

上海市乔木林生物量估算及动态分析

仲启铖^{1,2}, 傅煜^{1,2}, 张桂莲^{1,2}

(1. 上海市园林科学规划研究院, 上海 200232; 2. 上海城市困难立地绿化工程技术研究中心, 上海 200232)

摘要: 基于2014年上海市森林资源连续清查统计报告和2013-2014年乔木林典型样地实测数据, 采用转换因子连续函数法(CM法)和单木异速生长方程法(AM法)对上海全市乔木林生物量进行估算。结果显示: 2种方法估算的乔木林总生物量较为接近, 分别为 4.828×10^6 和 4.805×10^6 t, 前者仅比后者高0.47%。樟树 *Cinnamomum camphora*, 其他硬阔类, 阔叶混, 水杉 *Metasequoia glyptostroboides*, 其他软阔类和杨树 *Populus* 是上海乔木林生物量的主要贡献者, CM法估算这6个树种组在总生物量中占比为88.7%, AM法估算占比为85.7%。幼、中龄林是上海乔木林生物量的主体部分, CM法估算这2个龄组在总生物量中占比为86.2%, AM法估算占比为79.3%。自1999年起上海市乔木林总生物量持续快速增长, 到2016年接近 6.400×10^6 t; 1999-2016年乔木林总生物量年均增长率为19.2%, 超过同期乔木林总面积的年均增长率(16.8%)。乔木林单位面积生物量同样总体上呈增长趋势, 到2016年达 $75.7 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。由此认为: CM法和AM法在上海市乔木林总生物量估算上具有较好的一致性; 过去20 a, 上海城市森林资源的数量和质量都有显著提升, 且仍存在一定上升空间。图2表4参35

关键词: 森林生态学; 乔木林; 生物量; 转换因子连续函数; 单木异速生长方程; 上海

中图分类号: S718.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-0756(2019)03-0524-09

Biomass estimation and a dynamic analysis of forests in Shanghai

ZHONG Qicheng^{1,2}, FU Yu^{1,2}, ZHANG Guilian^{1,2}

(1. Shanghai Academy of Landscape Architecture Science and Planning, Shanghai 200232, China; 2. Shanghai Engineering Research Center of Landscaping on Challenging Urban Sites, Shanghai 200232, China)

Abstract: The objectives of this study are to estimate the total biomass of forests in Shanghai and its temporal dynamic during the past two decades. Taking report data from a continuous inventory of forest resources in 2014 and in-situ measured data from typical sample plots of forests in 2013-2014, biomass of forests in Shanghai were estimated using the conversion factor continuous function method (CM) and the allometric growth equation method (AM). Results showed that the total biomass of forests in Shanghai in 2014 estimated by CM (4.828×10^6 t) and AM (4.805×10^6 t) were similar with CM only 0.47% higher than AM. The six main contributors to forest biomass in Shanghai were forests of *Cinnamomum camphora*, other hardwood, mixed broadleaf, *Metasequoia glyptostroboides*, other softwood, and poplar. These six species groups occupied 88.7% (CM) and 85.7% (AM) of the total forest biomass in Shanghai with young and medium-aged forests occupying 86.2% (CM) and 79.3% (AM). CM estimates showed that forest biomass had increased since 1999 approaching 6.400×10^6 t in 2016. The average annual growth rate of forest biomass from 1999 to 2016 in Shanghai was 19.2% exceeding the average annual growth rate of forested areas (16.8%). Meanwhile, biomass per unit area of forest also showed an overall growth movement reaching $75.7 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ by 2016. In conclusion, CM and AM were relatively consistent in estimating the total biomass of forests in Shanghai. The biomass estimates showed

收稿日期: 2018-07-06; 修回日期: 2018-11-05

基金项目: “十三五”国家重点研发计划项目(2017YFC0505706); 国家自然科学基金资助项目(31800411); 上海市自然科学基金资助项目(17ZR1427400); 上海市科学技术委员会崇明科技专项(15dz1210905)

作者简介: 仲启铖, 高级工程师, 博士, 从事林业碳汇研究。E-mail: zhongqc2015@hotmail.com。通信作者: 张桂莲, 高级工程师, 博士, 从事森林生态学研究。E-mail: 371209698@qq.com

both quantity and quality of Shanghai forests improved markedly during the past two decades, which were expected to increase further in the future. [Ch, 2 fig. 4 tab. 35 ref.]

Key words: forest ecology; arbor forest; biomass; conversion factor continuous function method; allometric growth equation; Shanghai

