

# 宁波石栎-木荷天然常绿阔叶混交林的树高-胸径模型\*

娄明华<sup>1</sup> 白超<sup>2</sup> 杨同辉<sup>1</sup>

(1. 宁波市农业科学研究院, 浙江宁波 315040; 2. 宁波市测绘和遥感技术研究院, 浙江宁波 315042)

**摘要** 天然常绿阔叶混交林是宁波地区的典型地带性植被类型, 研究该林分类型的树高-胸径关系模型, 可为宁波地区的天然常绿阔叶混交林的林木生长预测、森林经营管理、森林资源清查等提供理论参考。以宁波地区常见的石栎 *Lithocarpus glaber*-木荷 *Schima superba* 天然常绿阔叶混交林为研究对象, 选用 30 个常用的树高-胸径经验模型, 通过 5 个模型评价指标即调整决定系数 ( $Ra^2$ )、均方根误差 (RMSE)、平均绝对误差 (MAE)、相对平均绝对误差 (RMAE) 和 Akaike 信息准则 (AIC) 比较分析模型之间的拟合效果差异, 从而确定适宜的树高-胸径模型。结果表明, 除 M23 无法求解, 其余 29 个模型均可求解。29 个模型中, M09、M12 和 M26 在 5 个模型评价指标中表现优异, M09 和 M12 优于 M26, 说明 M09 和 M12 均为适宜的石栎-木荷天然常绿阔叶混交林树高-胸径模型。若优先考虑建模数据的拟合效果, 建议选用 M09,  $Ra^2=0.9141$ ; 若优先考虑检验数据的拟合效果, 建议选用 M12,  $Ra^2=0.9126$ 。

**关键词** 石栎; 木荷; 常绿阔叶混交林; 树高-胸径模型

中图分类号: S757.1 文献标志码: A 文章编号: 2096-2053 (2021) 04-0046-08

## Height-Diameter Models for *Lithocarpus glaber* - *Schima superba* Natural Evergreen Broad-leaved Mixed Forest in Ningbo

LOU Minghua<sup>1</sup> BAI Chao<sup>2</sup> YANG Tonghui<sup>1</sup>

(1. Ningbo Academy of Agricultural Sciences, Ningbo, Zhejiang 315040, China; 2. Ningbo Institute of Surveying and Mapping & Remote Sensing, Ningbo, Zhejiang 315042, China)

**Abstract** Natural evergreen broad-leaved mixed forests are typical zonal vegetation types in Ningbo. Height-diameter models for natural evergreen broad-leaved mixed forests may provide a theoretical basis for forest growth prediction, forest management, forest inventory, et al. 30 height-diameter empirical models were constructed for *Lithocarpus glaber* - *Schima superba* natural evergreen broad-leaved mixed forest in Ningbo. The differences of fitting effect were analyzed among 30 height-diameter empirical models to determinate the appropriate height-diameter models using five model evaluation indices, namely, adjusted coefficient of determination ( $Ra^2$ ), root mean square error (RMSE), mean absolute error (MAE), relative mean absolute error (RMAE) and Akaike information criterion (AIC). The results show that 29 models can be solved except for M23. The fitting effects of M09, M12 and M26 are better among 29 models using five model evaluation indices. Additionally, M09 and M12 are better than M26. M09 and M12 are the optimization models for *L. glaber* - *S. superba* natural evergreen broad-leaved mixed forest. Priority of calibration fitting effects, M09 is recommended,  $Ra^2=0.9141$ ; Priority of validation fitting effects, M12 is recommended,  $Ra^2=0.9126$ .

**Key words** *Lithocarpus glaber*; *Schima superba*; evergreen broad-leaved mixed forest; height-diameter model

\* 基金项目: 国家自然科学基金 (31800539), 宁波市科学技术局公益性计划项目 (2019C10084)。

第一作者: 娄明华 (1987—), 男, 助理研究员, 主要从事森林可持续经营研究, E-mail: mhlou1987@163.com。

通信作者: 杨同辉 (1978—), 男, 高级工程师, 主要从事森林生态研究, E-mail: heliosx@163.com。

天然常绿阔叶混交林是宁波地区的典型地带性植被类型，具有结构复杂、生产力高、生物多样性丰富等特性，也是我国亚热带地区代表性的植被类型。可见，研究天然常绿阔叶混交林对宁波区域生态环境、碳平衡维护等方面起着重要作用<sup>[1-2]</sup>。树高与胸径是林业调查中的基本因子，是衡量林分结构和质量的重要指标<sup>[3]</sup>。树高数据对描述林分生长变化极其重要，其中优势高能直接反映树种当前环境立地质量的好坏，而林分平均高是林分蓄积量与生物量计算中不可或缺的变量<sup>[4]</sup>。在实践中，树高数据的获取相较于胸径难度更大，往往受林分密集度影响，在过密的林分由于观测视野受限，树高测量通常存在较大误差，故而往往先测定少数林木的树高，建立树高 - 胸径关系模型，再以胸径估计剩余林木的树高<sup>[5-8]</sup>。因此，构建准确的树高 - 胸径关系模型有重要的实际意义<sup>[6,9-10]</sup>。

