

上海4种常见绿化树种地上生物量模型构建

张希金¹, 冷寒冰², 赵广琦², 景军², 涂爱翠¹, 宋坤^{1,4*}, 达良俊^{1,3,4}

(1. 华东师范大学生态与环境科学学院, 上海 200241; 2. 上海植物园上海城市植物资源开发应用工程技术研究中心, 上海 200231; 3. 上海市城市化生态过程与生态恢复重点实验室, 上海 200241; 4. 浙江天童森林生态系统国家野外科学观测研究站, 浙江 宁波 315114)

摘要:【目的】分析上海市4种常见绿化乔木杜英(*Elaeocarpus decipiens*)、女贞(*Ligustrum lucidum*)、黄山栎树(*Koelreuteria bipinnata*)、无患子(*Sapindus mukorossi*)木材密度随径级大小的变异。构建更适用城市生态系统的常用绿化乔木生物量模型,并验证木材密度与胸径的关系,为全面估算上海市绿化乔木生物量及碳储量奠定基础。【方法】采用 $Y=aX^b$ 幂函数构建了生物量模型,汇总分析针对上海地区9种常见绿化乔木地上各器官生物量的模型,与此次研究构建的生物量模型进行比较,并讨论所建生物量模型的适用性。【结果】杜英树干密度显著小于其他3个树种,各树种树干密度随胸径增加没有明显变化趋势;构建单一树种生物量模型时可以忽略木材密度对生物量的影响。对4个树种构建的生物量模型总体上拟合效果良好,参数 a 、 b 大小因树种和器官不同而有所差异;其中常绿阔叶树种树干、树枝生物量模型参数 b 显著小于落叶阔叶树种。所构建的各器官生物量模型与有关学者已发表的上海地区相同树种相应器官模型之间存在差异,尤其对大径阶个体,估算的生物量总体上偏小。【结论】在城市中估算生物量时应根据人为管护强度情况选择适合的生物量模型。

关键词: 生物量模型; 绿化乔木; 木材密度; 上海市

中图分类号: S758

文献标志码: A

文章编号: 1000-2006(2018)02-0141-06

Allometric models for estimating aboveground biomass for four common greening tree species in Shanghai City, China

ZHANG Xijin¹, LENG Hanbing², ZHAO Guangqi², JING Jun², TU Aicui¹, SONG Kun^{1,4*}, DA Liangjun^{1,3,4}

(1. School of Ecological and Environmental Sciences, East China Normal University, Shanghai 200241, China; 2. Shanghai Botanical Garden, Shanghai Engineering Research Center of Sustainable Plant Innovation, Shanghai, 200231, China; 3. Shanghai Key Lab for Urban Ecological Process and Eco-Restoration, Shanghai 200241, China; 4. Tiantong National Forest Ecosystem Observation and Research Station, Ningbo 315114, China)

Abstract 【Objective】The objective of this study was to construct more suitable biomass models for urban greening tree species, and to discuss the relationship between the wood density and diameter at breast height (DBH). We expect that the study will improve methods of estimating biomass of greening trees in Shanghai. 【Method】*Elaeocarpus decipiens*, *Ligustrum lucidum*, *Koelreuteria bipinnata*, and *Sapindus mukorossi* were selected to analyze the variation in their wood densities, and to fit their allometric biomass models to the form of $Y=aX^b$. Moreover, we compiled published aboveground biomass models of nine common greening trees in Shanghai, and compared these to our results. 【Result】The wood density of *Elaeocarpus decipiens* was significantly lower than those of the other species, and wood density had no apparent correlation with DBH, which suggested that wood density can be ignored when fitting single species biomass models. The allometric models generally fitted the data well, and the values of coefficients a and b varied among species and organs. The coefficient b values of evergreen broad-leaved trees were significantly lower than those of deciduous broad-leaved trees. The published models yielded different biomass estimations than ours, especially for large trees. 【Conclusion】Suitable allometric models should be selected for estimating tree biomass in urban green areas according to specific conditions, especially the intensity of greening management.

