

龙脑型阴香可蒸生物量预测模型研究*

连辉明 张 谦 汪迎利 何波祥

陈杰连 陈一群 梁东成

(广东省森林培育与保护利用重点实验室/广东省林业科学研究院, 广东 广州 510520)

摘要 龙脑型阴香 (*Cinnamomum burmannii* chvar. *borneol*) 矮林经营中, 企业和农户需预估可蒸生物量, 以便根据加工能力合理安排采收面积。研究以 3~5 年生龙脑型阴香矮林为对象, 按照企业收购标准, 统一以 120 cm 为截顶高度、下部枝条全部保留的方法开展采收测定, 在同一试验林中, 分别在 3.5 a 生林龄生长期为 1 a 时和 5.5 a 生林龄生长期为 2 a 时测定树高、胸径、冠幅、分枝数和可蒸生物量 5 个性状。以线性和非线性的方法拟合单株可蒸生物量模型, 用 R^2 、RMSE、AIC、BIC 等指标评价并筛选出最佳模型, 筛选结果是 2 a 生长期最优线性和非线性模型分别 $DB=0.625H+0.076HDD$, $DB=0.091HDD+0.000\ 017\ 8HDD^2$, 1 a 生长期的分别是 $DB=-1.646H-2.734D+4.134C+1.252HD$, $DB=-1.356H+0.907H^2$ 。4 个模型在实际应用中估算的相对误差分别是 16.680%、14.107%、2.036% 和 20.543%。企业可依模型估算可蒸生物量, 合理安排采收面积。

关键词 龙脑型阴香; 可蒸生物量; 预测模型; 拟合

中图分类号: S718 文献标志码: A 文章编号: 2096-2053 (2020) 04-0059-05

Fitting of Distillable Biomass Prediction Model for *Cinnamomum burmannii* chvar. *borneol*

LIAN Huiming ZHANG Qian WANG Yingli HE Boxiang

CHEN Jielian CHEN Yiqun LIANG Dongcheng

(Guangdong Province Key Laboratory of Silviculture, Protection and Utilization/Guangdong Academy of Forestry, Guangzhou, Guangdong 510520 China)

Abstract The essence oil distillation of *Cinnamomum burmannii* chvar. *borneol* concentrates on 2-3 months in winter. When the cultivated area exceeds the enterprise distillation processing capacity, it is necessary to consider the reasonable arrangement of harvesting area, determining the harvesting area requires accurate estimation of the distillable biomass. In this paper, the growth index and biomass of 3-5 year stand were measured, the optimal linear and nonlinear models for distillable biomass estimation equation were selected by regression analysis and evaluated by R^2 , RMSE and AIC, BIC. The best linear and nonlinear models for 2-year growth period are: $DB=0.625H+0.076HDD$ and $DB=0.091HDD+0.000\ 017\ 8HDD^2$. The best models for a 1-year growth period are $DB=-1.646H-2.734D+4.134C+1.252HD$ and $DB=-1.356H+0.907H^2$. The relative errors in the practical application of the four models are as follows: 16.680%, 14.107%, 2.036% and 20.543%. The practical application results show that the models are accurate and effective.

Key words *Cinnamomum burmannii* chvar. *borneol*; distillable biomass; prediction model; fitting

* 基金项目: 广东省林业科技创新项目 (2019KJCX002, 2016KJCX001); 广东省林业科技创新项目 (2020KJCX001); 广东省科技计划项目 (2015B020202001)。