目前已有大量关于人工林和天然林树高 - 胸径关系模型的研究。其中，天然林的研究以针叶林或针阔混交林为主，如冯国红等<sup>[11]</sup>以东北小兴安岭天然林针阔混交林为对象研究不同树种的树高 - 胸径关系模型；李善尧<sup>[12]</sup>以内蒙古樟子松 *Pinus sylvestris* 天然林为对象研究树高 - 胸径模型；郭嘉等<sup>[13]</sup>以陕西秦岭林区松栎林为对象研

究树高 - 胸径模型；康波和寸永户<sup>[14]</sup>以云南 4 种天然针叶林为对象研究树高 - 胸径模型；王冬至等<sup>[15]</sup>以华北落叶松 *Larix principis-rupprechtii* 与白桦 *Betula platyphylla* 混交林为对象研究树高 - 胸径关系模型等。

然而，宁波地区的天然常绿阔叶混交林树高 - 胸径关系模型研究未见报道。鉴于此，本文以宁波地区常见的石栎 *Lithocarpus glaber* - 木荷 *Schima superba* 天然常绿阔叶混交林为研究对象，建立适宜的树高 - 胸径模型，以期为宁波地区的天然常绿阔叶混交林的林木生长预测、森林经营管理、森林资源清查提供理论参考。

## 1 材料与方 法

### 1.1 数据收集与统计

数据来源于宁波市 2019 年调查的两个石栎 - 木荷天然常绿阔叶混交林固定样地，样地大小均为 20 m × 20 m。样地内，对树高 ≥ 1.5 m 的林木进行每木调查，记录树种，测量胸径、树高、枝下高、林木坐标等特征因子。为建模需要，将一个样地作为建模数据，另一个样地作为检验数据。建模数据与检验数据的基本统计量见表 1。建模数据与检验数据的胸径与树高散点图，见图 1。

表 1 建模与检验数据统计量 (均值 ± 标准差)

Tab. 1 Summary statistics for calibration and validation data (mean ± standard deviation)

数据 Data	林分特征 Stand characteristics	特征值 Characteristic value
建模数据 Calibration data	株数 / (株 · hm <sup>-2</sup> ) Tree number	5 750
	胸径 / cm Diameter at breast height	7.8 ± 5.4 (0.5, 25.5)
	树高 / m Height	6.5 ± 3.8 (1.5, 13.8)
	树种组成 Species composition	3 石栎 3 木荷 2 甜槠 1 苦槠 1 其他树种 A
检验数据 Validation data	株数 / (株 · hm <sup>-2</sup> ) Tree number	3 325
	胸径 / cm Diameter at breast height	7.6 ± 4.0 (0.7, 16.7)
	树高 / m Height	6.7 ± 2.9 (1.5, 11.7)
	树种组成 Species composition	4 石栎 3 木荷 2 青冈 <i>Cyclobalanopsis glauca</i> 1 其他树种 B

注：小括号内的值表示范围，其他树种 A 包括青冈、马尾松 *Pinus massoniana*、山矾 *Symplocos sumuntia*、马银花 *Rhododendron ovatum*、浙江柿 *Diospyros japonica*、连蕊茶 *Camellia fraternal*，其他树种 B 包括白栎 *Quercus fabri*、米槠 *Castanopsis carlesii*、苦槠 *Castanopsis sclerophylla*、山梔子 *Gardenia jasminoides*、苦槠木 *Fraxinus insularis*、山矾、山合欢 *Albizia kalkora*、杨梅 *Myrica rubra*。

Notes: values in parentheses denote the scope, other species A include *Cyclobalanopsis glauca*, *Pinus massoniana*, *Symplocos sumuntia*, *Rhododendron ovatum*, *Diospyros japonica*, *Camellia fraternal*; other species B include *Quercus fabri*, *Castanopsis carlesii*, *Castanopsis sclerophylla*, *Gardenia jasminoides*, *Fraxinus insularis*, *Symplocos sumuntia*, *Albizia kalkora*, *Myrica rubra*.

