

浙江省森林生物量动态

张茂震¹, 王广兴²

(1. 浙江林学院环境科技学院, 浙江临安 311300; 2. Dept. of Geography, Southern Illinois University, Carbondale IL 62901, USA)

摘要:以浙江省 1976 至 2004 年森林资源连续清查资料为数据源, 采用基于生物量与蓄积之间关系的生物量转换因子连续函数法, 对全省林分生物量和包括林分在内的森林生物量动态进行估计。森林生物量为包括林分、疏林、灌木林、竹林、经济林和四旁树在内的所有林木生物量之和。结果表明, 浙江省 1976 至 2004 年间森林生物量从 1.00828×10^8 Mg 上升到 2.44426×10^8 Mg; 其中, 林分生物量由 0.5712×10^8 Mg 上升到 1.51128×10^8 Mg。森林生物量和林分生物量的年平均增长速度分别为 5.1% 和 9.1%。在 1999 至 2004 年间, 森林生物量和林分生物量增长速度均明显加快, 分别达到 8.6% 和 10.1%。在 1976 至 2004 年间, 全省森林面积年均增长速度为 1.0%, 森林平均生物量从 $16.50 \text{ Mg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 上升到 $36.59 \text{ Mg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。但是, 在森林资源总量不断增加的同时, 全省林分质量仍维持较低水平。2004 年全省林分单位面积生物量为 $38.40 \text{ Mg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 远低于全国平均水平 ($77.40 \text{ Mg} \cdot \text{hm}^{-2}$)。研究还表明, 利用森林资源连续清查数据和基于单株测树因子的森林生物量模型能够估计大尺度范围内的森林生物量及其动态, 但亟待建立和完善覆盖所有树种的生物量模型。

关键词:生物量转换因子连续函数; 森林资源连续清查; 森林生物量; 森林蓄积量

文章编号: 1000-0933(2008)11-5665-10 中图分类号: S718.55 + 6, S757.2 文献标识码: A

The forest biomass dynamics of Zhejiang Province

ZHANG Mao-Zhen¹, WANG Guang-Xing²

1 School of Environmental Sciences & Technologies, Zhejiang Forestry University, Lin'an, Zhejiang 311300, China

2. Dept. of Geography, Southern Illinois University, Carbondale IL 62901, USA

Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(11): 5665 ~ 5674.

Abstract: We estimated total forest biomass and the biomass of forest stands in Zhejiang Province between 1976 and 2004 using data from continuous forest resource inventory and conversion models that account for the relationship between volume and biomass using the Variable Biomass Expansion Factor (VBEF) method. Total-forest biomass included forest stands, bamboo stands, cash forests, open forest, shrub forest and trees on non-forest land. Between 1976 and 2004, Zhejiang Province total-forest biomass increased from 1.00828×10^8 Mg to 2.44426×10^8 Mg, whereas forest-stand biomass rose from 0.5712×10^8 Mg to 1.51128×10^8 Mg. That is, total-forest biomass and forest-stand biomass increased on average by 5.1% and 9.1% annually respectively. Between 1999 and 2004, biomass growth accelerated, reaching an average of 8.6% and 10.1% for total-forest and forest-stand biomass respectively. The total forest area of the Province increased on average by 1.0% annually between 1976 and 2004, resulting in an average forest biomass of $16.50 \text{ Mg} \cdot \text{hm}^{-2}$ in 1976 and 36.59

基金项目:浙江省重大科技专项重点农业资助项目; 浙江森林碳生存与储量计量模型研建及应用评估系统开发资助项目(2008C12068); 国家科技支撑资助项目(2006BAD23B0204-4); 浙江林学院科学研究发展基金资助项目(2006FR058)

收稿日期: 2008-01-07; 修订日期: 2008-09-16

作者简介:张茂震(1958~), 男, 湖南沅陵人, 博士, 副教授, 主要从事森林资源监测、森林生长与收获研究。E-mail: zhangmaozhen@126.com

Foundation item: The project was financially supported by The Key project of Agriculture, Zhejiang R&D project- Development of the Forest Carbon Modeling and Evaluation System (No. 2008C12068); The National Key Technologies R&D Program (No. 2006BAD23B0204-4) and Zhejiang Forestry College foundation for scientific research and development (No. 2006FR058)

Received date: 2008-01-07; **Accepted date:** 2008-09-16

Biography: ZHANG Mao-Zhen, Ph. D., Associate professor, mainly engaged in forest resources monitoring, growth and yield projection. E-mail: zhangmaozhen@126.com

$\text{Mg} \cdot \text{hm}^{-2}$ in 2004. However, the quality of the Zhejiang Province forests may be considered relatively poor as evidenced by the 2004 forest-stand biomass per unit of area ($38.40 \text{ Mg} \cdot \text{hm}^{-2}$), which was still much lower than the average across China ($77.40 \text{ Mg} \cdot \text{hm}^{-2}$). This study showed that data from continuous forest resource inventory and individual-tree based models may be used to estimate forest biomass and its change at regional levels. However, further studies are needed to either develop new biomass models for various species or improve existing models by implementing consistent standards.

Key Words: Variable Biomass Expansion Factor(VBEF); continuous forest resource inventory; forest biomass; forest stock

森林是陆地生态系统的主体,其生物量约占全球陆地植被生物量的 90%^[1]。作为整个森林生态系统运行的能量基础和营养物质来源,森林生物量是研究生物生产力、净第一性生产力、碳循环、全球变化研究的基础。森林生物量和生产力是反映森林生态系统的两个关键指标。它不仅是森林固碳能力的重要标志,也是评估森林碳收支的重要参数^[2]。研究森林生物量和生产力,在生态系统的尺度上,利用生态系统生物量的分布格局和机理来揭示生产力与环境因子的相互关系,可为评价森林的可持续经营提供科学依据;在国家、区域或全球大尺度上通过对森林生物量和生产力的数量和空间分布格局研究,可为评价大尺度的生态质量和林业与生态建设成效提供定量依据,为促进能源合理利用和提高生物产量与生产力水平提供决策支持^[3]。