Keywords: biomass model; greening tree species; wood density; Shanghai City

收稿日期: 2017-04-13

修回日期: 2017-07-03

基金项目: 上海城市植物资源开发应用工程技术研究中心开放课题(G201504); 国家自然科学基金项目(31500355)

第一作者: 张希金(xjzhang1991@163.com), 博士生。* 通信作者: 宋坤(ksong@des.ecnu.edu.cn), 讲师。

引文格式: 张希金, 冷寒冰, 赵广琦, 等. 上海4种常见绿化树种地上生物量模型构建[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2018, 42(2): 141-146.

近年来随着全球环境问题尤其是全球温室效应问题的日益突出,碳循环成为人们关注的前沿与热点问题^[1]。相较于自然森林生态系统,城市生态系统的生物量研究比较缺乏^[2-3]。随着上海市城市绿化的推进,截至2014年上海市绿地面积已达125 741 hm²,仅行道树就有103万株^[4]。因此,上海市绿化树木对城市碳汇功能具有重要作用。通过建立树木的生物量模型对乔木生物量进行估算是目前常用的生物量和碳储量估算方法^[5]。目前,异速生长模型是生物量模型中应用最广的经验模型^[6]。尽管学者对自然森林中的常见优势乔木已构建了丰富的异速生长模型,但城市中绿化树木的生长受到人为活动影响较大,已有的基于自然环境或近自然环境构建的乔木生物量模型在城市生态系统中的适用性较差,因此有必要针对城市常用绿化乔木构建适宜的生物量模型。

木材基本密度作为树种的一个重要功能性状,同时也是森林碳汇计量中的一个重要生物量估算因子^[7]。在估算物种丰富的森林生物量时,相同材积的木材,由于木材基本密度的种间差异,质量变化幅度较大^[6]。因此,混合树种生物量模型中引入木材密度可提高模型预测精度^[8]。而将木材密度引入单一树种生物量模型中能否提高生物量模型预测精度鲜有报道。假设某树种木材密度随胸径呈现规律性变化,引入木材密度则可能明显提高该树种生物量模型预测精度。然而目前对木材基本密度与胸径关系的研究没有得出一致结论,多数研究表明胸径与木材密度无显著相关^[9-12],但也有研究发现胸径与木材密度具有正相关关系^[9-13]。因此,以上海市常见绿化乔木杜英(*Elaeocarpus decipiens*)、女贞(*Ligustrum lucidum*)、黄山栾树(*Koelreuteria bipinnata*)、无患子(*Sapindus mukorossi*)为研究对象,对其木材密度变异进行初步研究,验证木材密度与胸径的关系。

在分析木材密度与胸径关系的基础上,分树种构建了生物量模型,对比目前已有的上海地区9种乔木地上各器官生物量模型,分析所建生物量模型的适用性,以期全面估算上海市绿化乔木生物量及碳储量奠定基础。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区域位于上海市(121°29'E,31°14'N),属于亚热带湿润季风气候,光照充足,雨量充沛,平均气温15.5℃,最高温度39.0℃,最低-8.5℃,年

平均降水量1 062 mm,无霜期200 d。实验用标准木均为该区域的苗圃苗木。

1.2 生物量测定

于2015年10月采用径阶标准木法在苗圃内按径阶选取标准木,取2 cm为1个径阶,即按照径阶分别≥2~4、≥4~6、≥6~8、≥8~10、≥10~12、≥12~14、≥14~16、≥16~18 cm选取标准木,每个树种选取标准木9株,共36株。伐倒后记录每一标准木的胸径、树高、冠幅等形态参数(由于伐倒前后两次胸径测量人员和测定位置不同,导致黄山栾树和女贞某些径阶内没有树木),并测定标准木的树干、树枝、树叶等各器官总鲜质量,其中树干部分为从基部到树梢的完整主干,其余枝条为树枝部分。每株标准木的各器官均取适量鲜样(其中树干部分约在1.3 m处截取1个3~5 cm圆盘)带回实验室,采用排水法测定树干鲜样体积,然后将鲜样60℃烘干至质量恒定,速测干质量,计算含水率。