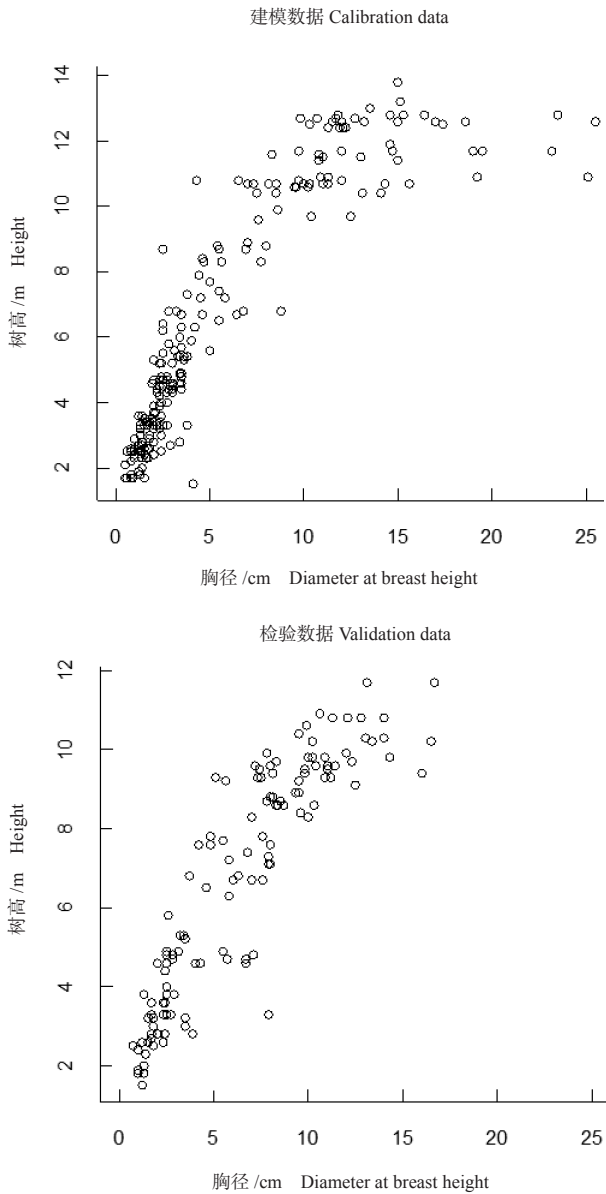


图 1 胸径与树高关系散点图

Fig. 1 Scatter diagram of height against diameter at breast height

1.2 建模方法

本文选用以下 30 个常用的树高 - 胸径经验模型<sup>[6,9]</sup> (表 2), 通过比较分析寻找适宜的石栎 - 木荷天然常绿阔叶混交林的树高 - 胸径模型, 并利用 R 统计语言<sup>[16]</sup> 进行建模及参数检验。

1.3 模型评价指标

本文选用了 5 个指标<sup>[17]</sup>, 分别为调整决定系数 (adjusted coefficient of determination,  $Ra^2$ )、均方根误差 (root mean square error, RMSE)、平均绝对误差 (mean absolute error, MAE)、相对平均绝对误差 (relative mean absolute error, RMAE) 和 Akaike 信息准则 (Akaike information criterion, AIC), 见

表 2 树高 - 胸径模型

Tab. 2 Height-diameter models

模型序号 Model No.	模型表达式 Model expression
M01	$H = a + bD$
M02	$H = (a + bD^{-1})^{-1}$
M03	$\log(H - 1.3) = a + b \log(D)$
M04	$\log(H - 1.3) = a + bD^{-1}$
M05	$H = a + b \log(D)$
M06	$H = a + bD + cD^2$
M07	$H = a + bD^{-1} + cD^2$
M08	$H = 1.3 + aD^b$
M09	$H = 1.3 + \exp(a + b / (D + 1))$
M10	$H = 1.3 + aD / (b + D)$
M11	$H = 1.3 + a(1 - \exp(-bD))$
M12	$H = 1.3 + D^2 / (a + bD)^2$
M13	$H = 1.3 + a \exp(b / D)$
M14	$H = 1.3 + 10^a D^b$
M15	$H = 1.3 + aD / (1 + D) + bD$
M16	$H = 1.3 + a(D / (1 + D))^b$
M17	$H = 1.3 + a / (1 + b \exp(-cD))$
M18	$H = 1.3 + a(1 - \exp(-bD))^c$
M19	$H = 1.3 + a(1 - \exp(-bD^c))$
M20	$H = 1.3 + a \exp(-b \exp(-cD))$
M21	$H = 1.3 + D^2 / (a + bD + cD^2)$
M22	$H = 1.3 + aD^{bD^{-c}}$
M23	$H = 1.3 + a^{\exp(b/(D+c))}$
M24	$H = 1.3 + a / (1 + b^{-1}D^{-c})$
M25	$H = 1.3 + a + b / (D + c)$
M26	$H = 1.3 + a \exp(-bD^{-c})$
M27	$H = 1.3 + a \exp(-\exp(-b(D - c)))$
M28	$H = 1.3 + \exp(a + bD^c)$
M29	$\log(H - 1.3) = a + bD^c$
M30	$H = a + bD + cD^2 + kD^3$

注:  $D$  表示胸径,  $H$  表示树高,  $a, b, c, k$  表示模型参数。  
Notes:  $D$  denotes diameter at the breast height,  $H$  denotes height,  $a, b, c$  and  $k$  denote model parameters.

