

DOI:10.12403/j.1001-1498.20220322

基于连清样地数据的全国杉木人工林 平均木树高-胸径模型

牛思圆^{1,2}, 刘鹏举^{1,2*}, 雷相东^{1,2}, 任 怡³, 高 影^{1,2}

(1. 中国林业科学研究院资源信息研究所, 北京 100091; 2. 国家林业和草原局森林经营与生长模拟重点实验室, 北京 100091; 3. 国家林业和草原局调查规划设计院, 北京 100714)

摘要: [目的] 基于我国森林资源连续清查(简称“连清”)样地数据, 分省区研建全国杉木人工林平均木树高-胸径的最优基础模型, 以期为全国各省区杉木人工林的树高预测提供基础模型。[方法] 研究范围为杉木人工林分布的 15 个省份, 数据来自第六次、第七次连清样地数据的树高调查表, 总样本数为 23 239 个。选取 18 种基础生长方程作为候选模型, 分别拟合各省区杉木平均木树高与胸径的关系, 根据模型的决定系数 (R^2)、平均绝对误差 (MAE)、平均相对误差 (MRE)、均方根误差 (RMSE) 和平均预估误差 (MPE), 并结合模型残差分布图, 确定各省区最优模型, 同时采用 5 折法验证各省区最优模型的预测能力, 最终决定各省区最优树高-胸径模型。[结果] 15 个省区的杉木最优树高-胸径模型并不相同, 四川、云南、重庆、陕西、浙江、江西、湖南、广西的最优模型为模型 18 (Mitscherlich 方程), 江苏、安徽、河南和福建的最优模型为模型 16 (Hossfeld 方程), 广东、湖北、贵州的最优模型分别为模型 10 (双曲线方程)、模型 11 (Logistic 方程) 和模型 13 (Gompertz 方程), R^2 分布在 0.602~0.807 之间, MAE 分布在 0.94~1.53 m 之间, MRE 分布在 -2.93%~-4.72% 之间, RMSE 分布在 1.23~2.00 m 之间, MPE 分布在 0.50%~2.77% 之间。模型拟合效果较好, 满足精度要求, 且参数具有生物学意义, 可作为全国各省区杉木人工林平均木树高-胸径基础模型。[结论] 本研究构建全国杉木人工林分布的 15 个省区的最优树高-胸径基础模型, 能较好的模拟各省区的杉木平均木树高随胸径的变化规律, 可以作为全国各省区基本的杉木人工林平均木树高-胸径模型, 为各省区杉木人工林的树高预测提供依据。

关键词: 连清样地数据; 杉木; 树高-胸径模型

中图分类号: S757

文献标志码: A

文章编号: 1001-1498(2023)01-0117-07

杉木 (*Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook.) 是我国主要造林树种之一^[1-4], 关于杉木树高-胸径模型, 很多学者都开展过研究, 但多为小区域建模。沈子奕等^[5]以江西省青原山杉木人工林为研究区, 在基础模型上构建了混合效应模型, 结果表明, 加入地形因子的混合效应模型能够更好的拟合该地区树高-胸径关系。魏晓慧等^[6]利用福建省三明市将乐县国有林场的杉树人工林调查数据, 对 Richards 方程进行拟合, 得出 Richards 模型能

够提高拟合精度的结果。黄其城^[7]选择 4 个常用的相对树高曲线模型对福州市 8 个国有林场 60 片伐区的树高-胸径调查数据进行拟合, 最终确定 Richards 函数变形固定参数模型作为杉木相对树高曲线的最优模型。近年来, 在树高-胸径模型的构建中逐渐加入了如海拔、林分密度、土壤条件、立地条件等随机效应, 用混合模型的方法来提高模型的拟合精度^[8-12], 但是这些模型大多都基于林场等小区域建模, 在实际应用时需要重新求解随机效

收稿日期: 2022-06-20 修回日期: 2022-07-15

基金项目: 十四五国家重点研发计划课题 (2021YFD2200404)

* 通讯作者: 刘鹏举, 博士, 副研究员。主要研究方向: 地理信息系统技术与应用。电话: 13671140815, Email: liupengju@ifrit.ac.cn

应参数,限制了模型的应用。在某一地区建立的模型,难以推广到其他地区,并且仍有杉木非核心分布区树高-胸径模型缺失,因此建立大区域乃至全国大尺度杉木树高-胸径模型显得尤其重要。目前,大区域的杉木树高-胸径模型在我国的研究还较少,如覃阳平等^[13]选用 Richards 等 15 种树高-胸径模型作为候选模型,建立了云南省 5 个针叶树种的树高-胸径模型,其中杉木的最优模型为 Hossfeld 方程。李海奎等^[14]分别采用树高分级和未分级的方法,建立了杉木等 6 个我国主要树种的树高曲线模型,结果表明分级建模方法的精度显著优于未分级建模。

因此,为推进我国杉木大尺度区域建模方面的研究,本研究基于第六次、第七次全国森林资源连续清查固定样地数据,以全国 15 个省份的杉木人工林为研究对象,选用 18 种常见的生长模型作为候选模型,分别拟合杉木树高胸径的关系,分省区建立杉木人工林最优平均木树高-胸径模型。

