与可持续发展。温室效应和气候变暖的加剧,使森林碳汇问题越来越受到人们的重视^[1-5]。全球森林生态系统每年的净碳汇为(2.4±0.4) PgC^[6]。因此,开展森林生态系统碳平衡动态研究,对于科学预测森林对全球碳平衡和气候变化的作用具有重要意义^[7-10],并已成为气候变化科学研究领域和国际社会关注的热点^[11-14]。

城市化是一个国家现代化水平的重要标志,是人类文明进步的必然结果。近年来,由于城市化水平的快速推进,生态环境问题日益突出,有许多市城区空气中 CO₂ 含量已超过自然界大气中 CO₂ 正常含量 300 mg/kg 的指标^[15],生态环境的恶化已经受到普遍关注。城市森林作为城市生态系统的重要组成部分,在改善和维持城市的生态环境,促进人与自然协调、满足社会可持续发展等方面的作用突出,尤其是城市森林的固碳作用,倍受国内外学者的关注,并取得相关的研究成果^[16-21]。尽管城市森林在降低大气 CO₂ 浓度,提高城市环境质量方面有重要的作用,但目前学术界对城市森林资源的碳储量和碳密度动态研究较少^[22]。因此,在当前城市土地与森林资源紧缺的情况下,对城市森林碳汇功能的研究就显得尤为重要。

城市森林的碳储量是评价城市森林功能的重要的指标之一^[23]。本文则以占长沙市区森林面积约 80% 的马尾松、杉木、毛竹和杨树人工林生态系统^[24]为研究对象,利用标准地调查和生物量实测方法,研究了长沙市 4 种主要人工林生态系统的生物量、生产力、碳含量、碳储量及空间分布格局,可为长沙市及湖南省城市森林碳平衡的深入研究提供基础数据,为湖南省城市森林合理规划布局提供科学依据。

1 试验区概况与研究方法

1.1 试验区概况

试验区设在湖南省长沙市西区。地理位置 111°53′—114°15′E, 27°51′—28°41′N。全市地势东西两端高耸,中部低平。海拔在 100 m 左右,年均气温 17.2℃,年降水量 1360 mm,相对湿度 80%,气候为典型的亚热带大陆性季风气候。土壤以红壤为主,地带性植被为亚热带常绿阔叶林,原生植被所剩无几,现有植被以人工林为主。森林资源中马尾松林、杉木林、毛竹林所占面积居大,分别为有林地面积的 35.82%、31.90%、10.10%^[24]。试验区的马尾松林、杉木林为 1a 生苗木造林;杨树林为 1a 生插条造林;毛竹林为 1—2a 生种竹造林。

1.2 研究方法

1.2.1 标准地设置

由于研究对象为城市人工林,因此尽可能地考虑到林分周边环境的影响。标准地选择在试验区不同森林类型的中间部位。在马尾松、杉木、杨树林分内各设置 20 m×33.3 m 的标准地 3 块,共 9 块。分别对标准地内的林木进行每木检尺,实测林木胸径、树高等测树因子,根据每木检尺结果,计算出各树种的平均胸径和平均树高。为保护资源,砍伐标准木受限,只能在不同森林类型的标准地内各选出平均木 1 株,各 3 株,3 种林分共选标准木 9 株。

由于毛竹林是一种异龄林,年龄是林分结构的重要特征,因此依据管护人员记载的栽植时间,并结合对毛竹年龄的判别方法,在试验区的毛竹林分内,选出 5a 生毛竹的株数占据了 50%—60%以上的竹林进行设置 20 m×33.3 m 的标准地 3 块,在标准地内只调查记录 5a 生毛竹的株数、胸径、竹高等因子。其他年龄毛竹不计入其内。经计算后,各选出平均竹 1 株,共选 5a 生标准竹 3 株。各标准地林分特征见表 1。

表 1 各标准地林分结构特征

Table 1 Stand structure characteristics of sample plot								
类型 Forest types	年龄/a Age	密度/(株/hm ²) Density		胸径/cm DBH		树高/m Tree height		林下主要植物 Forests mainly plant
		均值	标准差	均值	标准差	均值	标准差	
尾松林 <i>Pinus massoniana</i>	16	2800	180.28	13.63	3.68	14.53	3.68	金樱子(<i>Rosa laevigata Michx</i>);白栎(<i>Quercus fabri Hance</i>);鳞毛蕨(<i>Dryopteris simasakii</i>);五节芒(<i>Miscanthus floridulus</i>)
杉木林 <i>Cunninghamia lanceolata</i>	14	2400	360.56	12.63	2.40	17.03	0.56	山矾(<i>Symplocos caudata</i>);金樱子(<i>Rosa laevigata Michx</i>);莎草(<i>Cyperus rotundus</i>);铁线蕨(<i>Adiantum Capillus-veneris</i>)
杨树林 <i>Poplar</i>	17	600	20.00	17.37	0.85	11.41	0.21	构树(<i>Broussonetia papyrifera</i>);空心泡(<i>Rubus rosaeifolius</i>);白苏(<i>Perilla frutescens</i>);牛膝草(<i>Hyssopus officinalis</i>)
毛竹林 <i>Phyllostachys edulis</i>	5	2900	45.83	10.31	0.45	11.41	0.10	野鸭椿(<i>Euscaphis japonica</i>);油茶(<i>Camellia oleifera Abel</i>);翠云草(<i>Selaginella uncinata</i>);牛膝(<i>Achyranthes bidentata Blume</i>)

1.2.2 生物量测定

采用“分层切割法”测量马尾松、杉木、杨树和毛竹地上器官生物量。将各标准木从根干(茎)交界处伐倒后,以 1 m 为区分段,截取各段的树干(竹竿)、树枝、树叶并分别称其鲜重,各采取样品 1.0 kg。