第一作者: 连辉明 (1973—), 男, 正高级工程师, 主要从事林木育种与森林培育工作, E-mail: 284177320@qq.com。

通信作者: 何波祥 (1966—), 男, 研究员, 主要从事林木育种与森林培育工作, E-mail: heboxiang@163.com。

龙脑产业是新兴的兼顾种植和加工的产业,龙脑型阴香(*Cinnamomum burmannii* chvar. *borneol*)是产业经营的一个主要经济树种^[1],经济树种的产量对于合理安排后期的加工、生产具有重要的意义。比如林木果实产量预测预报,有助于科学安排林木种子贮藏、调拨计划^[2];也有助于实现林木果实生产的科学管理^[3];也有以栽培因子(密度)和立地因子(坡向)建立产量预估模型的研究^[4]。目前大部分经济作物产量预测预报建立在作物生长量与目标产量的关联上^[5-11],相关树种包括红松(*Pinus koraiensis*)、肉桂(*Cinnamomum cassia*)、香榧(*Torreya grandis*)、苧麻(*Boehmeria nivea*)、柑桔(*Citrus reticulata*)、厚朴(*Magnolia officinalis*)、核桃(*Juglans regia*)和光箬簕竹(*Phyllostachys nidularia*)等,用于拟合的生长量指标包括树高、胸径/眉径、冠幅、枝下高、皮厚、鲜皮重、果实数量等,也有形质指标如分枝轮数、分枝角度、标准枝枝长、枝径、叶数以及立地因子坡度、坡向、海拔、土层厚度、土壤有机质含量和栽培密度等。用于拟合模型的方法主要是线性回归(一元或多元)、非线性回归(指数、对数、幂等函数方程以及 Logistic、Weibull 方程等)。

我省龙脑生产企业,为加快原料培育满足加工需求,近几年以“公司+基地+农户”的模式带动约3000多农户种植将近1100 hm²龙脑型阴香原料林基地。随着栽培面积扩大,有效保障了原料的供应之后,原料林如何采、如何合理安排采收面积、采收产量如何估算以及如何最大化获得可蒸生物量,成为企业新关注的问题。本研究团队在2018年报道了截顶采收技术试验总结^[12],初步回答了如何采的问题。为探讨采收前可蒸生物量与收益估算以及根据加工能力合理安排采收面积和原料林合理的采收间隔期等问题,研究在截顶试验林中再开展采后2 a生长期的采收测定,结合1 a生长期的试验数据,拟合1 a和2 a生长期的可蒸生物量预测模型,以期为企业和农户经营提供技术参考。

1 材料与方法

1.1 试验林概况

试验地位于梅州市平远县石正镇马山村公司原料基地林中,所处地点为东经115°50'1"、北纬24°28'28",为亚热带与中亚热带过渡的气候区,气候温和,热量资源丰富,雨量充沛,一

月平均气温11.1℃,七月平均气温28.5℃,年平均温度19.3℃,年均相对湿度为77%,极端高温39℃,极端低温-4℃,年降雨量约1600 mm,年日照时数约1600 h,无霜期≥300 d^[12]。试验林2014年5月营建,2016年2月布置试验进行截顶采收,年底12月开展试验调查采收,2017年11月采后林龄1 a时再次试验调查采收,2019年11月采后林龄2 a时开展第4次试验采收。每次采收后均是按企业的经营技术进行施肥和抚育管护。

1.2 试验设计与调查方法

试验设置4个截顶高度,分别为A区(30 cm)、B区(60 cm)、C区(90 cm)、D区(120 cm)。每个截顶高度内又分3种下部枝条处理模式,分别是下部枝条全留(T1);下部枝条半截(T2);下部枝条全部截去(T3)。2016年12月和2017年11月调查全试验区1 a生长期数据,2019年11月选择ABCD各处理T1小区测定2 a生长期数据,首先测定树高(H)、胸径(D)、冠幅(C)和分枝数(B branch number)等生长指标,然后在树高120 cm处截顶采收,采下后截去主干和粗枝,称量细枝与叶片质量,得到可蒸生物量(DB distillable biomass)。

1.3 数据分析方法

1.3.1 数据处理 利用microsoft office(V2010)的Excel软件数据整理,并用SAS软件(V9.4)进行数据分析^[13]。为便于比较,本次分析选用试验林ABCD的T1小区2016年12月、2017年11月和2019年11月3个年度采收数据,分析中对于分枝多的单株,将其换算为单一胸径,换算方法如下:

$$S_{\text{总}} = S_1 + S_2 + S_3 + \dots + S_n = \pi \times [(D_1/2)^2 + (D_2/2)^2 + (D_3/2)^2 + \dots + (D_n/2)^2] \dots\dots\dots (1)$$

$$D_{\text{总}} = 2\sqrt{S_{\text{总}} \div \pi} \dots\dots\dots (2)$$

式中 $S_{\text{总}}$ 、 S_n 、 D_n 和 $D_{\text{总}}$ 表示各个分枝的总胸径面积、各分枝胸径面积、胸径和换算后单株总胸径。

另外参照李开祥^[14]等方法,计算出 $DD(D^2)$ 、 $HD(H \times D)$ 及 $HDD(H \times D^2)$ 3个指标,然后以另外5个指标一起开展分析。

