

## 多尺度相容的林木年生长模型组研究

代劲松, 季碧勇, 徐达, 陶吉兴

(浙江省森林资源监测中心, 浙江 杭州 310020)

**摘要:** 本文以浙江省 2018 年和 2019 年森林资源连续清查的 4 252 个固定样地数据为建模样本, 其中, 随机预留 10% 的样本用于对蓄积、胸径、树高模型进行独立验证, 其余数据用于建模, 分为林分和散生四旁树 2 类建模单元, 对 4 个不同的树种组 (松木、杉木、硬阔和软阔) 建立蓄积、胸径、树高的生长率模型, 并结合转换系数建立省、市、县多尺度相容的林木年生长模型组——蓄积生长模型、树高生长模型、胸径生长模型。结果表明, 林分蓄积生长模型的  $R^2$  均在 0.63 以上,  $rRMSE$  小于 0.2, 胸径生长模型的  $R^2$  均在 0.98 以上,  $rRMSE$  小于 0.1, 树高生长模型的  $R^2$  均在 0.61 以上,  $rRMSE$  小于 0.2, 模型组拟合效果良好; 模型组应用于森林资源小班数据的年蓄积生长率验证效果较好 ( $R^2$  为 0.810 9,  $rRMSE$  小于 0.2)。以上研究结果表明, 以森林资源连续清查固定样地数据建立林木年生长模型组, 能够为森林资源小班数据的模型更新提供可靠的技术支撑。

**关键词:** 年度监测; 生长模型; 森林资源连续清查样地; 尺度变换; 浙江省

中图分类号: S758.5

文献标识码: A

文章编号: 1001-3776 (2023) 05-0051-08

## Research on Model Groups for Annual Standing Volume Growth in Zhejiang

DAI Jinsong, JI Biyong, XU Da, TAO Jixing

(Zhejiang Forest Resources Monitoring Center, Hangzhou 310020, China)

**Abstract:** Data of fixed plots of continuous inventory for forest resources in Zhejiang province in 2018 and 2019 were collected for data modeling, among them, 10% of data were prepared for independent verification of standing volume, DBH and height. The models for standing volume growth, DBH and height were established with two modeling units and four forest groups (pine, Chinese fir, hard broad-leaved and soft broad-leaved), and that of multi-scale compatible model groups at the provincial, cities and counties level were established with conversion coefficient. The results indicated that the values of  $R^2$  for the volume growth models were greater than 0.63, with  $rRMSE$  smaller than 0.2, the values of  $R^2$  for DBH growth models were greater than 0.98, with  $rRMSE$  smaller than 0.1, and the values of  $R^2$  for the height growth models were greater than 0.61 with  $rRMSE$  smaller than 0.2. The fitting effects of the model group were significant. The model groups were applied to the forest resources subcompartment data, the annual volume growth rates verification effect was good ( $R^2$  was 0.8109,  $rRMSE$  smaller than 0.2).

**Key words:** annual monitoring; growth model; continuous inventory plots of forest resources; scale transformation; Zhejiang province

森林生态系统是保障国家生态安全的重要屏障, 通过及时掌握森林资源的动态变化情况, 可以为各级林业主管部门制定长期发展方针提供数据支撑<sup>[1]</sup>。针对我国现有森林资源清查中每 5 年获取一次全国森林资源信息, 监测数据时效性较低且数据存在滞后现象的问题, 通过以现行森林资源连续清查抽样框架为基础, 每年清查各省五分之一的样地, 实现对全国和各省森林资源年度监测将是一个有效的监测方式<sup>[2]</sup>。自 2012 年开始, 浙江省

收稿日期: 2023-03-27; 修回日期: 2023-08-03

基金项目: 浙江省省院合作林业科技项目 (2021SY05)

作者简介: 代劲松, 工程师, 从事森林资源监测研究; E-mail: Aarondjs@outlook.com。通信作者: 陶吉兴, 教授级高工, 从事森林资源调查监测与评估研究; E-mail: taojixing@126.com。

建立了省市联动年度监测体系,确立了省市两级监测以抽样调查,县级监测以小班区划调查为基本方法,建立省市县一体的监测框架体系和监测路线<sup>[3]</sup>。使用多源遥感数据对森林面积类指标的年度变化监测已经相对比较完善<sup>[4-6]</sup>,但在蓄积量相关指标的更新方面还处于探索当中。目前,林分蓄积量生长相关指标的更新,主要通过建立生长模型,采用模拟更新的方法<sup>[7]</sup>。