1.3 基本密度测定

用所测树干与树枝样品干质量与测定的鲜样体积来计算木材基本密度(g/cm³)。计算公式如下:

$$W_{Di} = \frac{M_i}{V_i}$$

其中: W_{Di} 为木材基本密度, g/cm³; M_i 为样品干质量, g; V_i 为鲜样体积, cm³。

1.4 生物量模型拟合

以测定的标准木胸径(D)、树高(H)、冠幅和胸径树高(D^2H)为自变量,用SPSS软件拟合幂函数形式的异速生长模型:

$$Y = aX^b$$

根据散点图与不同模型的拟合度(R^2)和显著性(P)选出通过检验的模型(R^2 较大、 $P < 0.05$),然后用R软件计算模型的均方根误差(RMSE)。 R^2 越大、均方根误差(RMSE)值越小,模型预测精度越高。模型中,生物量单位为kg,胸径单位为cm,树高单位为m。

2 结果与分析

2.1 木材密度对生物量的影响

杜英、女贞、黄山栾树和无患子的树干密度分别为(0.38 ± 0.024)、(0.57 ± 0.022)、(0.53 ± 0.053)、(0.57 ± 0.032) g/cm³(表1)。单因素方差分析表明树干密度种间差异显著,其中杜英密度显著小于其他3个树种($P < 0.01$)。

树干密度变异系数依次为女贞 < 无患子 < 杜英 < 黄山栾树,说明对研究的4个树种而言,女贞

树干密度种内变异最小,黄山栎树树干密度种内变异最大。

表 1 4 个树种木材密度
Table 1 Wood density of four tree species

树种 species	树干密度/(g·cm ⁻³) wood density	变异系数/% coefficient of variation
杜英 <i>Elaeocarpus decipiens</i>	0.38 ± 0.024 B	6.42
女贞 <i>Ligustrum lucidum</i>	0.57 ± 0.022 A	3.86
无患子 <i>Sapindus mukorossi</i>	0.57 ± 0.032 A	5.65
黄山栎树 <i>Koelreuteria bipinnata</i>	0.53 ± 0.053 A	9.98

注: 树干密度为平均值 ± 标准差, 同列相同字母表明差异不显著, 不同大写字母表示差异极显著 ($P < 0.01$)。Data of wood density are presented in the format of mean ± standard deviation; the same letters denote non-significant difference while different letters denote a significant difference ($P < 0.01$)。