表 3。其中,  $Ra^2$ 、RMSE、MAE、RMAE 和 AIC 用于建模评价, RMSE、MAE 和 RMAE 用于检验评价。

## 2 结果与分析

利用 R 统计语言求解 30 个模型, 发现 M23 无法求解, 其他 29 个模型均能求解。29 个模型的拟合效果和参数估计, 分别见表 4、表 5 和表 6。

建模数据的拟合效果分析: 由表 4 和表 5 可看出,  $Ra^2$  的平均值为 0.890 4, M19 具有最大  $Ra^2$  值为 0.921 7。 $Ra^2$  值小于 0.8 的有 2 个即 M07 和 M01, 其  $Ra^2$  值分别为 0.728 2 和 0.758 2。其中  $Ra^2$  值大于 0.91 的有 15 个模型, 该 15 个模型按  $Ra^2$  值由大到小排序, 其对应的模型为: M19、M20、M27、M18、M24、M17、M06、M21、M22、M09、M16、M12、M26、M28、M29。与此同时, 该 15 个模型的 AIC 值和建模数据的 RMSE 值由小到大排序的顺序, 均与其  $Ra^2$  值由大到小排序的顺序相同, AIC 值的范围为 679.139 9 至 965.276 8, 建模数据的 RMSE 值的范围为 1.050 0 至 1.955 9; 建模数据的 MAE 值, 其范围为 0.754 2 至 1.563 7, 由小到大排序的前 15 个模

型依次为: M20、M27、M19、M18、M06、M24、M17、M21、M22、M09、M16、M12、M26、M28、M29; 建模数据的 RMAE 值, 其范围为 0.138 1 至 0.265 7, 由小到大排序的前 15 个模型依次为: M20、M27、M06、M19、M18、M09、M12、M24、M17、M21、M11、M02、M10、M16、M22。

检验数据的拟合效果分析: 由表 4 和表 5 可看出, 检验数据的 RMSE 值, 其范围为 1.346 1 至 1.813 8, 由小到大排序的前 15 个模型依次为: M15、M03、M08、M14、M01、M10、M30、M11、M07、M02、M25、M12、M05、M09、M26; 检验数据的 MAE 值, 其范围为 1.040 5 至 1.415 1, 由小到大排序的前 15 个模型依次为: M03、M08、M14、M15、M01、M10、M02、M30、M25、M11、M12、M05、M09、M26、M28; 检验数据的 RMAE 值, 其范围为 0.143 0 至 0.438 2, 由小到大排序的前 15 个模型依次为: M07、M12、M09、M02、M25、M10、M03、M08、M14、M16、M26、M28、M29、M11、M24。

参数检验分析: 由表 6 可看出, M21 中参数

表 3 5 个模型评价指标

Tab. 3 Five model evaluation indices

模型评价指标 Model evaluation index	公式 Formula
$Ra^2$	$Ra^2 = 1 - (1 - R^2) \cdot \frac{n-1}{n-k-1}$ 其中, $R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}$
RMSE	$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n-k-1}}$
MAE	$MAE = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n  y_i - \hat{y}_i $
RMAE	$RMAE = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{ y_i - \hat{y}_i }{\hat{y}_i}$
AIC	$AIC = -\log L + 2k$

注:  $y_i$  表示观测值,  $\hat{y}_i$  表示估计值,  $\bar{y}$  表示平均观测值,  $n$  表示观测样本数,  $k$  表示模型参数个数,  $L$  表示似然函数值。

Notes:  $y_i$  are observed values,  $\hat{y}_i$  are estimated values,  $\bar{y}$  is mean observed value,  $n$  is observed sample quantity,  $k$  is the number of model parameters,  $L$  is the likelihood function value.