以森林资源规划设计调查小班(二类小班)为基础的森林资源“一张图”年度更新中,林分蓄积、胸径、树高等因子的更新是其核心内容。如何利用森林资源连续清查年度监测样地数据,构建合适的模型体系,建立既与省级固定样地相协同,有良好精度保障,又能适用于省、市、县三级的更新模型,是值得深入探讨的主题<sup>[8-10]</sup>。当前林木年度生长量模型研究应解决好以下几个主要问题:(1)年度监测中各类监测指标的变化量较小,如何实现各类指标年度变化的精准预测;(2)胸径、树高、单位面积株数、单位面积蓄积指标相关性强,如何构建一套相容的模型组,统一预测各类生长指标;(3)在固定样地样本数量有限的情况下,如何构建省、市、县三个不同尺度相容,具有良好精度保障的模型组。

本研究利用 2018 年和 2019 年的浙江省森林资源连续清查的固定样地数据,分松木、杉木 *Cunninghamia lanceolata*、硬阔、软阔 4 个树种组建立蓄积、胸径、树高的生长率模型,并结合转换系数构建省、市、县多尺度相容的林木年生长模型组。该方法能够为后续生物量、碳储量的估算提供数据基础,还能够为各省森林资源管理“一张图”年度监测中小班主要测树因子的更新提供借鉴。

1 材料与方法

1.1 样地数据处理

建模数据为浙江省 2018 年和 2019 年两期的 4 252 个森林资源连续清查固定样地(简称一类样地)数据,固定样地大小为 28.28 m×28.28 m,面积为 0.08 hm<sup>2</sup>,调查时间为每年的 5—10 月。主要调查内容包括样地坐标、地类、样木类型、检尺类型、树种、胸径等,详见《国家森林资源连续清查:浙江省第七次复查技术操作细则》<sup>[11]</sup>。为了避免采伐、征占用、自然灾害等因素对样地的地类引起变化,林分蓄积及平均胸径建模的样本选择时,只选取两期样地的地类均为乔木林地的数据,共计 1 366 个;树高建模样本为 2019 年乔木林样地中的平均标准木(每个样地选择接近平均胸径的 3~5 株样木测量树高)单木数据,共计 6 039 株;散生四旁木胸径建模样本为两期样木表中立木类型为散生或四旁的单木数据,共计 16 803 株。

对样木数据进行预处理,包括:(1)为了确保相同样地的调查时间一致,生长量达到 12 个月,本文按照不同树种(组)和径级的年生长率月际分配比例关系<sup>[7,12]</sup>,对 2019 年的样木数据进行调查时间误差修正;(2)剔除两期样木调查数据中均已采伐、枯死、多测的检尺木;(3)剔除 2019 年采伐木,并对漏测木、错测木进行胸径模拟回归,确保建模样木检尺类型仅有保留木、进界木和枯死木。建模样本数据的统计汇总情况见表 1。

表 1 建模样本数据汇总统计  
Tab. 1 Data modeling

因子	树种(组)	样本数/株	年份/年	范围	平均值	标准差
林木胸径/cm	松木	289	2018	6.10~22.96	11.76	2.61
			2019	6.81~23.30	12.12	2.64
	杉木	304	2018	5.69~25.55	11.84	2.72
			2019	6.26~25.80	12.21	2.67
	硬阔	689	2018	6.24~26.15	10.40	2.67
			2019	6.61~26.32	10.71	2.67
	软阔	84	2018	6.57~25.01	12.03	3.27
			2019	7.02~25.32	12.40	3.28
林木蓄积量/(m <sup>3</sup> ·hm <sup>-2</sup> )	松木	289	2018	4.00~350.00	78.13	53.38
			2019	4.25~362.50	83.38	55.25
	杉木	304	2018	2.38~355.50	98.88	60.00

表 1 (续)						
因子	树种 (组)	样本数/株	年份/年	范围	平均值	标准差
	硬阔	689	2019	3.13~365.38	105.88	61.88
			2018	4.88~363.00	73.50	45.50
			2019	6.00~370.88	78.25	46.63
	软阔	84	2018	7.00~259.13	64.63	40.25
			2019	7.63~266.75	68.88	41.38
	松木	971	2019	3.0~19.0	9.87	3.05
	杉木	1 442		2.5~18.0	9.29	2.65
	硬阔	3 312		3.2~23.0	8.43	2.23
	软阔	314		3.0~20.2	8.74	2.38
	四旁散生木胸径/cm	905	2018	5.0~39.7	16.06	8.63
			2019	5.2~40.0	16.76	8.66
		5 003	2018	5.0~37.6	11.39	5.53
			2019	5.0~38.1	11.86	5.61
		6 227	2018	5.0~39.2	10.29	5.76
			2019	5.0~39.9	10.85	5.96
		4 668	2018	5.0~39.3	10.24	5.52
			2019	5.0~39.8	10.89	5.74

