

DOI: 10.5846/stxb201409021740

汪珍川, 杜虎, 宋同清, 彭晚霞, 曾馥平, 曾昭霞, 张浩. 广西主要树种(组)异速生长模型及森林生物量特征. 生态学报, 2015, 35(13): 4462-4472.

Wang Z C, Du H, Song T Q, Peng W X, Zeng F P, Zeng Z X, Zhang H. Allometric models of major tree species and forest biomass in Guangxi. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(13): 4462-4472.

广西主要树种(组)异速生长模型及森林生物量特征

汪珍川^{1,2}, 杜 虎^{1,3}, 宋同清^{1,3,*}, 彭晚霞^{1,3}, 曾馥平^{1,3}, 曾昭霞^{1,3}, 张 浩^{1,3}

1 中国科学院亚热带农业生态研究所重点实验室, 长沙 410125

2 湖南农业大学资源环境学院, 长沙 410128

3 中国科学院环江喀斯特农业生态系统研究观测站, 环江 547200

摘要:基于广西 11 类主要树种(组)5 个龄组(245 株样木、345 块样地)的生物量实测调查,建立了各树种(组)的生物量优化异速生长模型,探讨广西森林生态系统总生物量及不同森林类型、不同龄组、不同层次的生物量组成与分配。结果表明:(1)广西 11 类树种(组)叶、枝、干、根、全株生物量(除了杉树叶、桉树叶生物量)、地上-地下、胸径-树高的优化回归模型均为幂函数,经 t 检验均达到显著水平($P < 0.05$),其中 11 类树种(组)以全株生物量的模拟效果最好;(2)广西森林总生物量为 1425.37 Tg,平均生物量为 105.36 Mg/hm²,各森林类型总生物量为松树林(366.14 Tg) > 硬阔(291.08 Tg) > 软阔(239.75 Tg) > 石山林(165.51 Tg) > 杉木林(164.01 Tg) > 桉树林(99.55 Tg) > 栎类(46.34 Tg) > 八角林(20.21 Tg) > 油茶林(19.59 Tg) > 竹林(13.19 Tg),均随年龄的增加而增加,各层次生物量均以乔木层占绝对优势,所占比例为 78.30%—97.47%,各龄组地上生物量均大于地下生物量;(3)考虑统计学与实际应用之间的平衡及异速生长模型的可解释量、回归系数的显著性,以胸径为变量的生物量模型能有效估算广西主要树种(组)各器官及总生物量;(4)优化筛选的广西各树种(组)的地上-地下优化异速生长模型及推算的地上-地下生物量比,对于估计广西森林地下生物量具有重要参考价值。

关键词:树种(组);异速生长模型;生物量;龄组;广西森林

Allometric models of major tree species and forest biomass in Guangxi

WANG Zhenchuan^{1,2}, DU Hu^{1,3}, SONG Tongqing^{1,3,*}, PENG Wanxia^{1,3}, ZENG Fuping^{1,3}, ZENG Zhaoxia^{1,3}, ZHANG Hao^{1,3}

1 Key Laboratory of Agro-ecological Processes in Subtropical Region, Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, China

2 College of Resources and Environment, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China

3 Huanjiang Observation and Research Station of Karst Ecosystem, Chinese Academy of Sciences, Huanjiang 547200, China

Abstract: Based on biomass measurements of 11 major tree species at five stand age classes (young, middle-aged, near-mature, mature, and over-mature forests), the optimized allometric biomass of various tree species was modeled. The total biomass of forest ecosystems in Guangxi, as well as the biomass composition and contribution in various forest types for various stand ages and forest layers were investigated. The leaf, branch, stem, root, and total single-tree biomass for 11 tree species, except *Cunninghamia lanceolata* and *Eucalyptus urophylla* × *grandis* leaf to diameter at breast height (DBH) (D), the ratio of belowground to aboveground biomass, and the tree height to DBH ratio (D) were best fitted with a power regression model at a significance level of $P < 0.05$ using t -tests. The best fit was observed for the total single-tree biomass to DBH (D) for the 11 tree species. The total forest biomass in Guangxi was 1425.7 Tg, and the average forest biomass was

基金项目:中国科学院战略性先导科技专项(DA05050205, XDA05070404);中国科学院西部行动计划项目(KZCX2-XB3-10);国家科技支撑计划(2011BAC09B02);国家自然科学基金项目(31370485, 31370623, 31400412)

收稿日期:2014-09-02; 修订日期:2015-03-26

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: songtongq@163.com

105.36 Mg/hm². The total stand biomass of major tree species was ranked in the following order: *Pinus* forest (366.14 Tg) > hardwood forest (291.08 Tg) > softwood forest (239.75 Tg) > karst forest (165.51 Tg) > *Cunninghamia lanceolata* forest (164.01 Tg) > *Eucalyptus* forest (99.55 Tg) > *Quercus* forest (46.34 Tg) > *Octagon* forest (20.21 Tg) > oil-tea *Camellia* forest (19.59 Tg) > Bamboo forest (13.19 Tg); the biomass of each forest increased with stand age. The biomass of the overstory tree layer accounted for 78.30% to 97.47% of the total forest biomass, indicating that the overstory tree layer dominated the total biomass. Moreover, the aboveground biomass was greater than the belowground biomass at various forest ages. Considering over-fitting of the statistical models, the explainable proportion of variance, and the significance of regression coefficients in the allometric models, it was demonstrated that the mathematical model of biomass, using DBH (D) as the single variable, could effectively predict biomass for the main forest species as well as the total forest biomass in Guangxi. The optimized allometric models and the stimulate values of the ratio of aboveground to belowground biomass were of great value for estimating the belowground biomass of primary wood species in Guangxi.