森林生物量是指森林群落一定面积内现存活有机体的干物质总量，是森林资源的重要测度指标之一，也是衡量森林固碳能力的重要标志^[1-2]。对森林生物量及其动态变化的定量估算不仅能为核算森林碳储量提供数据基础，还能为评价林业建设成效提供依据，有利于科学指导森林经营管理^[3-5]。乔木林是森林资源的最重要组分，准确估算大尺度上的乔木林生物量是测算区域森林生物量的前提^[6]。为提高生物量估算精度，比较和选择适合的方法非常必要，也是实际工作中的要求^[3,6-7]。常用的乔木林生物量估算方法有直接测量和间接估算 2 种^[8]。直接测量法准确度高，但破坏性大且耗时费力，缺少较大尺度应用可行性。间接估算法利用材积源生物量法、相对生长关系等生物量模型进行^[4,9]。材积源生物量法也称生物量转换因子法，利用林分生物量与木材蓄积的比值、基于森林资源数据中某类林分的总蓄积量得到生物量，近年来被广泛用于区域乃至国家尺度上乔木林生物量及其动态变化的评估^[1,10-11]。相对生长关系(如单木异速生长方程)是植株结构和功能特征指标(如材积、生物量等)与植株形态学变量(如胸径、树高等)间数量关系的统称^[12-13]，通常来自于对标准木的解析，在一定范围内往往有相对较高的准确度、可信度和可重复性^[6]，因此可用于局地乔木林生物量估算，并可用于对材积源生物量法进行验证。上海是中国城市化程度最高的大都市之一，快速城市化过程导致了环境污染蔓延，热岛效应加剧，生态安全水平低下等问题。作为上海生态空间的重要组成部分，城市森林对于改善城市生态环境，促进生态之城建设具有关键作用。过去近 20 a，上海森林覆盖率从 1999 年的 3.17% 增加到 2016 年的 15.56%；2016 年全市森林面积达 98 687 hm²，其中乔木林占比 85.60%。近年来已有一些研究^[14-18]分别以樟树 *Cinnamomum camphora*，水杉 *Metasequoia glyptostroboides*，杨树 *Populus*，女贞 *Ligustrum lucidum*，杜英 *Elaeocarpus decipiens*，玉兰 *Magnolia denudata*，栎树 *Koelreuteria paniculata* 和鹅掌楸 *Liriodendron chinense* 等乔木树种为对象，采用生物量转换因子法、相对生长关系法对上海市乔木林林分水平和区域水平的生物量或碳储量进行了估算；但未见到在全市水平上采用不同方法对乔木林生物量进行估算的比较分析，对过去近 20 a 全市乔木林生物量的动态变化也并不清楚。鉴于此，本研究以 2014 年上海市森林资源连清统计报告数据为基础，采用转换因子连续函数法估算了上海全市乔木林生物量；利用 2013-2014 年乔木林典型样地的实测数据，采用单木异速生长方程法做了同样的估算。通过对 2 种方法估算出的总生物量、不同树种组和龄组的乔木林生物量的比较和分析，定量研究全市 1999-2016 年乔木林生物量的动态变化。

1 研究区域和研究方法

1.1 研究区域

上海市(30°40'~31°50'N, 120°50'~121°53'E)地处长江三角洲东缘，东濒东海，南临杭州湾，西接江苏、浙江，北界为长江入海口；行政区域陆地总面积约 6 340.5 km²。属北亚热带季风性气候，四季分明，日照充分，雨水充沛，全年平均气温为 17.6 °C，年日照时数为 1 885.9 h，年均降水量为 1 173.4 mm。境内除西南部有少数丘陵山脉外，整体为坦荡低平的平原。土壤主要由潮间带土壤发育而来，多为中偏碱性，有机质含量偏低。

因人类活动频繁，上海地带性自然森林植被不足 1.0%，主要为分布在松江佘山地区和大金山岛的常绿落叶阔叶混交林。根据 2014 年上海市森林资源连续统计报告，全市林业用地面积为 101 916 hm²，森林面积为 89 022 hm²，森林覆盖率为 14.0%；乔木林面积为 72 343 hm²，竹林面积为 3 087 hm²，特灌林(灌木经济林)面积为 13 605 hm²；活立木总蓄积量为 6.643 2×10⁶ m³，森林蓄积量为 4.495 9×10⁶ m³。

1.2 研究方法

1.2.1 数据收集 乔木林数据为 1999，2004，2009 和 2014 年上海市森林资源连续清查统计报告以及 2012，2016 年上海市森林资源动态监测报告的汇总数据。乔木林按优势树种分为其他松类，柳杉 *Cryp-*

tomeria fortunei, 水杉, 池杉 *Taxodium ascendens*, 柏木 *Cupressus funebris*, 其他杉类, 针叶混, 樟树, 榆树 *Ulmus pumila*, 枫香 *Liquidambar formosana*, 其他硬阔类, 杨树, 柳树 *Salix*, 银杏 *Ginkgo biloba*, 其他软阔类, 阔叶混和针阔混等森林类型(树种组), 并按龄组统计面积和蓄积量。2012年, 根据国家林业局统一安排, 上海作为试点纳入林业碳汇计量监测体系; 该体系基于森林资源连续清查体系, 采用典型抽样方法布设样地, 以不同森林类型比例、乔木林主要树种组和龄组面积比和蓄积比等特征随机筛选, 在连续清查所有永久有林地样地中选择了100个面积为25.83 m × 25.83 m的典型样地, 其中其他松类4个, 柳杉3个, 水杉8个, 池杉1个, 柏木1个, 樟树6个, 枫香1个, 其他硬阔类15个, 杨树7个, 其他软阔类11个, 阔叶混10个, 针阔混4个, 共71个乔木林样地。本研究同时采用2013–2014年这71个样地所有乔木每木检尺的实测数据。