1.2 模型组构建

模型组以生长量预测为核心目标，包括蓄积生长模型、树高生长模型、胸径生长模型，建模单元分为乔木林分和散生四旁木 2 类，树种组分为松类、杉类、硬阔及软阔 4 类。模型组建模路线包括：（1）以两期乔木林样地数据构建省级林分胸径和蓄积生长模型；（2）以两期散生四旁单木数据构建省级散生四旁木胸径生长模型；（3）以 2019 年乔木林样地平均标准木单木数据构建省级胸径-树高模型；（4）以两期样地数据建立尺度转换系数；（5）通过尺度转换系数将省级模型转换为市、县级模型。蓄积量、胸径及树高的模型均以年生长率预测为核心，结合生长率与转换系数形成不同尺度预测模型，见公式（1）~（3）。

$$V_{后}=V_{前} \times (1+p_v \times r_v)$$
 (1)

$$D_{后}=D_{前} \times (1+p_d \times r_d)$$
 (2)

$$H_{后}=H_{前} \times (1+p_h \times r_h)$$
 (3)

上式中， $V_{后}$ 为后期蓄积量， $D_{后}$ 为后期胸径， $H_{后}$ 为后期树高， $V_{前}$ 为前期蓄积量， $D_{前}$ 为前期胸径， $H_{前}$ 为前期树高， $p_v$ 为蓄积年生长率， $p_d$ 为胸径年生长率， $p_h$ 为树高年生长率， $r_v$ 为蓄积转换系数， $r_h$ 为树高转换系数， $r_d$ 为胸径转换系数。

依据《森林生长量重生长率编制技术规定》（中华人民共和国林业部 1996 年）推荐的生长率模型，本次选用公式（4）为林分蓄积生长率预测方程<sup>[13]</sup>，公式（5）为胸径生长率预测模型<sup>[14]</sup>，公式（6）为树高生长率预测模型，公式（7）~（9）为林业中较为常见的树高曲线方程<sup>[15]</sup>，本文分松木、杉木及阔叶树选用不同的方程式。散生四旁木蓄积根据模型预测的后期胸径、树高及林木株数，采用实验形数进行计算。

$$p_v = C_0 \times e^{C_1 \times D_{前}}$$
 (4)

$$p_d = \frac{C_0 + C_1 \times D_{前} - D_{前}}{D_{前}}$$
 (5)

$$p_h = \frac{\hat{H}_{\text{后估}} - \hat{H}_{\text{前估}}}{\hat{H}_{\text{前估}}} \quad (6)$$

$$\hat{H}_{\text{松}} = C_0 + \frac{C_1}{D + C_2} \quad (7)$$

$$\hat{H}_{\text{杉}} = C_0 + C_1 \times D + C_2 \times D^2 \quad (8)$$

$$\hat{H}_{\text{阔}} = C_0 \times e^{\frac{C_1}{D}} \quad (9)$$

公式(4)~(9)中,  $p_v$ 为蓄积年生长率,  $p_d$ 为胸径年生长率,  $p_h$ 为树高年生长率,  $D_{\text{前}}$ 为前期胸径,  $D$ 为胸径,  $\hat{H}_{\text{后估}}$ 为后期估计树高,  $\hat{H}_{\text{前估}}$ 为前期估计树高,  $\hat{H}_{\text{松}}$ 为松木树高曲线方程估计树高,  $\hat{H}_{\text{杉}}$ 为杉木树高曲线方程估计树高,  $\hat{H}_{\text{阔}}$ 为阔叶树树高曲线方程估计树高,  $C_0$ 、 $C_1$ 、 $C_2$ 为模型式回归系数。

由于各县气候、地形地貌、土壤等自然条件存在一定差异, 树木的年生长量也不同, 因此需要建立各地市、县的转换系数, 对生长模型进行尺度转换。根据两期全省的所有样地数据, 分别计算各县蓄积生长率及全省平均蓄积生长率, 再将各县值与全省平均值相除计算比值, 即得到各县的蓄积转换系数( $r_v$ ), 树高转换系数( $r_h$ )和胸径转换系数( $r_d$ )根据蓄积转换系数计算, 见公式(10)~(11)。

$$r_v = \frac{p_{\text{县级}}}{p_{\text{省级}}} \quad (10)$$

$$r_d = r_h = \sqrt[3]{r_v} \quad (11)$$

### 1.3 模型验证及精度评估

从一类样地样本中随机预留 10% 的样本用于对蓄积、胸径、树高模型进行独立验证, 其余数据用于建模。为了验证模型应用于森林资源管理“一张图”数据更新的能力, 本文还以全省 11 个地级市的一类样地蓄积抽样中值与模型更新结果进行了比较。评价指标采用最常用的决定系数( $R^2$ )、均方根误差( $RMSE$ )、相对均方根误差( $rRMSE$ )<sup>[16]</sup>。 $R^2$ 越大, 说明自变量对因变量的变异解释能力越强; 实测值与估计值之间的  $RMSE$  越小, 表明模型的预测效果越好;  $rRMSE$  定义为  $RMSE$  与估计值算术平均值的比值, 值小于 0.1, 说明模型的预测效果非常好, 值介于 0.1~0.2, 说明模型预测效果好, 值介于 0.2~0.3, 说明模型预测效果一般, 值大于 0.3, 说明模型预测效果差。计算方法见公式(12)~(14)。