表 4 29 个模型的拟合效果  
Tab. 4 Fitting performance for 29 models

模型 Model	建模 Calibration					检验 Validation		
	$Ra^2$	RMSE	MAE	RMAE	AIC	RMSE	MAE	RMAE
M01	0.785 2	1.738 7	1.324 1	0.219 0	910.133 1	1.353 9	1.061 4	0.175 8
M02	0.908 0	1.137 7	0.843 7	0.156 1	715.047 2	1.501 7	1.134 6	0.163 1
M03	0.851 2	1.447 1	1.119 7	0.187 2	825.690 5	1.349 5	1.040 5	0.165 8
M04	0.909 9	1.126 1	0.833 9	0.180 4	710.328 0	1.670 9	1.240 8	0.175 2
M05	0.880 9	1.294 7	1.007 7	0.163 2	774.482 7	1.536 3	1.163 6	0.438 2
M06	0.916 8	1.082 2	0.770 3	0.139 9	693.014 7	1.608 9	1.240 8	0.169 2
M07	0.728 2	1.955 9	1.563 7	0.265 7	965.276 8	1.498 5	1.193 2	0.143 0
M08	0.851 2	1.447 1	1.119 7	0.187 2	825.690 5	1.349 5	1.040 5	0.165 8
M09	0.914 1	1.099 8	0.797 3	0.142 9	699.456 8	1.551 2	1.164 1	0.162 4
M10	0.895 1	1.215 0	0.921 2	0.156 9	745.284 6	1.437 3	1.113 2	0.165 5
M11	0.905 0	1.156 7	0.873 3	0.151 5	722.635 5	1.487 5	1.153 3	0.167 7
M12	0.912 6	1.108 9	0.807 1	0.143 7	703.242 3	1.535 0	1.155 0	0.162 2
M13	0.909 9	1.126 1	0.833 9	0.180 4	710.328 0	1.670 9	1.240 8	0.175 2
M14	0.851 2	1.447 1	1.119 7	0.187 2	825.690 5	1.349 5	1.040 5	0.165 8
M15	0.817 7	1.601 9	1.243 2	0.204 6	872.445 1	1.346 1	1.047 8	0.170 8
M16	0.913 9	1.101 0	0.806 5	0.157 0	699.967 3	1.610 6	1.198 6	0.166 1
M17	0.917 6	1.077 0	0.783 9	0.145 7	690.784 7	1.813 8	1.415 1	0.185 0
M18	0.920 6	1.057 4	0.760 5	0.142 1	682.333 4	1.678 6	1.269 8	0.170 4
M19	0.921 7	1.050 0	0.755 7	0.140 3	679.139 9	1.699 2	1.293 5	0.172 1
M20	0.921 5	1.051 3	0.754 2	0.138 1	679.686 5	1.735 6	1.330 0	0.175 0
M21	0.916 6	1.083 8	0.784 1	0.151 2	693.677 6	1.669 9	1.244 1	0.168 6
M22	0.916 0	1.087 3	0.792 2	0.157 4	695.172 0	1.657 6	1.235 6	0.169 1
M24	0.918 1	1.073 5	0.773 5	0.145 5	689.302 9	1.660 5	1.243 2	0.168 2
M25	0.908 1	1.137 1	0.844 0	0.167 2	715.789 1	1.530 4	1.147 7	0.165 3
M26	0.911 6	1.115 8	0.820 6	0.162 8	707.084 5	1.600 9	1.185 0	0.166 2
M27	0.921 5	1.051 3	0.754 2	0.138 1	679.686 5	1.735 6	1.330 0	0.175 0
M28	0.911 6	1.115 8	0.820 6	0.162 8	707.084 5	1.600 9	1.185 0	0.166 2
M29	0.911 6	1.115 8	0.820 6	0.162 8	707.084 5	1.600 9	1.185 0	0.166 2
M30	0.874 1	1.331 1	1.013 1	0.196 7	789.227 3	1.4785	1.142 2	0.178 0

b 的  $P$  值为 0.011 5, 介于 0.05 与 0.01 之间, 说明有显著统计学差异。除 M21, 其余 28 个模型的参数  $P$  值均小于 0.000 1, 说明有极显著统计学差异。

比较分析上述的建模数据的  $Ra^2$ 、RMSE、MAE、RMAE 和 AIC 和检验数据的 RMSE、MAE、RMAE 的前 15 个模型, 发现 M09、M12 和 M26 均出现在前 15 个模型中, 说明这 3 个模型是较优模型, 见表 7。

从表 7 可知, 建模数据中, M09 的 5 个评价指标最优, 其次为 M12, 第三为 M26; 检验数据中, M12 的 3 个评价指标最优, 其次为 M09, 第三为 M26。结合考虑建模数据和检验数据的评价指标, M09 和 M12 均为适宜的树高 - 胸径模型, M09 和 M12 的模型拟合曲线, 见图 2。若侧重考虑建模数据的拟合效果, 则推荐选用 M09; 若侧重考虑检验数据的拟合效果, 则推荐选用 M12。



表 5 29 个模型的模型评价指标值  
Tab. 5 Model evaluation for 29 models

数据 Data	模型评价指标 Model evaluation index	指标值 (均值 ± 标准差) Evaluation (mean ± standard deviation)
建模数据 Calibration data	$Ra^2$	0.890 4 ± 0.046 1 (0.728 2, 0.921 7)
	RMSE	1.221 8 ± 0.227 3 (1.050 0, 1.955 9)
	MAE	0.912 5 ± 0.200 0 (0.754 2, 1.563 7)
	RMAE	0.166 7 ± 0.028 7 (0.138 1, 0.265 7)
	AIC	741.888 5 ± 75.493 9 (679.139 9, 965.276 8)
检验数据 Validation data	RMSE	1.562 8 ± 0.131 3 (1.346 1, 1.813 8)
	MAE	1.187 4 ± 0.093 2 (1.040 5, 1.415 1)
	RMAE	0.177 8 ± 0.050 6 (0.143 0, 0.438 2)

注：小括号内的值表示范围。

Notes: values in parentheses denote the scope.