1.3.2 模型拟合与评价 对生长指标与可蒸生物量进行相关分析,以相关显著且中等强度相关的指标,利用线性及指数、对数、幂和 Logistic 函数等非线性方程开展龙脑型阴香单株可蒸

生物量模型拟合。以决定系数 (R^2)、均方根误差 (RMSE)、赤池信息量 (AIC)、贝叶斯信息量 (BIC) 以及模型 F 检验方差分析中的 F 值、 P 值对模型进行评价^[15-16]。

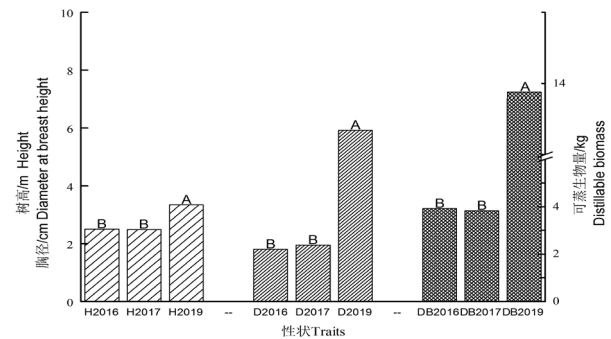
1.3.3 模型应用与验证 采用同期调查的 B 区的 T2 小区对最优的线性和非线性模型进行验证估算, 用预测的平均可蒸生物量 (MDB, Mean distillable biomass)、总可蒸生物量 (TDB, Total distillable biomass) 与实测值计算出相对误差 (RE)、平均绝对误差 (MAE)、均方误差 (MSE) 和均方根误差 (RMSE) 来检验模型预测效果。

2 结果与分析

2.1 方差分析与多重比较

对 2019 年调查的树高、地径、冠幅、分枝数和可蒸生物量 5 个指标进行方差分析, 结果表明 5 个性状在区组间均达显著水平 ($P<0.01$), 各性状 F 值分别是树高 (70.37)、地径 (43.61)、冠幅 (11.12)、分枝数 (6.7) 和可蒸生物量 (29.81), 说明不同的截顶高度处理对后面的生长仍存在影响。各小区间多重比较显示, 树高、胸径和可蒸生物量表现均呈 D (截顶 H120 cm) > C (H90 cm) > B (H60 cm) > A (H30 cm) 顺序排列, 再次验证在 120 cm 高度截顶效果最明显。以 2016、2017 和 2019 3 个年度相同小区进行方差分析及多重比较, 结果表明, 2019 的与 2016、2017 年在树高 ($F=63.78$)、胸径 ($F=275.72$) 及可蒸生物量 ($F=92.67$) 均达到极显著差异 ($P<0.01$), 多重比较如图 1。由图 1 可知, 两次 1 a 生长期的树高、胸径生长量相当, 可蒸生物量也保持平稳, 2 a 生长期其树高、胸径分别比 1 a 增长 33.60% 和 204.10% 以上, 而可蒸生物量则增产达 330.22%, 增长显著。按保存密度 $1.36 \text{ m} \times 1.52 \text{ m}$ ^[14] 估计, 每 667 m^2 可采收可蒸生物量为 4.482 t, 按企业 1 200 元/t 收购价计, 2 a 生长期每 667 m^2 收益为 5 378.40 元, 而 1 年生长期收益则 1 628.73 元。另外龙脑型阴香种植实行矮林经营, 从冠幅生长数据来看, 2016、2017 和 2019 的冠幅分别是 1.50、1.36 和 1.66 m, 可见 1 a 生长期矮林基本上可加速恢复实现郁闭, 第 2 年的生长期冠幅增幅不明显, 增加仅 16~30 cm, 林木单株间开始光照竞争, 促使林木高生长加剧, 林木出现分化, 如果延长生长期至第 3 年采收, 剧烈的竞争可能导致死株以及下部阳光不足而整枝或大

量落叶, 不利于可蒸生物量的最大化和长期经营的实现, 因而建议企业和农户可以分片经营、隔年采收, 可以大大提高经济效益。



注: 不同字母表示在 0.01 水平上差异显著。Note: different letter indicates a significant difference at 0.01 level.