$$R^2 = \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \hat{x}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}\right) \times 100 \quad (12)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \hat{x}_i)^2}{n}} \quad (13)$$

$$rRMSE = \frac{RMSE}{\bar{\hat{x}}} \quad (14)$$

公式(12)~(14)中,  $n$ 为样本数量,  $x_i$ 为样本实测值,  $\hat{x}_i$ 为样本估测值,  $\bar{x}$ 为实测值的算术平均,  $\bar{\hat{x}}$ 为估测值的算术平均。

## 2 结果与分析

### 2.1 模型拟合及验证

模型系数以及数据验证结果见表 2 及图 1。林分蓄积生长率模型式的  $R^2$  值介于 0.63~0.837,  $RMSE$  值介于

0.011 ~ 0.023,  $rRMSE$  值介于 0.159 ~ 0.192。林分平均胸径模型式的  $R^2$  值介于 0.98 ~ 0.998,  $RMSE$  值介于 0.162 ~ 0.327,  $rRMSE$  值介于 0.013 ~ 0.027。散生四旁树胸径模型式的  $R^2$  值介于 0.986 ~ 0.997,  $RMSE$  值介于 0.507 ~ 0.775,  $rRMSE$  值介于 0.031 ~ 0.07。树高模型式的  $R^2$  值介于 0.614 ~ 0.707,  $RMSE$  值介于 1.082 ~ 1.523,  $rRMSE$  值介于 0.159 ~ 0.186。

表 2 模型组系数及精度评价结果  
Tab. 2 Coefficient and accuracy assessment of the predictive models

类型	树种 (组)	模型系数			验证指标		
		$C_0$	$C_1$	$C_2$	$R^2$	$RMSE$	$rRMSE$
林分蓄积 生长率	松木	0.221 26	- 0.088 01		0.743	0.014	0.163
	杉木	1.683 17	- 0.265 45		0.837	0.011	0.159
	硬阔	0.314 39	- 0.139 44		0.630	0.023	0.192
	软阔	0.338 99	- 0.124 42		0.719	0.017	0.183
林分平均 胸径	松木	0.283 15	1.006 48		0.994	0.203	0.017
	杉木	0.624 48	0.978 33		0.980	0.327	0.027
	硬阔	0.333 53	0.997 42		0.995	0.179	0.017
	软阔	0.348 38	1.001 89		0.998	0.162	0.013
散生四旁木 胸径	松木	0.641 15	1.004 11		0.997	0.541	0.031
	杉木	0.339 50	1.011 14		0.993	0.507	0.042
	硬阔	0.298 50	1.024 80		0.993	0.587	0.052
	软阔	0.418 11	1.022 66		0.986	0.775	0.070
树高	松木	20.720 15	- 223.490 00	7.534 70	0.693	1.523	0.185
	杉木	- 1.219 29	1.077 91	- 0.018 22	0.707	1.402	0.183
	硬阔	14.669 09	6.092 71		0.614	1.210	0.186
	软阔	16.309 71	6.826 48		0.635	1.082	0.159