对 4 个树种树干密度和胸径分别进行线性回归分析, 结果表明: 杜英、女贞、黄山栎树和无患子 4 个树种的树干密度随胸径增加无明显变化趋势,

树干密度与胸径线性关系均不显著(图 1)。因此, 对这 4 个树种分别构建生物量模型时可以忽略木材密度对生物量的影响。

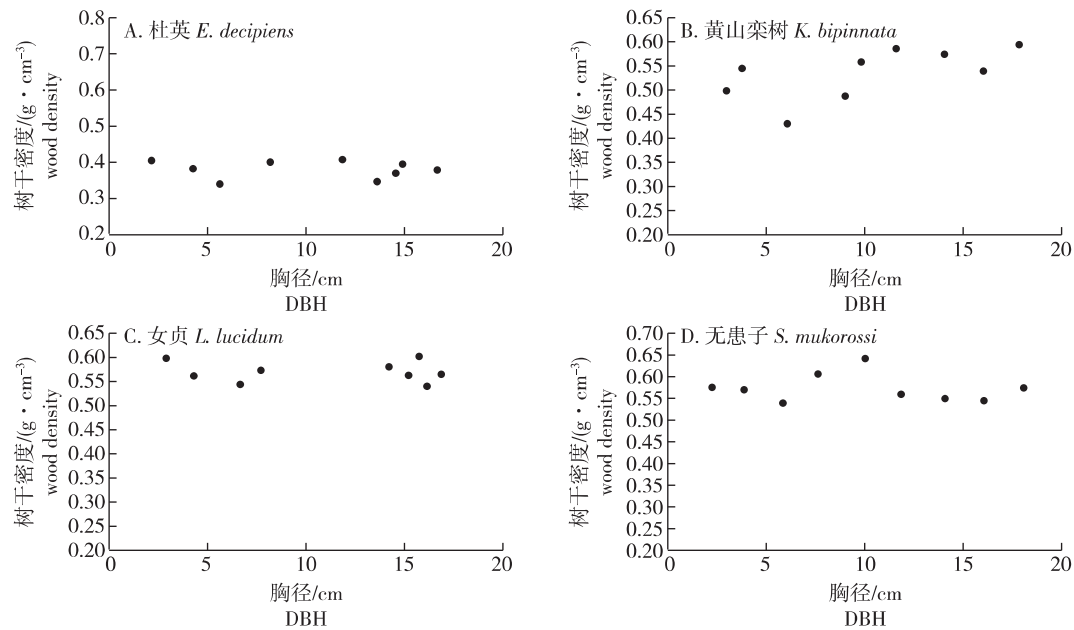


图 1 树干基本密度与胸径关系
Fig. 1 Relationship between wood density and DBH

2.2 生物量模型构建

根据实测数据, 建立并筛选出 2 套不同的异速生长模型: 以胸径 (D) 为自变量的 Biomass- D 模型和以胸径 (D)、树高 (H) 为自变量的 Biomass- D^2H 模型(表 2)。2 套模型总体上拟合效果良好, 树干、树枝和地上总生物量模型都有较高的拟合度 ($R^2 \geq 0.81$) 和显著性 ($P < 0.01$), 树叶生物量模型拟合率整体稍差(表 2)。 R^2 越大, 均方根误差 (RMSE) 值越小, 其模型的预测精度越高。据此, 除女贞外, 其他 3 个树种 Biomass- D^2H 模型略优于 Biomass- D 模型。但考虑到 2 套模型的统计参量相差不大及树高测定的困难和准确性等, 在实际工作中可根据树高测定的难易及准确程度, 选用不同的

模型。
对所构建模型 $Y = aX^b$ 中参数 a 、 b 研究发现, 参数 a 、 b 大小因树种和器官不同而有所差异, 这与 Navar^[14] 的研究结果是一致的。常绿阔叶树种与落叶阔叶树种的地上部分各器官生物量模型参数 a 差异均不显著 ($P > 0.05$); 而常绿阔叶树种与落叶阔叶树种的树干、树枝生物量模型参数 b 差异显著 ($t_{\text{树干}} = -2.34, P = 0.04$; $t_{\text{树枝}} = -3.96, P = 0.01$), 树叶生物量模型参数 b 差异不显著 ($t = -1.49, P = 0.17$) (表 3)。其中, 落叶阔叶树种树干、树枝生物量模型参数 b 均大于常绿阔叶树种, 这可能是相比落叶树种, 常绿树种大多生长缓慢导致的^[15-16]。

表2 树种各器官生物量模型($n=9$)
Table 2 Allometric biomass equations of different organs for four tree species($n=9$)