图 1 2016 年、2017 年和 2019 年 3 个年度龙脑型阴香树高 (H)、胸径 (D) 和可蒸生物量 (DB) 多重比较

Fig.1 Multiple comparisons of tree height (H), DBH (D) and distillable biomass (DB) in 2016, 2017 and 2019

2.2 相关分析

8 个指标相关分析结果见表 1, 由表 1 可知, 2019 年可蒸生物量与 HD、D、HDD、DD 和 H 呈显著 ($P<0.01$) 正相关关系 ($0.691 \leq r \leq 0.795$), 其余指标呈弱的正相关关系, 因此可以选择这 5 个指标作为模型拟合指标。2017 年可蒸生物量除与分枝数呈弱的正相关外, 与 H、D、C、DD、HD 和 HDD 6 个指标呈显著 ($P<0.01$) 正相关 ($0.683 \leq r \leq 0.818$), 因此可以选择这 6 个指标进行模型拟合。

2.3 单株可蒸生物量线性模型拟合

2.3.1 线性模型拟合 利用全模型法 (CP), 选出最优自变量组合。对 2019 年数据利用与可蒸生物量相关性较高的 5 个指标, 得到 F 检验为有效 ($P<0.01$) 的且决定系数在 0.87 以上的 3 个线性模型。可能由于测定误差的原因, 模型拟合总体不是特别理想, 决定系数由高至低在前 8 名的线性方程决定系数在 0.478~0.886 之间。对 2017 年数据利用同样的方法, 得到 F 检验为有效 ($P<0.01$) 的且决定系数在 0.870 以上的 3 个线性模型。6 个模型按决定系数 (R^2) 由高至低排列如表 2。比较各模型的 R^2 及 RMSE, 以 $\text{DB}=0.625H+0.076HDD$ 和 $\text{DB}=-1.646H-2.734D+4.134C+1.252HD$ 分别为 2 a 和 1 a 生长期的最佳线性模型。

2.3.2 非线性模型拟合 利用与可蒸生物量相关性较高的指标分别拟合二次项、指数、幂、对数和 Logistic 五种函数模型, 并得到 R^2 、RMSE、 F

表 1 两个年度生长性状间相关分析
Tabel 1 Correlation coefficient of growth traits in two years

相关系数 Correlation coefficient	<i>H</i>	<i>D</i>	<i>C</i>	DB	<i>DD</i>	<i>HD</i>	<i>HDD</i>	<i>D*DB</i>
<i>H</i>		0.712 <0.000 1	0.751 <0.000 1	0.266 0.0119	0.626 0.271	0.856 <0.000 1	0.715 <0.000 1	0.737 <0.000 1
<i>D</i>	0.812 <0.000 1		0.673 <0.000 1	0.140 0.191 0	0.977 <0.001	0.961 <0.000 1	0.959 <0.000 1	0.698 <0.000 1
<i>C</i>	0.480 <0.000 1	0.521 <0.000 1		0.298 0.004 5	0.598 <0.001	0.724 <0.000 1	0.622 <0.000 1	0.818 <0.000 1
DB	0.144 0.140	0.441 <0.000 1	0.274 0.005		0.120 0.263 3	0.194 0.068 4	0.156 0.144 4	0.346 0.000 9
<i>DD</i>	0.734 <0.000 1	0.978 <0.000 1	0.492 <0.000 1	0.480 <0.000 1		0.934 <0.000 1	0.983 <0.000 1	0.652 <0.000 1
<i>HD</i>	0.895 <0.000 1	0.973 <0.000 1	0.512 <0.000 1	0.357 0.000	0.954 <0.000 1		0.966 <0.000 1	0.756 <0.000 1
<i>HDD</i>	0.783 <0.000 1	0.961 <0.000 1	0.486 <0.000 1	0.427 <0.000 1	0.987 <0.000 1	0.973 <0.000 1		0.683 <0.000 1
<i>D*DB</i>	0.691 <0.000 1	0.784 <0.000 1	0.310 0.001	0.108 0.271	0.771 <0.000 1	0.795 <0.000 1	0.776 <0.000 1	

注：上三角为 2017 年 11 月各性状相关系数，下三角为 2019 年 11 月相关系数。单元格内上部数字为相关系数，下部为显著性检验。

Note: the upper triangle is correlation coefficient of each trait in November 2017, and the lower triangle is correlation coefficient of each trait in November 2019, the upper number in the cell is correlation coefficient, and the lower number is significance test.