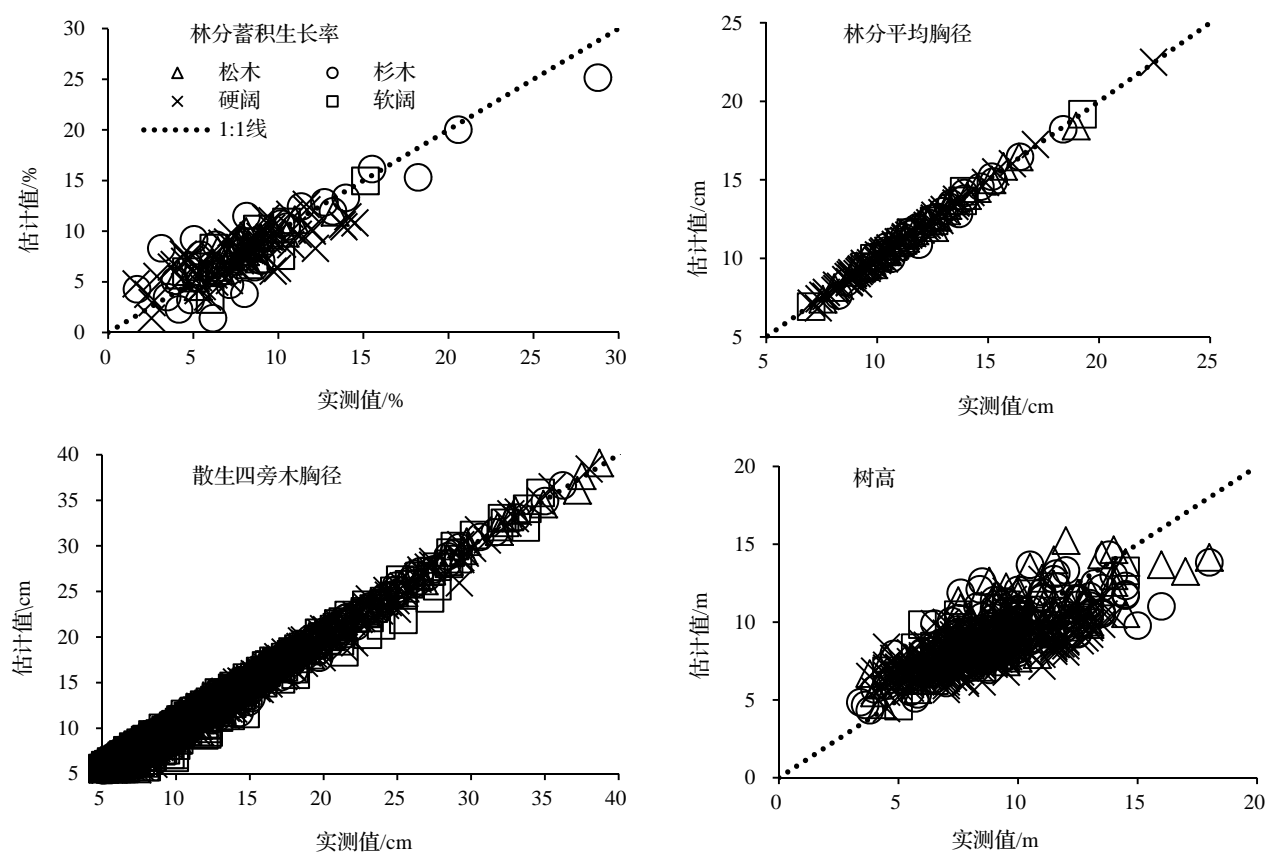


图 1 模型估计值与实测值散点图

Fig. 1 The scatter plots of the estimated by models and determined values

2.2 模型尺度转换系数

林木各级尺度的转换系数结果见表 3。为确保各县有足够的样地数减缓系数波动,提高转换系数精度,将杭州、宁波、温州、湖州、绍兴、金华、衢州、台州 8 个设区市的主城区,嘉兴和舟山全市,余姚和慈溪、温岭和玉环、苍南和平阳等相邻县,合并为一个统计单位。由表 3 可知,林分的蓄积转换系数值介于 0.8~1.2,林木的胸径及树高转换系数介于 0.928 3~1.062 7。杭州市的林分蓄积转换系数介于 0.839 7~1.103 1,林木胸径及树高转换系数介于 0.943 4~1.033 2,桐庐县、临安区的林分蓄积、林木胸径及树高生长率低于全省平均值,其他县(市、区)的林分蓄积、林木胸径及树高生长率均高于全省平均值。

表 3 浙江省不同地区林分蓄积、林木胸径及树高尺度转换系数  
Tab. 3 The conversion coefficient of standing volume, DBH and tree height in different regions of Zhejiang province

行政单元		转换系数		行政单元		转换系数		行政单元		转换系数		
		蓄积	胸径/树高			蓄积	胸径/树高			蓄积	胸径/树高	
浙江省		1	1		龙港市	1.056 4	1.018 5		开化县	0.913 4	0.970 3	
杭州市	市区	1.002 4	1.000 8	嘉兴市	全市	1.142 4	1.045 4		龙游县	1.123 9	1.039 7	
	桐庐县	0.990 0	0.996 7		湖州市	市区	0.954 2	0.984 5		江山市	0.932 1	0.976 8
	淳安县	1.074 3	1.024 2			德清县	1.026 6	1.008 8	舟山市	全市	0.955 0	0.984 8
	建德市	1.013 6	1.004 5			长兴县	0.954 7	0.984 7		台州市	市区	1.103 9
	富阳区	1.103 1	1.033 2	绍兴市	安吉县	0.887 8	0.961 1		三门县		1.143 6	1.045 7
临安区	0.839 7	0.943 4			市区	1.040 8	1.013 4		天台县	1.068 0	1.022 2	
宁波市	市区	0.999 3	0.999 8			新昌县	1.031 7	1.010 5		仙居县	1.017 8	1.005 9
	象山县	0.997 9	0.999 3			诸暨市	1.015 1	1.005 0		临海市	1.006 2	1.002 1
	宁海县	0.993 8	0.997 9		金华市	嵊州市	1.021 9	1.007 2		玉环市	0.951 2	0.983 5
	奉化区	0.919 7	0.972 5			市区	1.086 4	1.028 0	丽水市	温岭市	0.951 2	0.983 5
	余姚市	0.984 6	0.994 8			武义县	1.107 4	1.034 6			莲都区	0.946 1
慈溪市	0.984 6	0.994 8		浦江县		1.018 7	1.006 2			青田县	0.981 6	0.993 8
温州市	市区	1.054 7	1.017 9			磐安县	1.007 2	1.002 4			缙云县	0.919 5
	永嘉县	0.969 2	0.989 6		兰溪市	1.146 8	1.046 7			遂昌县	1.009 3	1.003 1
	平阳县	1.056 4	1.018 5		义乌市	1.200 0	1.062 7		松阳县	1.017 7	1.005 9	
	苍南县	1.056 4	1.018 5		东阳市	1.054 9	1.018 0		云和县	0.983 7	0.994 5	
	文成县	0.942 0	0.980 3	衢州市	永康市	1.162 6	1.051 5		庆元县	0.982 5	0.994 1	
泰顺县	0.918 8	0.972 2			市区	0.917 0	0.971 5		景宁县	0.921 0	0.972 9	
瑞安市	1.002 5	1.000 8			常山县	0.800 0	0.928 3		龙泉市	0.948 0	0.982 4	
乐清市	1.092 2	1.029 8										