Key Words: tree species; allometric model; biomass; stand ages; Guangxi forests

森林生物量是研究森林生态系统生产力的基础,也是度量植被碳库、研究整个生态系统结构、功能、能量流动和物质循环的重要参数^[1-4]。森林是陆地生物圈的主体,占全球非冰表面面积的 40%,但贮存了全球陆地生物量地上部分的 76%—98%和地下部分的 40%,对陆地生物圈及其它地表过程有着重要的影响^[5-6]。森林生物量的估算是生态学和全球变化研究的重要内容之一,世界各国广泛开展了对森林生物量的监测^[7-8]。20 世纪 70 年代末期至 90 年代中期,我国开展大量的森林生物量研究,发表了有关森林生物量研究报告^[9-11]。但在 90 年代中期之后,因森林生物量野外调查工作量和劳动强度较大,其研究工作有所停滞。近年来,大气 CO₂ 等温室气体浓度的持续增加加剧了一系列生态环境问题,CO₂ 减排的呼声日益高涨,获取准确的森林生物量对深入研究森林生态系统生物地球化学循环、碳汇功能、生产力与环境因子之间的关系具有重要的科学价值^[4]。

生物量异速生长方程能够克服直接测量法费时、费力和破坏性大的缺点,建立易测因子(如胸径、树高等)和林木不同组分(树叶、树枝、树干和树根等)生物量之间的数量关系^[12-13],且有一定的精度保证,是森林生态系统生物量和净生产力估测的一种普遍且可靠的方法^[14]。可采用的生物量模型众多^[15-17],我国较为全面系统地从国家尺度研究了生物量-蓄积量方程,但树干(蓄积)只是森林生物量组成中的一部分,干、皮、枝和叶 4 部分干质量之和也不等于总生物量,根、林下植物(灌、草)和凋落物生物量的问题一直没能得到很好的解决。另外,森林生物量受气候、立地条件、树种等因素的共同制约,因此有必要构建区域尺度内保持一定预测精度的立地普适和物种普适的广义异速生长模型,尽量准确估算不同区域的森林生态系统生物量^[18-19]。本文基于广西 10 类主要树种(组)5 个龄组(幼龄林、近熟林、中龄林、成熟林、过熟林)245 株样木生物量的实测调查,筛选了各树种(组)的生物量优化异速生长模型,探讨了广西森林生态系统总生物量及不同森林类型、不同龄组、不同层次的生物量组成与分配,为制定广西森林经营措施和碳汇管理策略提供科学依据。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于广西壮族自治区,经纬度范围为 104°26′—112°04′E、20°54′—26°24′N,总面积 23.67 万 km²,处于云贵高原东南边缘,两广丘陵的西部,南边朝向北部湾,整个地势为四周多山地与高原,而中部与南部多为平地,地貌为山地丘陵性盆地地貌,属于亚热带季风气候区,全区各地极端最高气温为 33.7—42.5 ℃,极端最低气温为-8.4—2.9 ℃,年平均气温在 16.5—23.1 ℃之间,各地年降水量均在 1070 mm 以上,大部分地区为 1500—2000 mm,4—9 月为雨季,其降水量占全年降水量的 70%—85%。研究区植被类型多样,植物物种丰富,以常绿树种为主,植被区域主要为亚热带常绿阔叶林区域。

1.2 树种(组)选择与样方建立

第八次森林资源清查数据表明,广西全区森林总面积 15 097 531.2 hm²,总蓄积 488 341 180 m³,其中松树、杉木、桉树、八角、栎类(白栎)、硬阔(米椎、白椎)、软阔(枫香、荷木、木姜子)、竹(毛竹、丛生竹)、石山林(青冈、润楠、肥牛树、南酸枣、香椿、任豆、菜豆、梔子皮)、八角、油茶 10 类森林类型占全区森林总面积的 90.62%和总蓄积的 98.81%(表 1)。参照《IPCC 优良做法指南》对系统随机抽样的建议,采用网格法(100 km×100 km、约为 0.1 经纬网格)进行样点布置。广西全区森林总网格数为 1509.75 个,调查网格占森林总网格数的 2.5%,按每个网格内约布置 3 个样点,且考虑广西森林目前的分布情况、林业经营管理措施以及广西目前进行的重大林业工程,本研究共设置 115 个调查样点,每个样点设置 3 个重复样地,共计 345 个样地,样地大小为 1000 m²(50 m×20 m)。按森林类型、龄组在各市(县)面积和蓄积加权进行样点布置(表 1,图 1)。

表 1 广西主要森林类型调查样点分配

Table 1 Details of plots distribution for main forest types in Guangxi

森林类型 Forest types	面积 Area/hm ²	比例 Percentage/%	理论样点 Nos. of samples in theory	蓄积/m ³ Volume	比例 Percentage/%	理论样点 Nos. of samples in theory	实际样点 Nos. of samples in actual
松树 <i>Pinus</i>	2487154.3	16.66	25.39	142888732	28.97	29.42	22
杉木 <i>Cunninghamia lanceolata</i>	1323829.1	8.87	14.87	94965180	19.25	18.89	15
桉树 <i>Eucalyptus urophylla</i> × <i>grandis</i>	1570741.0	10.52	15.73	61217762	12.41	12.81	15
栎类 <i>Quercus</i>	296433.8	1.99	2.79	15638140	3.17	3.03	6
硬阔 Hardwood	1792645.9	12.01	2.08	73797432	14.96	1.86	5
软阔 Softwood	2054599.6	13.76	17.84	87163650	17.67	14.94	14
石山林 Forest in karst region	2793945.5	18.72	25.83	208992	0.04	0.00	25
竹 Bamboo	361852.8	2.42	3.43	240981.0	0.05	0.00	6
八角 <i>Octagon</i>	508209.1	3.40	4.27	11115556	2.25	2.04	3
油茶 Oil-tea <i>Camellia</i>	338503.9	2.27	2.77	139744	0.03	0.00	3
合计 Total	14928622.7	100.00	—	493231183	100.00	—	115

1.3 生物量测定

1.3.1 乔木层

在 2012 年 9—11 月每块样地的每木调查基础上,充分考虑径级分布,遵循中央径级数量多、两端径级数量少的原则,在样地外选择不同龄组和胸径的松树 21 株、杉木 15 株、桉树 18 株、八角 15 株、栎类 23 株、硬阔 15 株、软阔 30 株、石山林 63 株、毛竹 15 株、丛生竹 15 株、油茶 15 株作为样木,进行生物量的测定。测定其基径、胸径、树高和冠幅,并按 2 m 分段锯断称量,在树干基部、胸径、中部及顶端分别锯取一个圆盘测定含水量;并分别称取枝条、叶片和花果的鲜质量;根的生物量采用全挖法,并分小根(<2cm)、中根(2—5cm)、大根(>5cm)3 组分别称鲜重;然后对各部分器官分别取样 500 g 带回实验室,将样品在 105 ℃烘箱内杀青 2 h,调至 75 ℃下烘干至恒重,求出各器官干鲜质量之比,由此换算出样木各器官的干质量及总干质量。