表 2 单株可蒸生物量线性模型拟合
Table 2 Fitting of linear model for steam biomass of single plant

林龄 Stand age	生长期/a Growth period	线性模型 Linear model	评价指标 Evaluating indicator					
			R^2	RMSE	AIC	BIC	F 值 F value	$Pr>F$
5.5	2	DB=0.625H+0.076HDD	0.886	6.158	434.606	436.775	456.11	<0.01
		DB=0.086HDD	0.883	6.224	436.166	438.191	889.42	<0.01
		DB=0.337DD	0.879	6.325	439.981	441.942	857.63	<0.01
3.5	1	DB=-1.646H-2.734D+4.134C+1.252HD	0.904	1.68	33.483	35.812	199.42	<0.01
		DB=-4.778D+3.587C+0.804DD+0.673HD	0.895	1.428	39.204	41.478	181.369	<0.01
		DB=-3.161D+1.881C+1.218HD	0.879	1.524	44.623	46.456	484.155	<0.01

及 P 值。2019 和 2017 数据得到 30 和 25 个方程。通过 F 检验 ($P<0.01$) 的有效模型, 2019 数据拟合模型的 R^2 位于 0.410~0.885 之间, 而 2017 数据拟合的模型 R^2 位于 0.116~0.845 之间。根据决定系数排序, 列出 2019 和 2017 两个年度决定系数最高的 2 个非线性模型, 按 R^2 由高至低排列如表 3。比较各模型的 R^2 及 RMSE, 非线性模型均以二次方程 DB=0.091HDD+0.000 017 8HDD² 和 DB=-1.356H+0.907H² 分别为 2 a 和 1 a 生长期的最佳非线性模型。

2.4 最优模型应用与验证

分别以 2017 年 11 月和 2019 年 11 月同期调查的 B 区 T2 小区未参与建模的数据对两个模型进行应用验证, 验证与估算结果如表 4。由表 4

可知, 2019 数据预测精度较高, 线性和非线性模型的相对误差分别为 16.680% 和 14.107%, 而 2017 数据非线性模型预测精度相对较差, 相对误差为 20.543%, 但线性模型相对误差极小, 为 2.036%。

3 结论与讨论

本研究利用生长量因子, 采用线性和非线性方法对龙脑型阴香可蒸生物量进行模型拟合。结果显示 2 a 生长期采收比 1 a 生长期可获得更高的生长量, 2 a 生长期的树高、胸径分别 1 a 增长 33.60% 和 204.10% 以上, 而可蒸生物量则增产达 330.22%, 增长极为显著, 因而建议企业和农户可以分片经营、隔年采收, 可以成倍提高采收量, 进而提高收益。其增产原因除了生长期长外, 地下

表 3 单株可蒸生物量非线性模型拟合
Table 3 Fitting of nonlinear model for steam biomass of single plant

林龄 Stand age	生长期 /a Growth period	非线性模型 Non-linear model	评价指标 Evaluating indicator			
			R^2	RMSE	F 值 F valus	$Pr>F$
5.5	2	$DB=0.091HDD+0.000\ 017\ 8HDD^2$	0.885	6.225	445.075	<0.01
		$DB=-4.496H+2.438H^2$	0.791	8.342	221.929	<0.01
3.5	1	$DB=-1.356H+0.907H^2$	0.838	1.752	225.529	<0.01
		$DB=0.586HD+0.004HD^2$	0.845	1.716	236.897	<0.01

表 4 最优模型验证与估计应用
Table 4 Optimal model validation and application

林龄 Stand age	生长期 /a Growth period	实测值 /kg Measured value		模型 Model	模型验证参数 Model validation parameters					
		MDB	TDB		MDB/kg	TDB/kg	RE/%	MAE	MSE	RMSE
5.5	2	8.575	248.670	$DB=0.625H+0.076HDD$	10.005	290.149	16.680	2.666	0.378	0.615
				$DB=0.091HDD+0.000\ 017\ 8HDD^2$	9.784	283.750	14.107	2.784	0.478	0.691
3.5	1	1.395	41.840	$DB=-1.646H-2.734D+4.134C+1.252HD$	1.423	42.692	2.036	0.120	0.623	0.789
				$DB=-1.356H+0.907H^2$	1.681	50.435	20.543	0.286	0.727	0.853

