

DOI:10.13332/j.1000-1522.20180445

广东省3个乡土树种树干密度和木材密度 影响因子分析

徐胜林¹ 何潇¹ 曹磊¹ 李海奎¹ 徐期瑚² 刘晓彤¹

(1. 中国林业科学研究院资源信息研究所, 北京 100091; 2. 广东省林业调查规划院, 广东 广州 510520)

摘要:【目的】分析不同因子对树干密度和木材密度的影响, 为林木选育、碳汇计量提供数据支撑。【方法】基于广东省樟树、木荷、枫香3个乡土阔叶树种树干密度和木材密度的实测数据, 利用含协变量和无交互作用的多因子方差分析法, 从5大类30个因子(11个定性因子、19个定量因子)中, 筛选出与树干密度和木材密度相关的因子, 进而用增强回归树(BRT)来分析不同因子对3个树种树干密度和木材密度影响程度的大小。【结果】(1)植被类型、枝下高、胸径、植被总覆盖度、冠幅东西向宽度是影响樟树树干密度的主要因子, 地市、植被类型是影响木荷树干密度的主要因子, 坡向、海拔、平均高度为影响枫香树干密度的主要因子; 3个树种树干密度的主要影响因子不同, 无共同主要影响因子。(2)影响樟树木材密度的主要因子有枝下高、植被类型、海拔、植被总覆盖度、平均高度、灌木盖度、年龄、胸径、林种、土层厚度, 影响木荷木材密度的主要因子有年龄、草本盖度、枝下高、平均胸径、土层厚度、植被类型, 影响枫香木材密度的主要因子为坡向、海拔、平均高度、枝下高; 3个树种木材密度具有共同主要影响因子枝下高, 其相对贡献率相近, 均在10%左右。(3)林分因子和单木因子同为影响樟树树干密度和木材密度的主导因子, 其相对贡献率之和分别为87.04%和76.92%。林分因子、单木因子和地域因子是影响木荷树干密度的主导因子, 其相对贡献率之和为79.96%; 影响木荷木材密度的主导因子为林分因子、单木因子和土壤因子, 其相对贡献率之和为83.04%。地形因子、林分因子和单木因子同是影响枫香树干密度和木材密度的主导因子, 其相对贡献率之和分别为83.98%和92.70%。【结论】本文通过多因子方差分析和增强回归树对不同因子进行分析, 得出林分因子和单木因子同是影响樟树、木荷、枫香树干密度和木材密度的主导因子。

关键词: 树干密度; 木材密度; 乡土树种; 影响因子; 增强回归树(BRT)

中图分类号: S758.1 文献标志码: A 文章编号: 1000-1522-(2019)06-0044-11

引文格式: 徐胜林, 何潇, 曹磊, 等. 广东省3个乡土树种树干密度和木材密度影响因子分析 [J]. 北京林业大学学报, 2019, 41(6):44-54. Xu Shenglin, He Xiao, Cao Lei, et al. Analysis of the factors affecting trunk density and wood density of three native tree species in Guangdong Province of southern China [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2019, 41(6): 44-54.

Analysis of the factors affecting trunk density and wood density of three native tree species in Guangdong Province of southern China

Xu Shenglin¹ He Xiao¹ Cao Lei¹ Li Haikui¹ Xu Qihu² Liu Xiaotong¹

(1. Research Institute of Forest Resource Information Techniques, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China;

2. Forestry Survey and Designing Institute of Guangdong Province, Guangzhou 510520, Guangdong, China)

Abstract: [Objective] The effects of different factors on trunk density and wood density were analyzed to provide data support for tree breeding and carbon sequestration measurement. [Method] Based on the measured data of trunk density and wood density of *Cinnamomum camphora*, *Schima superba* and *Liquidambar formosana*, which are three native tree species in Guangdong Province of southern China,

收稿日期: 2018-12-29 修回日期: 2019-03-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(31770676), 广东省林业科技专项(2015-02), 广东省林业科技创新平台建设项目(2016CXPT03)。

第一作者: 徐胜林。主要研究方向: 林业统计与生物数学模型。Email: 1510387268@qq.com 地址: 100091 北京市海淀区东小府1号中国林业科学研究院资源信息研究所。

责任作者: 李海奎, 博士, 研究员。主要研究方向: 林业统计与生物数学模型。Email: lihk@ifrit.ac.cn 地址: 同上。

本刊网址: <http://j.bjfu.edu.cn>; <http://journal.bjfu.edu.cn>

using multifactor analysis of variance with covariate and no interaction to screen out factors affecting trunk density and wood density from 30 factors (11 qualitative factors and 19 quantitative factors) of five categories, and then the boosted regression trees(BRT) was used to analyze the influence of different factors on trunk density and wood density of three species. [Result] (1) Vegetation type, height under branch, DBH, vegetation coverage and the crown width from east to west are the main factors affecting trunk density of *Cinnamomum camphora*. City and vegetation type are the main factors affecting trunk density of *Schima superba*. Slope aspect, altitude and average height are the main factors affecting trunk density of *Liquidambar formosana*. The main factors affecting trunk density of three tree species are different and there was no common main factors in them. (2) The main factors affecting wood density of *Cinnamomum camphora* are height under branch, vegetation type, altitude, vegetation coverage, average height, shrub coverage, age, DBH, forest category and soil thickness. The main factors affecting wood density of *Schima superba* are age, herb coverage, height under branch, average DBH, soil thickness and vegetation type. The main factors affecting wood density of *Liquidambar formosana* are slope aspect, altitude, average height, height under branch. The height under the branch is the common main influencing factor, affecting wood density of the three tree species, and the relative influence upon three tree species was similar, all of which was about 10%. (3) Stand factor and single tree factor are the dominant factors affecting trunk density and wood density of *Cinnamomum camphora*, and their total relative influence rates were 87.04% and 76.92%, respectively. Stand factor, single tree factor and regional factor are the dominant factors affecting trunk density of *Schima superba*, and the total relative influence rate was 79.96%. The dominant factors affecting wood density of *Schima superba* are stand factor, single tree factor and soil factor, and the total relative influence rate was 83.04%. Terrain factor, stand factors and single tree factor are the main factors affecting trunk density and wood density of *Liquidambar formosana*, and their total relative influence rates were 83.98% and 92.70%, respectively. [Conclusion] This paper analyzes different factors by multifactor analysis of variance and BRT, and it is concluded that stand factor and single tree factor are the dominant factors affecting trunk density and wood density of *Cinnamomum camphora*, *Schima superba* and *Liquidambar formosana*.