1.3.2 灌木层、草本层和地上凋落物

按“品”字型在样地内设置 3 个 2 m×2 m 的小样方,调查所有灌木种类、株丛数、高度、基径、覆盖度,在每个 2 m×2 m 的小样方内各取 1 个 1 m×1 m 的小样框,调查草本种类、株丛数、平均高度、覆盖度。按全收获法收获样框内所有灌木的枝、叶、根,测定各器官生物量,并以 3 个样框的平均值来推算样地中灌木层的总生物量。按同样方法在 1 m×1 m 小样框内获取草本层地上地下生物量、凋落物生物量。

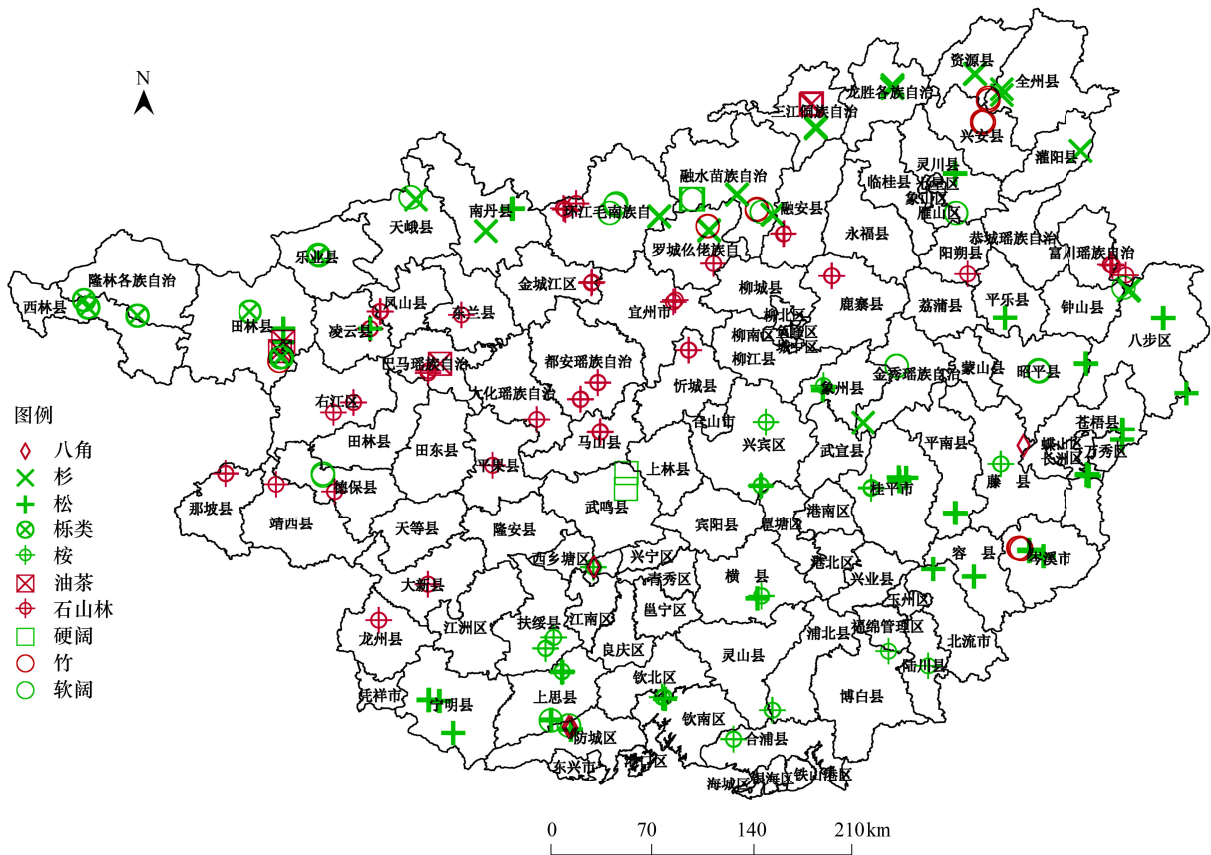


图 1 调查样地分布图

Fig.1 Map of plots in the study area

1.4 广西主要树种(组)生物量异速生长模型拟合及不同尺度的生物量估算

建立广西主要树种(组)样木各器官(干、枝、叶、根)的干重、总干重与样木胸径(D)的幂回归方程($W=aD^b$)、多项式方程($W=a+bD+cD^2$)或指数方程($W=ae^{bd}$),在 SPSS16.0 软件中进行回归分析,选择相关系数最高的最优模型,根据样地每木调查数据,计算乔木层各林木的生物量,求和计算乔木层的总生物量;累加乔木层、灌木层、草本层和地上凋落物的生物量求得广西 10 类森林类型、各龄组单位面积森林生态系统生物量,根据其所占面积可估算各森林类型、各龄组的生物量,累积相加为广西的森林总生物量。

2 结果与分析

2.1 主要树种(组)生物量异速生长模型

对杉木、松、桉树、八角、栎类、硬阔、软阔、石山林、毛竹、丛生竹、油茶等 11 类树种(组)叶、枝、干、根、全株生物量进行拟合,除杉木树叶、桉树叶生物量的优化回归模型为 $W_L = 1.119 + 0.019D + 0.014D^2$, $W_L = 1.182e^{0.003D^2}$ 外,其余器官的优化回归模型均为 $W=aD^b$ (表 2),各回归模型的相关系数在 0.465—0.993 之间,经 t 检验均达到显著水平($P<0.05$),其中 11 类树种(组)总生物量回归模型相关系数为 0.931—0.993,模型拟合效果非常好,表明拟合模型可用来估算森林生物量。

2.2 主要树种(组)地上-地下生物量及胸径-树高模型

由于树高和地下根系生物量测定困难、误差大,分别用胸径预测树高、地上生物量预测地下生物量具有较大的实际意义。通过各种回归模型拟合发现,广西 11 类树种(组)地上-地下、胸径-树高的最优回归模型均为幂函数(表 3),其中地上-地下幂函数的相关系数在 0.652 以上,均达到极显著水平(表 3),胸径-树高幂函数的相关系数在 0.58 以上,也均达到了极显著水平。

表 2 主要树种(组)生物量估算模型

Table 2 The biomass regression models for trees species (groups)