1.2.2 生物量估算方法 分别采用转换因子连续函数法(conversion factor continuous function method, 以下简称CM法)和单木异速生长方程法(allometric growth equation method, 以下简称AM法)对2014年上海市全市水平的乔木林生物量进行估算。①转换因子连续函数法(CM法)。FANG等^[19]基于全国各地生物量和蓄积量的758组数据, 把中国森林分成了21类, 每类森林类型的生物量转换因子(F_{BE})与蓄积量的关系为 $F_{BE}=a+b/V$; 转化为生物量与蓄积量的简单线性关系为 $B=axV+b$ 。其中: B 为某一树种组的单位面积生物量($t \cdot hm^{-2}$), a 和 b 均为转换因子参数, V 为某一树种组的单位面积蓄积量($m^3 \cdot hm^{-2}$)。本研究不同树种组采用的转换因子参数见表1。②单木异速生长方程法(AM法)。松类、杉类及枫香采用林业行业标准中适用于上海地区的立木生物量二元模型(直径大于5 cm); 硬阔、软阔树种则采用近年来上海本地或邻近地区构建的女贞、杜英、栾树、樟树、鹅掌楸、玉兰、银杏和杨树等树种的立木生物量一元模型(表2)。分别计算每个乔木林典型样地的地上部分、地下部分和总生物量, 并按照树种组和龄组外推获得上海全市乔木林生物量。

表1 乔木林蓄积量与生物量转换因子参数

Table 1 Parameters of biomass conversion factor between volume and biomass of arbor forests

树种组	a	b	N	R^2
其他松类、其他杉类 ^[20]	0.529 2	25.087	19	0.86
柳杉、水杉、池杉 ^[20]	0.349 1	39.816	30	0.79
柏类 ^[20]	0.889 3	7.396	19	0.87
栎类 ^[20]	1.145 3	8.547	12	0.98
樟树、榆树、枫香、其他硬阔类 ^[20]	1.178 3	2.558	17	0.95
杨树、柳树、银杏、其他软阔类 ^[19]	0.475 4	30.603	16	0.92
针叶混 ^[21]	0.589 4	24.515	–	–
阔叶混 ^[20]	0.978 8	5.376	35	0.93
针阔混 ^[20]	0.813 6	18.466	10	0.99

说明: 不同树种组的转换因子参数来源于各自标注的参考文献。 N 表示回归方程中所使用的样本数; R^2 表示回归方程的决定系数。–表示参考文献未注明该参数

2 结果与分析

2.1 乔木林生物量总量

CM法和AM法对2014年上海市全市水平乔木林总生物量的估算结果较为接近(图1), 分别为 4.828×10^6 和 4.805×10^6 t, 前者仅比后者高0.47%。CM法和AM法估算的上海市乔木林地下/地上生物量比分别为0.274和0.289, 前者比后者低5.47%。2种方法对2014年上海市乔木林平均单位面积生物量的估算结果同样比较一致, 分别为66.7(CM法)和66.4 $t \cdot hm^{-2}$ (AM法)。

2.2 不同树种组乔木林生物量

如表3所示: 按树种组来分, 樟树、其他硬阔类、阔叶混、水杉、其他软阔类和杨树是上海市乔木林生物量的主要贡献者, CM法和AM法分别估算出这6个树种组生物量之和为总生物量的88.7%和85.7%。在乔木林优势树种中, 樟树总生物量最高, CM法估算为 $2\,294.404 \times 10^3$ t, AM法估算为 $2\,333.854 \times 10^3$ t; 第2位为其他硬阔类, CM法和AM法估算其总生物量分别为 706.992×10^3 和 $634.780 \times$