Key words: trunk density; wood density; native tree species; affecting factor; boosted regression trees (BRT)

近年来,随着全球气候变化问题日益突出,森林的碳汇功能越来越受到重视。在此背景下,涌现出一系列有关生物量的研究^[1-5]。在生物量研究中,对于胸径较大的树,野外称量困难,通常需采用密度法进行推算^[6]。由此,木材密度在生物量研究中扮演着重要角色。木材密度还是描述木材材性的重要指标,在树种中具有重要的功能意义^[7-8]。木材作为一种广泛应用的原材料^[9],木材密度在木材生产加工过程中,对产品的质量和性能有着直接的影响^[10]。在森林生态系统中,木材密度也发挥着重要作用,既是树种的功能性状,又是许多功能过程的核心,比如碳分配、水运输等^[11-12]。另外,木材密度是估算树木生物量的关键变量,是一个重要的生物量估算因子^[1],在计算大径级树木生物量以及 IPCC 方法计算林分生物量时起着关键作用^[3,13-14]。木材密度有着很复杂的变化规律和物理性质,树种差异对木材密度影响明显,不同树种间木材密度差异可达数倍^[15]。已有研究表明,一些树木的生长部位、生长速度、年龄等

对木材密度也具有一定的影响^[16]。除此之外,外界环境因子可以通过改变树木生长的生境等条件,从而影响木材密度变化^[17]。

现有的研究主要利用单因素方差分析、相关性分析、回归模型^[17-19]等方法,对木材密度影响因子进行了相关研究。这些研究主要是针对木材密度在不同树种性状上的变化情况,以及一些营林措施和遗传选育与木材密度的关系,而关于林木及环境因子,例如郁闭度、海拔、坡向等对木材密度影响的研究仍不够深入^[20-22]。樟树(*Cinnamomum camphora*)、木荷(*Schima superba*)、枫香(*Liquidambar formosana*)为广东省重要的乡土树种^[23],碳汇潜力巨大。本文利用这 3 个树种生物量以及树干密度和木材密度的实测数据,其中树干密度指树干生物量与带皮材积的比值,木材密度指干材生物量与去皮材积的比值。从定义上来看,树干密度相当于木材基本密度,而木材密度相当于干材密度,二者均属于广义上的木材密度。针对不同单木间树干密度、木材密度差异较

大,基于多因子方差分析和增强回归树方法,分析不同因子对树干密度和木材密度的影响,以期对树干密度和木材密度的良种选育和碳计量提供一定数据支撑和科学依据。

1 数 据

本文数据来源于广东省2013年实测的樟树、木荷和枫香3个主要碳汇树种的生物量数据,均为破坏性获得,样本量各90株。树干密度和木材密度均为实测值,单位均为 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$,其统计量见表1。树干密度计算公式为 $T_d = \frac{B}{V}$,式中 T_d 为树干密度, B 为树干生物量, V 为带皮材积;木材密度计算公式为 $W_d = \frac{B_0}{V_0}$,

式中 W_d 为树干密度, B_0 为干材生物量, V_0 为去皮材积。用来分析树干密度和木材密度差异的因子有30个,包括11个定性因子,19个定量因子,共分为5类:4个地形因子(坡向、坡位、海拔、坡度),4个土壤因子(土壤类型、土层厚度、腐殖层厚度、枯落物厚度),12个林分因子(植被类型、起源、优势树种、林种、龄组、植被总覆盖度、郁闭度、平均年龄、平均胸径、平均高度、灌木盖度、草本盖度),8个单木因子(径阶、胸径、地径、树高、枝下高、冠幅南北向、冠幅东西向、年龄),以及地市、气候带这2个地域因子。定性因子详见表2。

表1 树干密度、木材密度统计量

Tab. 1 Statistics of trunk density and wood density

树种 Tree species	项目 Item	平均数 Mean/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	标准差 Standard deviation/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	最小值 Min./($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	最大值 Max./($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	变异系数 Coefficient of variation/%
樟树 <i>Cinnamomum camphora</i>	树干密度 Trunk density	0.449 1	0.083 0	0.229 2	0.810 0	18.48
	木材密度 Wood density	0.447 7	0.084 7	0.230 4	0.723 0	18.92
木荷 <i>Schima superba</i>	树干密度 Trunk density	0.501 8	0.103 1	0.257 6	0.798 1	20.54
	木材密度 Wood density	0.503 9	0.109 4	0.257 1	0.781 5	21.70
枫香 <i>Liquidambar formosana</i>	树干密度 Trunk density	0.479 6	0.106 2	0.104 5	0.905 7	22.15
	木材密度 Wood density	0.469 8	0.109 8	0.097 9	0.871 8	23.38

表2 定性因子统计表

Tab. 2 Statistical table of qualitative factors

因子类别 Factor category	因子 Factor	水平数 Level		
		樟树 <i>Cinnamomum camphora</i>	木荷 <i>Schima superba</i>	枫香 <i>Liquidambar formosana</i>
地形因子 Terrain factor	坡向 Slope aspect	9	9	8
	坡位 Slope position	4	4	3
土壤因子 Soil factor	土壤类型 Soil type	4	3	3
林分因子 Stand factor	植被类型 Vegetation type	8	6	6
	起源 Origin	3	2	2
	优势树种 Dominant species	2	2	2
	林种 Forest category	5	4	3
单木因子 Single tree factor	龄组 Age group	5	5	4
	径阶 Diameter class	10	10	10
地域因子 Region factor	地市 City	17	20	12
	气候带 Climate zone	3	2	2

2 方 法

采用含协变量和无交互作用的多因子方差分析,即一般线性模型,探究不同因子对树干密度和木

材密度影响的显著性,筛选出对树干密度和木材密度具有影响的因子。用增强回归树(BRT)方法,计算出对树干密度和木材密度有影响的因子及其影响程度的大小。由于影响因子较多,且定性因子有多个