树种(组) Tree species (groups)	样本数 Nos. of samples	胸径范围 DBH range/cm	器官 Organs	回归模型 Regression models	R^2	残差平方和 Sum of squared residuals RSS
松树 <i>Pinus</i>	21	1.75—31.7	叶	$W_L = 0.332D^{0.855}$	0.732	2.871
			枝	$W_B = 0.07D^{1.920}$	0.953	2.036
			干	$W_S = 0.172D^{2.203}$	0.989	0.614
			根	$W_R = 0.023D^{2.241}$	0.984	0.901
			全株	$W_T = 0.428D^{2.009}$	0.991	0.405
杉木 <i>C. lanceolata</i>	15	5.0—32.7	叶	$W_L = 1.119 + 0.019 D + 0.014D^2$	0.857	32.471
			枝	$W_B = 0.025D^{2.171}$	0.877	2.340
			干	$W_S = 0.026D^{2.720}$	0.989	0.353
			根	$W_R = 0.01D^{2.469}$	0.904	2.681
			全株	$W_T = 0.096D^{2.410}$	0.993	0.158
桉树 <i>Eucalyptus urophylla</i> × <i>grandis</i>	18	3.2—18.8	叶	$W_L = 1.182e^{0.003D^2}$	0.762	0.690
			枝	$W_B = 0.042D^{1.835}$	0.894	1.530
			干	$W_S = 0.028D^{2.996}$	0.978	0.811
			根	$W_R = 0.06D^{1.771}$	0.851	1.831
			全株	$W_T = 0.138D^{2.436}$	0.977	0.556
八角 <i>Octagon</i>	15	5.32—16.6	叶	$W_L = 0.098D^{1.634}$	0.733	1.242
			枝	$W_B = 0.008D^{2.845}$	0.932	0.759
			干	$W_S = 0.2436D^{1.913}$	0.865	0.731
			根	$W_R = 0.002D^{3.172}$	0.774	3.739
			全株	$W_T = 0.206D^{2.277}$	0.931	0.492
栎类 <i>Quercus</i>	23	3.52—35.5	叶	$W_L = 0.048D^{1.499}$	0.727	5.399
			枝	$W_B = 0.024D^{2.413}$	0.863	10.847
			干	$W_S = 0.089D^{2.452}$	0.942	2.355
			根	$W_R = 0.033D^{2.333}$	0.798	8.816
			全株	$W_T = 0.174D^{2.39}$	0.947	2.029
硬阔 Hardwood	15	5.3—32.83	叶	$W_L = 0.022D^{2.185}$	0.857	4.577
			枝	$W_B = 0.036D^{2.303}$	0.873	4.404
			干	$W_S = 0.086D^{2.461}$	0.975	0.848
			根	$W_R = 0.027D^{2.394}$	0.922	2.691
			全株	$W_T = 0.186D^{2.377}$	0.97	0.948
软阔 Softwood	30	6.31—36.45	叶	$W_L = 0.066D^{1.541}$	0.639	18.807
			枝	$W_B = 0.036D^{2.303}$	0.876	11.899
			干	$W_S = 0.028D^{2.802}$	0.930	6.7
			根	$W_R = 0.043D^{2.165}$	0.873	8.048
			全株	$W_T = 0.104D^{2.53}$	0.956	3.293
石山林 Forest in karst region	63	1.0—24.85	叶	$W_L = 0.026D^{1.880}$	0.796	55.195
			枝	$W_B = 0.014D^{2.611}$	0.902	42.462
			干	$W_S = 0.048D^{2.697}$	0.938	26.978
			根	$W_R = 0.06D^{2.148}$	0.909	26.398
			全株	$W_T = 0.171D^{2.382}$	0.936	21.617
毛竹 <i>Phyllostachys heterocycla</i> <i>cv pubescens</i>	15	4.29—12.5	叶	$W_L = 0.024D^{0.993}$	0.794	0.258
			枝	$W_B = 0.009D^{1.801}$	0.825	0.812
			干	$W_S = 0.031D^{2.649}$	0.974	0.222

续表						
树种(组) Tree species (groups)	样本数 Nos. of samples	胸径范围 DBH range/cm	器官 Organs	回归模型 Regression models	R^2	残差平方和 Sum of squared residuals RSS
丛生竹 Clumping Bamboo	15	3.9—11.64	根	$W_R = 0.01D^{2.762}$	0.831	1.830
			全株	$W_T = 0.055D^{2.572}$	0.946	0.446
			叶	$W_L = 0.199D^{1.387}$	0.554	2.349
			枝	$W_B = 0.066D^{1.452}$	0.465	3.675
			干	$W_S = 0.114D^{2.168}$	0.873	0.961
油茶 Oil-tea <i>Camellia</i>	15	3.7—15.2 *	根	$W_R = 0.098D^{1.816}$	0.781	1.815
			全株	$W_T = 0.436D^{1.843}$	0.951	0.244
			叶	$W_L = 0.02D^{2.031}$	0.824	1.458
			枝	$W_B = 0.082D^{2.088}$	0.96	0.304
			根	$W_R = 0.049D^{1.808}$	0.780	1.522
			全株	$W_T = 0.151D^{2.017}$	0.981	0.130

* 油茶采用地径进行生物量方程拟合

2.3 广西森林生物量特征

2.3.1 主要森林类型的总生物量

广西松树、杉木、桉树、栎类、硬阔、软阔、石山林、竹(丛生竹、毛竹)、八角、油茶 10 类森林类型不同龄组单位面积生物量均不同。各森林类型的平均生物量大小顺序为硬阔(206.45 Mg/hm²)>软阔(198.20 Mg/hm²)>栎类(182.29 Mg/hm²)>松树(168.88 Mg/hm²)>杉木(165.36 Mg/hm²)>石山林(80.57Mg/hm²)>桉树(79.21 Mg/hm²)>八角(53.53 Mg/hm²)>竹(42.59 Mg/hm²)>油茶(38.06 Mg/hm²)(见表4)。由图2可知,广西主要森林类型总生物量大小顺序为松树(366.14 Tg)>硬阔(291.08 Tg)>软阔(239.75 Tg)>石山林(165.51 Tg)>杉木(164.01 Tg)>桉树(99.55 Tg)>栎类(46.34 Tg)>八角(20.21 Tg)>油茶(19.59 Tg)>竹(13.19 Tg),其所占比例分别为25.68%、20.42%、18.82%、11.61%、11.50%、6.98%、3.25%、1.42%、1.37%和0.92%(图3)。广西森林总生物量为1425.37Tg,其平均生物量为105.36 Mg/hm²。