表 2 乔木林单木异速生长方程

Table 2 Single-tree allometric growth equations of arbor forests

模型树种	树种组	生物量组分(kg)	异速生长方程
马尾松 <i>Pinus massoniana</i> ^[22]	其他松类	地下生物量 M_b	$M_b=0.008\ 28D^{2.738\ 28}H^{-0.080\ 255}$
		地上生物量 M_a	$M_a=0.066\ 62D^{2.093\ 17}H^{0.497\ 63}$
		总生物量 M_t	$M_t=M_a+M_b$
柳杉 ^[23]	柳杉	地下生物量 M_b	$M_b=0.016\ 79D^{2.697\ 56}H^{-0.212\ 18}$
		地上生物量 M_a	$M_a=0.093\ 11D^{1.811\ 74}H^{0.606\ 77}$
		总生物量 M_t	$M_t=M_a+M_b$
杉木 <i>Cunninghamia lanceolata</i> ^[24]	水杉、柏类、其他杉等	地下生物量 M_b	$M_b=0.016\ 39D^{2.017\ 32}H^{-0.117\ 44}$
		地上生物量 M_a	$M_a=0.065\ 39D^{2.017\ 32}H^{0.494\ 25}$
		总生物量 M_t	$M_t=M_a+M_b$
枫香 ^[25]	枫香	地下生物量 M_b	$M_b=0.120\ 52D^{2.421\ 78}H^{-0.403\ 70}$
		地上生物量 M_a	$M_a=0.089\ 09D^{2.255\ 64}H^{0.304\ 14}$
		总生物量 M_t	$M_t=M_a+M_b$
女贞 ^[18]	女贞	地下生物量 M_b	$M_b=0.107\ 47D^{1.619\ 21}$
		地上生物量 M_a	$M_a=M_t-M_b$
		总生物量 M_t	$M_t=0.139\ 99D^{2.342\ 73}$
玉兰 ^[14]	玉兰、广玉兰 <i>Magnolia grandiflora</i>	地下生物量 M_b	$M_b=0.104\ 94D^{1.809\ 28}$
		地上生物量 M_a	$M_a=M_t-M_b$
		总生物量 M_t	$M_t=0.330\ 79D^{1.909\ 57}$
杜英 ^[16]	杜英	地下生物量 M_b	$M_b=0.126\ 84D^{1.613\ 75}$
		地上生物量 M_a	$M_a=M_t-M_b$
		总生物量 M_t	$M_t=0.188\ 33D^{2.141\ 25}$
栎树 ^[16]	栎树	地下生物量 M_b	$M_b=0.047\ 27D^{2.327\ 26}$
		地上生物量 M_a	$M_a=M_t-M_b$
		总生物量 M_t	$M_t=0.109\ 94D^{2.484\ 38}$
樟树 ^[16]	樟树、榆树、其他硬阔类	地下生物量 M_b	$M_b=0.033\ 45D^{2.436\ 92}$
		地上生物量 M_a	$M_a=M_t-M_b$
		总生物量 M_t	$M_t=0.103\ 87D^{2.535\ 00}$
鹅掌楸 ^[16]	鹅掌楸	地下生物量 M_b	$M_b=0.047\ 72D^{2.106\ 47}$
		地上生物量 M_a	$M_a=M_t-M_b$
		总生物量 M_t	$M_t=0.063\ 93D^{2.611\ 47}$
银杏 ^[26]	银杏	地下生物量 M_b	$\ln M_b=-3.750\ 00+2.450\ 00\ln D$
		地上生物量 M_a	$\ln M_a=-2.560\ 00+2.400\ 00\ln D$
		总生物量 M_t	$M_t=M_a+M_b$
杨树 ^[17]	杨树、柳树、其他软阔类	地下生物量 M_b	$M_b=0.013\ 45D^{2.453\ 50}$
		地上生物量 M_a	$M_a=M_t-M_b$
		总生物量 M_t	$M_t=0.019\ 01D^{3.105\ 10}$

说明：不同模型树种的异速生长方程来源于各自标注的参考文献。 D 表示胸径， H 表示树高

10^3 t；排名第 3 位的树种，CM 法估算为水杉(492.825×10^3 t)，AM 法为阔叶混(380.639×10^3 t)。针叶混对上海市乔木林生物量的贡献最小，CM 法和 AM 法估算其总生物量仅分别为 1.534×10^3 t 和 1.586×10^3 t。

樟树、杨树、榆树、柳杉、水杉和池杉的单位面积生物量相对较高。CM 法估算出单位面积生物量较高的 3 个树种组依次为杨树($103.1\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$)，水杉($97.2\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$)和樟树($82.7\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$)；AM 法估算出单位面积生物量最高的为池杉($131.4\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$)，其次为樟树($84.2\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$)和杨树($76.2\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$)。柏木的单位面

积生物量相对最低, CM法和AM法估算结果仅分别为21.6和40.9 t·hm⁻²(表3)。

表3 上海市不同树种组乔木林总生物量和单位面积生物量

Table 3 Total biomass and biomass per unit area of different tree species groups of arbor forest in Shanghai

树种组	面积/hm ²	总生物量/×10 ³ t		单位面积生物量/(t·hm ⁻²)	
		CM法	AM法	CM法	AM法
其他松类	1 481	72.593	81.553	49.0	55.1
柳杉	368	28.241	18.023	76.8	49.0
水杉	5 069	492.825	293.693	97.2	57.9
池杉	736	46.096	96.704	62.6	131.4
柏木	597	12.896	24.405	21.6	40.9
其他杉类	1 255	50.829	80.899	40.5	64.5
针叶混	25	1.534	1.586	62.3	64.5
樟树	27 728	2 294.404	2 333.854	82.7	84.2
榆树	179	14.442	11.534	80.7	64.5
枫香	170	4.965	7.391	29.3	43.6
其他硬阔类	15 788	706.992	634.780	44.8	40.2
杨树	3 029	312.25	230.675	103.1	76.2
柳树	1 575	105.798	101.569	67.2	64.5
银杏	1 158	51.207	74.645	44.2	64.5
其他软阔类	3 453	169.131	243.607	49.0	70.6
阔叶混	7 051	304.707	380.639	43.2	54.0
针阔混	2 683	159.232	189.772	59.3	70.7
合计/平均	72 343	4 828.139	4 805.330	66.7	66.4

2.3 不同龄组乔木林生物量

如表4所示:不同龄组乔木林总生物量随龄组增加而降低,从大到小依次为幼龄林、中龄林、近熟林、成熟林和过熟林,其中幼、中龄林是乔木林总生物量的主体部分。CM法和AM法分别估算出幼、

表4 上海市各龄组乔木林总生物量

Table 4 Total biomass of different tree species groups of arbor forests in Shanghai