浙江省是我国经济发达省份之一。高速的经济发展带来了频繁的土地利用与土地覆盖变化,也带来了生态环境破坏。2004 年省森林覆被率达 57.41%,但单位蓄积、人均林分面积和蓄积都在全国处于较低水平,生态环境脆弱。森林资源连续清查数据显示,全省阔叶树种消耗量大于生长量。这些都展示了保护与发展森林资源、提高资源利用水平的紧迫性。研究和评估浙江省的森林生物量及其动态,为有效保护生态环境和合理利用森林资源提供科学数据,对实现人与自然和谐发展、促进全省经济社会全面协调可持续发展都具有十分重要的意义。

森林生物量和生产力研究可分为个体研究和区域研究两大类。前者主要基于林木个体或集群进行研究,主要手段是地面实测^[4]。在我国这类研究开始于 20 世纪 70 年代,其代表有潘维传等人的湖南会同杉木林生态系统生物量定位观测研究^[5,6]、俞新妥等人的闽北邵武杉木人工林生态系统生物量的初步研究^[7]、冯宗炜等的桃源杉木林生物量研究^[8]。这些研究大多以建立森林生物量模型为目标,研究森林生物量和生产力相关因子之间的关系^[9~15]。后者是对以省、流域或国家为单位的区域森林生物量估计,方法主要有基于森林资源清查数据的估计方法^[16,17]和基于遥感信息技术的估计方法^[18~20]。基于森林资源清查数据的方法包括平均生物量法、生物量转换因子法^[21,22]等。

基于森林资源清查数据进行大区域森林生物量的估算一直是人们关注的焦点^[23],其方法已从材积比值法、蓄积量转化法发展到生物量转换因子法,但其方法对区域生物量的估算仍存在较大局限性^[24,25]。1996 年方精云等提出了森林生物量估计转换因子连续函数法,并给出了生物量与蓄积量模型及各优势树种的计算参数,克服了生物量转换因子法转换参数静态的缺点^[26,27]。本研究利用转换因子连续函数法,在森林资源连续清查的基础上对浙江省 1976~2004 年森林生物量进行动态分析。同时,用 1994 和 1999 年森林资源连续清查数据进行基于单株生物量模型(相对生长模型)的估计,对照基于转换因子连续函数法的全省森林生物量估计结果,对用森林资源清查数据进行大尺度森林生物量估计的方法进行分析。

1 研究资料与方法

1.1 研究资料

浙江省位于我国东南沿海三角洲南翼,全省陆地总面积 10180 km^2 。境内地形地貌复杂,以低山、丘陵为主。全省跨南亚热带和北亚热带过度地带,物种资源丰富。

该省国家森林资源连续清查体系于 1979 年始建,到 2004 年为止,已对固定样地进行了 5 次复查。该抽样系统样地覆盖全省,样地面积 0.08 hm^2 ,复查周期一般为 5a。从 1994 年开始,为了防偏,每次复查在水平方

向按一定间隔向东移动部分(1/3)的样地,导致每期复查样地数量有一定差异:1994 年 4222 个,1999 年 4249 个,2004 年 4252 个,各期现状总体估计值计算自全部样地。

本研究除利用全省森林资源连续清查样地数据、样木数据及相关参数等资料外,同时包括国家森林资源连续清查体系建立之前 1976 年以县为单位的森林资源调查成果资料。

1.2 研究方法

1.2.1 森林生物量估计

森林生物量估计采用方精云的转换因子连续函数法^[27],其回归方程为:

$$B = a \times V + b \quad (1)$$

式中, B 为每公顷生物量($\text{Mg} \cdot \text{hm}^{-2}$), V 为每公顷蓄积量($\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$), a 和 b 为参数。

文献^[27]中包括混交林有 21 个树种组,由于森林资源连续清查数据按优势树种记录,本研究采用其中除落叶针叶混交林等 3 个混交树种以外的 18 组参数,其余针叶混交林、针阔混交林和阔叶混交林 3 个树种采用文献^[28]的参数。表 1 列出本研究采用的森林蓄积量-生物量转换模型参数。

表 1 森林蓄积量与生物量转换模型参数

Table 1 The exchange parameters of forest volume-biomass

序号 Seq. Num.	a	b	树种(组)名称 Species (group) name
1	0.4642	47.4990	冷杉、云杉、紫杉 <i>Abies</i> and <i>Picea</i> and <i>Taxanes</i>
2	1.0687	10.2370	桦木 <i>Betula</i>
3	0.7441	3.2377	木麻黄 <i>Casuarina</i>
4	0.3999	22.5410	杉木 <i>Cunninghamia lanceolata</i>
5	0.6129	46.1451	柏木 <i>Cypress</i>
6	1.1453	8.5473	栎类 <i>Oaks</i>
7	0.8873	4.5539	桉树 <i>Eucalyptus</i>
8	0.6096	33.8060	落叶松 <i>Larix</i>
9	0.5894	24.5151	针叶混交林 Mixed conifer forests ^[28]
10	0.7143	16.9154	针阔混交林 Mixed conifer and broad-leaved forests ^[28]
11	0.8392	9.4157	阔叶混交林 Mixed broad-leaved forests ^[28]
12	0.7564	8.3103	硬阔、杂木、矮林 Nonmerchantable woods
13	0.5856	18.7435	华山松 <i>Pinus armandii</i>
14	0.5185	18.2200	红松 <i>P. koraiensis</i>
15	0.5101	1.0451	马尾松、云南松、思茅松 <i>P. massoniana</i> , <i>P. yunnanensis</i> , <i>Pinus hesiya</i> var. <i>langbianensis</i>
16	1.0945	2.0040	樟子松、赤松 <i>Pinus sylvestris</i> Linn. var. <i>mongolica</i> Litv., <i>Pinus densiflora</i> Sieb. et Zucc.
17	0.7554	5.0928	油松 <i>P. tabulaeformis</i>
18	0.5168	33.2378	黑松、高山松、水杉、乔松 <i>Pinus thunbergii</i> , <i>Pinus densata</i> , <i>Metasequoia glyptostroboides</i> , Other pines
19	0.4754	30.6034	杨、桐、相思、软阔类 <i>Populus</i> group
20	0.4158	41.3318	铁杉、油杉、柳杉 <i>Tsuga</i> , <i>Cryptomeria</i> , <i>Keteleer</i>
21	0.7975	0.4204	水胡黄、楠樟梓、榧树 <i>Ptreocarya rhoifolia</i> , <i>Lauraceae</i> , <i>Cryptomeria fortunei</i>