宁波市的林分蓄积转换系数值介于 0.919 7~0.999 3,林木胸径及树高转换系数介于 0.972 5~0.999 8,所有县(市、区)的林分蓄积、林木胸径及树高生长率均低于全省平均值;温州市的林分蓄积转换系数值介于 0.918 8~1.092 2,林木胸径及树高转换系数介于 0.972 2~1.029 8,永嘉县、文成县、泰顺县的林分蓄积、林木胸径及树高生长率低于全省平均值,其他县(市、区)的林分蓄积、林木胸径及树高生长率均高于全省平均值;湖州市的林分蓄积转换系数值介于 0.887 8~1.026 6,林木胸径及树高转换系数介于 0.961 1~1.008 8,德清县的林分蓄积、林木胸径及树高生长率高于全省平均值,其他县(市、区)的林分蓄积、林木胸径及树高生长率均低于全省平均值;绍兴市的林分蓄积转换系数值介于 1.015 1~1.040 8,林木胸径及树高转换系数介于 1.005 0~1.013 4,金华市的林分蓄积转换系数值介于 1.007 2~1.2000 0,林木胸径及树高转换系数介于 1.002 4~1.062 7,两个市的所有县(市、区)的林分蓄积、林木胸径及树高生长率均高于全省平均值;衢州市的林分蓄积转换系数值介于 0.800 0~1.123 9,林木胸径及树高转换系数介于 0.928 3~1.039 7,龙游县的林分蓄积、林木胸径及树高生长率均高于全省平均值,其他县(市、区)的林分蓄积、林木胸径及树高生长率均低于全省平均值;台州市的林分蓄积转换系数值介于 0.951 2~1.143 6,林木胸径及树高转换系数介于 0.983 5~1.045 7,玉环市、温岭市的林分蓄积、林木胸径及树高生长率低于全省平均值,其他县(市、区)的林分蓄积、林木胸径及树高生长率均高于全省平均值;丽水市的林分蓄积转换系数值介于 0.919 5~1.017 7,林木胸径及树高转换系数介于

0.972 4 ~ 1.005 9，遂昌县、松阳县的林分蓄积、林木胸径及树高生长率高于全省平均值，其他县（市、区）的林分蓄积、林木胸径及树高生长率均低于全省平均值；嘉兴市和舟山市均以全市为总体计算，嘉兴市的林分蓄积、林木胸径及树高生长率高于全省平均值，林分蓄积转换系数为 1.142 4，林木胸径及树高转换系数值为 1.045 4，舟山市的林分蓄积、林木胸径及树高生长率低于全省平均值，林分蓄积转换系数为 0.955，林木胸径及树高转换系数为 0.984 8。

2.3 各市预测结果比较验证

全省 2019 年各地市一类抽样林分蓄积自然生长率（实测值）与模型更新蓄积自然生长率（估测值）结果见表 4。

表 4 各地市 2019 年一类抽样与模型更新林分蓄积自然生长率比较							
Tab. 4 Comparison on natural volume growth rate of continuous inventory plots and model updating in different regions in 2019							
地市	一类抽样蓄积 自然生长率/%	2019 年模型更新 蓄积自然生长率/%	误差/%	地市	一类抽样蓄积 自然生长率/%	2019 年模型更新 蓄积自然生长率/%	误差/%
杭州市	5.79	5.55	-0.24	金华市	5.09	5.56	0.48
宁波市	6.44	5.81	-0.62	衢州市	6.94	7.50	0.56
温州市	5.04	5.87	0.83	舟山市	6.82	7.77	0.95
嘉兴市	10.87	9.86	-1.01	台州市	5.31	6.11	0.80
湖州市	9.85	8.60	-1.25	丽水市	6.62	5.99	-0.63
绍兴市	6.22	5.48	-0.74				