水平,而样本数量有限,采取如下方法合并定性因子的水平数和剔除影响不显著的因子。

2.1 逐一因子剔除法

用所有的因子进行多因子方差分析,获得模型的 R^2 和调整 R^2 ,然后剔除最不显著的因子(即 P 值最大的因子),再次进行多因子方差分析,获得新的 R^2 和调整 R^2 ,这时 R^2 减小,若调整 R^2 增大,则剔除该因子。重复以上过程,依次剔除最不显著的因子,直至调整 R^2 不再增大为止。

2.2 多水平因子合并

利用保留的因子依次与树干密度和木材密度进行方差分析,得到各定量因子和定性因子各水平相应参数的估计值,并得到置信区间。对水平较多且影响显著的因子,利用其估计值的置信区间进行合并。合并准则为:置信区间同正或同负归为一类;置信区间下限为负而上限为正归为一类;若因子所有水平都处在一类区间中(同正、同负或下限为负上限为正),则将其按参数估计值从小到大等分成 3 小类。

将合并后的各因子重新进行方差分析,再按 2.1 中的方法,逐步剔除最不显著因子,直至调整 R^2 最大为止,利用此时结果筛选出影响树干密度和木材密度的因子。

2.3 增强回归树

增强回归树(boosted regression trees, BRT)是一种基于分类回归树算法的机器学习方法,该方法通过随机选择和自学习方法产生多重回归树,可有效提高模型的稳定性和预测精度^[24-26]。在运算过程中多次随机抽取一定量的数据,分析自变量对因变量的影响程度,剩余数据用来对拟合结果进行检验,最后对生成的多重回归取均值并输出。目前分类回归树已经被运用到土地利用分类、物种分布模拟以及城市扩展驱动力分析中^[27-28],取得了较好的结果。BRT 法不仅可获得自变量对因变量影响的相对贡献率,而且还可以获得在其他自变量不变或取均值的情况下,因变量随某一自变量变化而变化的边际效应^[29-30]。

在 R 软件中利用样本数据,分别以樟树、木荷、枫香树干密度和木材密度为因变量,以 2.2 中筛选出的因子为自变量,调用 gbm 包进行增强回归树分析。依据 Elith 等^[26] 推荐的经验法则,并结合本研究情况,设置学习速率为 0.005,每次抽取 50% 的数据进行分析,50% 用于训练,并进行 5 次交叉验证。

3 结果与分析

3.1 影响树干密度的因子

表 3 给出了樟树、木荷、枫香树干密度一般线性

模型的决定系数(R^2)与调整决定系数(Adjusted R^2)。表 3 显示:各因子对 3 个树种树干密度的解释程度为 0.518 ~ 0.659,考虑到参数个数后解释程度下降为 0.273 ~ 0.502。其中,决定系数与调整决定系数均为木荷最大,樟树最小。

表 3 树干密度多因子方差分析模型 R^2 与调整 R^2

Tab. 3 R^2 and adjusted R^2 of multifactor analysis of variance for trunk density

树种 Tree species	R^2	调整 R^2 Adjusted R^2
樟树 <i>Cinnamomum camphora</i>	0.518	0.273
木荷 <i>Schima superba</i>	0.659	0.502
枫香 <i>Liquidambar formosana</i>	0.632	0.445

表 4 列出了 3 个树种分别以树干密度为因变量进行多因子方差分析所得出的 F 值和 P 值(此时为已完成 1.2.2 因子合并,调整 R^2 最大时的结果)。从表 4 可以看出:影响樟树树干密度的因子有地径、胸径、地市、林种、枯落物厚度等,共 16 个因子;对木荷树干密度有影响的因子有地市、年龄、龄组、坡度、冠幅南北向等,共 19 个因子;影响枫香树干密度的因子有海拔、平均高度、胸径、径阶、腐殖层厚度等,共 19 个因子。对 3 个树种均有影响的因子是坡向、枯落物厚度、草本盖度、龄组、平均高度、气候带,其中枯落物厚度对 3 个树种均有显著性影响。

3.2 影响木材密度的因子

表 5 列出了 3 个树种木材密度一般线性模型的决定系数与调整决定系数。由表 5 可知:各因子对 3 个树种木材密度的解释程度为 0.587 ~ 0.696,考虑到参数个数后解释程度降至 0.398 ~ 0.550。决定系数与调整决定系数,均为枫香最大,木荷最小。

表 6 为樟树、木荷、枫香 3 个树种分别以木材密度为因变量进行多因子方差分析所得出的 F 值和 P 值统计表。从表 6 可以看出:影响樟树木材密度的因子有地域、土层厚度、地径、径阶、林种等,共 20 个因子;对木荷木材密度有影响的因子有年龄、枝下高、土壤类型、草本盖度、龄组等,共 16 个因子;影响枫香木材密度的因子有径阶、枯落物厚度、草本盖度、冠幅东西向、腐殖层厚度等,共 17 个因子。对 3 个树种均有影响的因子是海拔、灌木盖度、植被类型、年龄、枝下高,其中年龄对 3 个树种均有显著性影响。

3.3 多重因子对树干密度和木材密度的相对贡献率

3.3.1 影响树干密度因子的相对贡献率

图 1 是由增强回归树(BRT)分析得到的各因子对 3 个树种树干密度影响的相对贡献率,即各因子对树干密度的影响力大小。利用有序样本分类(最优

表4 树干密度多因子方差分析 F 值与 P 值统计Tab. 4 F value and P value statistics of multifactor variance analysis for trunk density