在国家森林资源连续清查中,森林包括林分、疏林、经济林、竹林以及灌木林 5 个部分,而在调查中经济林、竹林和灌木林均不计算蓄积量,而且也无相应的蓄积量-生长量转换模型,本研究对经济林、竹林、灌木林均采用文献^[28]方法估计,非林地上的林木生物量由立木蓄积换算。具体计算方法和参数如下:

竹林 单株平均生物量乘以总株数;单株平均生物量取 22.5 kg ;

经济林 单位面积生物量平均值乘以总面积,单位面积生物量平均值取 $23.7 \text{ Mg} \cdot \text{hm}^{-2}$;

灌木和疏林 单位面积生物量平均值乘以总面积,单位面积生物量平均值取 $19.76 \text{ Mg} \cdot \text{hm}^{-2}$;

非林地林木 用该省同期林分生物量与林分蓄积量的比值作为平均转换参数计算。

1.2.2 森林生物量估计方法比较

为分析转换因子连续函数法估计结果的合理性,本研究应用文献^[10~14,32~37]的单株生物量模型和参数,根据单株立木的胸径(和树高)计算其生物量,由单株累加获得样地生物量,进而推算全省森林生物量。通过初步比较,在剔除少量异常模型以后,发现各模型计算结果之间差异较大,模型的稳定性也有较大差别,而且现有的相对生长模型主要集中在马尾松和杉木等少量几个树种,因此,将树种归并为马尾松、杉木、硬阔和软阔4个模型组,选其中有代表性的模型和参数进行计算(表2)。浙江省1994年和1999年森林资源连续清查数据的样本按模型组树种范围归类:松类和柏木归入马尾松;水杉、柳杉等归入杉木。

表2 生长模型及其参数*

Table 2 The Growth models and its parameters

模型组 Mdl Grp	树种组 Species Group	模型表达式和参数 Model Expression and the Parameters
1	杉木 <i>Cunninghamia lanceolata</i> group ^[32]	$W = 0.0163\text{Power}(D^2H, 0.9582) + 0.0028\text{Power}(D^2H, 1.0036) + 0.3813\text{Power}(D^2H, 0.3344) + 0.0058\text{Power}(D^2H, 0.8890) + 0.0436\text{Power}(D^2H, 0.6464)^*$
	马尾松 <i>Pinus massoniana</i> group ^[11]	$W = 0.1369\text{Power}(D^2H, 0.7123) + 0.0469\text{Power}(D^2H, 0.6899) + 0.0147\text{Power}(D^2H, 0.7512) + 0.0173\text{Power}(D^2H, 0.7125) + 0.2525\text{Power}(D^2H, 0.4965)^*$
	硬阔 hard broad leaf group ^[13]	$W = 0.0844\text{Power}(D, 2.4462) + 0.0150\text{Power}(D, 2.2717) + 0.0274\text{Power}(D, 2.4461) + 0.0129\text{Power}(D, 2.3686) + 0.0361\text{Power}(D, 2.3102)^*$
	软阔 soft broad leaf group ^[12]	$W = 0.1351\text{Power}(D^2H, 0.8020)^{***}$
2	杉木 <i>Cunninghamia lanceolata</i> group ^[10]	$W = 0.00686\text{Power}(D^2H, 1.0802) + 0.0077\text{Power}(D^2H, 0.8740) + 0.000015\text{Power}(D^2H, 1.7632) + 0.0000027\text{Power}(D^2H, 2.0304) + 0.0336\text{Power}(D^2H, 0.7073)^*$
	马尾松 <i>Pinus massoniana</i> group ^[34]	$W = 0.0977\text{Power}(D, 2.5206)$
	硬阔 hard broad leaf group ^[35]	$W = 0.2460\text{Power}(D, 2.080) + 0.00736\text{Power}(D, 2.840) + 0.000546\text{Power}(D, 3.20) + 0.08280\text{Power}(D, 2.220)^*$
	软阔 soft broad leaf group ^[12]	$W = 0.1351\text{Power}(D^2H, 0.8020)^{***}$
3	杉木 <i>Cunninghamia lanceolata</i> group ^[36]	$W = 0.0492\text{Power}(D, 2.660)$
	马尾松 <i>Pinus massoniana</i> group ^[37]	$W = 0.1309\text{Power}(D, 2.4367)$
	硬阔 hard broad leaf group ^[14]	$W = 0.0710\text{Power}(D^2H, 0.9117)^{**}$
	软阔 soft broad leaf group ^[12]	$W = 0.1351\text{Power}(D^2H, 0.8020)^{***}$

* 单株生物量由干、皮、枝、叶、根的生物量构成,模型组2阔叶树未单独分出树皮; ** : 原文献中未除以1000,公式为 $71.029\text{Power}(D^2H, 0.9117)$; *** : 3个模型组中软阔树种组采用同一参数 * Tree biomass is composed of 5 parts: stem, branch, bark, leaf and root. Hard broad-leaf tree in model group 2 only has 4 parts (stem, branch, leaf and root); ** The original formula is $71.029\text{Power}(D^2H, 0.9177)$; *** The soft broad leaf trees in the three model groups use the same model and parameters

2 结果与分析

2.1 林分生物量

采用生物量转换因子连续函数法,根据表1的参数,按优势树种转换和统计,林分生物量估计结果如表3。

表3显示,浙江省1976、1979、1986、1989、1994、1999和2004年林分生物量分别为 $0.5712 \times 10^8 \text{Mg}$ 、 $0.6328 \times 10^8 \text{Mg}$ 、 $0.7396 \times 10^8 \text{Mg}$ 、 $0.8173 \times 10^8 \text{Mg}$ 、 $0.9512 \times 10^8 \text{Mg}$ 、 $1.0061 \times 10^8 \text{Mg}$ 和 $1.5113 \times 10^8 \text{Mg}$,基本保持逐年增长。林分平均生物量也从1976年的 $18.70 \text{Mg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 上升到2004年的 $38.40 \text{Mg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。各指标在各树种间变化较大,主要原因是各清查期的优势树种划分标准不同。1999年到2004年上升迅速,主要部分是源于森林蓄积的实际增长,但仍有一部分增长是由于调查标准变化引起的。2004年以前,主要树种为马尾松、杉木、硬阔和软阔。2004年调查时大量的样地优势树种被定义成针叶混、阔叶混和针阔混。在表1中,针叶混、阔叶混和针阔混的参数值比纯树种的值大,用此参数计算生物量会导致结果偏大。如果按1999年的树种划分标准,将针叶混、阔叶混和针阔混落实到具体的树种组(按蓄积比例分配),2004年全省林分生物量为