树种组	幼龄林生物量/×10 ³ t		中龄林生物量/×10 ³ t		近熟林生物量/×10 ³ t		成熟林生物量/×10 ³ t		过熟林生物量/×10 ³ t	
	CM法	AM法	CM法	AM法	CM法	AM法	CM法	AM法	CM法	AM法
其他松类	9.029	15.317	48.039	52.759	13.236	11.658	2.289	1.819	0	0
柳杉	1.327	1.452	6.972	5.620	0.753	0.499	12.859	7.330	6.329	3.123
水杉	29.982	33.810	149.253	119.492	104.94	50.169	172.827	75.889	35.822	14.334
池杉	12.709	34.646	24.540	51.642	3.176	4.174	5.568	6.136	0.103	0.107
柏木	7.920	20.019	4.929	4.360	0.030	0.020	0.017	0.006	0	0
其他杉类	46.808	78.194	3.954	2.657	0	0	0.067	0.048	0	0
针叶混	0.277	0.359	0.938	1.080	0.319	0.147	0	0	0	0
樟树	1 367.162	1 670.411	871.475	635.183	44.233	23.349	11.380	4.850	0.154	0.061
榆树	0.263	4.127	1.045	1.661	4.367	2.962	8.533	2.720	0.235	0.064
枫香	1.460	4.627	2.848	2.511	0.624	0.248	0.033	0.006	0	0
其他硬阔类	602.207	587.114	96.954	44.031	5.337	2.842	2.486	0.790	0.008	0.003
杨树	1.285	2.581	31.692	34.238	154.211	108.214	111.718	75.848	13.344	9.794
柳	1.234	2.392	12.028	14.826	53.16	51.256	35.083	29.797	4.293	3.298
银杏	8.939	17.379	28.215	43.993	7.655	8.175	4.893	4.093	1.504	1.005
其他软阔类	31.442	71.806	49.485	83.686	47.058	51.342	28.383	26.567	12.763	10.206
阔叶混	35.105	86.457	222.279	256.369	41.790	34.592	5.298	3.120	0.235	0.100
针阔混	22.610	52.966	92.013	104.795	35.338	27.088	9.271	4.923	0	0
合计	2 179.759	2 683.656	1 646.658	1 458.903	516.227	376.737	410.705	243.940	74.790	42.093

中龄林 2 个龄组生物量之和占有龄组的 86.2% 和 79.3%。

在不同优势树种组中，樟树和其他硬阔类的生物量主要来自幼龄林，CM 法和 AM 法分别估算出该龄组樟树生物量占比为 59.6% 和 71.6%，其他硬阔类占比为 85.2% 和 92.5%。水杉、阔叶混和其他软阔类的生物量主要来自中龄林，CM 法和 AM 法分别估算出该龄组生物量占比为 30.3% 和 40.7%，73.0% 和 67.4% 以及 29.3% 和 34.4%；杨树的生物量则主要来自近熟林，CM 法和 AM 法分别估算出其近熟林生物量占比为 49.3% 和 46.9%。

2.4 上海市乔木林生物量动态变化

尽管 CM 法和 AM 法对不同树种组和龄组乔木林生物量的估算结果存在一定差异，但对总生物量的估算结果较为接近。鉴于此，本研究基于 CM 法，采用前后 6 期乔木林资源调查报告的统计数据，分析了 1999–2016 年上海市乔木林总生物量的动态变化。

如图 2 所示：自 1999 年起上海市乔木林总生物量持续快速增长，至 2016 年接近 6.400×10^6 t。1999–2016 年，乔木林总生物量年均增长率为 19.2%，超过同期乔木林面积的年均增长率(16.8%)。乔木林单位面积生物量总体上同样呈增长趋势；1999–2004 年，乔木林单位面积生物量从 $54.0 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 下降到 $32.1 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ；但自 2004 年起持续稳定上升，年均增长率为 7.4%；2009，2012，2014 和 2016 年分别为 47.2，59.0，66.7 和 $75.7 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

3 结论与讨论

3.1 不同方法估算的上海乔木林生物量

早期的材积源生物量法将生物量与蓄积量之比设为常数^[27]；FANG 等^[28]提出了蕴涵林分和年龄关系的转换因子连续函数法，并建立了与林龄无关的生物量蓄积量线性关系。自此之后，线型关系、改进型线型关系以及其他关系模型(如双曲线模型、指数模型和幂函数模型)常被用于国家和省域尺度上的森林生物量及碳储量评估^[19–20,29–31]。有研究指出^[6–7,10]：CM 法在中小尺度上的适用性相对较差，可能会高估森林生物量；相比之下，AM 法直接运用单株立木生物量模型测算样木生物量，并运用系统/典型抽样调查方法，统计估测局部地区或区域森林生物量，计算精度相对较高，精度保障可靠，具可重复性^[6]，是全国林业碳汇计量监测体系推荐的方法之一^[32]；但 AM 法需要在样地尺度进行每木检尺，且选择不同异速生长方程也会对估算结果产生较大影响。本研究中，除松类、杉类及枫香采用了林业行业标准中的立木生物量二元模型外，其他树种均选用了近年来上海及周边地区报道的一元生物量模型。张茂震等^[1]和曾伟生等^[6]发现，与基于胸径和树高的二元模型相比，仅基于胸径的一元模型估算结果偏高。因此，下一步应研究上海地区优势树种(特别是樟树、水杉、杨树)的二元生物量模型，从而增强采用 AM 法估算区域和林分乔木林生物量的准确性。

作为林分水平的生物量模型，FANG 等^[19]的 CM 法估算精度低于样木水平的 AM 法^[6]，但在大空间尺度、长时间序列上进行森林生物量动态分析时，通过样地调查获得的样木水平数据往往比较有限，而基于森林资源调查成果，利用 CM 法来估算森林生物量的区域时空变化则更容易实现。本研究中，CM 法和 AM 法估算的 2014 年上海市乔木林总生物量较为接近(约 4.800×10^6 t)，反映 2 种方法在总生物量估算方面具有相对较好的一致性，与张茂震等^[1]结果一致。因此，在无法采用 AM 法实现年际动态分析的时候，CM 法也能较好地反映上海市乔木林总生物量的动态变化。