因子类别 Factor category	源 Source	樟树 <i>Cinnamomum camphora</i>		木荷 <i>Schima superba</i>		枫香 <i>Liquidambar formosana</i>	
		F	$P > Pr$	F	$P > Pr$	F	$P > Pr$
地形因子 Terrain factor	海拔 Altitude	—	—	9.23	0.003 5**	43.64	<0.000 1**
	坡度 Slope	—	—	10.63	0.001 8**	3.03	0.087 1
	坡位 Slope position	2.47	0.070 4	—	—	2.75	0.072 4
	坡向 Slope aspect	3.82	0.055 3	4.43	0.039 5*	1.27	0.280 8
土壤因子 Soil factor	腐殖层厚度 Thickness of humic layer	—	—	—	—	9.30	0.003 4**
	枯落物厚度 Litter depth	4.66	0.034 9*	4.49	0.038 1*	6.34	0.014 5*
	土层厚度 Soil thickness	—	—	2.56	0.115 0	2.32	0.133 2
	土壤类型 Soil type	—	—	—	—	5.94	0.004 4**
林分因子 Stand factor	草本盖度 Herb coverage	1.23	0.271 1	3.01	0.087 6	8.23	0.005 7**
	灌木盖度 Shrub coverage	1.33	0.254 0	—	—	9.10	0.003 7**
	林种 Forest category	2.80	0.033 8*	1.61	0.196 5	—	—
	龄组 Age group	1.67	0.183 1	5.87	0.000 4**	2.68	0.055 0
	平均高度 Average height	2.36	0.130 0	6.11	0.016 2*	23.59	<0.000 1**
	起源 Origin	—	—	4.52	0.037 6*	—	—
	郁闭度 Canopy density	—	—	1.23	0.272 6	2.98	0.089 7
	植被类型 Vegetation type	2.40	0.038 3*	2.98	0.018 1*	—	—
植被总覆盖度 Total vegetation coverage	1.46	0.232 4	—	—	—	—	
单木因子 Single tree factor	地径 Ground diameter	11.05	0.001 5**	3.26	0.076 0	—	—
	冠幅东西向 Crown width from east to west	1.86	0.177 6	3.82	0.055 3	—	—
	冠幅南北向 Crown width from north to south	—	—	9.51	0.003 0**	—	—
	径阶 Diameter class	—	—	—	—	10.01	0.000 2**
	年龄 Age	—	—	25.42	<0.000 1**	6.99	0.010 5*
	树高 Tree height	—	—	4.84	0.031 6*	2.96	0.090 6
	胸径 DBH	8.28	0.005 6**	—	—	21.37	<0.000 1**
	枝下高 Height under branch	1.22	0.274 8	—	—	2.38	0.127 9
地域因子 Region factor	地市 City	7.84	0.006 9**	37.48	<0.000 1**	—	—
	气候带 Climate zone	1.54	0.222 4	6.70	0.012 1*	5.81	0.019 1*

注:—表示无影响的因子,*表示0.05水平显著因子,**表示0.01水平极显著因子。表6同此。Notes:— means non-influential factors,* means significant factor at 0.05 level,** means extremely significant factor at 0.01 level. Same as Tab. 6.

表5 木材密度多因子方差分析模型 R^2 与调整 R^2 Tab. 5 R^2 and adjusted R^2 of multifactor analysis of variance for wood density

树种 Tree species	R^2	调整 R^2 Adjusted R^2
樟树 <i>Cinnamomum camphora</i>	0.674	0.472
木荷 <i>Schima superba</i>	0.587	0.398
枫香 <i>Liquidambar formosana</i>	0.696	0.550

分割法)将 BRT 结果分成 3 类可以发现:植被类型、枝下高、胸径、植被总覆盖度、冠幅东西向 5 个因子是影响樟树树干密度的主要因子,相对贡献率为 8.11%~10.78%,其次为平均高度、灌木盖度、林种

等 7 个因子,其相对贡献率范围为 4.96%~7.69%,以上因子对樟树树干密度的总相对贡献率达 92%以上(图 1A)。地市、植被类型是影响木荷树干密度的主要因子,其相对贡献率分别为 12.76%、10.59%,其次为年龄、海拔、地径等 10 个因子,相对贡献率范围为 4.53%~8.44%,以上因子对木荷树干密度的总相对贡献率近 85%(图 1B)。坡向、海拔、平均高度为影响枫香树干密度的主要因子,相对贡献率分别为 18.07%、13.94%、12.02%,其次为枝下高、胸径、灌木盖度、腐殖层厚度,其相对贡献率范围为 5.91%~9.49%,以上因子对枫香树干密度的总相对贡献率近 75%(图 1C)。从单一因子来看,对 3 个树种树干

密度均有影响的因子是坡向、枯落物厚度、草本盖度、龄组、平均高度、气候带。这些因子对樟树树干密度的相对贡献率依次为 0.95%、3.66%、4.96%、6.55%、7.69%、1.58%，总相对贡献率为 25.39%。对木荷树干密度的相对贡献率依次为 2.99%、2.82%、6.53%、2.25%、5.54%、2.43%，总相对贡献率为 22.55%。对枫香树干密度的相对贡献率依次为 18.07%、1.20%、2.49%、1.08%、12.02%、0.90%，总相对贡献率为 35.75%。从主要影响因子来看，3 个树种树干密度的主要影响因子不同，无共同主要影响因子。

表 7 列出了 5 大类因子(地形因子、土壤因子、林分因子、单木因子和地域因子)分别对树干密度和木材密度影响的相对贡献率。表 7 显示:对于不同树种,5 大类因子影响排序不尽相同。对于樟树和木荷树干密度,均为林分因子影响最大,其相对贡献率分别为 53.43% 和 32.75%。其中,在樟树林分因子中,植被类型最大(10.78%),其次为植被总覆盖度(9.03%),草本盖度最小(4.96%);对于木荷林分因子,植被类型也最大(10.59%),草本盖度次之(4.96%),起源最小(1.12%)。而对枫香树干密度影

表 6 木材密度多因子方差分析 F 值与 P 值统计Tab. 6 F value and P value statistics of multifactor variance analysis for tree wood density