根系采用“分层挖掘法”测量地下生物量。马尾松、杉木、杨树标准木按树冠投影区域,以 0.5 m 为一层,并按根系粗度级(根桩、大根直径>0.5 cm、粗根直径 0.2—0.5 cm、细根直径<0.2 cm)分层挖取,分别不同粗度级根系称量鲜重,同时采取样品 1.0 kg;在毛竹标准竹周围 0.5 m×0.5 m 范围内挖出地下所有的鞭根,按竹兜、竹鞭、侧根、须根分别称量鲜重,同时采取样品 1.0 kg。将采集的各器官样品,带会实验室,置于 105℃ 烘箱杀青 5 min 后,再于 80℃ 烘至恒重,求其含水率,推算其生物量,计算标准木(竹)各器官生物量。

在各标准地内设置灌木层样方(2 m×2 m)和草本层样方(1 m×1 m)各 3 块,以及死地被物层小样方(1 m×1 m)3 块,记录每个样方内的灌木和草本植物种类后,均采用“样方收获法”测定生物量。灌木植物和草本植物均按地上器官和地下根系分别称其鲜重,并各取样 1.0 kg。死地被物层则分为未分解、半分解、已分解层分别称鲜重,各取样 1.0 kg,将样品带回实验室,置于 80℃ 烘箱烘至恒重,求其含水率,推算其生物量。

1.2.3 土壤样品采集

在各标准地内,划出对角线,在对角线的中间部位,布设 4 个采样点,挖土壤剖面,按 0—20 cm、20—40 cm、40—60 cm 土层,分别采取土样 500 g,共采土样 144 个。将样品带回实验室,去除石砾和根系等杂物,风干后粉碎,过 2 mm 筛,以备测定有机碳含量用。在采集土壤样品同时,用 100 cm³ 环刀取样,置于 105℃ 烘至恒重,测定土壤容重。

1.2.4 碳含量测定

所有植物和土壤样品的有机碳含量,均采用重铬酸钾—水合加热法测定。

1.3 数据处理与计算

用 Excel 及 SPSS 软件对实验数据进行整理和分析。数据显著性检验采用单因素方差分析(ANOVA)和最小显著差异法(LSD),对不同类型林分生物量及碳储量进行了比较,显著性水平设定为 $\alpha = 0.05$ 。

1.3.1 林分生物量计算

林分乔木层生物量(t/hm^2) = 单株林木生物量(3 株标准木的平均值) × 林分株数(毛竹林仅为 5 年生毛竹的株数)

灌木层生物量(t/hm^2) = 所有灌木植物地上部分生物量 + 地下部分生物量;

草本层生物量(t/hm^2) = 所有草本植物地上部分生物量 + 地下部分生物量;

死地被物层生物量(t/hm^2) = 未分解层生物量 + 半分解层生物量 + 已分解层生物量。

1.3.2 林分碳储量计算

乔木层各器官碳储量(t/hm^2) = 各器官生物量 × 各器官碳含量;

林分乔木层碳储量(t/hm^2) = 乔木层林木各器官碳储量之和;

灌木层碳储量(t/hm^2) = 各灌木植物碳储量的加权平均值;

草本层碳储量(t/hm^2) = 各草本植物碳储量的加权平均值;

土壤层碳储量(t/hm^2) = 土壤容重(g/cm^3) × 土层深度(cm) × 土壤有机碳含量(g/kg);

林分年净固碳量($\text{t}/\text{hm}^2 \cdot \text{a}^{-1}$) = 林分年净生产力 × 平均碳含量;

折合成 CO_2 量 = 林分年净固碳量 × 3.666^[25]。

2 结果与分析

2.1 不同林分的生物量

2.1.1 不同林分乔木层生物量及其分配

从表 2 可以看出,马尾松林乔木层生物量最高,为 135.390 t/hm^2 ($P < 0.05$),其次为杉木林 100.578 t/hm^2 ($P < 0.05$),毛竹林和杨树林生物量最低,分别为 64.497 t/hm^2 和 63.381 t/hm^2 ($P < 0.05$)。各林分中树干(竹竿)生物量显著高于其他组织器官($P < 0.05$),其生物量占总生物量的比例均在 50% 以上,而细根所占比例却在 2% 以下。

2.1.2 灌木层、草本层和死地被物层生物量

由表 3 可知,杨树林林下植被层和死地被物层生物量分别为 0.800 t/hm^2 和 1.802 t/hm^2 。且草本层略高于灌木层,但差异不显著($P < 0.05$),死地被物层生物量显著高于草本层和灌木层($P < 0.05$);

杉木林林下植被层生物量为 14.686 t/hm^2 ,且灌木层显著高于草本层($P < 0.05$),死地被物层生物量为 7.635 t/hm^2 ,显著高于草本层($P < 0.05$)。

毛竹林林下植被层生物量为 0.214 t/hm^2 ,且灌木层高于草本层($P < 0.05$),死地被物层生物量为 1.633 t/hm^2 ,占林下植被层和死地被物层生物量的 88.41%;

马尾松林林木下层生物量为 18.374 t/hm^2 ,其中灌木层生物量(2.064 t/hm^2)显著高于草本层(0.950 t/hm^2) ($P < 0.05$),死地被物层生物量为 15.360 t/hm^2 ,显著高于灌木层和草本层($P < 0.05$)。

表 2 不同林分乔木层的生物量及分配比例 (t/hm²)

Table 2 Stand biomass and its distribution ratio in organs for different forest types									
	林分类型 Forest type	干(竿) Stem	枝 Branch	叶 Leaf	细根(须根) Fibril root	粗根(侧根) Lateral root	大根(竹鞭) Rhizomes	根头(竹蔸) Stump	合计 Total
林分 Forest type	杨树林 <i>Poplar</i>	42.041a±18.157	5.790b±0.990	4.059b±0.379	1.145b±0.337	2.077b±0.044	2.802b±0.058	5.467b±3.385	63.381A±22.561
	杉木林 <i>Cunninghamia lanceolata</i>	70.536a±3.100	9.016b±3.210	6.837b±1.455	1.232c±0.232	2.322c±0.447	3.554c±0.680	7.081b±1.345	100.578B±4.721
	毛竹林 <i>Phyllostachys edulis</i>	39.785a±11.954	8.324b±4.060	5.474b±5.194	1.199c±0.350	1.532c±0.595	2.828c±0.556	5.355b±0.043	64.497A±18.050
	马尾松林 <i>Pinus massoniana</i>	67.971a±1.031	31.596b±8.250	21.502c±4.468	0.487d±0.105	0.931d±0.074	4.724df±0.163	8.179f±0.253	135.390C±12.401
分配比例	杨树林 <i>Poplar</i>	66.33	9.13	6.40	1.81	3.28	4.42	8.63	100
Ratio/%	杉木林 <i>Cunninghamia lanceolata</i>	70.13	8.96	6.80	1.23	2.31	3.53	7.04	100
	毛竹林 <i>Phyllostachys edulis</i>	61.68	12.91	8.49	1.86	2.38	4.38	8.30	100
	马尾松林 <i>Pinus massoniana</i>	50.20	23.34	15.88	0.36	0.69	3.49	6.04	100