前期也有一些研究对上海市区域水平的乔木林生物量进行了估算。王美霞等^[15]基于 2009 年森林资

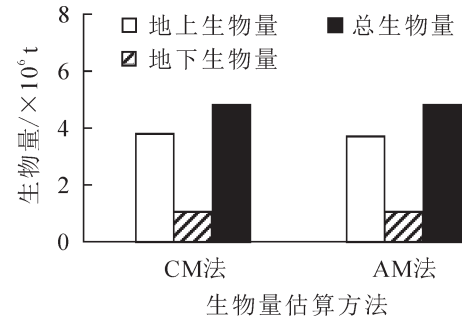


图 1 上海市乔木林生物量总量

Figure 1 Total biomass of arbor forest in Shanghai

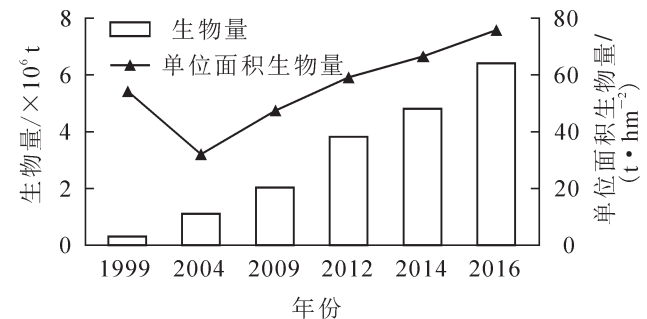


图 2 1999–2016 年上海市乔木林总生物量和单位面积生物量的动态变化

Figure 2 Dynamic of total biomass and per unit area biomass of arbor forests in Shanghai during 1999–2016

源清查资料,利用线性和双曲线CM法,对上海市8种主要乔木林(樟树、水杉、杨树、柏类、柳杉、刺槐、马尾松和杉木)的总生物量进行了估算,结果分别是 1.696×10^6 和 1.698×10^6 t。这一结果低于本研究采用CM法(线性)估算的2009年乔木林生物量(2.056×10^6 t),可能原因是王美霞等^[15]的研究没有包含上海市的所有优势树种。同样基于森林资源清查资料,聂祥永等^[33]采用加权生物量回归模型法估算出上海市2009年乔木林生物量为 2.173×10^6 t,略高于本研究,反映出2项研究在生物量估算方法上的差异。另外,本研究中2种方法估算出2014年上海市乔木林的平均单位面积生物量均超过 $66.0 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$;这一数值低于采用CM法估算的1989–1993年全国平均水平($77.4 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)^[34],但高于采用加权生物量回归模型法估算的2004–2010年长江三角洲地区乔木林的平均单位面积生物量($54.2 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)^[33],表明上海乔木林的总体质量已接近区域平均水平。

3.2 不同树种组和龄组的乔木林生物量

从树种结构来看,樟树、硬阔类、水杉、阔叶混、其他软阔类和杨树生物量的贡献比例较大,合计占8成以上,表明阔叶树种是目前上海乔木林生物量的主要贡献者。而1999年的森林资源连续清查资料显示,当时上海市主要树种为水杉等针叶树种,阔叶树种仅占很小比例。因此,能否稳步提升这些新增阔叶林的生物量,将直接决定上海乔木林生物量能否实现连续稳定增长。在不同阔叶树种组中,樟树生物量贡献比例最大,和王美霞等^[15]的研究一致。另外,CM法和AM法在估算不同树种组的单位面积生物量时存在一定差异,这反映了2种方法在模型、参数和计算过程等方面的区别。其中,樟树、杨树和水杉的面积、总生物量和单位面积生物量均相对较高,特别需要加强经营管理。

从龄组结构来看,幼、中龄林是上海乔木林生物量的最重要贡献龄组,同时,樟树、其他硬阔类、水杉、阔叶混和其他软阔类等优势树种组的主要贡献者也是幼、中龄林。这一现象在浙江、江苏等周边省份同样存在^[29,35]。这反映出过去近20 a,上海尽管在城市森林建设方面取得了巨大成就,但林龄仍相对偏低,乔木林总生物量有待进一步提升。另外,鉴于幼、中龄林的生物量占有绝对优势,若后续经营管理得当,上海市乔木林总生物量预期将持续稳定增加。

3.3 上海市乔木总生物量的动态变化

从1999–2016年的发展形势看,上海市乔木林总生物量持续快速增长,年均增长率达到19.2%,在长江三角洲地区尤为突出。同样采用CM法估算的江苏省2000–2005年以及浙江省1999–2004年林分生物量的年均增长率则分别为4.9%^[35]和10.1%^[1]。尽管这一时期的快速增长与期初(1999年)森林资源基数较低有一定关系,但仍反映了过去近20 a上海城市森林资源的跨越式发展。

近20 a上海市乔木林单位面积生物量总体上也呈增长趋势。1999–2004年的阶段性下降主要是由于大量新造林的蓄积量较低。自2004年起,这些新造林的生长使单位面积生物量止跌回升并持续增加。至2016年,采用CM法估算出单位面积生物量达 $75.7 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,已接近全国平均水平 $77.4 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ^[34],且仍存在一定上升空间。