因子类别 Factor category	源 Source	樟树 <i>Cinnamomum camphora</i>		木荷 <i>Schima superba</i>		枫香 <i>Liquidambar formosana</i>	
		F	$P > Pr$	F	$P > Pr$	F	$P > Pr$
地形因子 Terrain factor	海拔 Altitude	1.62	0.209 0	1.67	0.200 7	9.48	0.003 1**
	坡度 Slope	-	-	-	-	-	-
	坡位 Slope position	-	-	1.25	0.299 2	4.46	0.015 6*
	坡向 Slope aspect	-	-	-	-	2.57	0.022 0**
土壤因子 Soil factor	腐殖层厚度 Thickness of humic layer	3.62	0.062 2	-	-	12.84	0.000 7**
	枯落物厚度 Litter depth	2.21	0.143 1	-	-	24.07	<0.000 1**
	土层厚度 Soil thickness	13.87	0.000 5**	1.78	0.187 6	-	-
	土壤类型 Soil type	-	-	5.25	0.007 9**	-	-
林分因子 Stand factor	草本盖度 Herb coverage	-	-	7.28	0.009 0**	19.30	<0.000 1**
	灌木盖度 Shrub coverage	3.13	0.082 6	1.63	0.206 6	7.03	0.010 2*
	林种 Forest category	5.17	0.001 3**	1.03	0.387 4	-	-
	龄组 Age group	4.24	0.009 1**	3.43	0.013 5*	-	-
	平均高度 Average height	4.56	0.037 2*	-	-	8.98	0.003 9**
	平均年龄 Average age	2.47	0.121 8	-	-	-	-
	平均胸径 Average DBH	-	-	2.37	0.129 1	-	-
	起源 Origin	5.20	0.026 4*	3.17	0.080 0	-	-
	郁闭度 Canopy density	-	-	-	-	2.74	0.103 2
	优势树种 Dominant species	2.65	0.109 5	-	-	6.40	0.014 1*
	植被类型 Vegetation type	3.97	0.003 8**	1.57	0.182 1	2.78	0.025 1*
	植被总覆盖度 Total vegetation coverage	7.13	0.001 0**	-	-	7.29	0.009 0**
	单木因子 Single tree factor	地径 Ground diameter	13.74	0.000 5**	-	-	-
冠幅东西向 Crown width from east to west		-	-	5.23	0.025 7*	18.40	<0.000 1**
冠幅南北向 Crown width from north to south		-	-	3.06	0.085 2	-	-
径阶 Diameter class		7.84	0.001 0**	-	-	22.07	<0.000 1**
年龄 Age		6.12	0.016 4*	17.98	<0.000 1**	11.72	0.001 1**
树高 Tree height		-	-	-	-	6.46	0.013 6*
胸径 DBH		8.70	0.004 7**	-	-	-	-
枝下高 Height under branch		6.05	0.017 1*	7.83	0.006 9**	2.39	0.127 2
地域因子 Region factor	地市 City	12.34	<0.000 1**	5.24	0.025 5*	-	-
	气候带 Climate zone	4.72	0.012 8*	-	-	-	-

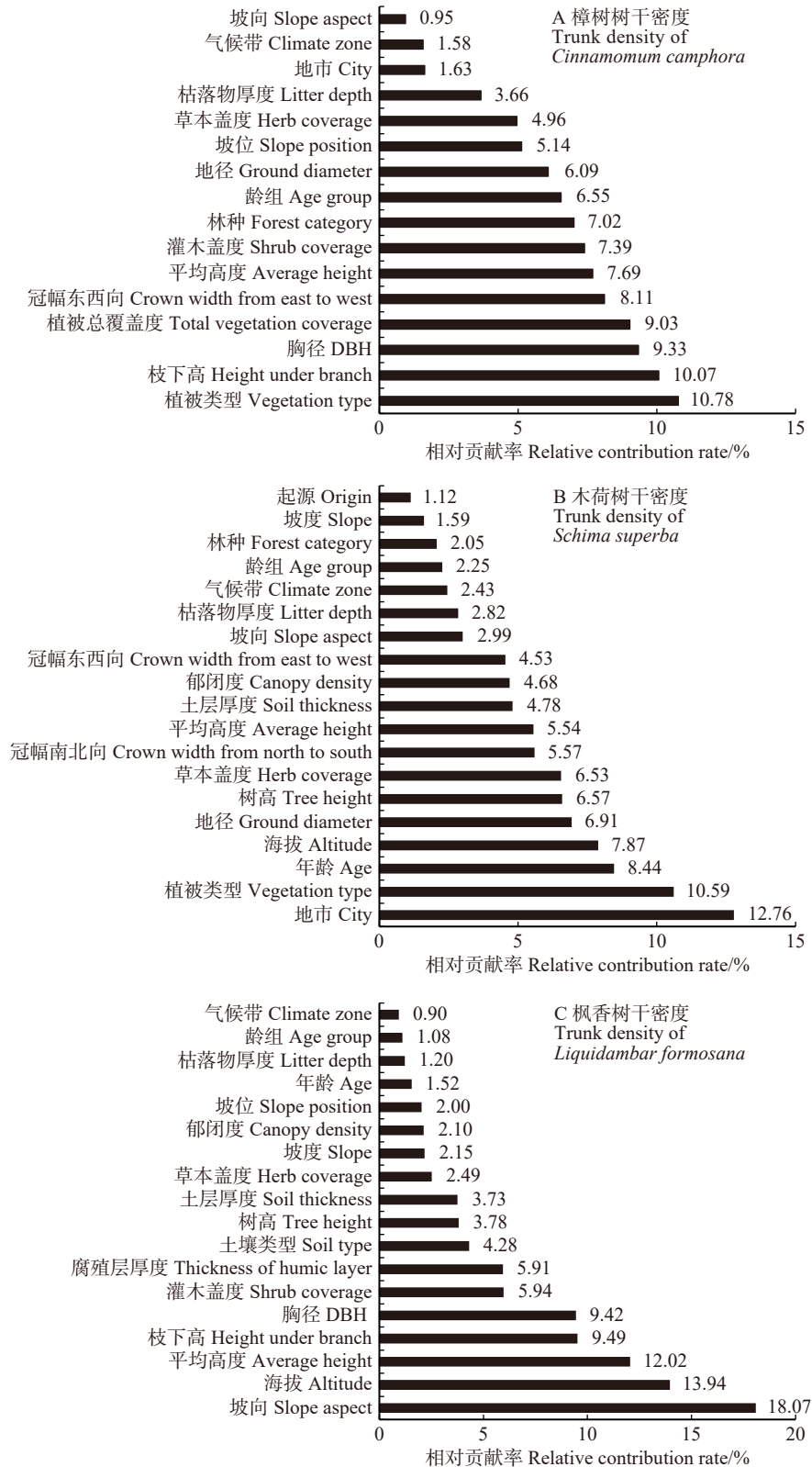


图1 各自变量对树干密度的相对贡献率

Fig. 1 Relative contribution rate of the factors affecting trunk density

响程度最大的是地形因子(36.15%),其中,坡向影响最大(18.07%),海拔次之(13.94%),坡位最小(2.00%)。5大类因子对樟树、木荷、枫香树干密度影响作用排在第2位的因子,均为单木因子;居于第3位的因子,各不相同,分别为地形因子、地域因子、