表 3 主要树种(组)地上-地下生物量(kg)、胸径-树高回归模型

Table 3 Models for the aboveground biomass to the belowground biomass and the DBH to height for main tree species				
树种(组) Tree species (groups)	地上-地下生物量模型 Above-underground biomass models		胸径-树高回归模型 DBH and height biomass models	
	拟合方程 Fitting equation	R^2	拟合方程 Fitting equation	R^2
松树 <i>Pinus</i>	$y = 0.157x^{0.939}$	0.948	$H = 1.482D^{0.818}$	0.939
杉木 <i>C. lanceolata</i>	$y = 0.156x^{0.991}$	0.843	$H = 1.134D^{1.099}$	0.892
桉树 <i>E. urophylla</i> × <i>grandis</i>	$y = 0.323x^{0.677}$	0.794	$H = 1.134D^{1.099}$	0.933
栎类 <i>Quercus</i>	$y = 0.232x^{0.967}$	0.826	$H = 1.531D^{0.785}$	0.801
硬阔 Hardwood	$y = 0.192x^{0.989}$	0.866	$H = 3.629D^{0.401}$	0.568
软阔 Softwood	$y = 0.46x^{0.792}$	0.736	$H = 2.17D^{0.661}$	0.829
石山林 Forest in karst region	$y = 0.427x^{0.85}$	0.920	$H = 1.615D^{0.788}$	0.900
毛竹 <i>P. heterocycla</i> cv <i>pubescens</i>	$y = 0.284x^{1.123}$	0.919	$H = 1.745D^{0.885}$	0.967
丛生竹 Clumping Bamboo	$y = 0.311x^{0.954}$	0.708	$H = 2.266D^{0.805}$	0.601
八角 <i>Octagon</i>	$y = 0.027x^{1.255}$	0.652	$H = 4.175D^{0.294}$	0.640
油茶 Oil-tea <i>Camellia</i>	$y = 0.404x^{0.811}$	0.677	$H = 1.188D^{0.489}$	0.655

2.3.2 主要森林类型不同龄组的生物量

由表4可知,广西10类主要森林类型的总生物量均随年龄的增加而增加。其中,松树过熟林生物量显著

高于其他龄组,成熟林生物量显著高于中龄林和幼龄林,近熟林显著高于幼龄林,其他各龄组间的差异不显著;杉木过熟林和成熟林的生物量显著高于其他龄组,近熟林显著高于幼龄林和中龄林,幼龄林和中龄林间的差异不明显;桉树过熟林生物量显著高于其他龄组,幼龄林则显著低于其他林龄,其他龄组间的差异不显著;栎类幼龄林生物量显著低于其他龄组,其他龄组间差异不显著;硬阔林各龄组间差异均不显著;软阔除幼龄林、中龄林、成熟林之间的差异不显著外,其他各龄组间差异均达到显著水平;石山林过熟林显著高于其他林龄,成熟林显著高于幼龄林,其他龄组间差异不显著;老龄竹总生物量显著高于幼龄竹生物量;八角林、油茶林各龄组间的差异均达到显著水平。

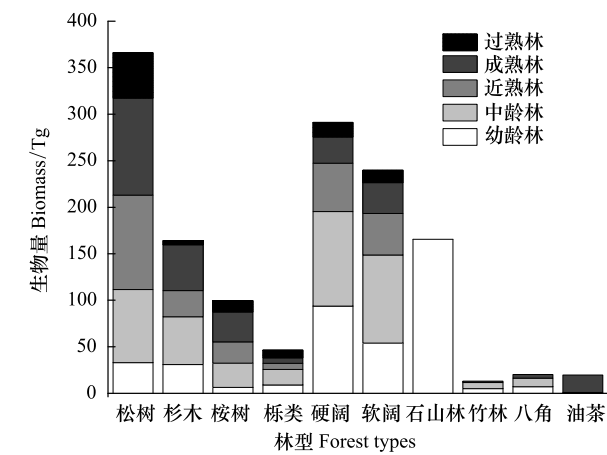


图 2 广西各森林类型不同龄组总生物量

Fig.2 Total biomass of different forest types with different stand age classes

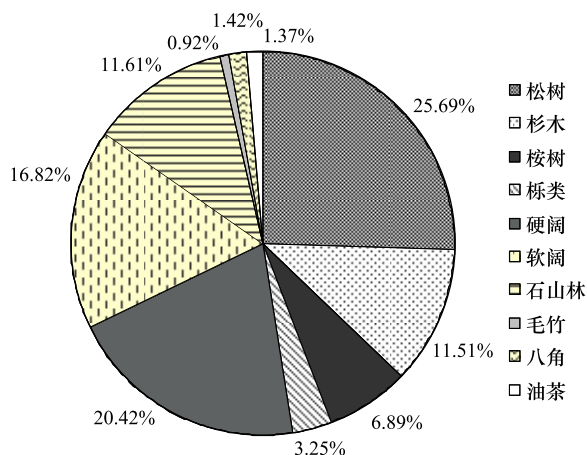


图 3 广西各森林类型总生物量比例

Fig.3 The proportion total biomass of different forest types

表 4 不同森林类型不同龄组总生物量变化 (Tg)

Table 4 Total biomass change with different stand age classes in different forest types (Tg)

森林类型 Forest types	幼龄林 Young	中龄林 Middle-aged	近熟林 Near-mature	成熟林 Mature	过熟林 Over-mature
松树 <i>Pinus</i>	71.88d	103.30cd	168.97bc	208.92b	291.35a
杉木 <i>C. lanceolata</i>	64.08c	114.00c	171.86b	235.05a	241.80a
桉树 <i>E. urophylla</i> × <i>grandis</i>	14.08c	63.33b	75.81b	100.29ab	142.54a
栎类 <i>Quercus</i>	90.62b	161.46ab	196.12a	213.51a	249.73a
硬阔 Hardwood	143.21a	150.99a	179.38a	217.22a	341.46a
软阔 Softwood	74.56c	110.23c	147.80c	239.44b	418.97a
石山林 Forest in karst region	59.24d	90.45cd	119.96bc	158.68b	331.46a
竹 Bamboo	27.32b	—	43.36ab	—	57.09a
八角 <i>Octagon</i>	24.40c	—	53.79b	—	82.40a
油茶 Oil-tea <i>Camellia</i>	12.02c	—	45.29b	—	59.58a

同行不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$)

2.3.3 不同森林类型的森林生态系统各层次生物量分配

由表 5 可知,广西 10 类主要森林类型各层次生物量均以乔木层占绝对优势,所占比例为 78.30%—97.47%。除八角林、桉树林分别为 78.30%、88.55%外,其他森林类型乔木层生物量所占比例均大于 90%,灌木层、草本层和凋落物层所占生物量比例分别为 0.14%—2.39%、0.51%—9.50%和 1.25%—9.79%。不同森林类型各层次生物量所占比例不同,松树林、杉木林、桉树林、硬阔、竹林、八角林均为乔木层>凋落物层>草本层>灌木层,软阔、石山林、油茶林为乔木层>凋落物层>灌木层>草本层。