$1.3861 \times 10^8 \text{ Mg}$, 林分平均生物量为 $35.22 \text{ Mg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 均比表 3 计算结果低 8.3%, 即年均低 1.7% 左右。

表 3 林分各优势树种不同时期生物量

Table 3 Forest stands biomass by dominant species in different periods

序号 Seq. num.	树种(组) 名称 Species (group) name	生物量 Biomass (10^3 Mg)						
		1976	1979	1986	1989	1994	1999	2004
1	柏木 <i>Cypress</i>	566			881	1192	2415	2399
2	黑松 <i>Pinus thunbergii</i>				2600	2548	1763	653
3	马尾松 <i>Pinus massoniana</i>	17567	18959	24617	26623	32653	27264	23138
4	高山松 <i>Pinus densata</i>					95	828	6182
5	杉木 <i>Cunninghamia lanceolata</i>	23587	21936	27446	27398	35688	41677	39989
6	柳杉 <i>Cryptomeria fortunei</i>				1327	1519	1593	1813
7	栎类 <i>Quercus</i>				10336	7809	8237	7571
8	硬阔类 hard broad leaf	15245			12189	12837	15584	6360
9	樟木 <i>Sassafras tsumu</i> Hemsl				65	25	145	
10	软阔类 soft broad leaf	155			309	752	1100	1447
11	针叶混 mixture of coniferous							17780
12	阔叶混 mixture of broadleaf		22391	21898				22383
13	针阔混 mixture of con. & broadl.							21413
14	合计 sum	57120	63286	73961	81728	95118	100606	151128

1999 年较 1994 年林分面积有较大幅度增加(年均递增 1.0%), 但生物量增加相对缓慢, 每平均单位生物量从 1994 年的 $27.59 \text{ Mg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 上升到 1999 年的 $27.83 \text{ Mg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 林分单位面积生物量年增幅低于 0.2%, 说明近年来森林增长主要是幼龄林和中龄林。2004 年与 1999 年相比, 情况有较大差别。1999~2004 年间的情况正好相反, 林分面积年均递增 3.2%, 而林分平均单位生物量年均递增 6.0% (如不扣除以上因素导致的变动, 年均递增为 7.6%), 说明林分质量有较大幅度的提高。

2.2 森林生物量

国家森林资源连续清查中土地覆盖类型分林地和非林地两个一级类型, 林地中划分 8 个 2 级类型, 其中与森林生物量计算有关的有: 林分、疏林、灌木林、竹林、经济林^①。总森林生物量包括这 5 个部分以及非林地上四旁树的生物量。疏林生物量采用蓄积换算, 其参数为同年度(调查期)的林分总生物量与其相应蓄积量的比值。计算其结果如表 4 所示。

表 4 各类型森林生物量

Table 4 Forest biomass by types

类型 Type	生物量 Biomass (10^3 Mg)						
	1976	1979	1986	1989	1994	1999	2004
林分 Forest stands	57120	63285	73961	81728	95119	100606	151128
疏林 Open forest	12251 **	10323	5506	5424	1059	581	258
经济林 Cash forest *	10902	14770	16746	21475	26058	27881	26667
竹林 Bamboo	15220	13024	15104	14538	20512	25716	37370
灌木林 Shrub	4116	5500	5784	5592	7656	10002	22992
四旁树 Trees on non-forest land	1219	1217	2021	3833	5343	6105	6011
合计 Sum	100828	108119	119122	132590	155747	170891	244426

* 乔木经济林没有测蓄积, 灌木经济林没有计入灌木林 arbor cash forest are not measured for volume, shrub cash forest not included in shrub forest; ** 1976 年疏林没有蓄积, 根据面积计算生物量 ** the biomass for the open forest without volume in 1976 is calculated from area

2.3 森林生物量动态

表 4 显示, 浙江省森林生物量的总量从 1976 年至 2004 年一直保持增长, 与林分的生物量增长基本一致

① 2004 年以前国家森林资源连续清查地类(土地覆盖类型)中有经济林 Cash forest was defined as a category of land cover type in the national continous forest inventory standard before 2004.

(图1)。1994年以后,森林生物总量增长速度加快,特别是1999至2004年间,5a间的增量超过1999年以前20a的总增量。经济林、竹林占据总生物量的比重一直保持在11%~15%之间,经济林在2004年有较大幅度的下降,而竹林一直维持上升趋势。在1976至2004年间,林分单位面积平均生物量增长速度为年均3.8%,而森林单位面积生物量的年均增长达4.3%,超过林分单位面积生物量增长速度,说明林分以外的竹林等森林成分的质量在稳步提高,这一趋势在1989至1999年间特别突出。但与其他省林分质量比较^[28],无论是林分单位面积生物量还是全省总平均单位面积森林生物量仍然偏低。