树种 species	器官 organs	自变量 variables	系数 coefficients of biomass equations		径阶/cm DBH classes	均方根 误差 RMSE	R^2	P
			a	b				
杜英 <i>E. decipiens</i>	地上 aboveground	D	0.184 48	1.930 50	2.10 ~ 16.62	6.192	0.98	< 0.001
		$D^2 H$	0.056 73	0.892 85		5.240	0.98	< 0.001
	树干 stem	D	0.119 32	1.948 25		1.914	0.99	< 0.001
		$D^2 H$	0.036 60	0.899 67		1.404	0.99	< 0.001
	树枝 branch	D	0.027 92	2.128 43		3.697	0.93	< 0.001
		$D^2 H$	0.007 66	0.983 28		3.503	0.93	< 0.001
女贞 <i>L. lucidum</i>	地上 aboveground	D	0.071 38	1.104 70	2.89 ~ 16.80	1.167	0.56	0.021
		$D^2 H$	0.031 46	0.535 22		1.113	0.61	0.013
	树干 stem	D	0.471 18	1.648 13		4.495	0.98	< 0.001
		$D^2 H$	0.1139 4	0.8495 7		6.832	0.97	< 0.001
	树枝 branch	D	0.189 54	1.868 53		3.187	0.99	< 0.001
		$D^2 H$	0.039 39	0.956 79		5.447	0.97	< 0.001
黄山栎树 <i>K. bipinnata</i>	地上 aboveground	D	0.132 82	1.475 93	3.00 ~ 17.9	2.358	0.81	0.001
		$D^2 H$	0.033 57	0.778 09		2.453	0.84	0.001
	树干 stem	D	0.247 93	0.893 46		0.667	0.62	0.012
		$D^2 H$	0.116 13	0.458 71		0.72	0.61	0.013
	树枝 branch	D	0.122 38	2.137 93		8.004	0.95	< 0.001
		$D^2 H$	0.082 94	0.844 68		4.627	0.97	< 0.001
无患子 <i>S. mukorossi</i>	地上 aboveground	D	0.114 78	2.065 73	2.19 ~ 18.00	4.971	0.97	< 0.001
		$D^2 H$	0.082 59	0.808 31		4.319	0.97	< 0.001
	树干 stem	D	0.001 11	3.200 22		3.386	0.88	< 0.001
		$D^2 H$	0.000 53	1.291 04		2.51	0.94	< 0.001
	树枝 branch	D	0.020 68	1.685 02		0.965	0.73	0.004
		$D^2 H$	0.012 86	0.694 08		0.808	0.81	0.001
无患子 <i>S. mukorossi</i>	地上 aboveground	D	0.141 19	2.357 53	2.19 ~ 18.00	14.45	0.97	< 0.001
		$D^2 H$	0.054 81	0.989 65		12.406	0.98	< 0.001
	树干 stem	D	0.124 88	2.093 15		6.142	0.98	< 0.001
		$D^2 H$	0.054 11	0.878 05		5.328	0.99	< 0.001
	树枝 branch	D	0.014 39	2.928 04		8.433	0.95	< 0.001
		$D^2 H$	0.004 42	1.229 98		7.473	0.96	< 0.001
无患子 <i>S. mukorossi</i>	树叶 leaf	D	0.032 00	1.982 18	2.19 ~ 18.00	2.157	0.87	< 0.001
		$D^2 H$	0.014 24	0.834 39		2.059	0.88	< 0.001

表3 常绿阔叶与落叶阔叶相应器官模型参数的差异
Table 3 Difference of a and b value in organic models
between evergreen and deciduous broad-leaved trees

器官 organs	a			b		
	t	df	P	t	df	P
树干 stem	1.45	10	0.18	-2.34	10	0.04
树枝 branch	2.22	5.11	0.08	-3.96	5.62	0.01
树叶 leaf	1.73	5.30	0.14	-1.49	9	0.17

3 讨论

3.1 木材密度变异及其对生物量模型的影响

此次研究树种间木材密度差异显著,这与徐明锋等^[9]、Henry 等^[17]研究结果是一致的。树种差异可明显地影响木材密度,这是因为不同树种的木材结构有所差异,细胞组织比例不同,细胞壁与孔隙度所占的比例也不同,这种内在因素上的差异造成木材密度的不同^[18]。因此,相同胸径的树木,地上部分生物量会随着木材密度增加而增加^[14]。结