1999–2016年上海乔木林总生物量和单位面积生物量的同步显著增加表明,在国土资源极其有限的情况下,上海城市森林资源在数量和质量方面都得到了显著提升。这不仅增强了上海城市森林在应对区域气候变化中的作用,对于改善大都市环境污染状况,提升城市生态安全水平也至关重要。

4 参考文献

- [1] 张茂震,王广兴.浙江省森林生物量动态[J].生态学报,2008,28(11):5665–5674.
ZHANG Maozhen, WANG Guangxing. The forest biomass dynamics of Zhejiang Province [J]. *Acta Ecol Sin*, 2008, 28(11): 5665–5674.
- [2] 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,2008,23(2):58–63.
WANG Weifeng, LEI Yuancai, WANG Xuefeng, et al. A review of forest biomass models [J]. *J Northwest For Univ*, 2008, 23(2): 58–63.
- [3] 董利虎,李凤日.3种林分生物量估算方法的比较[J].应用生态学报,2016,27(12):3862–3870.
DONG Lihu, LI Fengri. Comparison of three stand-level biomass estimation methods [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2016, 27(12): 3862–3870.
- [4] 罗云建,张小全,王效科,等.森林生物量的估算方法及其研究进展[J].林业科学,2009,45(8):129–134.

- LUO Yunjian, ZHANG Xiaoquan, WANG Xiaoke, *et al.* Forest biomass estimation methods and their prospects [J]. *Sci Silv Sin*, 2009, **45**(8): 129 – 134.
- [5] IPCC. *IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Vol 4: Agriculture, Forestry, and Other Land Use* [R]. Hayama: Institute for Global Environmental Strategies, 2006.
- [6] 曾伟生, 陈新云, 蒲莹, 等. 基于国家森林资源清查数据的不同生物量和碳储量估计方法的对比分析[J]. 林业科学研究, 2018, **31**(1): 66 – 71.
- ZENG Weisheng, CHEN Xinyun, PU Ying, *et al.* Comparison of different methods for estimating forest biomass and carbon storage based on national forest inventory data [J]. *For Res*, 2018, **31**(1): 66 – 71.
- [7] 李海奎, 赵鹏祥, 雷渊才, 等. 基于森林清查资料的乔木林生物量估算方法的比较[J]. 林业科学, 2012, **48**(5): 44 – 52.
- LI Haikui, ZHAO Pengxiang, LEI Yuancai, *et al.* Comparison on estimation of wood biomass using forest inventory data [J]. *Sci Silv Sin*, 2012, **48**(5): 44 – 52.
- [8] WEST P W. *Tree and Forest Measurement* [M]. Berlin: Springer, 2009.
- [9] SOMOGYI Z, CIENCIALA E, MÄKIPÄÄ R, *et al.* Indirect methods of large-scale forest biomass estimation [J]. *Eur J For Res*, 2007, **126**(2): 197 – 207.
- [10] 尹惠妍, 李海奎. 基于蓄积的森林生物量估算方法的对比分析[J]. 林业科学研究, 2014, **27**(6): 848 – 853.
- YIN Huiyan, LI Haikui. Comparison of the methods estimating forest biomass based on stock volume [J]. *For Res*, 2014, **27**(6): 848 – 853.
- [11] 黄兴召, 王泽夫, 徐小牛. 生物量转换因子连续函数的拟合方法比较[J]. 浙江农林大学学报, 2017, **34**(5): 775 – 781.
- HUANG Xingzhao, WANG Zefu, XU Xiaoniu. Comparison of fitting approaches with biomass expansion factor equations [J]. *J Zhejiang A&F Univ*, 2017, **34**(5): 775 – 781.
- [12] KETTERINGS Q M, COE R, van NOORDWIJK M, *et al.* Reducing uncertainty in the use of allometric biomass equations for predicting above-ground tree biomass in mixed secondary forests [J]. *For Ecol Manage*, 2001, **146**(1): 199 – 209.
- [13] 赵金龙, 王添鑫, 韩海荣, 等. 辽河源不同龄组油松天然次生林生物量及空间分配特征[J]. 生态学报, 2014, **34**(23): 7026 – 7037.
- ZHAO Jinlong, WANG Luoxin, HAN Hairong, *et al.* Biomass and spatial distribution characteristics of *Pinus tabulaeformis* natural secondary forest at different age groups in the Liaoheyuan Nature Reserve, Hebei Province [J]. *Acta Ecol Sin*, 2014, **34**(23): 7026 – 7037.
- [14] 王哲. 黄浦江中上游广玉兰人工林生态系统碳储量特点[J]. 世界林业, 2014(3): 34 – 41.
- WANG Zhe. Carbon storage of *Magnolia grandiflora* plantations in upper and middle reaches of Huangpu River, Shanghai [J]. *World J For*, 2014(3): 34 – 41.
- [15] 王美霞, 刘玲, 吕文利. 上海乔木林分碳储量比较分析研究[J]. 环境科学与管理, 2013, **38**(5): 174 – 177.
- WANG Meixia, LIU Ling, LÜ Wenli. Comparative analysis on carbon storage of arbor stand in Shanghai [J]. *Environ Sci Manage*, 2013, **38**(5): 174 – 177.
- [16] 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.
- WANG Zhe, HAN Yujie, KANG Hongzhang, *et al.* Carbon storage of main tree species plantations for water resources conservation in upper reaches of Huangpu River, Shanghai [J]. *Chin J Ecol*, 2012, **31**(8): 1930 – 1935.
- [17] 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.
- XUE Chunyan, WANG Zhe, CUI Xuan, *et al.* Carbon storage of poplar plantations in upper and middle reaches of Huangpu River, Shanghai [J]. *Guihaia*, 2014, **34**(3): 338 – 343.
- [18] 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.
- WANG Zhe, DU Baoming, HAN Yujie, *et al.* Carbon storage of *Ligustrum lucidum* plantations in Shanghai Out-Loop Forest Belt [J]. *Chin J Ecol*, 2014, **33**(4): 910 – 914.