注：误差为 2019 年模型更新蓄积自然生长率 - 一类抽样蓄积自然生长率。

由表 4 可知，各地市一类抽样林分蓄积自然生长率（实测值）与模型更新蓄积自然生长率（估测值）的误差值（估测值 - 实测值）介于 -1.25% ~ 0.95%。其中，6 个市的模型更新生长率低于一类抽样值，分别为杭州市、宁波市、嘉兴市、湖州市、丽水市；5 个市的模型更新生长率高于一类抽样值，分别为温州市、金华市、衢州市、舟山市、台州市。以全省 11 个市为单元的森林资源数据蓄积生长率模型更新结果与一类蓄积生长率抽样中值数据分布见图 2。由图 2 可知， $R^2$  值为 0.810 9， $RMSE$  值为 0.007 8， $rRMSE$  值为 0.116 2（小于 0.2），表明模型的估测效果好。

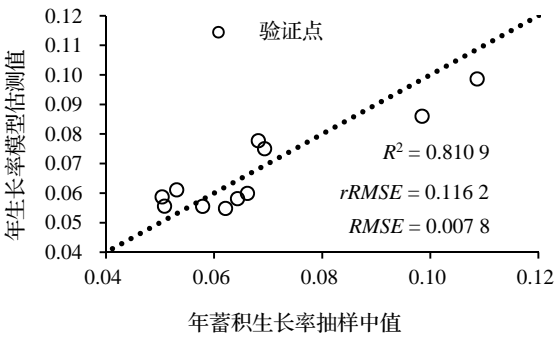


图 2 全省 11 个市年蓄积生长率样地抽样中值与模型估测值比较散点图（n=11）

Fig. 2 The scatter plot of annual volume growth rate of sampled median and model predictive values in 11 regions of Zhejiang province

3 结论与讨论

本研究利用浙江省 2018 年、2019 年两期的森林资源连续清查固定样地为数据源，分松木、杉木、硬阔、软阔 4 个树种组，通过统计建模，结合尺度转换系数，分别构建了不同树种组的省、市、县 3 级的胸径、树高、蓄积生长率模型，并选用决定系数（ $R^2$ ）、均方根误差（ $RMSE$ ）、相对均方根误差（ $rRMSE$ ）3 个评价指标对模型的准确性及可靠性进行验证。得出以下结论：

（1）通过建立林分蓄积生长率模型，是准确预测森林生长量的有效方法。对蓄积生长率模型的研究主要以马尾松 *Pinus massoniana*、杉木等针叶树种为主。陈利等以湖南省第 6 次和第 7 次国家森林资源连续清查杉木林固定样地数据为数据源，分不同龄组和起源建模组建立的杉木蓄积生长率模型精度  $R^2$  大于 0.87<sup>[13]</sup>。缪丽娟以福建省 1998 年和 2003 年两次森林资源清查 150 块杉木林固定样地数据，建立的杉木林分生长率模型精度  $R^2$  为 0.84<sup>[14]</sup>。本文以 304 个样本建立的杉木蓄积生长率模型精度  $R^2$  为 0.837，与缪丽娟的研究结果一致，由于未考虑上龄组和起源对生长量的影响，本文的结果精度略低于陈利等的研究结果。孔婷婷以广西壮族自治区国有高峰林场 2015 年的二类调查数据建立的马尾松林分蓄积模型模型精度  $R^2$  为 0.55 ~ 0.61<sup>[8]</sup>，曾伟生利用西藏自治区 2006 年森林资源连续清查的 127 个天然云杉 *Picea asperata* 林实测样地资料建立的天然云杉蓄积生长率模型精

度  $R^2$  为 0.62<sup>[17]</sup>, 由于二类调查数据主要以估测为主, 样本精度低于一类固定样地实测精度, 本文中松木林蓄积生长率模型精度  $R^2$  为 0.743, 精度高于孔婷婷的研究结果。前期的研究主要以单一树种的蓄积生长率建模为主, 缺少对省域范围全树种覆盖的统一建模, 本文将全省树种分为松木、杉木、硬阔、软阔 4 类, 建立的模型可以与森林资源“一张图”小班数据无缝衔接, 更加有利于模型的应用。