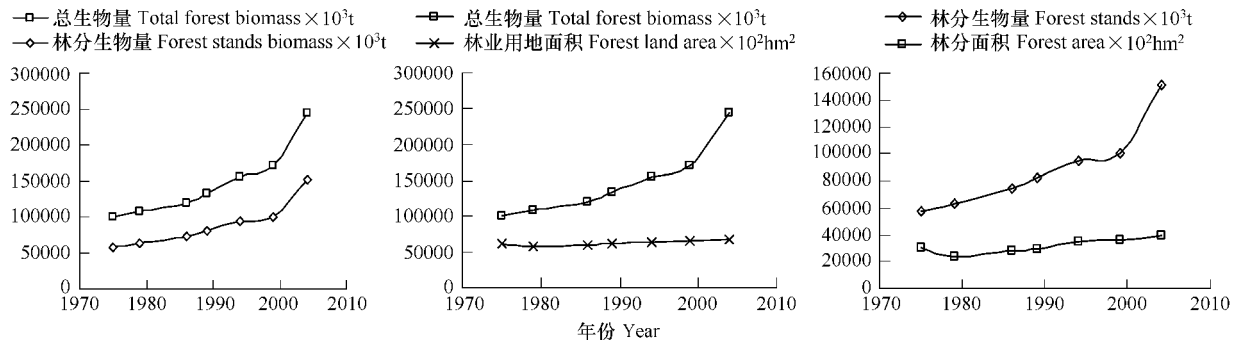


图1 森林生物量动态比较

Fig. 1 Comparison of the forest biomass dynamics

在1976至2004年间,全省平均单位面积森林生物量与总生物量增长趋势基本一致,从 $18.70 \text{ Mg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 上升到 $38.40 \text{ Mg} \cdot \text{hm}^{-2}$,但总平均生物量趋势较为平缓。1989~1999年间林分平均单位生物量没有实质性的变化(年均增长不到0.08%),而森林总平均单位生物量的增长幅度达到2.1%。这一情况也在平均蓄积中有所反映。林分平均生物量与林分平均蓄积动态趋势完全一致。这一时期正好是浙江省全省消灭荒山计划实施期间,在此期间造林较多,幼林的单位面积生物量较低,因而导致此结果(表5)。

表5 林分不同时期平均蓄积量和生物量

Table 5 Average stock and biomass of forest stands in different periods

项目 Item	年份 Year						
	1976	1979	1986	1989	1994	1999	2004
林分平均蓄积量 Average stock ($\text{M}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$)	23.50	34.13	30.98	31.96	32.26	31.91	43.76
林分平均生物量 Average biomass ($\text{Mg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	18.70	27.25	26.00	27.61	27.59	27.83	38.40
总平均生物量 Total average biomass ($\text{Mg} \cdot \text{hm}^{-2}$) *	16.50	18.33	20.01	21.53	24.35	26.10	36.59
生物量与蓄积量比值 Biomass/volume ($\text{Mg} \cdot \text{M}^{-3}$)	0.7968	0.7992	0.8393	0.8638	0.8552	0.8721	0.8775

* 森林生物量与林业用地面积之比 Total biomass divided by forestry land area

2.4 结果比较

用相对生长模型(表2)估计的全省两期(1994,1999)林分生物量结果如表6。其结果及其与基于转换因子连续函数法估计结果的比较可概括如下:

首先,表6反映了各模型的差异。第2组和第3组模型估计值总量差别较小,在1%以内。而这两组模型与第1组模型之间差别较大,以第一组模型为基数比较,差异达到16%。从总体上看,3组模型计算结果仍比较接近,与基于转换因子连续函数法计算的林分生物量基本相符。

其次,表6的结果在一定程度上印证了表3的计算结果的合理性。但由于两个模型组对两期计算结果都比用转换因子连续函数法计算的结果稍大,说明表3计算结果可能偏低。以表3的林分生物量为基本参照,用3组相对生长模型基于样木的计算结果高出4.5%~22.1%(1994年)和4.2%~21.2%(1999年)。

另外,全省竹林生物量的估计可能偏高。据研究,全省竹林生物量为 $1.5200 \times 10^7 \text{ Mg}$ ^[38],而本研究为 $3.7370 \times 10^7 \text{ Mg}$,其原因是:文献中的全省竹林(毛竹)平均生物量为 10.44231 kg/株 ,而平均生物量为

22.5kg/株^[27],两者相差1倍以上。从浙江省竹林资源的实际情况看,10.44231kg/株更合理。参数取值不同将对各期森林生物量产生约8%的影响。

表6 基于单株生物量的全省林分生物量估计

Table 6 Tree biomass model based estimation of the forest biomass in Zhejiang Province

树种(组) Species(group)	1994 年生物量 Biomass in 1994 (10 ³ Mg)			1999 年生物量 Biomass in 1999 (10 ³ Mg)		
	模型组 1	模型组 2	模型组 3	模型组 1	模型组 2	模型组 3
	Mdl group1	Mdl group 2	Mdl group 3	Mdl group1	Mdl group 2	Mdl group 3
柏木 <i>Cypress</i>	793	883	963	1216	1507	1632
黑松 <i>Pinus thunbergii</i>	1016	1213	1332	576	725	799
水杉 <i>Taxodiaceae</i>	13	10	11	51	47	102
木麻黄 <i>Casuarina equisetifolia</i>	9	9	9	36	36	36
华山松 <i>Pinus armandii</i>	5	6	6	0	0	0
马尾松 <i>Pinus massoniana</i>	43403	62789	66979	41304	60712	64793
高山松 <i>Pinus densata</i>	418	510	552	506	673	721
杉木 <i>Cunninghamia lanceolata</i>	20197	16249	25274	25000	19735	31917
柳杉 <i>Cryptomeria japonica</i>	750	663	1020	1239	1263	1836
樟树 <i>Cinnamomum camphora</i>	343	348	212	634	640	347
楠木 <i>Phoebe bournei</i>	38	42	22	51	55	32
栎类 <i>Quercus</i>	11288	11529	6320	11010	11282	5833
桦木 <i>Birch</i>	8	9	6	16	17	12
硬阔类 Hard broad leaf group	19430	20103	11962	21294	22232	12187
椴树类 <i>Tilia</i> group	1	1	1	1	1	1
檫木 <i>Sassafras tsumu</i> Hemsl	333	361	177	503	532	266
桉树 <i>Eucalyptus</i>	62	63	30	0	0	0
杨树 <i>Poplar</i>	1	1	1	23	23	23
桐类 <i>Paulownia</i> group	179	179	179	56	56	56
软阔类 Soft broad leaf group	1094	1094	1094	1348	1348	1348
合计 Sum	99381	116062	116150	104864	120884	121941

在森林生物量相对生长模型中,基于胸径的幂指数式较基于胸径和树高的幂指数式估计高,表6说明这一问题。样地调查中没有树高记录,只有样地平均高。由于样地平均高普遍偏低,导致表6中杉木树种组估计值可能偏低,更说明表6中林分生物量估计结果可能偏低。

3 结论与讨论

3.1 估计结果

采用生物量转换因子连续函数法估计,浙江省1976、1979、1986、1989、1994、1999、2004年的森林生物量分别为 1.00828×10^8 Mg、 1.08119×10^8 Mg、 1.19122×10^8 Mg、 1.32590×10^8 Mg、 1.55747×10^8 Mg、 1.70891×10^8 Mg、 2.44426×10^8 Mg,平均年递增速率为5.1%。在这期间,森林生物量增长表现出两次加速,第一次出现在1989年,第二次出现在1999年,第二次加速度大于第一次。