林分因子;土壤因子和地域因子对树干密度影响较小,对三者树干密度影响作用次序均较为靠后。

3.3.2 影响木材密度因子的相对贡献率

由BRT分析得到的各因子对3个树种木材密度影响的相对贡献率,其结果条形图与树干密度相

表 7 5 大类因子对树干密度和木材密度影响的相对贡献率

Tab. 7 Relative contribution rate of five factors to trunk density and wood density

%

因子类别 Factor category	树干密度 Trunk density			木材密度 Wood density		
	樟树 <i>Cinnamomum camphora</i>	木荷 <i>Schima superba</i>	枫香 <i>Liquidambar formosana</i>	樟树 <i>Cinnamomum camphora</i>	木荷 <i>Schima superba</i>	枫香 <i>Liquidambar formosana</i>
地形因子 Terrain factor	6.08	12.44	36.15	7.95	12.03	32.23
土壤因子 Soil factor	3.66	7.60	15.12	13.02	13.63	7.30
林分因子 Stand factor	53.43	32.75	23.62	49.62	36.92	34.62
单木因子 Single tree factor	33.61	32.02	24.20	27.30	32.79	25.85
地域因子 Region factor	3.21	15.19	0.90	2.11	4.62	0.00

似,故省略。利用有序样本分类将 BRT 结果分成 3 类得到:枝下高、植被类型、海拔等 10 个因子是影响樟树木材密度的主要因子,相对贡献率为 6.16%~10.01%,其次为平均年龄、龄组、腐殖层厚度等 5 个因子,相对贡献率范围为 2.88%~5.81%,以上因子对樟树木材密度的总相对贡献率达 97% 以上。年龄、草本盖度、枝下高、平均胸径、土层厚度、植被类型是影响木荷木材密度的主要因子,相对贡献率范围为 8.09%~11.29%,其次为海拔、冠幅南北向、冠幅东西向等 6 个因子,相对贡献率范围为 4.62%~7.29%,以上因子对木荷木材密度的总相对贡献率超过 90%。坡向、海拔、平均高度、枝下高是影响枫香木材密度的主要因子,相对贡献率分别为 16.49%、14.34%、11.64%、10.46%,其次为植被类型、腐殖层厚度、灌木盖度等 7 个因子,相对贡献率范围为 3.81%~8.09%,以上因子对枫香木材密度的总相对贡献率达 89% 以上。从单一因子来看,对 3 个树种均有影响的因子是海拔、灌木盖度、植被类型、年龄、枝下高,这些因子对樟树木材密度的相对贡献率依次为 7.95%、6.88%、9.54%、6.73%、10.01%,总相对贡献率为 41.11%;对木荷木材密度的相对贡献率依次为 7.29%、1.96%、8.09%、11.29%、9.53%,总相对贡献率为 38.16%;对枫香木材密度的相对贡献率依次为 14.34%、5.79%、8.09%、3.82%、10.46%,总相对贡献率为 42.50%。3 个树种木材密度具有共同主要影响因子枝下高,且其相对贡献率相近,均在 10% 左右,说明枝下高对树木生长的木材密度变化具有较大影响。

从表 7 可以看出:5 大类因子对樟树、木荷、枫香木材密度影响较为一致,均为林分因子影响最大(49.62%、36.92%、34.62%),地域因子影响最小(2.11%、4.62%、0.00%)。其中,在樟树林分因子中,植被类型作用最大(9.54%),其次为植被总覆盖度(7.65%),优势树种最小(0.04%);在木荷林分因子中,草本盖度最大(10.25%),其次为平均胸径

(8.72%),起源最小(0.89%);而对于枫香林分因子,平均高度最大(11.64%),其次为植被类型(8.09%),优势树种最小(0.12%)。5 大类因子对三者木材密度影响作用排序不尽相同,其中樟树与木荷规律完全一致,作用大小依次同为林分因子、单木因子、土壤因子、地形因子、地域因子。而对于枫香木材密度,相较其余 2 个树种,地形因子影响作用较大,排名靠前。其整体排序为林分因子、地形因子、单木因子、土壤因子、地域因子。说明樟树和木荷这两个树种的木材密度,其影响因子较为接近。而地形因子相对枫香木材密度的影响,相较前两个树种,影响程度更大。

4 结 论

本文通过多因子方差分析从 5 大类 30 个因子中筛选出对树干密度和木材密度具有影响的因子,进而由增强回归树法(BRT)分析各因子对树干密度和木材密度的影响程度,得出以下结论:

(1)利用有序样本分类将 BRT 结果分成 3 类得到:影响樟树树干密度的主要因子从大到小依次是植被类型、枝下高、胸径、植被总覆盖度、冠幅东西向;影响木荷树干密度的主要因子为地市和植被类型;影响枫香树干密度的主要因子有坡向、海拔、平均高度。从单一因子来看,3 个树种树干密度的主要影响因子不同,无共同主要影响因子。

(2)3 个树种木材密度主要影响因子也存在差异。樟树木材密度的主要影响因子从大到小依次为枝下高、植被类型、海拔、植被总覆盖度、平均高度、灌木盖度、年龄、胸径、林种、土层厚度;木荷木材密度的主要影响因子依次为年龄、草本盖度、枝下高、平均胸径、土层厚度、植被类型;枫香木材密度的主要影响因子依次是坡向、海拔、平均高度、枝下高。枝下高为共同主要影响因子,其相对贡献率相近,均在 10% 左右。

(3)3 个树种树干密度和木材密度主导因子均包

括林分因子和单木因子,但不尽相同。林分因子和单木因子同为影响樟树树干密度和木材密度的主导因子,其相对贡献率之和分别为 87.04% 和 76.92%。林分因子、单木因子和地域因子是影响木荷树干密度的主导因子,其相对贡献率之和为 79.96%;影响木荷木材密度的主导因子为林分因子、单木因子和土壤因子,其相对贡献率之和为 83.04%。地形因子、林分因子和单木因子同是影响枫香树干密度和木材密度的主导因子,其相对贡献率之和分别为 83.98% 和 92.70%。