表中数据为均值±标准差;不同小写字母表示同一林分不同器官生物量差异显著($P<0.05$);不同大写字母表示不同林分间生物量差异显著($P<0.05$)

表 3 林下植被层和死地被物层生物量及分配 (t/hm²)

Table 3 Biomass and its distribution ratio in undergrowth and litter layer					
层次 Layer		杨树林 <i>Poplar</i>	杉木林 <i>Cunninghamia lanceolata</i>	毛竹林 <i>Phyllostachys edulis</i>	马尾松林 <i>Pinus massoniana</i>
灌木层 Shrub layer		0.370a±0.043 (14.22)	9.703a±1.041 (43.47)	0.168a±0.162 (9.10)	2.064a±0.179 (11.23)
草本层 Herb layer		0.430a±0.029 (16.53)	4.983b±1.069 (22.32)	0.046b±0.005 (2.49)	0.950b±0.095 (5.17)
死地被物层 Litter layer	未分解 Un-decomposed	0.418±0.177	3.192±0.471	0.765±0.026	8.072±7.427
	半分解 Semi-decomposed	1.105±0.008	2.740±1.372	0.507±0.375	4.168±0.408
	已分解 Decomposed	0.279±0.022	1.703±0.720	0.361±0.163	3.121±0.583
	小计 Sum	1.802b±0.442 (69.25)	7.635a±0.764 (34.21)	1.633c±0.205 (88.41)	15.360c±2.609 (83.60)
	合计 Total	2.602	22.321	1.847	18.374

表中数据为均值±标准差;括号内数据为百分数

2.2 植被层和死地被物层碳素含量

2.2.1 乔木层林木各器官碳素含量

从乔木层林木各器官碳含量可以看出(表4),杨树各器官碳含量在 0.454—0.551 gC/g 之间,以树干碳含量最高,细根最低;杉木各器官碳含量在 0.458—0.509 gC/g,以枝碳含量最低,叶最高;毛竹各器官碳含量在 0.405—0.527 gC/g,竹枝碳含量最高,须根最低;马尾松各器官碳含量在 0.405—0.516 gC/g,以粗根最低,树干最高。表明树种不同,碳含量不同,而且器官不同,碳含量亦不相同。

2.2.2 灌木层、草本层和死地被物层碳含量

由表5可知,杨树林灌木层碳含量最高,为 0.518 gC/g,马尾松林次之,为 0.512 gC/g,毛竹林最低,为 0.484 gC/g;而草本层碳含量却以马尾松林最高,为 0.483 gC/g,杨树林其次,为 0.478 gC/g,杉木林最低,为 0.421 gC/g。不同森林类型的林下植被碳含量均表现为灌木层>草本层;死地被物层碳含量中,除毛竹林碳含量较低外(平均碳含量为 0.244 gC/g),其他森林类型死地被物层平均碳含量在 0.397—0.517 gC/g 之间。

2.3 土壤层碳含量

由表6表明,杨树林土壤有机碳含量在 12.340—23.161 g C/kg 之间,并随着土层深度的增加,土壤有机碳

含量逐渐减小,且 0—20 cm 土壤有机碳含量与 40—60 cm 土层间存在显著差异 ($P<0.05$);杉木林土壤有机碳含量在 7.650—20.354 g C/kg 之间,以表层土(0—20cm)最高,占 0—60cm 土层碳含量的 49.746%,并且随土层加深,各层次均表现出显著下降的趋势 ($P<0.05$);毛竹林土壤有机碳含量为 11.783—21.913g C/kg,且 20—40 cm 和 40—60 cm 间无显著差异 ($P>0.05$),但均显著低于表土层 ($P>0.05$);马尾松林土壤有机碳含量为 10.299—22.410 g C/kg,且垂直分布规律与毛竹林相似。由方差分析结果表明,4 种林分土壤有机碳平均含量在 15.669—19.163 g C/kg 范围内,以杨树林最高,毛竹林和马尾松林次之,杉木林最低,但差异并不显著 ($P>0.05$)。

表 4 不同林木各器官碳素含量 (gC/g)

Table 4 Carbon contents of different organs in different forest types

林木 Forest type	干(竿) Stem	枝 Branch	叶 Leaf	细根(须根) Fibril root	粗根(侧根) Lateral root	大根(竹鞭) Rhizomes	根头(竹蔸) Stump	平均值 Average
杨树 <i>Poplar</i>	0.551±0.099	0.547±0.139	0.501±0.062	0.454±0.016	0.476±0.026	0.512±0.031	0.486±0.032	0.504
杉木 <i>Cunninghamia lanceolata</i>	0.476±0.071	0.458±0.102	0.509±0.043	0.474±0.078	0.476±0.056	0.478±0.063	0.462±0.105	0.476
毛竹 <i>Phyllostachys edulis</i>	0.512±0.102	0.527±0.203	0.499±0.179	0.405±0.115	0.466±0.094	0.506±0.087	0.467±0.106	0.483
马尾松 <i>Pinus massoniana</i>	0.516±0.124	0.476±0.025	0.446±0.077	0.506±0.061	0.405±0.029	0.466±0.074	0.467±0.102	0.469

表中数据为均值±标准差;最后一列平均值为加权平均值

表 5 不同林分林下植被层和死地被物层碳含量 (gC/g)

Table 5 Carbon contents of under growth and litter layer in different forest types