根系随着树龄增长而增长，从而可充分保障地上部分生长所需的水分和微量元素，也可能是一个重要原因。相关分析显示可蒸生物量与树高、胸径等生长量指标呈显著正相关，利用这几个指标作线性和非线性方程拟合，用于龙脑型阴香可蒸生物量预测，得到 2 a 生长期的最佳线性模型是 $DB=0.625H+0.076HDD$ ，决定系数为 0.886，实际应用相对误为 16.680%，最佳非线性方程是 $DB=0.091HDD+0.000\ 017\ 8HDD^2$ ，决定系数是 0.885；实际应用相对误为 14.107%，而 1 a 生长期最佳线性模型为 $DB=-1.646H-2.734D+4.134C+1.252HD$ ，决定系数是 0.904，实际应用相对误为 2.036%，最佳非线性模型为 $DB=-1.356H+0.907H^2$ ，决定系数是 0.838，实际应用相对误为 20.543%。预测模型的构建后，企业可调查一定数量的样株的树高和胸径，计算平均值后代入模型得到单株预测的可蒸生物量，根据保留密度得到单位面积可蒸生物量，再根据蒸馏车间每月蒸馏加工所消耗原料量，合理确定采收面积，以免出现超量采收，导致原料贮藏时间过长造成精油减产，或因加工不完而导致原料及人工成本损失的现象，有效解决了龙脑型阴香矮林经营的产量估算及合理采收面积的确定问题。

参考文献

[1] 黄浩, 连辉明, 何波祥, 等. 龙脑型阴香叶片精油及其主要化学成分含量动态变化研究[J]. 林业与环境科学,

2019, 35(6): 22-26.
[2] 董丽芬, 雷振民, 黄琳, 等. 可见半面树冠法预测油松种子产量的研究[J]. 西北林学院学报, 1997(S1): 111-114.
[3] 周志翔, 宋丛文, 冯春莲. 杉木种子园种子产量预测预报模型研究[J]. 林业科学, 1999(1): 124-127.
[4] 赵绍文, 元昌安, 何顺育, 等. 肉桂经济产量分析[J]. 经济林研究, 1997(1): 1-4; 61.
[5] 李玲玲, 李凤日, 贾炜玮, 等. 红松人工林林木果实产量预估模型[J]. 植物研究, 2014, 34(3): 349-355.
[6] 谢哲根, 储开江, 韩国康, 等. 古香榧树青果产量模型研究[J]. 浙江林业科技, 2017, 37(1): 79-86.
[7] 陈兵兵. 苧麻产量模型的优化研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2013.
[8] 王瑞辉, 曾桂海, 罗丹杰. 柑桔产量采前预测模型研究[J]. 中国南方果树, 2004(5): 15-18.
[9] 黄修麟. 厚朴人工林生物产量模型的研究[J]. 经济林研究, 1996(S1): 54-57.
[10] 邓玉林, 李流恩, 陈继红. 核桃产量预测模型及其应用[J]. 四川农业大学学报, 1996(2): 227-230.
[11] 戴晓勇, 张喜. 光箨篌竹单竹产量模型的初步研究[J]. 竹子研究汇刊, 1995(4): 66-72.
[12] 吴先基, 陈一群, 陈杰连, 等. 龙脑型阴香截顶采收技术研究[J]. 亚热带植物科学, 2018, 47(4): 380-385.
[13] 黄少伟, 谢维辉. 实用SAS编程与林业试验数据分析[M]. 广州: 华南理工大学出版社, 2001: 101-140.
[14] 李开祥, 梁晓静, 黄开顺, 等. 肉桂树皮产量预估模型的研究[J]. 广西林业科学, 2016, 45(1): 57-61.
[15] 梁晓静, 梁文汇, 黄开顺, 等. 肉桂人工林生物量回归模型应用研究[J]. 中国农学通报, 2019, 35(35): 40-44.
[16] 覃世杰, 李况, 莫德祥, 等. 桂东南柳杉人工林生物量回归模型应用研究[J]. 南方农业学报, 2013, 44(2): 261-265.