表 5 不同森林类型各层次的生物量分配

森林类型 Forest types	乔木层 Tree layer		灌木层 Shrub layer		草本层 Herb layer		凋落物层 Litter		合计 Total
	生物量		生物量		生物量		生物量		生物量
	Biomass/ (Mg/hm ²)	%	Biomass/ (Mg/hm ²)	%	Biomass/ (Mg/hm ²)	%	Biomass/ (Mg/hm ²)	%	Biomass/ (Mg/hm ²)
松树 <i>Pinus</i>	158.49	93.84	2.09	1.24	3.60	2.13	4.70	2.78	168.88
杉木 <i>C. lanceolata</i>	159.60	96.52	0.74	0.45	2.02	1.22	3.00	1.81	165.36
桉树 <i>Eucalyptus urophylla</i> × <i>grandis</i>	70.14	88.55	1.29	1.62	3.54	4.47	4.24	5.35	79.21
栎类 <i>Quercus</i>	175.42	96.24	1.86	1.02	2.02	1.11	2.99	1.64	182.29
硬阔 Hardwood	199.87	96.81	1.75	0.85	2.08	1.01	2.76	1.33	206.45
软阔 Softwood	191.31	96.53	2.53	1.28	1.66	0.84	2.69	1.36	198.20
石山林 Forest in karst region	148.12	97.47	1.17	0.77	0.77	0.51	1.91	1.25	151.96
竹 Bamboo	38.7	90.87	0.63	1.48	0.98	2.30	2.28	5.36	42.59
八角 <i>Octagon</i>	41.91	78.30	1.28	2.39	5.09	9.50	5.24	9.79	53.53
油茶 Oil-tea <i>Camellia</i>	37.75	96.89	0.05	0.14	0.25	0.63	0.92	2.35	38.96

2.3.4 不同森林类型不同龄组地上-地下生物量分配

广西松树、杉木、桉树、栎类、硬阔、软阔、石山、竹、八角、油茶 10 类森林类型不同龄组地上生物量均大于地下生物量(表 6)。各龄组地上部分生物量所占比例松树为 72.56%—87.76%,杉木为 81.15%—86.60%,桉树为 64.12%—92.50%,栎类为 73.42%—78.93%,硬阔为 83.40%—84.61%,软阔为 65.76%—89.37%,石山林为 78.28%—86.82%,竹为 71.26%—75.39%,八角为 75.75%—88.65%,油茶为 50.80%—86.52%。松树、桉树、软阔、石山林地上生物量所占比例随龄组增大逐渐增大;杉木呈现先增后减再增的趋势;栎类除幼龄林明显低于其他 4 个龄组外,其他龄组地上部分所占比例比较稳定;硬阔各龄组地上部分比例均比较稳定;竹林随龄组增大呈减小的趋势;八角和油茶 75.75%—88.65%,油茶为 50.80%—86.52%。松树、桉树、软阔、石山林地上生物量所占比例随龄组则为先增后减的趋势。从各龄组的平均值来看,各森林类型地上生物量所占比例大小顺序为硬阔(83.96%)>杉木(83.60%)>石山林(82.85%)>八角(82.87%)>松树(82.35%)>桉树(81.06%)>软阔(78.83%)>栎类(77.61%)>竹(73.13%)>油茶(71.82%)。

表 6 各森林类型不同龄组地上-地下生物量(Mg/hm²)分配

森林类型 Forest types	层次 Layer	幼龄林 Young		中龄林 Middle-aged		近熟林 Near-mature		成熟林 Mature		过熟林 Over-mature	
		生物量		生物量		生物量		生物量		生物量	
		Biomass	%	Biomass	%	Biomass	%	Biomass	%	Biomass	%
松树 <i>Pinus</i>	地上	52.15	72.56	82.66	80.02	142.43	84.30	182.04	87.13	255.68	87.76
	地下	19.73	27.44	20.64	19.98	26.54	15.70	26.89	12.87	35.67	12.24
杉木 <i>Cunninghamialanceolata</i>	地上	52.00	81.15	98.72	86.60	141.38	82.26	197.18	83.89	203.40	84.12
	地下	12.08	18.85	15.28	13.40	30.48	17.74	37.86	16.11	38.41	15.88
桉树 <i>E.urophylla</i> × <i>grandis</i>	地上	9.33	66.23	48.46	76.52	64.12	84.59	85.69	85.45	131.86	92.50
	地下	4.76	33.77	14.87	23.48	11.68	15.41	14.59	14.55	10.68	7.50
栎类 <i>Quercus</i>	地上	66.53	73.42	126.78	78.52	154.81	78.93	167.14	78.28	197.08	78.92
	地下	24.09	26.58	34.68	21.48	41.31	21.07	46.37	21.72	52.65	21.08
硬阔 Hardwood	地上	119.66	83.55	125.92	83.40	151.79	84.61	182.44	83.99	287.66	84.24
	地下	23.55	16.45	25.07	16.60	27.60	15.39	34.78	16.01	53.80	15.76
软阔 Softwood	地上	49.03	65.76	83.55	75.80	116.51	78.83	202.03	84.38	374.42	89.37
	地下	25.53	34.24	26.68	24.20	31.29	21.17	37.41	15.62	44.55	10.63
石山 Forest in karst region	地上	46.38	78.28	73.51	81.27	98.30	81.95	134.18	84.56	287.76	86.82
	地下	12.86	21.72	16.94	18.73	21.66	18.05	24.50	15.54	43.70	13.18

续表

森林类型 Forest types	层次 Layer	幼龄林 Young		中龄林 Middle-aged		近熟林 Near-mature		成熟林 Mature		过熟林 Over-mature	
		生物量	%	生物量	%	生物量	%	生物量	%	生物量	%
竹 Bamboo	地上	20.60	75.39	31.55	72.75	—	—	40.68	71.26	—	—
	地下	6.72	24.61	31.55	11.81	—	—	16.40	28.74	—	—
八角 Octagon	地上	18.48	75.75	47.69	88.65	—	—	69.39	84.20	—	—
	地下	5.92	24.25	6.10	11.35	—	—	13.02	15.80	—	—
油茶 Oil-tea Camellia	地上	6.11	50.80	39.18	86.52	—	—	46.56	78.15	—	—
	地下	5.92	49.20	6.10	13.48	—	—	13.02	21.85	—	—