合前人研究,在对物种多样性较丰富的森林构建混合树种生物量模型时,建议引入木材密度^[8, 14-20]。

研究中4个树种胸径与木材密度无显著相关性,这与周志春等^[10]、Wheeler等^[11]、李泰君等^[12]研究结果是一致的。徐明锋等^[9]对粤东6种阔叶树种的研究中只有栲、黄樟胸径与木材密度呈显著正相关,米槠、红锥、木荷和华润楠均无显著相关性。因此总体来看胸径与木材密度相关关系较弱,构建单一物种生物量模型时可以忽略木材密度对生物量的影响。

3.2 上海不同树种地上部分器官生物量模型差异及适用性

上海地区香樟(*Cinnamomum camphora*)^[21-23]、水杉(*Metasequoia glyptostroboides*)^[22, 24]、杜英^[21]、黄山栎树^[21]、马褂木(*Liriodendron chinense*)^[21]、重阳木(*Bischofia polycarpa*)^[25]、杨树(*Populus euramevicana* ‘I-214’)^[22, 26]、女贞^[27]及广玉兰(*Magnolia grandiflora*)^[28]等树种生物量模型已有研究,但未见无患子生物量模型的报道。

笔者所构建的各器官生物量模型与王哲等^[21, 27]发表的上海地区相应树种模型存在明显差异,尤其对大径阶个体,此次研究所构建模型估算的生物量总体上偏小(其中,女贞树干和黄山栎树叶生物量估算总体偏大)。这主要是由于标准木数量和标准木来源(管护程度)不同造成的。目前上海地区构建生物量模型标准木取样数量较少(5~10株),且大径阶标准木数量少,导致生物量估测不确定性增加^[29]。王哲等^[21, 27]构建模型的标准木来源为水源涵养林、外环林带等主要使用幼树大规模造林的人工林;此次研究标准木来源于上海地区的苗圃,人为管护较多。可见,人为管护强度对生物量模型影响较大。

综上,今后在城市中估算生物量时应慎重选择生物量模型。不仅要考虑区域、气候和物种,而且要考虑待估测树木或林分苗木来源与管护程度选择基于不同来源标准木的生物量模型。在估算上海郊野大片使用幼树造林、人工管护较弱的人工林生物量时建议选择基于类似人工林构建的生物量模型;在估算居民区绿化树木、行道树等直接移栽苗圃苗木、人为管护较多的绿化区树木生物量时建议选择基于该绿化类型树木或苗圃树木构建的生物量模型。而此次研究并未区分不同的修剪方式、修剪频率、修剪后恢复时间等对模型的影响。考虑到人为管护对生物量模型的影响,从提高模型精度

和适用性的角度,建议今后对城市绿化乔木构建生物量模型时明确说明管护方式和管护频率等影响因素。

参考文献(reference):