5 讨 论

综合来看,不同树种树干密度和木材密度之间影响因子差异显著。相较其余两个树种,枝下高对樟树树干密度和木材密度影响较大。年龄对木荷树干密度和木材密度影响较大,这与刘一星等^[31]的研究结果一致,通常情况,从幼树期至成熟期,木材的密度呈增大趋势;相比樟树和木荷,地形因子中的海拔和坡向对枫香树干密度和木材密度的影响作用较为突出。这可能是枫香相较樟树和木荷而言,对海拔和坡向变化响应更为灵敏。通常情况下,海拔每升高 100 米温度下降 0.5~0.6 °C^[32],随着海拔上升,树木生长环境条件逐渐趋于恶劣^[33]。而坡向的变化会显著影响光照条件,故对树木生长造成影响。同一树种树干密度和木材密度影响因子较为相似,排在前 10 位因子至少有 6 个共同影响因子。从 5 大类因子影响来看,影响 3 个树种树干密度和木材密度的主导因子均包括林分因子和单木因子,说明林分和单木因子在影响树干密度和木材密度方面起到重要作用。

本文中机器学习方法(增强回归树)与传统数理统计方法(多因子方差分析)得出的结果存在一定差异,例如在樟树树干密度影响因子分析中,方差分析得出的 16 个因子中枝下高 P 值最大为 0.27,表明枝下高对樟树树干密度影响不显著。但在增强回归树计算时,其相对贡献率为 10.07%,排名很靠前,居第 2 位。造成这种差异的原因有如下几条:其一, P 值不等同于影响程度;其二,是由于方差分析为一般线性模型,而增强回归树采用的是决策树作为基学习器,构建出的模型为非线性模型,增强回归树是对模型中的每一个特征进行处理。方差分析只能找到线性分割,而增强回归树则可以作非线性分割处理。两种方法的计算原理不同,导致其计算结果不尽一致;其三是由于本研究 90 个样本量相对于 30 个因子来说,样本数量有些偏少,导致结果和结论的可能性可能存在一定的局限。

本文中树干密度实际上相当于木材基本密度,即树干绝干质量与带皮材积之比,与立木生物量标准上木材密度定义一致。本文木荷与枫香树干密度均低于立木生物量标准上的木材密度,木荷树干密度低于标准 9.79%^[34],枫香树干密度较之标准低了 4.75%^[35],这大概是由于研究样本中处于幼龄期的样木占比较大。影响树干密度和木材密度的因子有很多,本文利用多因子方差分析和增强回归树法(BRT)分析了影响树干密度和木材密度的 5 大类 30 个影响因子,得到林分和单木因子为主导影响因子。这与实际情况比较相符,符合统计学规律,林分和单木因子之所以为主导影响因子的原因,是因为本文样本数据全部来源于广东省。其并不是全国范围内采样,土壤和地域因子相差无几,故其影响程度也较低。

增强回归树(BRT)能同时处理连续变量和分类变量,适合于树干密度和木材密度影响因子的分析,可以得出各个影响因子相对贡献率的大小,获得比较直观的结果。本文仅研究了所调查的 30 项因子对樟树、木荷、枫香树干密度和木材密度的影响,然而林木生长还会受到诸如气候因子、生物因子以及人为因子的影响^[36],由于调查未对这些进行详细统计,故本文未对这些因素进行研究,而这些因素是否会影响树干密度与木材密度,有待进一步探讨分析。

参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] 董利虎,李凤日,贾炜玮. 黑龙江省红松人工林立木生物量估算模型的研建[J]. *北京林业大学学报*, 2012, 34(6): 16-22.
Dong L H, Li F R, Jia W W. Effects of tree competition on biomass and biomass models of *Pinus koraiensis* plantation[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2012, 34(6): 16-22.
- [3] 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 H K, Zhao P X, Lei Y C, et al. Comparison on estimation of wood biomass using forest inventory data[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2012, 48(5): 44-52.
- [4] 符利勇,雷渊才,曾伟生. 几种相容性生物量模型及估计方法的比较[J]. *林业科学*, 2014, 50(6): 42-54.
Fu L Y, Lei Y C, Zeng W S. Comparison of several compatible biomass models and estimation approaches[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2014, 50(6): 42-54.
- [5] 曾伟生. 基于木材密度的 34 个树种组一元立木生物量模型建立[J]. *林业资源管理*, 2017(6): 41-46.
Zeng W S. Developing one-variable individual tree biomass models based on wood density for 34 tree species in China[J]. *Forest Resources Management*, 2017(6): 41-46.