浙江省森林生态系统质量近30a来稳步提高,但仍有较大提升空间。从1976年至2004年,森林平均单位面积生物量分别为 $16.50 \text{ Mg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $36.59 \text{ Mg} \cdot \text{hm}^{-2}$,年均递增速率为4.3%;林分平均单位面积生物量分别为 $18.70 \text{ Mg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $38.41 \text{ Mg} \cdot \text{hm}^{-2}$,年均递增速率为3.8%。1999年至2004年,年均林分生物量增长速度为10.04%,超过同期全省林分平均蓄积生长率9.06%。虽然2004年林分平均单位面积生物量已经上升到 $38.409 \text{ Mg} \cdot \text{hm}^{-2}$,但仍低于全国平均水平^[39]① $77.4 \text{ Mg} \cdot \text{hm}^{-2}$,如河南省林分平均单位面积生物量^[40]为 $47.27 \text{ Mg} \cdot \text{hm}^{-2}$,云南省为 $87.54 \text{ Mg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

① 由平均碳密度换算成平均生物量,系数取2.0

对于林分以外的生物量估计采用不同方法,估计结果的不确定性增加,竹林生物量的估计值可能偏高。如果用 10.44231kg/株 的研究结果估计^[38],竹林生物量将比现有估计值低 53.59%。

在省和国家尺度上研究森林生物量动态,由于方法不同,其估算结果差别可能较大。王效科等人根据根据 1994 年的森林资源清查资料估计了全国森林生物量^[41],浙江省林分生物量为 $4.846 \times 10^7\text{Mg}$,与本研究结果相差一倍以上。方精云等的关于生物量和蓄积量的估算是一种简单的线性关系,目前还存在争议^[42~44]。王玉辉等的研究认为落叶松生物量与蓄积量的关系为双曲线^[42],用此模型估计浙江省 2004 年马尾松生物量为 $4.18697 \times 10^7\text{Mg}$,较用转换因子连续函数法估算结果 $2.3138 \times 10^7\text{Mg}$ 高出将近一倍。黄从德等研究四川地区森林碳储量,发现用方精云的转换因子连续函数法较实际研究偏高^[45]。在本研究中,通过与相对生长模型估计结果(1994~1999 年)比较,发现用文献^[27]方法估计的结果偏低 9%~17%,如考虑相对生长模型中树高的误差,实际偏低可能达 20% 以上,但在总体上可以认为转换因子连续函数法与相对生长模型估计结果是一致的,前者稍偏低。

3.2 估计方法

利用森林生物量转换因子连续函数法^[27]将蓄积量转换为生物量,方法有效、可操作性强,但也存在不确定性。由于用于建立此模型、获得其参数的样地数量有限,而且不属于以某种方法抽样的样本,因而无法利用严格的数理统计方法对其参数的广泛代表性和稳定性进行分析。该方法将森林生物量与森林蓄积的关系定义为 $y = ax + b$,其中 b 为截距,其物理意义是当蓄积为 0 时生物量为 b ,与实际情况不符。如在表 1 中,大部分 $b > a$,最大达近 100 倍,如果单位蓄积很小,则主要是 b 的贡献。因此,此公式的适用条件是有限制的。

基于单株测树因子的生物量模型具有较高的准确度和可信度,在局部森林生物量估计中广泛采用。对于大尺度林分生物量估计,采用基于单株测树因子的生物量模型的方法,也是较为理想的方法,特别是在已有大量调查数据的情况下。我国森林资源连续清查工作开展 30a 来,已经积累了大量的数据,利用这些数据分析森林生物量及碳动态具有其他方法不可替代的优势。但是,在具体应用中仍存在一些问题。首先是缺乏相对生长模型。我国幅员辽阔,涉及不同的地带性植被、森林类型和较多的树种,需要建立大量的相对生长模型。目前,这方面的工作还做的不够,大量的相对生长模型有待建立。其次,模型的标准也是一个重要问题。由于测量及建模方法不同,目前已有的同类模型估计结果相差较大,给模型的利用带来困难,已有的生物量研究集中在少数几个树种,如马尾松、杉木,较多树种还没有对应的模型,需进行进一步的基础研究以补充和完善。再次是数据问题。目前,森林资源连续清查中测树因子原始数据只有胸径。而相当多的模型是二元模型,即需要胸径和树高两个因子。此问题的解决办法一般是拟合树高与胸径的关系,或直接用样地平均高代替单株样木的高。实际应用中,后者往往偏低。相对而言,一元(胸径)模型不涉及数据源改造的问题,比较容易实施,但模型必须分地区建立。

References:

- [1] Yang H X, Wu B, Zhang J T, *et al.* Progress of research into carbon fixation and storage of forest ecosystems. *Journal of Beijing Normal University (Natural Science)*, 2005, 41(2): 172–177.
- [2] Brown S, Sathaye J, Canell M, *et al.* Mitigation of carbon emission to atmosphere by forest management. *Com For Res*, 1996, 75: 80–91.
- [3] Xiang W H, Tian D L, Yan W D. Review of researches on forest Biomass and productivity. *Central South Forest Inventory and Planning*, 2003, 22(3): 57–64.
- [4] kimura. The methods for terrestrial plant communities productivity measurision. Jiang R, Chen N Q Translated. Beijing, Science Press, 1981. 58–105.
- [5] Pan W C, Li L C, Gao Z H, *et al.* The biomass and the productivity of the ecosystem of Chinese Fir plantation. *Central South Forestry Science and Technologies*, 1978, (2): 1–14.
- [6] Pan W C, *et al.* Study on the nutrient circulation of Chinese Fir plantation. *Journal of Central South Forestry College*, 1981, (1): 1–21.
- [7] Yu X T, Chen C J, Lin S Z. A pilot study on the Chinese Fir plantation ecosystem in Fujian Province. *Forestry Science and Technologies of Fujian Forestry College*, 1979(1): 1–18.
- [8] Feng Z W, *et al.* Study on Chinese Fir plantation biomass, Comprehensive observations report of Taoyuan county. *Hunan Press of Science &*