- [1] 杨海军,邵全琴,陈卓奇,等. 森林碳蓄积量估算方法及其应用分析[J]. 地球信息科学学报, 2012, 9(4): 5-12. DOI: 10.3969/j.issn.1560-8999.2007.04.002. YANG H J, SHAO Q Q, CHEN Z Q, et al. Summary of estimation methods of carbon storage in forests[J]. Geo-Information Science, 2012, 9(4): 5-12.
- [2] KAYE J P, MCCULLEY R L, BURKE I C. Carbon fluxes, nitrogen cycling, and soil microbial communities in adjacent urban, native and agricultural ecosystems[J]. Global Change Biology, 2005, 11(4): 575-587. DOI: 10.1111/j.1365-2486.2005.00921.x.
- [3] PIAO S, FANG J, CIAIS P, et al. The carbon balance of terrestrial ecosystems in China[J]. Nature, 2009, 458(7241): 1009-1013. DOI: 10.1038/nature07944.
- [4] 上海市统计局,国家统计局上海调查总队. 上海统计年鉴2015[M]. 北京: 中国统计出版社, 2015.
- [5] 董利虎,李凤日,宋玉文. 东北林区4个天然针叶树种单木生物量模型误差结构及可加性模型[J]. 应用生态学报, 2015, 26(3): 704-714. DOI: 10.13287/j.1001-9332.20150106.011. DONG L H, LI F R, SONG Y W. Error structure and additivity of individual tree biomass model for four natural conifer species in Northeast China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(3): 704-714.
- [6] 王天博,陆静. 国外生物量模型概述[J]. 中国农学通报, 2012, 28(16): 6-11. DOI: 10.3969/j.issn.1000-6850.2012.16.002. WANG T B, LU J. The Advance on foreign biomass model[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2012, 28(16): 6-11.
- [7] 罗云建. 华北落叶松人工林生物量碳计量参数研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2007. LUO Y J. Study on biomass carbon accounting factors of *Larix principis-rupprechtii* plantation[D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2007.
- [8] MUGASHA W A, MWAKALUKWA E E, LUOGA E, et al. Allometric models for estimating tree volume and aboveground biomass in lowland forests of Tanzania[J]. International Journal of Forestry Research, 2016, 2016: 1-13. DOI: 10.1155/2016/8076271.
- [9] 徐明锋,柯炳钊,张毅,等. 粤东6种阔叶树木材密度及其影响因素研究[J]. 华南农业大学学报, 2016, 37(3): 100-106. DOI: 10.7671/j.issn.1001-411X.2016.03.016. XU M F, KE X D, ZHANG Y, et al. Wood densities of six hardwood tree species in Eastern Guangdong and influencing factors[J]. Journal of South China Agricultural University, 2016, 37(3): 100-106.
- [10] 周志春,王章荣. 影响马尾松天然林样木胸高木材密度因子的分析[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 1989, 13(2): 41-45. DOI: 10.3969/j.issn.1000-2006.1989.02.007. ZHOU Z C, WANG Z R. Factors affecting breast height density of wood of sample trees from natural stand of Masson pine[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edi-