3 讨论

3.1 生物量异速生长模型的选择

森林生物量的测定有直接或间接两种途径:前者是将一定面积内的树木皆伐以获取其生物量,准确度高,因其对环境的破坏性大,对森林的主要产品干材的损耗太多,很少使用;后者是确定生物量的主要方法,也叫生物量模型法,根据尺度不同可以分为单木生物量模型和大尺度森林生物量模型,单木生物量模型是通过样木观测建立树木的相对生长方程进行生物量的估测^[20-21],大尺度森林生物量模型利用多种遥感信息参数进行模拟,许多学者利用多种生物量模型来估计林木的生物量^[22-23]。目前相对生长方程的拟合多采用对数形式,常用的模型变量有胸径(D)、树高(H)、密度(S)。常见的预测模型包括以胸径为单变量的模型、以胸径和树高为变量的模型以及以胸径、高度、密度为变量的模型。最优生物量模型的获取取决于实际应用和不同变量的可获得性^[24]。模型中引进较多变量可一定程度上提高异速生长模型预测精度,但过多变量往往会增加实际调查难度,降低模型的实用性^[25]。许多异速生长模型在胸径基础上引进树高作为第2个变量预测树木各器官生物量^[26-27]。但树高数据获得费时费力且准确性不高,且胸径和树高之间存在较高的相关性^[28],增加变量树高将使模型增加新的变异^[29-30]。又加上胸径信息获取简单且准确,因此,综合考虑统计学与实际应用之间的平衡及异速生长模型的可解释量及回归系数的显著性,我们认为利用胸径即可较好地预测广西10类主要树种(组)各器官生物量。本研究证明以胸径为单变量的生物量数学模型具有较高的精度,能够对广西主要树种(组)各器官及总生物量进行有效预测,各器官干、枝、叶、根和总生物量回归模型的决定系数在0.465—0.993之间,经 t 检验均达到显著水平($P<0.05$),全株生物量的拟合效果最好,决定系数均达到0.93以上,其次是干的拟合效果最佳。由于树叶生物量与光照、水分、土壤养分及种间竞争关系密切,同时在采用收获法进行标准木解析时,人为因素对树叶测量的影响比较大,从而引起较大误差,各树种(组)叶片生物量拟合的决定系数在0.554—0.857之间,明显低于其他各器官。可见,基于胸径的单变量预测模型更易于应用在生产实践中。

3.2 森林生物量的估算

森林生物量与许多生物学因素和非生物学因素密切相关,如区域的水热条件、土壤条件以及森林的类型、年龄、优势种的组成、活立木密度等^[20,31]。本研究表明广西森林总生物量为1425.37Tg(森林乔木层、林下灌木、草本、凋落物及根系生物量),松树林、杉木林、硬阔和软阔贡献了整个区域70%以上的生物量。平均生物量为105.36 Mg/hm²,高于我国森林植被平均生物量84.08 Mg/hm²^[32],但低于同纬度地区中国西南地区森林平均总生物量(148.66 Mg/hm²)^[33],且远低于我国典型南亚热带(鼎湖山)的生物量380 Mg/hm²^[34]和Whittaker与Linkens总结的亚热带常绿阔叶林平均生物量356 Mg/hm²^[35]。这是因为广西区石山林面积较大,为2793945.5 hm²,占整个广西森林面积的18.72%,但由于石山林主要生长在岩石上、岩石缝隙中和土壤瘠薄处,树木矮小,其生物量仅为165.51 Tg,只占广西森林总生物量的11.61%,导致广西森林总生物量低于同纬度地区其他森林。

生物量是植物积累能量的主要体现,其分配方式受外界环境、植株年龄及植株大小限制^[36]。树木在生长发育过程中,与相邻植株进行光照、水分及养分竞争^[37]。植株不同部位的生物量分配也是不均匀的。通常死体生物量占总生物量的 9%,地下生物量占 21%,而地上活生物量高达 70%左右^[38]。广西各森林类型中乔木层生物量在整个生态系统中占绝对优势,除八角林所占比例为 78.30%外,其余树种(组)乔木层生物量所占比例均>90%以上;林下灌草、凋落物、根系生物量则因树种、林龄等其他条件的差异表现出不同的变化趋势;树木地下生物量与地上生物量在单木水平和林分水平上均存在线性关系^[39],徐振邦等推算了长白山阔叶红松林中红松、色木槭、紫椴、水曲柳、蒙古栎地上地下生物量比^[40],广西森林生态系统生物量的分配以地上部分为主,不同林型地上生物量所占比例均在 50%以上,各林龄地上平均生物量密度均达到了 71.82%,与赵金龙等^[41]研究结果一致,各林型地上生物量所占比例随林龄的变化并不一致。本研究优化筛选了广西各树种(组)的地上-地下优化异速生长模型及推算的地上-地下生物量比,对于估计广西各树种(组)地下生物量具有重要参考价值。

参考文献 (References):