- Technology, 1980, 322—333.
- [9] Feng Z W, Chen C Y, Zhang J W, *et al.* The measuration of Masson Pine biomass in Huitong, Hunan Province. *Forestry Science*, 1982, 18(2): 127—134.
- [10] Zhao K, Tian D L. Study on biomass of mature Masson Pine plantation in Huitong. *Journal of Central South Forestry College*, 2000, 20(1): 7—13.
- [11] Wang Z, Zhang X L. Study on the models for overground biomass of *Pinus massoniana* in Zhoushan region of Zhejiang. *Forest Inventory and Planning*, 2006, 31(5): 103—105.
- [12] Wu Z M, Sun Q X. Biomass and nutrient accumulation of poplar plantation on beach land in Yangtse River in Anhui Province. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2001, 12(6): 806—810.
- [13] Guan D Y, Huang G Q. Studies on the biomass and its predictive models of *Castanopsis fissa* natural forest. *Journal of Fujian Forestry Science and Technology*, 2000, (6): 34—36.
- [14] Liu Q X, Chang J, Jiang B, *et al.* The biomass of the evergreen broad-leaved ecological public-welfare forests in Zhejiang, East China. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(9): 2139—2144.
- [15] Li Y D. Analysis of the estimation methods of forest biomass in tropical mountain rain forest at Jianfengling, Hainan Island. *Acta Ecologica Sinica*, 1993, 13(4): 314—320.
- [16] Neth Top, Nobuya Mizoue, Shigetaka Kai. Estimating forest biomass increment based on permanent sample plots in relation to woodfuel consumption; a case study in Kampong Thom Province, Cambodia. *The Japanese Forestry Resources*, 2004, (9): 117—123.
- [17] Brown S, Gillespie A JR, Lugo A E. Biomass estimation methods for tropical forests with application to forest inventory data. *Forest Science*, 1989, 35: 881—902.
- [18] Guo Z H, Peng S L, Gong B X. Estimating forest biomass in western Guangdong using Landsat TM data. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(77): 1832—839.
- [19] Hame T, Sallli A, Andersson K, *et al.* A new methodology for the estimation of biomass of conifer-dominated boreal forest using NOAA AVHRR data. *Int. J. Remote Sens.*, 1997, 18(15): 3211—3243.
- [20] Field C B, Randerson J T, Malstrom C M. Global net primary production: combining ecology and remote sensing. *Remote Sensing of Environment*, 1995, 51: 74—88.
- [21] Kauppi P E, MielikÄI K, Kuusela K. Biomass and carbon budget of European forests, 1971 to 1990. *Science*, 1992, 256(5053): 70—74.
- [22] Birdsey R A, Plantinga A G, Heath L S. Past and prospective carbon storage in United States forests. *For Ecol Man*, 1993, 59: 33—40.
- [23] Walker B H, Steffen W L, Canadell J, *et al.* The terrestrial biosphere and global change: Implications for natural and managed ecosystems: A synthesis of GCTE and related research. 1997, IGBP Book Series Number 4.
- [24] Fang J Y, Wang G G, Liu G H, *et al.* Forest biomass of China: an estimate based on the biomass-volume relationship. *Ecological Applications*, 1998, 8(4): 1984—1091.
- [25] Kurz W A and Apps M J. Contribution of northern forests to the global cycle: Canada asa case study. *Water, Air, and Soil Pollution*, 1993, 70: 163—176.
- [26] Fang J Y, Liu G H, Xu S L. Biomass and net production of forest vegetation in China. *Acta Ecologica Sinica*, 1996, 16(4): 497—508.
- [27] Fang J Y, Chen A P, Peng C H, *et al.* Changes in forest biomass carbon storage in China between 1949 and 1998. *Science*, 2001, 292: 2320—2322.
- [28] Zeng W S. Research on forest biomass and productivity in Yunnan. *Contral South Forest Inventory and Planning*, 2005, 24(4): 1—13.
- [29] Ye J Z, Jiang Z L. The biomass structure of Chinese Fir plantation in south Jiangsu hilly area. *Acta Ecologica Sinica*, 1993, 3(1): 7—13.
- [30] Lin K M, Zheng Y S, Huang Z Q, *et al.* Study on the biomass model of yong Chinese Fir and Masson Pine. *Journal of Fujian Forestry College*, 1993, 13(4): 351—356.
- [31] Liao H Z, Zhang C N, Di D S, *et al.* Study on the production of *Castanopsis carlesii* plantation. *Journal of Fujian Forestry College*, 1991, 11(3): 313—317.
- [32] Yan W D, Tian D L. He G X. The arboreal biomass distribution patterns of the second generation Chinese Fir plantation in Huitong. *Forest Resources Management*, 2003, (2): 5—7.
- [33] Cheng T R, Ma Q Y, Feng Z K, Luo X. Research on forest biomass in Xiaolong Mountains, Gansu Province. *Journal of Beijing Forestry University*, 2007, 29(1): 31—36.
- [34] Zhang Z J, Wang Y H, Yuan Y X. Study on the biomass structure and distribution of natural secondary forest of *Pinus massoniana*. *Journal of Agricultural University of Hebei*, 2006, 29(5): 37—43.
- [35] Wang X Y, Hu D, He J S. Biomass research of *Fagus Engleriana* and *Quercus aliena* var. *acuteserrata* forest in Shennongjia Foest District. *Journal of Capital Normal University(Natural Science Edition)*, 2007, 28(2): 62—67.
- [36] Zhou G M, Yao J X, Qiao W Y. Biomass of Chinese Fir plantation in Qinyuan of Zhejiang. *Journal of Zhejiang Forestry College*, 1996, 13(3): 235—242.
- [37] Wu S R, Yang H Q, HongR, *et al.* Studieson the biomass of *Pinus massoniana* plantations and its structure. *Journal of Fujian Forestry Sci &*

Tech, 1999, 26(1):18—21.