表 6 29 个模型参数估计  
Tab. 6 Parameter estimates for 29 models

模型 Model	参数 Parameter	估计值 Estimate	标准差 Std. Error	t 值 t value	P 值 P value
M01	a	2.945 8	0.166 4	17.705 2	0.000 0
	b	0.619 0	0.021 3	29.034 5	0.000 0
M02	a	0.054 6	0.001 7	33.070 5	0.000 0
	b	0.413 9	0.014 4	28.754 2	0.000 0
M03	a	0.275 4	0.022 2	12.420 1	0.000 0
	b	0.280 9	0.009 2	30.431 1	0.000 0
M04	a	1.136 9	0.008 2	138.654 5	0.000 0
	b	-1.628 9	0.051 2	-31.816 5	0.000 0
M05	a	1.430 7	0.148 5	9.631 7	0.000 0
	b	3.819 8	0.092 5	41.275 4	0.000 0
M06	a	1.122 3	0.141 1	7.951 7	0.000 0
	b	1.365 3	0.041 4	32.953 7	0.000 0
	c	-0.039 5	0.002 1	-19.014 1	0.000 0
M07	a	7.747 4	0.260 7	29.720 2	0.000 0
	b	-5.810 9	0.439 3	-13.226 2	0.000 0
	c	0.016 1	0.001 4	11.597 8	0.000 0
M08	a	1.885 3	0.096 3	19.586 8	0.000 0
	b	0.646 7	0.021 3	30.431 1	0.000 0
M09	a	2.739 8	0.020 3	134.662 8	0.000 0
	b	-5.634 9	0.159 0	-35.437 5	0.000 0
M10	a	19.767 3	0.982 5	20.120 4	0.000 0
	b	12.238 9	1.076 7	11.367 2	0.000 0
M11	a	13.182 1	0.445 1	29.613 3	0.000 0
	b	0.116 5	0.007 3	16.036 8	0.000 0
M12	a	-0.781 7	0.027 2	-28.738 5	0.000 0
	b	-0.251 0	0.003 3	-76.708 8	0.000 0
M13	a	13.705 7	0.258 8	52.965 8	0.000 0
	b	-3.750 7	0.117 9	-31.816 5	0.000 0
M14	a	0.275 4	0.022 2	12.420 2	0.000 0
	b	0.646 7	0.021 3	30.431 1	0.000 0

模型 Model	参数 Parameter	估计值 Estimate	标准差 Std. Error	<i>t</i> 值 <i>t</i> value	<i>P</i> 值 <i>P</i> value
M15	a	3.005 3	0.240 7	12.484 4	0.000 0
	b	0.529 7	0.023 7	22.388 9	0.000 0
M16	a	14.509 6	0.280 7	51.688 3	0.000 0
	b	4.601 5	0.135 5	33.956 1	0.000 0
M17	a	10.678 1	0.172 2	62.019 8	0.000 0
	b	9.821 3	0.883 5	11.115 9	0.000 0
	c	0.497 1	0.028 3	17.544 4	0.000 0
M18	a	11.380 0	0.283 5	40.146 8	0.000 0
	b	0.231 4	0.022 7	10.187 4	0.000 0
	c	1.629 4	0.133 7	12.188 8	0.000 0
M19	a	11.115 7	0.259 8	42.791 5	0.000 0
	b	0.088 0	0.006 5	13.549 9	0.000 0
	c	1.367 9	0.060 6	22.583 5	0.000 0
M20	a	11.005 9	0.204 5	53.813 1	0.000 0
	b	3.038 5	0.153 0	19.854 9	0.000 0
	c	0.325 2	0.019 6	16.603 4	0.000 0
M21	a	1.199 5	0.183 7	6.529 9	0.000 0
	b	0.170 2	0.066 8	2.546 5	0.011 5
	c	0.076 3	0.004 4	17.320 1	0.000 0
M22	a	0.579 8	0.079 1	7.334 4	0.000 0
	b	2.356 4	0.192 7	12.228 7	0.000 0
	c	0.288 3	0.014 9	19.376 4	0.000 0
M24	a	12.532 2	0.486 0	25.784 9	0.000 0
	b	0.067 9	0.006 0	11.236 3	0.000 0
	c	1.665 7	0.101 9	16.350 3	0.000 0
M25	a	16.494 7	0.747 4	22.068 6	0.000 0
	b	-122.911 2	19.016 0	-6.463 6	0.000 0
	c	6.770 4	0.898 8	7.532 5	0.000 0
M26	a	15.723 3	1.249 7	12.581 6	0.000 0
	b	3.408 8	0.143 5	23.747 0	0.000 0
	c	0.813 2	0.080 9	10.050 0	0.000 0
M27	a	11.005 9	0.204 5	53.812 9	0.000 0
	b	0.325 2	0.019 6	16.603 4	0.000 0
	c	3.417 3	0.112 2	30.459 3	0.000 0
M28	a	2.755 1	0.079 5	34.664 4	0.000 0
	b	-3.408 8	0.143 5	-23.746 8	0.000 0
	c	-0.813 2	0.080 9	-10.050 1	0.000 0
M29	a	1.196 5	0.034 5	34.664 4	0.000 0
	b	-1.480 4	0.062 3	-23.746 9	0.000 0
	c	-0.813 2	0.080 9	-10.050 1	0.000 0
M30	a	5.464 4	0.226 3	24.148 2	0.000 0
	b	-3.132 2	0.341 4	-9.174 2	0.000 0
	c	0.077 4	0.003 9	19.911 8	0.000 0
	k	-0.002 8	0.000 2	-16.252 0	0.000 0