- [1] Overman J P M, Witte H J L, Saldarriaga J G. Evaluation of regression models for above-ground biomass determination in Amazon rainforest. *Journal of Tropical Ecology*, 1994, 10(2): 207-218.
- [2] 冯仲科, 罗旭, 石丽萍. 森林生物量研究的若干问题及完善途径. *世界林业研究*, 2005, 18(3): 25-28.
- [3] 黄玫, 季劲钧, 曹明奎, 李克让. 中国区域植被地上与地下生物量模拟. *生态学报*, 2006, 26(12): 4156-4163.
- [4] Garkoti S C. Estimates of biomass and primary productivity in a high-altitude maple forest of the west central Himalayas. *Ecological Research*, 2008, 23(1): 41-49.
- [5] Fang J Y, Chen A P, Peng C H, Zhao S Q, Ci L J. Changes in forest biomass carbon storage in China between 1949 and 1998. *Science*, 2001, 292(5525): 2320-2322.
- [6] 方精云, 陈安平, 赵淑清, 慈龙骏. 中国森林生物量的估算: 对 Fang 等 *Science* 一文(*Science*, 2001, 291: 2320-2322)的若干说明. *植物生态学报*, 2002, 26(2): 243-249.
- [7] 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): 57-60.
- [8] Ovington J D. The form, weights and productivity of tree species grown in close stands. *New Phytologist*, 1956, 55(3): 289-304.
- [9] Zhou Z Z, Zheng H S, Yin G T, Yang Z J, Chen K T. Biomass equations for rubber tree in Southern China. *Forest Research*, 1995, 8(6): 624-629.
- [10] Zhou G Y, Zeng Q B, Lin M X, Chen B F, Li Y D, Wu Z M. Biomass and nutrient allocation in *Manglietia hainanensis* plantation ecosystem at Jianfengling. *Forest Research*, 1997, 10(5): 453-457.
- [11] Feng Z W, Chen Z Y, Zhang J W, Wang S P, Zhao J L, Gao H. Determination of Biomass of *Pinus massoniana* stand in Huitong County, Hunan Province. *Scientia Silvae Sinicae*, 1982, 18(2): 127-134.
- [12] 于贵瑞. 全球变化与陆地生态系统碳循环和碳蓄积. 北京: 气象出版社, 2003.
- [13] 刘琪璟. 嵌套式回归建立树木生物量模型. *植物生态学报*, 2009, 33(2): 331-337.
- [14] 汪金松, 张春雨, 范秀华, 赵亚洲. 臭冷杉生物量分配格局及异速生长模型. *生态学报*, 2011, 31(14): 3918-3927.
- [15] 罗云建, 张小全, 王效科, 朱建华, 侯振宏, 张治军. 森林生物量的估算方法及其研究进展. *林业科学*, 2009, 45(8): 129-134.
- [16] Zianis D, Muukkonen P, Mäkipää R, Mencuccini M. Biomass and stem volume equations for tree species in Europe. *Silva Fennica Monographs*, 2005, 4: 63-63.
- [17] Muukkonen P. Generalized allometric volume and biomass equations for some tree species in Europe. *European Journal of Forest Research*, 2007, 126(2): 157-166.
- [18] 付甜, 朱建华, 肖文发, 曾立雄. 八种亚热带森林类型乔木层地上生物量分配模型. *林业科学*, 2014, 50(9): 1-9.
- [19] 李燕, 张建国, 段爱国, 相聪伟. 杉木人工林生物量估算模型的选择. *应用生态学报*, 2010, 21(12): 3036-3046.
- [20] 王维枫, 雷渊才, 王雪峰, 赵浩彦. 森林生物量模型综述. *西北林学院学报*, 2008, 23(2): 58-63.
- [21] Foody G M, Boyd D S, Cutler M E J. Predictive relations of tropical forest biomass from Landsat TM data and their transferability between regions. *Remote Sensing of Environment*, 2003, 85(4): 463-474.
- [22] Ketterings Q M, Coe R, van Noordwijk M, Ambagau Y, Palm C A. Reducing uncertainty in the use of allometric biomass equations for predicting above-ground tree biomass in mixed secondary forests. *Forest Ecology and Management*, 2001, 146(1/3): 199-209.

- [23] 王洪岩, 王文杰, 邱岭, 苏冬雪, 安静, 郑广宇, 祖元刚. 兴安落叶松林生物量、地表枯落物量及土壤有机碳储量随林分生长的变化差异. 生态学报, 2012, 32(3): 833-843.
- [24] Cienciala E, Černý M, Tatarinov F, Apltauer J, Exnerová Z. Biomass functions applicable to Scots pine. *Trees*, 2006, 20(4): 483-495.
- [25] Wirth C, Schumacher J, Schulze E D. Generic biomass functions for Norway spruce in Central Europe—a meta-analysis approach toward prediction and uncertainty estimation. *Tree Physiology*, 2004, 24(2): 121-139.
- [26] Wagner R G, Ter-Mikaelian M T. Comparison of biomass component equations for four species of northern coniferous tree seedlings. *Annals of Forest Science*, 1999, 56(3): 193-199.
- [27] Peichl M, Altaf Arain M. Allometry and partitioning of above- and belowground tree biomass in an age-sequence of white pine forests. *Forest Ecology and Management*, 2007, 253(1/3): 68-80.
- [28] Hochbichler E, Bellos P, Lick E. Biomass functions for estimating needle and branch biomass of spruce (*Picea Abies*) and Scots pine (*Pinus Sylvestris*) and branch biomass of beech (*Fagus sylvatica*) and oak (*Quercus robur* and *petraea*). *Australian Journal of Forest Science*, 2006, 123(1/2): 35-46.
- [29] Mowrer H T, Frayer W E. Variance propagation in growth and yield projections. *Canadian Journal of Forest Research*, 1986, 16(6): 1196-1200.
- [30] Wang C K. Biomass allometric equations for 10 co-occurring tree species in Chinese temperate forests. *Forest Ecology and Management*, 2006, 222(1/3): 9-16.
- [31] 黄从德, 张健, 杨万勤, 唐宵, 赵安玖. 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.
- [32] 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(5): 497-508.
- [33] 于维莲, 董丹, 倪健. 中国西南山地喀斯特与非喀斯特森林的生物量与生产力比较. 亚热带资源与环境学报, 2010, 5(2): 25-30.
- [34] 彭少麟, 张祝平. 鼎湖山地带性植被生物量、生产力和光能利用效率. 中国科学(B辑), 1994, 24(5): 497-502.
- [35] Whittaker R H, Likens G E. Carbon in the biota // Woodwell G M, Pecan E V, eds. *Carbon and the Biosphere*. Virginia, USA: Springfield, 1973: 281-302.
- [36] Mokany K, Raison R J, Prokushkin A S. Critical analysis of root: shoot ratios in terrestrial biomes. *Global Change Biology*, 2006, 12(1): 84-96.
- [37] Lewis S L, Tanner E V J. Effects of above- and belowground competition on growth and survival of rain forest tree seedlings. *Ecology*, 2000, 81(9): 2525-2538.
- [38] Houghton R A, Lawrence K T, Hackler J L, Brown S. The spatial distribution of forest biomass in the Brazilian Amazon: a comparison of estimates. *Global Change Biology*, 2001, 7(7): 731-746.
- [39] Brown S. Measuring carbon in forests: current status and future challenges. *Environmental Pollution*, 2002, 116(3): 363-372.
- [40] Xu Z B, Li X, Dai H C. Study on the biomass and productivity of broad leaved-Korean pine forest at Changbai Mountain. *Forest Ecosystem Research*, 1985, (5): 33-47.
- [41] 赵金龙, 王添鑫, 韩海荣, 康峰峰, 宋小帅, 于晓文, 赵伟红. 辽河源不同龄组油松天然次生林生物量及空间分配特征. 生态学报, 2014, 34(23): 7026-7037.