- [38] Zhou G M. Carbon storage, fixation and distribution in Mao Bamboo(*Phyllostachys Pubescens*) stands ecosystem. Zhejiang University, 2006.
- [39] Liu G H, Fu B J, Fang J Y. Carbon dynamics of Chinese forests and its contribution to global carbon balance. *Acta Ecologica Sinica*, 2000, 20(5):733—740.
- [40] Guang Z Y. Study on forest biomass and productivity in Henan. *Journal of Henan Agricultural University*, 2006, 40(5):493—497.
- [41] Wang X K, Feng Z W, Ouyang Z Y. Vegetation carbon storage and density of forest ecosystems in China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2001, 12(1):13—16.
- [42] Wang Y H, Zhou G S, Jiang Y L, *et al.* Estimating biomass and NPP of Larix forests using forest inventory data. *Acta Phytocologica Sinica*, 2001, 25(4):420—425.
- [43] Zhou G S, Wang Y H, Jiang Y L, *et al.* Estimating biomass and net primary production from forest inventory data: A case study of China's Larix forests. *For Ecol Man*, 2002, 169:149—157.
- [44] Zhao M, Zhou G S. Forest Inventory Data based biomass models and their prospects. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(8):1468—1472.
- [45] Huang C D, Zhang J, Yyang W Q, *et al.* Dynamics on forest carbon stock in Sichuan Province and Chongqing City. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(3):966—975.

参考文献:

- [1] 杨洪晓, 吴波, 张金屯, 等. 森林生态系统的固碳功能和碳储量研究进展. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2005, 41(2):172~177.
- [3] 项文化, 田大伦, 闫文德. 森林生物量与生产力研究综述. *中南林业调查规划*, 2003, 22(3):57~64.
- [4] 木村允(姜恕, 陈乃全, 译). 陆地植物群落的生产量测定法. 北京: 科学出版社, 1981. 58~105.
- [5] 潘维伟, 李利村, 高正衡, 等. 杉木人工林生态系统中的生物产量及其生产力的研究. *中南林科技*, 1978, (2):1~14.
- [6] 潘维伟, 等. 杉木人工林养分循环研究. *中南林学院学报*, 1981, (1):1~21.
- [7] 俞新妥, 陈存及, 林思祖. 福建杉木人工林生态系统生物产量的初步研究. *福建林学院林业科技*, 1979(1):1~18.
- [8] 冯宗炜, 等. 杉木人工林生物产量的研究. 桃源综合考察报告集. 长沙: 湖南科学技术出版社, 1980. 322~333.
- [9] 冯宗炜, 陈楚莹, 张家武, 等. 湖南会同地区马尾松林生物量的测定. *林业科学*, 1982, 18(2):127~134.
- [10] 赵坤, 田大伦. 会同杉木人工林成熟阶段生物量的研究. *中南林学院学报*, 2000, 20(1):7~13.
- [11] 王震, 张晓丽. 浙江舟山地区马尾松地上生物量模型研究. *林业调查规划*, 2006. 31(5):103~105.
- [12] 吴泽民, 孙启祥, 陈美工. 安徽长江滩地杨树人工林生物量和养分积累. *应用生态学报*, 2001, 12(6):806~810.
- [13] 管大跃, 黄国泉. 闽粤天然林生物量及预测模型研究. *福建林业科技*, 2000, (6):34~36.
- [14] 刘其霞, 常杰, 江波, 等. 浙江省常绿阔叶生态公益林生物量. *生态学报*, 2005, 25(9):2139~2144.
- [15] 李意德. 海南岛热带山地雨林分生物量估测方法比较分析. *生态学报*, 1993, 13(4):314~320.
- [18] 郭志华, 彭少麟, 王伯荪. 利用 TM 数据提取粤西地区的森林生物量. *生态学报*, 2002, 22(77):1832~839.
- [26] 方精云, 刘国华, 徐嵩龄. 我国森林植被的生物量和净生产量. *生态学报*, 1996, 16(4):497~508.
- [28] 曾伟生. 云南省森林生物量与生产力研究. *中南林业调查规划*, 2005, 24(4):1~13.
- [29] 叶镜中, 姜志林. 苏南丘陵杉木人工林的生物量结构. *生态学报*, 1993, 3(1):7~13.
- [30] 林开敏, 郑郁善, 黄祖清, 等. 杉木和马尾松幼林生物产量模型研究. *福建林学院学报*, 1993, 13(4):351~356.
- [31] 廖涵宗, 张春能, 邱道生, 等. 米槠人工林生产量的研究. *福建林学院学报*, 1991, 11(3):313~317.
- [32] 闫文德, 田大伦, 何功秀. 湖南会同第2代杉木人工林乔木层生物量的分布格局. *林业资源管理*, 2003, (2):5~7.
- [33] 程堂仁, 马钦彦, 冯仲科, 等. 甘肃小陇山森林生物量研究. *北京林业大学学报*, 2007, 29(1):31~36.
- [34] 张治军, 王彦辉, 袁玉欣. 马尾松天然次生林生物量的结构与分布. *河北农业大学学报*, 2006, 29(5):37~43.
- [35] 王向雨, 胡东, 贺金生. 神农架地区米心水青冈林和锐齿槲栎林生物量的研究. *首都师范大学学报(自然科学版)*, 2007, 28(2):62~67.
- [36] 周国模, 姚建祥, 乔卫阳. 浙江庆元杉木人工林生物量的研究. *浙江林学院学报*, 1996, 13(3):235~242.
- [37] 吴守蓉, 杨惠强, 蓉洪, 等. 马尾松林生物量及其结构的研究. *福建林业科技*, 1999, 26(1):18~21.
- [38] 周国模. 毛竹林生态系统中碳储量、固定及分配与分布的研究. *浙江大学*, 2006.
- [39] 刘国华, 傅伯杰, 方精云. 中国森林碳库动态及其对全球碳平衡的贡献. *生态学报*, 2000, 20(5):733~740.
- [40] 光增云. 河南森林生物量与生产力研究. *河南农业大学学报*, 2006, 40(5):493~497.
- [41] 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.
- [42] 王玉辉, 周广胜, 蒋延玲, 等. 基于森林资源清查资料的落叶松林生物量和净生长量估算模式. *植物生态学报*, 2001, 25(4):420~425.
- [44] 赵敏, 周广胜. 基于森林资源清查资料的生物量估算模式及其发展趋势. *应用生态学报*, 2004, 15(8):1468~1472.
- [45] 黄从德, 张健, 杨万勤, 等. 四川省及重庆地区森林植被碳储量动态. *生态学报*, 2008, 28(3):966~975.