(2) 胸径、树高是重要的林分调查因子, 是表现林分生产潜力的重要数据。涂宏涛等采用 2017 年全国第九次森林资源连续清查云南省清查的 568 块云南松 *Pinus yunnanensis* 林的固定样地数据, 建立的林分平均高模型精度  $R^2$  为 0.65 ~ 0.73<sup>[10]</sup>, 孔婷婷在广西壮族自治区国有高峰林场建立的马尾松林分平均高模型精度  $R^2$  为 0.76 ~ 0.78<sup>[8]</sup>, 本文的松木树高模型式的  $R^2$  为 0.693, 此结果与以上两个研究结果基本一致。廖志云等利用西藏自治区 2001 年森林资源连续清查中复查的 493 个地面样地的复位样木资料, 建立的 12 个树种 (组) 的胸径生长率模型精度  $R^2$  介于 0.81 ~ 0.96<sup>[18]</sup>, 缪丽娟建立的杉木林分平均胸径模型精度  $R^2$  为 0.86<sup>[14]</sup>, 本文胸径模型所采用的数据间隔期为 1 年, 生长量相对较小, 前后期数据的相关性更高, 因此建模精度高于前期的研究结果 (林分胸径模型式的  $R^2$  值介于 0.980 ~ 0.998, 散生四旁树胸径模型式的  $R^2$  值介于 0.986 ~ 0.997)。

(3) 在有限样本数量的情况下, 利用建模样本统计分析数据, 本文首次采用尺度转换系数, 构建了适用不同范围各类指标预测模型, 实现了省、市、县三个不同尺度的模型转换, 提高了各级预测结果的准确性, 将模型组应用于森林资源“一张图”小班数据更新, 11 个地级市估测结果与样地抽样中值的验证  $R^2$  为 0.810 9,  $rRMSE$  小于 0.2, 表明模型组能够较好地满足林业生产要求。

## 4 问题与展望

林分的生长受到的立地条件、气候环境、林分内部竞争等诸多方面因素的影响, 根据孔婷婷在广西壮族自治区国有高峰林场的研究结果, 马尾松林在引入坡向因子后, 树高模型  $R^2$  值提高了 0.04, 蓄积模型  $R^2$  提高了 0.06, 引入土壤厚度因子后, 树高模型  $R^2$  值提高了 0.06, 蓄积模型  $R^2$  提高了 0.07<sup>[8]</sup>。本研究中只采用胸径作为自变量, 后续的研究中可以考虑加入更多的影响因子, 比如龄组、起源、坡向等<sup>[13]</sup>, 提高模型在更小范围的预测精度。

### 参考文献:

- [1] 阳帆. 森林资源综合监测体系优化设计研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2020.
- [2] 曾伟生. 关于森林资源年度监测总体方案的思考[J]. 中南林业调查规划, 2018, 37(2): 1-5, 19.
- [3] 陶吉兴, 季碧勇, 张国江, 等. 浙江省森林资源一体化监测体系探索与设计[J]. 林业资源管理, 2016(3): 28-34.
- [4] 葛宏立, 周国模, 张国江, 等. 遥感、地面三相抽样及其在森林资源年度监测面积估计中的应用[J]. 林业科学, 2007, 43(6): 77-82.
- [5] 魏安世, 杨志刚. 森林资源年度监测小班数据自动更新技术[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2010, 34(4): 123-128.
- [6] 王雪军. 基于多源数据源的森林资源年度动态监测研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2013.
- [7] 陶吉兴, 谢秉楼, 季碧勇, 等. 浙江省森林蓄积年生长量精准监测时空误差校正[J]. 林业资源管理, 2022(2): 32-38.
- [8] 孔婷婷. 马尾松人工林林分生长模型研究及模拟系统研建[D]. 北京: 北京林业大学, 2020.
- [9] 卢婧, 冯仲科. 运用随机森林模型对北京市林分蓄积生长量的预测[J]. 东北林业大学学报, 2020, 48(5): 7-11.
- [10] 涂宏涛, 李华, 张成程, 等. 基于森林资源连续清查数据的西南地区云南松林分生长模型研究[J]. 林业调查规划, 2020, 45(4): 18-22.
- [11] 浙江省林业厅. 国家森林资源连续清查: 浙江省第七次复查技术操作细则[M]. 杭州: 浙江省林业厅, 2014: 4-23.
- [12] 陶吉兴, 王文武, 徐达, 等. 基于固定样地连续监测数据的林木蓄积生长率月际分布[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2017, 41(2): 111-116.
- [13] 陈利, 王福生, 管远保, 等. 湖南省杉木材积生长率模型研究[J]. 中南林业科技大学学报, 2015, 35(11): 49-54.
- [14] 缪丽娟. 基于固定样地的杉木林分生长模型构建[J]. 河北农机, 2013(6): 75-77.
- [15] 郭海洋. 间伐对林口林业局主要人工林生长、结构及更新的影响[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2019.
- [16] 庞勇, 李增元. 基于机载激光雷达的小兴安岭温带森林组分生物量反演[J]. 植物生态学报, 2012, 36(10): 1095-1105.
- [17] 曾伟生. 西藏天然云杉林兼容性材积生长率模型系统研究[J]. 北京林业大学学报, 2008(5): 87-90.
- [18] 廖志云, 曾伟生. 西藏自治区主要树种生长率模型的研建[J]. 林业资源管理, 2006(3): 36-38, 43.