表 7 3 个较优模型的拟合效果  
Tab. 7 Fitting performance for 3 better models

模型 Model	建模 Calibration				检验 Validation			
	$Ra^2$	RMSE	MAE	RMAE	AIC	RMSE	MAE	RMAE
M09	0.914 1	1.099 8	0.797 3	0.142 9	699.456 8	1.551 2	1.164 1	0.162 4
M12	0.912 6	1.108 9	0.807 1	0.143 7	703.242 3	1.535 0	1.155 0	0.162 2
M26	0.911 6	1.115 8	0.820 6	0.162 8	707.084 5	1.600 9	1.185 0	0.166 2

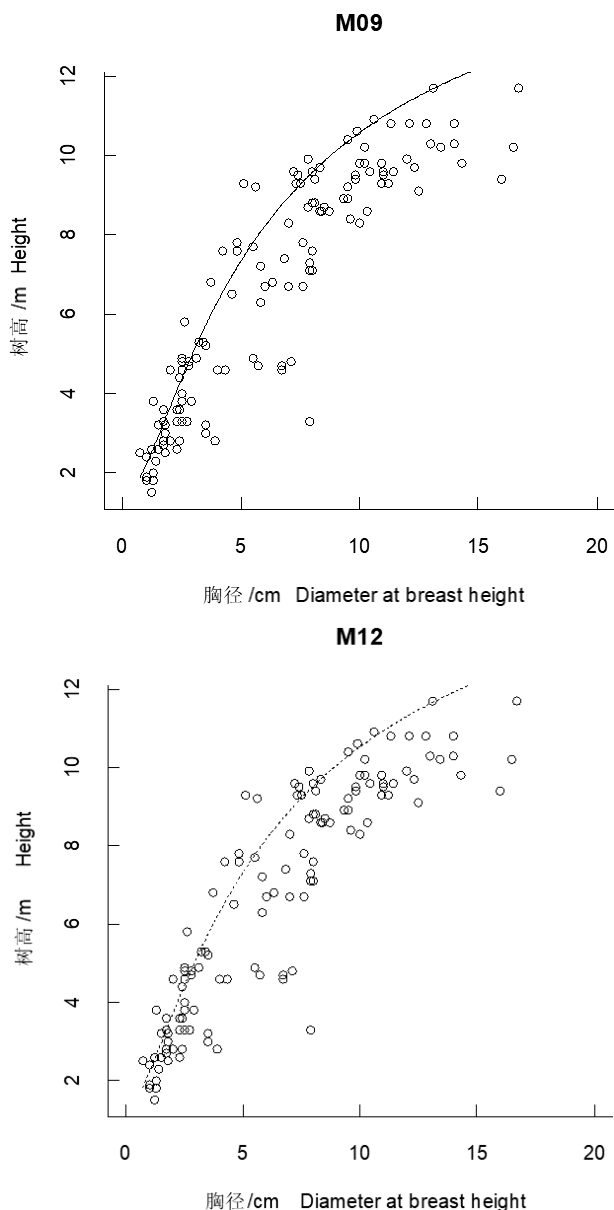


图 2 检验数据的模型拟合曲线

Fig. 2 Model fitting curve for validation data

### 3 结论与讨论

为选择适宜的石栎 - 木荷天然常绿阔叶混交林树高 - 胸径模型，本文选用 30 个常用的树高 - 胸

径经验模型，建立了 29 个模型（M23 无法求解），并利用 5 个模型评价指标比较分析了 29 个模型的拟合效果。综合考虑建模数据和检验数据的模型评价指标和参数检验，可得出以下结论：

（1）M09 和 M12 可作为适宜的石栎 - 木荷天然常绿阔叶混交林树高 - 胸径模型，公式如下：

$$M09: H = 1.3 + \exp(2.7398 - 5.6349 / (D + 1))$$

$$M12: H = 1.3 + D^2 / (-0.7817 - 0.2510D)^2$$

（2）若侧重考虑建模数据的拟合效果，则推荐选用 M09，其  $Ra^2=0.9141$ ；若侧重考虑检验数据的拟合效果，则推荐选用 M12，其  $Ra^2=0.9126$ 。

本文建立了适宜的石栎 - 木荷天然常绿阔叶混交林树高 - 胸径模型，可为后续研究相关的森林资源信息系统<sup>[18-19]</sup>、森林遥感分析<sup>[20-22]</sup>等方面提供基础理论模型。

卢军等<sup>[9]</sup>以长白山地区的云冷杉 *Picea asperata*、*Akjes fabri* 针阔混交林的幼树树高  $\geq 1.3$  m 且  $1.0 \text{ cm} \leq$  胸径  $< 5.0 \text{ cm}$  的林木研究对象，探索比较分析适宜的幼树树高 - 胸径模型，研究认为 M30 是最适宜的模型，这与本文结论不一致即 M09 和 M12 可作为适宜的石栎 - 木荷天然常绿阔叶混交林树高 - 胸径模型。分析不一致原因，可能是研究对象不同所致，本文研究对象为宁波地区的石栎 - 木荷天然常绿阔叶混交林，林木胸径范围为  $0.5 \sim 25.5 \text{ cm}$ ，进一步说明了模型适宜性可能与林分类型（树种）、林木胸径范围、研究地区（如气候、经纬度等地区差异）等因素有关，考虑这些因素的树高 - 胸径模型是下一步值得研究的问题。