- [6] 张会儒, 唐守正, 胥辉. 树干平均密度的估计方法研究 [J]. 林业科学研究, 1998, 11(1): 58–62.
Zhang H R, Tang S Z, Xu H. Studies on the estimate method for average stem density [J]. Forest Research, 1998, 11(1): 58–62.
- [7] He D, Deane D C. The relationship between trunk- and twigwood density shifts with tree size and species stature [J]. *Forest Ecology and Management*, 2016, 372: 137–142.
- [8] Dadzie P K, Amoah M, Boampong E, et al. Effect of density and moisture content on biological durability of stem and branch wood of *Entandrophragma cylindricum*, (sapele) [J]. *Journal of the Indian Academy of Wood Science*, 2015, 12(1): 44–53.
- [9] Wu R. Microstructural study of sanded and polished wood by replication [J]. *Wood Science and Technology*, 1998, 32(4): 247–260.
- [10] Machado J S, Louzada J L, Santos A J A, et al. Variation of wood density and mechanical properties of blackwood (*Acacia melanoxylon* R. Br.) [J]. *Materials & Design*, 2014, 56(4): 975–980.
- [11] Molteberg D, Hoibo O. Modelling of wood density and fibre dimensions in mature Norway spruce [J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 2007, 37(37): 1373–1389.
- [12] Poorter L, Wright S J, Paz H, et al. Are functional traits good predictors of demographic rates? Evidence from five neotropical forests [J]. *Ecology*, 2008, 89(7): 1908–1920.
- [13] 尹惠妍. 大区域森林生物量估算方法研究 [D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2014.
Yin H Y. Study on estimation method to regional forest biomass [D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2014.
- [14] 王仲锋. 森林生物量建模与精度分析 [D]. 北京: 北京林业大学, 2006.
Wang Z F. On the forest biomass's modeling and precision analysis [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2006.
- [15] 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.
- [16] Patino S, Lloyd J, Paiva R, et al. Branch xylem density variations across the Amazon Basin [J]. *Biogeosciences*, 2009, 6(4): 545–568.
- [17] 徐金梅, 吕建雄, 鲍甫成, 等. 祁连山青海云杉木材密度对气候变化的响应 [J]. 北京林业大学学报, 2011, 33(5): 115–121.
Xu J M, Lü J X, Bao F C, et al. Response of wood density of *Picea crassifolia* to climate change in Qilian Mountains of northwestern China [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2011, 33(5): 115–121.
- [18] 徐明锋, 柯炳氨, 张毅, 等. 粤东 6 种阔叶树木材密度及其影响因子研究 [J]. *华南农业大学学报*, 2016, 37(3): 100–106.
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.
- [19] Koprowski M, Duncker P. Tree ring width and wood density as the indicators of climatic factors and insect outbreaks affecting spruce growth [J]. *Ecological Indicators*, 2012, 23(4): 332–337.
- [20] 朱丽梅, 胥辉. 思茅松树干平均密度估计方法研究 [J]. *西南林业大学学报*, 2008, 28(2): 17–20.
Zhu L M, Xu H. Studies on estimation methods for average stem density of *Pinus kesiya* var. *langbianensis* [J]. *Journal of Southwest Forestry University*, 2008, 28(2): 17–20.
- [21] Nguyen H, Firn J, Lamb D, et al. Wood density: a tool to find complementary species for the design of mixed species plantations [J]. *Forest Ecology and Management*, 2014, 334: 106–113.
- [22] 王秀花, 陈柳英, 马丽珍, 等. 7 年生木荷生长和木材基本密度地理遗传变异及种源选择 [J]. 林业科学研究, 2011, 24(3): 307–313.
Wang X H, Chen L Y, Ma L Z, et al. Geographical provenance variation of growth and wood basic density of 7-year-old *Schima superba* and its provenance selection [J]. *Forest Research*, 2011, 24(3): 307–313.
- [23] 黄继丰, 冯学周, 莫罗坚, 等. 粤北 10 种乡土阔叶树种生长及根际养分比较 [J]. *林业与环境科学*, 2006, 22(3): 17–21.
Huang J F, Feng X Z, Mo L J, et al. Growth and rhizospheric fertility of 10 native broad-leaved trees in north Guangdong [J]. *Forestry and Environmental Science*, 2006, 22(3): 17–21.
- [24] Franklin J, McCullough P, Gray C. Terrain variables used for predictive mapping of vegetation communities in Southern California [M] // Wilson J P, Gallant J C. *Terrain analysis: principles and applications*. New York: John Wiley and Sons, 2000: 331–353.
- [25] De'ath G. Boosted trees for ecological modeling and prediction [J]. *Ecology*, 2007, 88(1): 243–251.
- [26] Elith J, Leathwick J R, Hastie T. A working guide to boosted regression trees [J]. *Journal of Animal Ecology*, 2008, 77(4): 802–813.
- [27] Weisberg P J, Shandra O, Becker M E. Landscape influences on recent timberline shifts in the Carpathian Mountains: abiotic influences modulate effects of land-use change [J]. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 2013, 45(3): 404–414.
- [28] Pittman S J, Costa B M, Battista T A. Using lidar bathymetry and boosted regression trees to predict the diversity and abundance of fish and corals [J]. *Journal of Coastal Research*, 2009, 25(6): 27–38.
- [29] 焦琳琳, 常禹, 申丹, 等. 利用增强回归树分析中国野火空间分布格局的影响因素 [J]. 生态学杂志, 2015, 34(8): 2288–2296.
Jiao L L, Chang Y, Shen D, et al. Using boosted regression trees to analyze the factors affecting the spatial distribution pattern of wildfire in China [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2015, 34(8): 2288–2296.
- [30] 李春林, 刘淼, 胡远满, 等. 基于增强回归树和 Logistic 回归的城市扩展驱动力分析 [J]. 生态学报, 2014, 34(3): 727–737.
Li C L, Liu M, Hu Y M, et al. Driving forces analysis of urban expansion based on boosted regression trees and Logistic

- regression[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(3): 727–737.
- [31] 刘一星, 赵广杰. 木材学[M]. 北京: 中国林业出版社, 2012.
Liu Y X, Zhao G J. *Wood science*[M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2012.
- [32] 张大鹏. 不同海拔高度对马尾松茎木质部结构的影响[J]. *生态学杂志*, 1994, 13(2): 12–18.
Zhang D P. Xylem structure of *Pinus massoniana* stem at different altitudes[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 1994, 13(2): 12–18.
- [33] 刘彦春, 张远东, 刘世荣, 等. 川西亚高山针阔混交林乔木层生物量、生产力随海拔梯度的变化[J]. *生态学报*, 2010, 30(21): 5810–5820.
Liu Y C, Zhang Y D, Liu S R, et al. Changes of tree layer aboveground biomass, ANPP to altitudinal gradient in the subalpine secondary mixed forest of Western Sichuan, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(21): 5810–5820.
- [34] 国家林业局. 立木生物量模型及碳计量参数: 木荷: LY/T 2660—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
State Forestry Administration. Tree biomass models and related parameters to carbon accounting for *Schima superba*: LY/T 2660—2016[S]. Beijing: Standards Press of China, 2017.
- [35] 国家林业局. 立木生物量模型及碳计量参数: 枫香: LY/T 2661—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
State Forestry Administration. Tree biomass models and related parameters to carbon accounting for *Liquidambar formosana*: LY/T 2661—2016[S]. Beijing: Standards Press of China, 2017.
- [36] 闫晶, 罗云建, 郑德福, 等. 桉树生物量估算差异的源解析[J]. *林业科学*, 2014, 50(2): 92–98.
Yan J, Luo Y J, Zheng D F, et al. Source appointment of differences in biomass estimates of eucalypt plantation[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2014, 50(2): 92–98.

(责任编辑 冯秀兰
责任编委 张会儒)