林型 Forest type	灌木层 Shrub layer	草本层 Herb layer	死地被物层 Litter layer			平均值 Average
			未分解 Unrecompensed	半分解 Semi-decomposed	已分解 Decomposed	
杨树林 <i>Poplar</i>	0.518±0.072	0.478±0.073	0.479±0.023	0.545±0.061	0.528±0.098	0.517±0.023
杉木林 <i>Cunninghamia lanceolata</i>	0.507±0.061	0.421±0.130	0.492±0.036	0.434±0.100	0.458±0.087	0.461±0.020
毛竹林 <i>Phyllostachys edulis</i>	0.484±0.032	0.474±0.039	0.230±0.003	0.249±0.014	0.253±0.014	0.244±0.008
马尾松林 <i>Pinus massoniana</i>	0.512±0.026	0.483±0.082	0.402±0.098	0.437±0.170	0.353±0.920	0.397±0.028

表中数据为均值±标准差

表 6 不同林分土壤有机碳含量 (g C/kg)

Table 6 Soil carbon content in different forest types

林分 Forest type	0—20cm	20—40cm	40—60cm	加权平均值 Weighted Means
杨树林 <i>Poplar</i>	23.161aA±4.339 (1.161)	16.887abA±4.071 (1.237)	12.340bA±3.105 (1.263)	19.163A±5.780 (1.220)
杉木林 <i>Cunninghamia lanceolata</i>	20.354aA±0.932 (1.400)	12.912bA±0.634 (1.437)	7.650cB±1.044 (1.500)	15.669A±5.581 (1.446)
毛竹林 <i>Phyllostachys edulis</i>	21.913aA±3.790 (1.093)	15.587bA±2.245 (1.184)	11.783bA±1.263 (1.317)	17.774A±4.989 (1.198)
马尾松林 <i>Pinus massoniana</i>	22.410aA±0.592 (1.417)	13.438bA±1.374 (1.490)	10.299bAB±0.972 (1.510)	17.140A±5.516 (1.472)

表中数据为均值±标准差;括号内数据为土壤容重;同行相同小写字母表示同一森林类型不同土层间有机碳含量差异不显著 ($P>0.05$);同列不同大写字母表示不同森林类型间和相同土层间有机碳含量差异显著 ($P<0.05$)

2.4 森林生态系统碳储量及空间分布

2.4.1 不同林分乔木层碳储量

表 7 可以看出,马尾松林乔木层总碳储量最高,为 66.346 t/hm²,显著高于其他森林类型 ($P<0.05$),其次为杉木林 47.871 t/hm² ($P<0.05$),最低为杨树林和竹林分别为 33.976 t/hm² 和 32.632 t/hm² ($P<0.05$),且杨树林和竹林总碳储量间没有显著差异 ($P>0.05$)。

4 种林分的树干(竿)碳储量均为最高,且显著高于其他器官 ($P<0.05$),均占乔木层总碳储量的 52% 以

上。其次为树枝,占 8.504%—22.649%,细根(须根)均为最低,为 0.246—0.584 t/hm²,仅占 2% 以下。

从表 7 还可以看出,4 种林分地上部分碳储量主要集中在树干(竿),除马尾松外,其他林分的枝和叶碳储量间均无显著差异($P>0.05$);地下部分主要集中在根头(竹蔸)内,除杨树林外,根头(竹蔸)碳储量均显著高于细根、粗根和大根($P<0.05$)。

表 7 不同林分乔木层碳储量(t/hm²)

Table 7 Carbon storage of different organs in different forest types								
林木 Forest type	干±竿 Stem	枝 Branch	叶 Leaf	细根(须根) Fibril root	粗根(侧根) Lateral root	大根(竹鞭) Rhizomes	根头(竹蔸) Stump	合计 Total
杨树林 <i>Poplar</i>	23.177a±10.010	3.164b±0.541	2.031b±0.189	0.520b±0.153	0.988b±0.021	1.435b±0.030	2.659b±1.646	33.976A±12.277
杉木林 <i>Cunninghamia lanceolata</i>	33.603a±1.477	4.129b±1.470	3.482b±0.741	0.584c±0.110	1.105c±0.213	1.699c±0.325	3.268b±0.621	47.871B±2.213
毛竹林 <i>Phyllostachys edulis</i>	20.385a±6.125	4.383b±2.735	2.732b±2.026	0.486c±0.142	0.714c±0.277	1.431c±0.281	2.502b±0.020	32.632A±9.217
马尾松林 <i>Pinus massoniana</i>	35.080a±0.532	15.027b±3.924	9.594c±1.994	0.246d±0.053	0.377d±0.030	2.200d±0.076	3.821f±0.118	66.346C±5.823

表中数据为均值±标准差;同行不同小写字母表示差异显著($P<0.05$);同列相同大写字母表示差异不显著($P>0.05$)

2.4.2 森林生态系统碳储量及空间分布

由表 8 可以看出,杨树林生态系统碳储量为 164.735 t/hm²,其中土壤层为 126.860 t/hm²,占系统总碳储量的 77.01%,且显著高于其他层次碳储量($P<0.05$);植被层碳储量为 36.925 t/hm²,占 22.41%;死地被物层为 0.950 t/hm²,仅占 0.58%。

表 8 森林生态系统碳储量及空间分布(t/hm²)