由于建模样本数据有限，本文研究对象的树高 1.5 m 以上的林木，其胸径范围为  $0.5 \sim 25.5 \text{ cm}$ ，通过模型比较分析得出 M09 和 M12 可作为适宜宁波地区的石栎 - 木荷天然常绿阔叶混交林树高 - 胸径模型，说明 M09 与 M12 目前仅针对林木胸径范



围为0.5~25.5 cm的林木预测树高。因此,为增加石栎-木荷天然常绿阔叶混交林树高-胸径模型的林木胸径适用范围,可扩大建模样本的林木胸径范围,如胸径范围扩大至60、80 cm等,比较分析不同林木胸径范围下的树高-胸径模型,这是下一步值得研究的问题。

### 参考文献

- [1] 中国森林编辑委员会. 中国森林第三卷: 阔叶森林[M]. 北京: 中国林业出版社, 2000.
- [2] 唐青青, 黄永涛, 丁易, 等. 亚热带常绿落叶阔叶混交林植物功能性状的种间和种内变异[J]. 生物多样性, 2016, 24(3): 262-270.
- [3] 刘春云, 方文静, 蔡琼, 等. 中国落叶松林胸径-树高相关关系的探讨[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2017, 53(6): 1081-1088.
- [4] 张雄清, 张建国, 段爱国. 基于贝叶斯法估计杉木人工林树高生长模型[J]. 林业科学, 2014, 50(3): 69-75.
- [5] HUANG S M, WIENS D P, YANG Y Q, et al. Assessing the impacts of species composition, top height and density on individual tree height prediction of quaking aspen in boreal mixed woods[J]. Forest Ecology and Management, 2009, 258(7): 1235-1247.
- [6] LEI X D, PENG C H, WANG H Y, et al. Individual height-diameter models for young black spruce (*Picea mariana*) and jack pine (*Pinus banksiana*) plantations in New Brunswick, Canada[J]. The Forestry Chronicle, 2009, 85(1): 43-56.
- [7] 臧颢, 雷相东, 张会儒, 等. 红松树高-胸径的非线性混合效应模型研究[J]. 北京林业大学学报, 2016, 38(6): 8-16.
- [8] 樊伟, 许崇华, 崔珺, 等. 基于混合效应的大别山地区杉木树高-胸径模型比较[J]. 应用生态学报, 2017, 28(9): 2831-2839.
- [9] 卢军, 张会儒, 雷相东, 等. 长白山云冷杉针阔混交林幼树树高-胸径模型[J]. 北京林业大学学报, 2015, 37(11): 10-25.
- [10] 姚丹丹, 徐奇刚, 闫晓旺, 等. 基于贝叶斯方法的蒙古栎林单木树高-胸径模型[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2020, 44(1): 131-137.
- [11] 冯国红, 朱玉杰, 王景峰. 小兴安岭天然林不同树种的树高曲线模型[J]. 东北林业大学学报, 2016, 44(12): 6-9.
- [12] 李善尧. 樟子松天然林树高-胸径模型及胸径分布规律分析[J]. 林业科技, 2018, 43(2): 10-13.
- [13] 郭嘉, 孙帅超, 田相林, 等. 引入优势木树高建立的秦岭林区松栎林树高-胸径模型[J]. 东北林业大学学报, 2019, 47(11): 66-72.
- [14] 康波, 寸永户. 云南省4种天然针叶林树高胸径模型研究[J]. 农村实用技术, 2020(12): 138-142.
- [15] 王冬至, 刘红艳, 张冬燕, 等. 华北落叶松与白桦混交林树高与胸径关系研究[J]. 中南林业科技大学学报, 2020, 40(11): 31-38.
- [16] R Development Core Team. R: a language and environment for statistical computing. Vienna: R Foundation for Statistical Computing[EB/OL]. [2021-02-15]. <http://www.R-project.org>.
- [17] 姜明华, 张会儒, 雷相东, 等. 天然栎类阔叶混交林林分平均高与平均胸径关系模型[J]. 北京林业大学学报, 2020, 42(9): 37-50.
- [18] 魏安世, 李伟, 杨志刚, 等. 基于RS、GIS的森林资源年度监测信息系统设计与开发[J]. 广东林业科技, 2010, 26(1): 44-50.
- [19] 赖超, 方陆明, 李记, 等. 森林资源信息集成系统的设计与实现[J]. 浙江农林大学学报, 2015, 32(6): 890-896.
- [20] 李明泽, 郭鸿郡, 范文义, 等. 基于GWR的大兴安岭森林立地质量遥感分析[J]. 林业科学, 2017, 53(6): 56-66.
- [21] 刘沁茹, 孙睿. 森林生物量遥感降尺度研究[J]. 生态学报, 2019, 39(11): 3967-3977.
- [22] 周宇飞, 王振师, 钟映霞, 等. 基于无人机机载激光雷达的桉树蓄积量估测技术研究[J]. 林业与环境科学, 2021, 37(2): 7-11.