- tion), 1989, 13(2): 41–45.
- [11] WHEELER P R, MITCHELL H L. Specific gravity variation in *Mississippi pines* [R]. North Carolina: Fifth Southern Forest Tree Improvement Conference, 1959.
- [12] 李泰君, 胥辉, 丁勇, 等. 思茅松树干生物量, 树皮率与基本密度研究 [J]. 林业科技, 2008, 33(4): 20–23. DOI: 10.3969/j.issn.1001-9499.2008.04.007.
- LI T J, XU H, DING Y, et al. Study on biomass model and bark rate and basic density of *Pinus kesiya* var. *langbianensis* [J]. Forestry Science & Technology, 2008, 33(4): 20–23.
- [13] 朱栗琼. 杉木无性系材性变异研究 [D]. 南宁: 广西大学, 2003.
- ZHU L Q. Study on wood property variation of chinese fir clones [D]. Nanning: Guangxi University, 2003.
- [14] NÁVAR J. Allometric equations for tree species and carbon stocks for forests of northwestern Mexico [J]. Forest Ecology and Management, 2009, 257(2): 427–434. DOI: 10.1016/j.foreco.2008.09.028.
- [15] 史喜兵, 孙毅宁, 李盼. 常绿树种在郑州市园林绿化中的应用 [J]. 陕西农业科学, 2009(5): 115–116. DOI: 10.3969/j.issn.0488-5368.2009.05.045.
- [16] CORNELISSEN J, DIEZ P C, HUNT R. Seedling growth, allocation and leaf attributes in a wide range of woody plant species and types [J]. Journal of Ecology, 1996, 84(5): 755–765. DOI: 10.2307/2261337.
- [17] HENRY M, BESNARD A, ASANTE W A, et al. Wood density, phytomass variations within and among trees, and allometric equations in a tropical rainforest of Africa [J]. Forest Ecology and Management, 2010, 260(8): 1375–1388. DOI: 10.1016/j.foreco.2010.07.040.
- [18] 徐有明. 木材学 [M]. 北京: 中国林业出版社, 2006.
- [19] CHÁIDEZ J D J N. Allometric equations and expansion factors for tropical dry trees of eastern Sinaloa, Mexico [J]. Tropical and Subtropical Agroecosystems, 2008, 10(1): 45–52.
- [20] PANSHIN A J, ZEEUW C D. Textbook of wood technology [M]. New York: McGraw-Hill Book Co, 1980.
- [21] 王哲, 韩玉洁, 康宏樟, 等. 黄浦江上游主要树种水源涵养林生态系统碳储量 [J]. 生态学杂志, 2012, 31(8): 1930–1935. DOI: 10.13292/j.1000-4890.2012.0239.
- WANG Z, HAN Y J, KANG H Z, et al. Carbon storage of main tree species plantations for water resources conservation in upper reaches of Huangpu River, Shanghai [J]. Chinese Journal of Ecology, 2012, 31(8): 1930–1935.
- [22] 任巧, 郭雪艳, 蔡北溟, 等. 宝钢厂区植被碳储量及其固碳效益评价 [J]. 城市环境与城市生态, 2012, 25(3): 6–9.
- REN Q, GUO X Y, CAI B M, et al. Evaluation of vegetation carbon storage and carbon fixation benefits in Shanghai Baosteel factory area [J]. Urban Environment & Urban Ecology, 2012, 25(3): 6–9.
- [23] 高凯, 胡永红, 冷寒冰, 等. 两种测算香樟单株植物生物量和生产力的方法 [J]. 生态学杂志, 2014, 33(1): 242–248.
- GAO K, HU Y H, LENG H B, et al. Two methods of estimating biomass and productivity for *Cinnamomum camphora* at individual scale [J]. Chinese Journal of Ecology, 2014, 33(1): 242–248.
- [24] 庄红蕾, BECUWE X, 肖春波, 等. 上海崇明岛水杉人工林生物量方程构建及固碳潜力研究 [J]. 上海交通大学学报(农业科学版), 2012, 29(2): 48–55. DOI: 10.3969/J. ISSN. 1671-9964.2012.02.009.
- ZHUANG H L, BECUWE X, XIAO C B, et al. Allometric equation-based estimation of biomass carbon sequestration in metasequoia glyptostroboides plantations in Chongming island, Shanghai [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University (Agricultural Science), 2012, 29(2): 48–55.
- [25] 王倩玲. 不同间伐强度对人工林碳储量分布格局的影响 [D]. 上海: 华东师范大学, 2015.
- WANG Q L. The effect of thinning intensity on carbon storage distribution pattern of plantation—a study on the water conservation plantation in Fengxian district of Shanghai [D]. Shanghai: East China Normal University, 2015.
- [26] 薛春燕, 王哲, 崔旋, 等. 黄浦江中上游杨树人工林生态系统碳储量研究 [J]. 广西植物, 2014, 34(3): 338–343. DOI: 10.3969/j.issn.1000-3142.2014.03.011.
- XUE C Y, WANG Z, CUI X, et al. Carbon storage of poplar plantations in upper and middle reaches of Huangpu River, Shanghai [J]. Guihaia, 2014, 34(3): 338–343.
- [27] 王哲, 杜宝明, 韩玉洁, 等. 上海外环线带女贞人工林生态系统碳储量 [J]. 生态学杂志, 2014, 33(4): 910–914. DOI: 10.13292/j.1000-4890.2014.0089.
- WANG Z, DU B M, HAN Y J, et al. Carbon storage of *Ligustrum lucidum* plantations in Shanghai out-loop forest belt [J]. Chinese Journal of Ecology, 2014, 33(4): 910–914.
- [28] 王哲. 黄浦江中上游广玉兰人工林生态系统碳储量特点 [J]. 林业世界, 2014, 3(3): 34–41. DOI: 10.12677/WJF.2014.33007.
- Wang Z. Carbon storage of magnolia grandiflora plantations in upper and middle reaches of Huangpu River, Shanghai [J]. World Journal of Forestry, 2014, 3(3): 34–41.
- [29] CHAVE J, ANDALO C, BROWN S, et al. Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests [J]. Oecologia, 2005, 145(1): 87–99. DOI: 10.1007/s00442-005-0100-x.

(责任编辑 李燕文)