Table 8 Carbon storage and distribution for different Forest types					
层次 Layer		林分 Forest type			
		杨树林 <i>Poplar</i>	杉木林 <i>Cunninghamia lanceolata</i>	毛竹林 <i>Phyllostachys edulis</i>	马尾松林 <i>Pinus massoniana</i>
乔木层 Arbores layer		33.976aA±12.227	47.871aB±2.213	32.632aA±9.217	66.346aC±5.823
灌木层 Shrub layer		2.639bA±0.354	5.766bB±0.795	0.133bC±0.014	1.061bC±0.093
草本层 Herb layer		0.310cA±0.024	2.637cB±0.614	0.024bC±0.003	0.459bA±0.003
植被层 Vegetable layer	小计 Sum	36.925±18.801	56.274±25.653	32.789±18.795	67.866±37.867
死地被物层 Litter layer	未分解 Under-composed	0.200±0.085	1.569±0.232	0.176±0.008	3.243±2.984
	半分解 Semi-decomposed	0.602±0.004	1.190±0.596	0.126±0.009	1.820±0.178
	已分解 De-composed	0.147±0.011	0.779±0.330	0.092±0.009	1.101±0.206
	小计 Sum	0.950cA±0.220	3.538bcB±0.496	0.394cA±0.043	6.163cC±1.771
土壤层 Soil layer ±cm	0—20	54.106±13.258	56.997±2.825	48.027±9.423	63.493±0.592
	20—40	41.580±8.740	36.944±2.280	37.046±6.828	40.046±1.374
	40—60	31.174±7.928	22.970±3.413	30.912±1.652	31.102±0.972
	小计 Sum	126.860dAB±11.482	116.911dA±17.104	115.985dA±8.671	134.642dB±16.728
合计 Total		164.735AB±62.788	176.723A±56.481	149.168B±57.901	208.671C±66.090

表中数据为均值±标准差;同列不同小写字母表示相同林型不同层次碳储量差异显著($P<0.05$);同行相同大写字母表示不同林型碳储量差异不显著($P>0.05$)

杉木林生态系统总碳储量为 176.723 t/hm²,其中土壤层碳储量为 116.911 t/hm²,占系统总碳储量的 66.16%;植被层为 56.274 t/hm²,占 31.84%,且灌木层碳储量显著高于草本层($P<0.05$);死地被物层为 3.538 t/hm²,占生态系统碳储量的 2.00%。

毛竹林生态系统碳储量为 164.735 t/hm²,其中土壤层碳储量为 115.985 t/hm²,占系统总碳储量的 77.76%;植被层为 32.789 t/hm²,占 21.98%,且灌木层和草本层碳储量间无显著差异($P>0.05$);死地被物层碳储量为 0.394 t/hm²,仅占 0.26%。

马尾松林生态系统碳储量为 208.671 t/hm^2 , 其中土壤层碳储量为 134.642 t/hm^2 , 占系统总碳储量的 64.52%; 植被层为 67.866 t/hm^2 , 占 32.52%, 且乔木层碳储量显著高于灌木层和草本层 ($P < 0.05$), 但灌木层和草本层间无显著差异 ($P > 0.05$); 死地被物层碳储量为 6.163 t/hm^2 , 只占 2.96%。

从表 8 还可以看出, 4 种森林生态系统总碳储量以马尾松林最高 ($P < 0.05$), 竹林最低, 其碳储量的空间分布格局均为: 土壤层 > 植被层 > 死地被物层。

2.4.3 4 种森林类型年净固碳量

由表 9 可看出, 长沙市 4 种人工林乔木层净初级生产力为 $31.597 \text{ t hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 。其中, 毛竹林净初级生产力最高, 为 $12.461 \text{ t hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$, 其次为马尾松林和杉木林, 分别为 $8.462 \text{ t hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 和 $7.184 \text{ t hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$, 以杨树林 $3.490 \text{ t hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 最低。4 种林分的年净固碳量约为 $15.167 \text{ t hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$, 以毛竹林最高, 为 $6.019 \text{ t hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$, 马尾松林和杉木林相近, 分别为 $3.969 \text{ t hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 和 $3.721 \text{ t hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$, 最低的是杨树林, 为 $1.758 \text{ t hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 。4 种林分折合成 CO_2 量为 $55.602 \text{ t hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 。其中, 毛竹林最高, 约为马尾松林、杉木林的 2 倍, 杨树林的 3.4 倍。

表 9 长沙市 4 种人工林类型乔木层生产力与年净固碳量 ($\text{t hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$)

Table 9 Productivity and annual net carbon accumulation of four different artificial forests in Changsha

林型 Forest type	净初级生产力 Net primary productivity	年净固碳量 Annual net carbon accumulation	折合成 CO_2 量 CO_2 accumulation
杨树林 <i>Poplar</i>	3.490	1.759	6.448
杉木林 <i>Cunninghamia lanceolata</i>	7.184	3.420	12.538
毛竹林 <i>Phyllostachys edulis</i>	12.461	6.019	22.066
马尾松林 <i>Pinus massoniana</i>	8.462	3.969	14.550
合计 Total	31.597	15.167	55.602

2.4.4 4 种人工林生态系统碳总储量

依据长沙市森林资源数据, 推算了长沙市 4 种人工林生态系统的碳总储量, 并列于表 10。可以看出, 长沙市 4 种人工林面积为 368195.50 hm^2 , 总碳储量为 6868.35 万吨, 其中以栽植面积大的马尾松林和杉木林的总碳储量最高, 占 4 种人工林生态系统总碳储量的 88.04%。

表 10 长沙市 4 种人工林生态系统碳总储量

Table 10 Total carbon storage in four artificial forest ecosystems in Changsha

林分类型 Forest type	森林面积 / hm^2	碳储量 / (t/hm^2)	总碳储量 / ($\times 10^4 \text{ t}$)	占百分比/%
马尾松林 <i>Pinus massoniana</i>	160352.00	208.67	3346.07	48.71
杉木林 <i>Cunninghamia lanceolata</i>	152852.10	176.72	2701.20	39.33
杨树林 <i>Poplar</i>	490.80	164.74	8.09	0.12
毛竹林 <i>Phyllostachys edulis</i>	54500.60	149.17	812.99	11.84
合计 Total	368195.50	699.30	6868.35	100.00

3 讨论

3.1 林分生物量

生物量是森林生态系统最基本的数量特征之一, 也是研究森林碳储量和碳平衡的基础。本文所测得 17a 生杨树林生物量为 63.38 t/hm^2 , 高于天津 13a 生杨树林 45.43 t/hm^2 [26], 分别低于天津 21a 生和贵阳市 25a 生杨树林 100.17 t/hm^2 和 105.36 t/hm^2 [26, 27]。同时, 16a 生马尾松林生物量为 135.390 t/hm^2 , 分别高于长沙南区 13a 生和广西隆林县 14a 生马尾松林 63.42 t/hm^2 和 114.95 t/hm^2 [19, 28]。表明生物量是随林分年龄的增大而增加, 这与前人的研究结果 [29-31] 相一致。