- [19] FANG Jingyun, CHEN Anping, PENG Changhui, *et al.* Changes in forest biomass carbon storage in China between 1949 and 1998 [J]. *Science*, 2001, **292**(5525): 2320 – 2322.
- [20] FANG Jingyun, GUO Zhaodi, PIAO Shilong, *et al.* Terrestrial vegetation carbon sinks in China, 1981–2000 [J]. *Sci China Series D Earth Sci*, 2007, **50**(9): 1341 – 1350.
- [21] 曾伟生. 云南省森林生物量与生产力研究[J]. 中南林业调查规划, 2005, **24**(4): 1 – 3.
ZENG Weisheng. Research on forest biomass and productivity in Yunnan [J]. *Cent South For Inv Plann*, 2005, **24**(4): 1 – 3.
- [22] 国家林业局. 立木生物量模型及碳计量参数: 马尾松: LY/T 2263–2014[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014.
- [23] 国家林业局. 立木生物量模型及碳计量参数: 柳杉: LY/T 2657–2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- [24] 国家林业局. 立木生物量模型及碳计量参数: 杉木: LY/T 2264–2014[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014.
- [25] 国家林业局. 立木生物量模型及碳计量参数: 枫香: LY/T 2261–2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- [26] 刘坤, 曹林, 汪贵斌, 等. 银杏生物量分配格局及异速生长模型[J]. 北京林业大学学报, 2017, **39**(4): 12 – 20.
LIU Kun, CAO Lin, WANG Guibin, *et al.* Biomass allocation patterns and allometric models of *Ginkgo biloba* [J]. *J Beijing For Univ*, 2017, **39**(4): 12 – 20.
- [27] BROWN S, LUGO A E. Biomass of tropical forests: a new estimate based on forest volumes [J]. *Science*, 1984, **223**(4642): 1290 – 1293.
- [28] FANG Jingyun, WANG G G, LIU Guohua, *et al.* Forest biomass of China: an estimate based on the biomass-volume relationship [J]. *Ecol Appl*, 1998, **8**(4): 1084 – 1091.
- [29] 李银, 陈国科, 林敦梅, 等. 浙江省森林生态系统碳储量及其分布特征[J]. 植物生态学报, 2016, **40**(4): 354 – 363.
LI Yin, CHEN Guoke, LIN Dunmei, *et al.* Carbon storage and its distribution of forest ecosystems in Zhejiang Province, China [J]. *Chin J Plant Ecol*, 2016, **40**(4): 354 – 363.
- [30] REN Yin, WEI Xiaohua, ZHANG Li, *et al.* Potential for forest vegetation carbon storage in Fujian Province, China, determined from forest inventories [J]. *Plant Soil*, 2011, **345**(1/2): 125 – 140.
- [31] 张春华, 居为民, 王登杰, 等. 2004–2013年山东省森林碳储量及其碳汇经济价值[J]. 生态学报, 2018, **38**(5): 1739 – 1749.
ZHANG Chunhua, JU Weimin, WANG Dengjie, *et al.* Biomass carbon stocks and economic value dynamics of forests in Shandong Province from 2004 to 2013 [J]. *Acta Ecol Sin*, 2018, **38**(5): 1739 – 1749.
- [32] 国家林业局调查规划设计院. 全国林业碳汇计量监测技术指南(试行)[R]. 北京: 国家林业局, 2011.
- [33] 聂祥永, 姚顺彬, 楼毅, 等. 长江三角洲地区森林碳汇的初步估算与分析[J]. 林业资源管理, 2012(6): 51 – 56.
NIE Xiangyong, YAO Shunbin, LOU Yi, *et al.* Estimation and analysis of forest carbon sinks in the Yangtze River Delta [J]. *For Res Manage*, 2012(6): 51 – 56.
- [34] 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 Guohua, FU Bojie, FANG Jingyun. Carbon dynamics of Chinese forests and its contribution to global carbon balance [J]. *Acta Ecol Sin*, 2000, **20**(5): 733 – 740.
- [35] 温小荣, 蒋丽秀, 刘磊, 等. 江苏省森林生物量与生产力估算及空间分布格局分析[J]. 西北林学院学报, 2014, **29**(1): 36 – 40.
WEN Xiaorong, JIANG Lixiu, LIU Lei, *et al.* Estimation of forest biomass, net primary production and analysis on spatial distribution pattern for Jiangsu Province [J]. *J Northwest For Univ*, 2014, **29**(1): 36 – 40.