本研究的 14a 生杉木林生物量 100.578 t/hm^2 , 略高于会同 14a 生杉木林 97.186 t/hm^2 ^[32], 而低于大岗山 16a 生杉木林 148.303 t/hm^2 ^[33]。同时毛竹林生物量为 64.479 t/hm^2 , 却与福建永春毛竹林 64.749 t/hm^2 ^[34] 近似, 但低于四川长宁毛竹林 87.38 t/hm^2 ^[35]。

上述表明, 林龄、地域、气候、立地条件及林分类型均是影响森林生物量的重要因素。

3.2 林木的碳含量

林木的含碳率是估算森林碳储量必须的基本参数。以往研究表明, 估算森林碳储量有的专家学者采用国际上常用的转换系数 0.5 g C/g ^[20,22,36]。有的采用实测和分析林木的含碳率, 本文则采用后者对长沙市 4 种森林类型的含碳率进行了测定和分析, 而与本研究相关的有: 马尾松含碳率为 $0.429—0.541$ ^[19]、 $0.446—0.516$ ^[27]、 $0.475—0.559 \text{ gC/g}$ 和 $0.510—0.526 \text{ g C/g}$ ^[37], 本文测得 $0.405—0.516 \text{ gC/g}$; 杉木: $0.499—0.617$ ^[27]、 $0.474—0.533$ ^[37]、 $0.449—0.532$ ^[38]、 $0.458—0.509 \text{ gC/g}$ ^[39], 本研究为 $0.458—0.509 \text{ gC/g}$; 杨树: $0.428—0.441$ ^[23]、 $0.419—0.475$ ^[26]、 $0.505—0.568$ ^[27]、 $0.423—0.456 \text{ g C/g}$ ^[37], 本文测得 $0.454—0.551 \text{ gC/g}$; 毛竹: $0.462—0.481$ ^[35]、 $0.445—0.499$ ^[40]、 $0.451—0.531$ ^[41]、 $0.422—0.475$ ^[42]、 $0.468—0.521 \text{ g C/g}$ ^[43], 本研究为 $0.405—0.527 \text{ gC/g}$ 。虽然上述各研究结果接近, 但还是存在差异, 而且各个器官的含碳率大小顺序也不尽相同。表明林木的含碳率随种类和器官不同而不同, 同一种类在不同区域其含碳率也不相同, 且与常用转换系数也存在差异。因此, 为了科学准确计算森林碳汇, 有必要分区域分林种实测含碳率。

3.3 森林的碳储量及其分配格局

本研究的马尾松林生态系统碳储量为 208.671 t/hm^2 , 低于方晰等的广西武宣县马尾松林 276.63 t/hm^2 ^[44], 而巫涛等的长沙南区马尾松林 159.93 t/hm^2 ^[19]、陶玉华等的柳州市马尾松林 180.700 t/hm^2 ^[20]、宁晓波等的贵阳市马尾松林 165.37 t/hm^2 ^[27], 均小于本研究; 同时本研究的杉木林碳储量为 176.723 t/hm^2 , 而陶玉华等的柳州市杉木林 124.800 t/hm^2 ^[20]、林雯等的广州市杉木林 165.710 t/hm^2 ^[38]、肖复明等的会同县杉木林 150.190 t/hm^2 ^[40], 均小于本研究。

本文的杨树林碳储量为 164.735 t/hm^2 , 低于贵阳市杨树林 188.490 t/hm^2 ^[27], 而高于天津 13a 生和 21a 生杨树林 121.030 t/hm^2 和 121.720 t/hm^2 ^[26]。

刘应芳等的蜀南竹海毛竹林碳储量为 105.070 t/hm^2 ^[41], 周国模等的浙江临安毛竹林 106.362 t/hm^2 ^[43], 均低于本研究的毛竹林 149.168 t/hm^2 , 但张蕊等的四川长宁毛竹林 156.570 t/hm^2 ^[35]、肖复明等的会同县毛竹林 166.340 t/hm^2 ^[40]、王兵等的大岗山毛竹林 226.750 t/hm^2 ^[42] 却高于本研究。

上述表明, 各地马尾松、杉木、杨树、毛竹林生态系统的碳储量均存在差异, 这可能与不同研究区的气候条件、林分密度、立地条件及经营方式有关。但各研究区不同森林类型的碳储量分布格局是一致的, 即: 土壤层 > 植被层 > 枯落物层。

3.4 森林的碳汇能力

由表 11 可以看出, 本文马尾松林固碳量高于长沙市南区马尾松林的 1.6 倍, 与广西马尾松林接近; 杉木林固碳量高于广州市杉木林 1.5 倍, 与湖南会同杉木林一致; 杨树林固碳量高于天津杨树林 1.2 倍和 1.5 倍; 毛竹林固碳量高于浙江和江西 1.2 倍和 1.4 倍, 但却低于湖南会同毛竹林 1.4 倍。表明森林类型、生长区域以及经营管理措施等对森林固碳量产生影响。

从表 11 还可以看出, 各栽植区的 4 种人工林中, 均以毛竹林的固碳能力最强, 其固碳能力为马尾松林和杉木林的 1—3 倍, 为杨树林的 3—5 倍。因此, 在城市中适度发展毛竹林, 有利于保护当地生态环境, 并在应对气候变化中发挥更大的碳汇功能^[35]。

4 结论

(1) 长沙市杨树林、杉木林、毛竹林和马尾松林生态系统乔木层生物量分别为 63.381 、 100.578 、 64.497 t/hm^2 和 135.390 t/hm^2 ; 林下植被及死地被物层生物量分别为 2.602 、 22.321 、 1.847 t/hm^2 和 18.374 t/hm^2 。

(2) 林木各器官含碳量: 马尾松 0.405—0.516 gC/g、杉木 0.458—0.509 gC/g、杨树 0.454—0.551 gC/g、毛竹 0.405—0.527 gC/g。

表 11 不同森林类型碳汇能力的比较 ($\text{t hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$)

Table 11 Comparison of carbon sink capacity in different forest ecosystems

林分类型 Forest type	研究地点 Research location	固碳量 Net carbon accumulation	固定 CO_2 量 Net CO_2 accumulation	资料来源 Data source
马尾松林 <i>Pinus massoniana</i>	广西	3.85	14.11	方晰等 ^[44]
	长沙	2.50	9.16	巫涛等 ^[19]
	本文	3.97	14.55	本文
杉木林 <i>Cunninghamia lanceolata</i>	广州市	2.30	8.43	林雯等 ^[38]
	湖南会同	3.12	11.46	方晰等 ^[45]
	湖南会同县	3.48	12.79	肖复明等 ^[46]
	本文	3.42	12.54	本文
杨树林 <i>Poplar</i>	天津	2.06 2.69	7.55 9.86	李平等 ^[26]
	本文	1.76	6.45	本文
毛竹林 <i>Phyllostachys edulis</i>	浙江	5.08	18.62	周国模等 ^[43]
	江西	4.30	15.77	王兵等 ^[42]
	湖南会同	8.29	30.40	肖复明等 ^[46]
	本文	6.02	22.07	本文

(3) 4 种森林生态系统碳储量为: 马尾松林 208.671 t/hm^2 、杉木林 176.723 t/hm^2 、杨树林 164.735 t/hm^2 、毛竹林 149.168 t/hm^2 。其中植被层分别为 67.866、56.274、36.925、32.789 t/hm^2 ; 死地被物层为 6.163、3.538、0.950、0.394 t/hm^2 ; 土壤层为 134.642、116.911、126.860、115.985 t/hm^2 。碳储量分布格局为土壤层>植被层>死地被物层。

(4) 长沙市 4 种人工林的净生产力为马尾松林 8.462 $\text{t hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 、杉木林 7.184 $\text{t hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 、杨树林 3.490 $\text{t hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 、毛竹林 12.461 $\text{t hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$; 年固碳量和年固定的 CO_2 量为马尾松 3.969 $\text{t hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 和 14.550 $\text{t hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 、杉木林 3.420 $\text{t hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 和 12.538 $\text{t hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 、杨树林 1.759 $\text{t hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 和 6.448 $\text{t hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 、毛竹林 6.019 $\text{t hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 和 22.066 $\text{t hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 。

(5) 长沙市 4 种人工林面积为 368195.50 hm^2 , 总碳储量为 6868.35 万吨, 其中马尾松林 3346.07 万吨、杉木林 2701.20 万吨、杨树林 8.09 万吨、毛竹林 812.99 万吨。表明长沙市的 4 种人工林的碳吸存功能明显, 在维持和改善市区环境中发挥了较大的作用。因此减少人为活动对城市森林的干扰, 增加城市造林面积, 加强保护和经营管理, 提高城市森林的碳汇功能, 对缓解城市热岛效应, 减缓气候变化负面影响等具有重要意义。

参考文献 (References):

- [1] Wright S J. The carbon sink in intact tropical forests. *Global Change Biology*, 2013, 19(2): 337-339.
- [2] Fang J Y, Guo Z D, Hu H F, Kato T, Muraoka H, Son Y. Forest biomass carbon sinks in East Asia, with special reference to the relative contributions of forest expansion and forest growth. *Global Change Biology*, 2014, 20(6): 2019-2030.
- [3] Syampungani S, Chirwa P W, Akinnifesi F K, Ajayi O C. The potential of using agroforestry as a win-win solution to climate change mitigation and adaptation and meeting food security challenges in Southern Africa. *Agricultural Journal*, 2010, 5(2): 80-88.
- [4] Tan Z H, Zhang Y P, Yu G R, Sha L Q, Tang J W, Deng X B, Song Q H. Carbon balance of a primary tropical seasonal rain forest. *Journal of Geophysical Research*, 2010, 115(D4): D00H26.
- [5] Li F, Bond-Lamberty B, Levis S. Quantifying the role of fire in the earth system-part 2: impact on the net carbon balance of global terrestrial ecosystems for the 20th century. *Biogeosciences*, 2014, 11(5): 1345-1360.
- [6] Pan Y D, Birdsey R A, Fang J Y, 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 L, Rautiainen A, Sitch S, Hayes D. A large and persistent carbon sink in the world's forests. *Science*, 2011, 333(6045): 988-993.

- [7] 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. 生态学报, 2000, 20(5): 733-740.
- [8] 方精云, 陈安平. 中国森林植被碳库的动态变化及其意义. 植物学报, 2001, 43(9): 967-973.
- [9] Stinson G, Kurz W A, Smyth C E, Neilson E T, Dymond C C, Metsaranta J M, Boisvenue C, Rampley G J, Li Q, White T M, Blain D. An inventory-based analysis of Canada's managed forest carbon dynamics, 1990 to 2008. Global Change Biology, 2011, 17(6): 2227-2244.
- [10] Chen J X, Colombo S J, Ter-Mikaelian M T, Heathc L S. Carbon budget of Ontario's managed forests and harvested wood products, 2001-2100. Forest Ecology and Management, 2010, 259(8): 1385-1398.
- [11] 徐耀粘, 江明喜. 森林碳库特征及驱动因子分析研究进展. 生态学报, 2015, 35(3): 926-933.
- [12] Bowman D M J S, Murphy B P, Boer M M, Bradstock R A, Cary G J, Cochrane M A, Fensham R J, Krawchuk M A, Price O F, Williams R J. Forest fire management, climate change, and the risk of catastrophic carbon losses. Frontiers in Ecology and the Environment, 2013, 11(2): 66-67.
- [13] 胡海清, 魏书精, 魏书威, 等. 气候变暖背景下火干扰对森林生态系统碳循环的影响. 灾害学, 2012, 27(4): 37-41.
- [14] 尹伟伦. 全球森林与环境关系研究进展. 森林与环境学报, 2015, 35(1): 1-7.
- [15] 张鼎华. 城市林业. 北京: 中国环境科学出版社, 2001: 2-25.
- [16] Brack C L. Pollution mitigation and carbon sequestration by an urban forest. Environmental Pollution, 2002, 116: S195-S200.
- [17] Nowak D J, Crane D E. Carbon storage and sequestration by urban trees in the USA. Environmental Pollution, 2002, 116(3): 381-389.
- [18] 苏继申, 庄家尧, 顾叶, 闽俊杰. 南京市城市森林固碳制氧效益研究. 林业科技开发, 2010, 24(3): 49 - 52.
- [19] 巫涛, 彭重华, 田大伦, 闫文德. 长沙市区马尾松人工林生态系统碳储量及其空间分布. 生态学报, 2012, 32(13): 4034-4042.
- [20] 陶玉华, 隆卫革, 马麟英, 曹书阁, 向达永, 郭蓍. 柳州市马尾松、杉木、桉树人工林碳储量及其分配. 广东农业科学, 2011, 38(22): 42-45.
- [21] 徐飞, 刘为华, 任文玲, 仲启钺, 张桂莲, 王开运. 上海城市森林群落结构对固碳能力的影响. 生态学杂志, 2010, 29(3): 439-447.
- [22] 王大睿. 厦门城市森林碳储量和碳密度时空变化特征. 福建林学院学报, 2013, 33(1): 12-17.
- [23] 应天玉, 李明泽, 范文义. 哈尔滨城市森林碳储量的估算. 东北林业大学学报, 2009, 37(9): 33-35.
- [24] 胡长清, 田大伦. 长沙市生态文明示范城市研究. 长沙: 湖南人民出版社, 2013: 28-30.
- [25] 方晰, 田大伦, 项文化, 闫文德, 康文星. 第二代杉木中幼林生态系统碳动态与平衡. 中南林学院学报, 2002, 22(1): 1-6.
- [26] 李平, 肖玉, 杨洋, 张昌顺. 天津平原杨树人工林生态系统碳储量. 生态学杂志, 2014, 33(3): 567-574.
- [27] 宁晓波, 刘隆德, 李明刚, 顾永顺, 王太清, 夏婧. 喀斯特城市主要森林生物量及碳吸存功能. 中南林业科技大学学报, 2013, 33(11): 109-114.
- [28] 张仕光, 刘建, 黄开勇, 梁瑞龙, 蓝肖. 桂西北马尾松人工林生物量生长规律及其分配模式. 广西林业科学, 2010, 39(4): 189-192, 219-219.
- [29] Noh N T, Son Y, Lee S K, Seo K W, Heo S J, Yi M J, Park P S, Kim R H, Son Y M, Lee K H. Carbon and nitrogen storage in an age-sequence of *Pinus densiflora* stands in Korea. Science China Life Sciences, 2010, 53(7): 822-830.
- [30] Li X D, Yi M J, Son Y, Park P S, Lee K H, Son Y M, Kim R H, Jeong M J. Biomass and carbon storage in an age-sequence of Korean pine (*Pinus koraiensis*) plantation forests in central Korea. Journal of Plant Biology, 2011, 54(1): 33-42.
- [31] Cao J X, Wang X P, Tian Y, Wen Z Y, Zha T S. Pattern of carbon allocation across three different stages of stand development of a Chinese pine (*Pinus tabulaeformis*) forest. Ecological Research, 2012, 27(5): 883-892.
- [32] 杨超, 田大伦, 康文星, 项文化, 闫文德, 方晰, 梁小翠. 连栽 14 年生杉木林生态系统生物量的结构特征. 中南林业科技大学学报, 2011, 31(5): 1-6.
- [33] 潘勇军, 王兵, 陈步峰, 彭清珍. 江西大岗山杉木人工林生态系统碳汇功能研究. 中南林业科技大学学报, 2013, 33(10): 120-125.
- [34] 彭在清, 林益明, 刘建斌, 邹秀红, 郭志坚, 郭启荣, 林鹏. 福建永春毛竹种群生物量和能量研究. 厦门大学学报: 自然科学版, 2002, 41(5): 579-583.
- [35] 张蕊, 申贵仓, 张旭东, 张雷, 高升华. 四川长宁毛竹林碳储量与碳汇能力估测. 生态学报, 2014, 34(13): 3592-3601.
- [36] 王瑞静, 赵敏, 高峻. 城市森林主要植被类型碳储量研究——以崇明岛为例. 地理科学, 2011, 31(4): 490-494.
- [37] 田勇燕, 秦飞, 言华, 郭伟红, 关庆伟. 我国常见木本植物的含碳率. 安徽农业科学, 2011, 39(26): 16166-16169.
- [38] 林雯, 李吉跃, 周平, 魏龙. 广州市 3 种典型人工林碳储量及分布特征研究. 广东林业科技, 2014, 30(2): 1-7.
- [39] 田大伦, 方晰, 项文化. 湖南会同杉木人工林生态系统碳素密度. 生态学报, 2004, 24(11): 2382-2386.
- [40] 肖复明, 范少辉, 汪思龙, 熊彩云, 张池, 刘素萍, 张剑. 毛竹 (*Phyllostachy pubescens*)、杉木 (*Cunninghamia lanceolata*) 人工林生态系统碳贮量及其分配特征. 生态学报, 2007, 27(7): 2794-2801.
- [41] 刘应芳, 黄从德, 陈其兵. 蜀南竹海风景区毛竹林生态系统碳储量及其空间分配特征. 四川农业大学学报, 2010, 28(2): 136-140.
- [42] 王兵, 杨清培, 郭启荣, 赵广东, 方楷. 大岗山毛竹林与常绿阔叶林碳储量及分配格局. 广西植物, 2011, 31(3): 342-348.
- [43] 周国模, 姜培坤. 毛竹林的碳密度和碳贮量及其空间分布. 林业科学, 2004, 40(6): 20-24.
- [44] 方晰, 田大伦, 胥灿辉. 马尾松人工林生产与碳素动态. 中南林学院学报, 2003, 23(2): 11-15.
- [45] 方晰, 田大伦, 项文化. 速生阶段杉木人工林碳素密度、贮量和分布. 林业科学, 2002, 38(3): 14-19.
- [46] 肖复明, 范少辉, 汪思龙, 官凤英, 于小军, 申正其. 毛竹、杉木人工林生态系统碳平衡估算. 林业科学, 2010, 46(11): 59-65.