1 数据来源与处理

1.1 研究区概况

杉木人工林主要分布于我国的 15 个省区,分别为江苏、安徽、河南、浙江、福建、江西、湖北、湖南、广东、广西、重庆、四川、陕西、贵州和云南,为了便于应用,本研究分省区建立杉木树高-胸径模型,但由于一些省份杉木样地数据过少,参考张英凯等^[15]杉木分布区分组的结果,对低于 100 个观测数据的省份进行合并处理。江苏省和安徽省均位于长江中下游平原,河南省的杉木样地分布于该省东南部,紧邻安徽省杉木分布区,且 3 省的杉木分布区气候都属亚热带季风气候,因此将江苏、安徽和河南 3 省数据合并处理(以下简称苏徽豫),一同建模。陕西省杉木样地主要分布在该省秦岭南部地区,紧邻重庆市北部的杉木样地,因此将陕西省数据与重庆市数据合并处理(以下简称渝陕),其余各省区单独处理。

1.2 数据来源

所用数据来自于第六次、第七次一类清查杉木人工林固定样地数据的树高调查表,每个固定样地选取 3~5 株胸径接近样地平均胸径的树木测定其树高,剔除不完整的样本,最终总样本数为 23 239 个平均木单株树高-胸径数据。详细的数据统计量如表 1 所示。

表 1 杉木树高-胸径统计量

Table 1 Summary statistics for diameter at breast height (D) and tree height(H) of *Cunninghamia lanceolata*

省区 Provincial area	样本数 Number of trees	变量 Variable	平均值 Mean	标准差 SD	最小值 Min.	最大值 Max.
苏徽豫	4 230	D	10.0	2.5	5.0	22.7
		H	7.4	2.0	2.5	15.4
浙江	3 712	D	10.8	3.3	5.0	28.0
		H	7.1	2.2	2.3	19.4
福建	4 962	D	11.9	3.8	5.0	30.0
		H	9.0	3.1	1.3	21.6
江西	2 901	D	10.3	2.9	5.0	26.0
		H	7.4	2.3	1.4	17.8
湖北	188	D	14.0	5.6	5.2	33.2
		H	11.1	4.3	3.8	21.0
湖南	3 591	D	11.4	3.4	5.0	27.5
		H	8.5	2.5	2.3	21.0
广东	1 308	D	10.7	3.5	5.0	29.7
		H	8.0	2.6	2.2	17.1
广西	192	D	12.5	3.6	5.2	22.5
		H	10.3	3.3	4.0	19.3
四川	258	D	12.1	3.8	5.3	26.7
		H	9.4	3.1	3.2	21.6
贵州	815	D	12.0	3.9	5.0	29.7
		H	8.7	3.0	2.9	23.0
云南	596	D	12.1	4.7	5.1	34.7
		H	8.6	3.3	2.8	19.3
渝陕	486	D	12.2	3.5	5.8	26.5
		H	9.4	2.9	2.7	19.0

2 研究方法

2.1 建模方法

根据前人的研究经验^[14,16-18],采用常见的 18 个线性和非线性模型作为候选模型来拟合杉木的树高-胸径关系,探讨杉木各省区最适宜的树高曲线形式,候选树高-胸径模型的具体表达式如表 2 所示。

2.2 模型评价及检验

模型的评价主要利用决定系数 (R^2)、平均绝对误差 (MAE)、平均相对误差 (MRE)、均方根误差 (RMSE) 和平均预估误差 (MPE) 5 种评

表 2 18 种候选的树高-胸径模型

Table 2 Eighteen kinds of height-diameter curve model for candidate

模型序号 Models No.	模型类型 Model types	参数个数 Number of parameters	方程名称 Equation name	模型表达式 Height-diameter function
1				$H = a + b \log D$
2	线性模型	2		$H = \frac{1}{a + bD^{-1}}$
3				$H = a + bD + cD^2$
4		幂函数		$H = 1.3 + aD^b$
5			Wykoff	$H = 1.3 + e^{a + \frac{b}{D+1}}$
6	非线性模型	2	Bates 方程	$H = 1.3 + \frac{aD}{b+D}$
7			Schumacher	$H = 1.3 + ae^{\frac{b}{D}}$
8		双曲线	$H = 1.3 + a\left(\frac{D}{1+D}\right)^b$	
9		Richard	$H = 1.3 + a\left(1 - e^{-bD}\right)^c$	
10		Weibull	$H = 1.3 + a\left(1 - e^{-bD^c}\right)$	
11		Logistic	$H = 1.3 + \frac{a}{1 + be^{-cD}}$	
12		Korf	$H = 1.3 + ae^{-\frac{b}{D^c}}$	
13		Gompertz	$H = 1.3 + ae^{-be^{-cD}}$	
14		Hossfeld	$H = 1.3 + \frac{a}{1 + b^{-1}D^{-c}}$	
15		唐守正树高曲线方程		$H = 1.3 + a + \frac{b}{D+c}$
16	Mitscherlich		$H = 1.3 + a\left(1 - be^{-cD}\right)$	
17	Ratkowsky		$H = 1.3 + ae^{\frac{b}{D+c}}$	
18	柯列尔		$H = 1.3 + aD^b e^{-cD}$	

注: H 为树高值 (单位: m), D 为胸径 (单位: cm); a, b, c 为参数。
Notes: H is tree height (unit: m), D is diameter at breast height (unit: cm); a, b, c are parameters.

价指标, 分析残差分布图, 并考虑模型各参数的生物学意义以及参数的取值范围是否合理, 以此来确定各省区拟合效果最优的模型。 R^2 的值越接近 1, MAE 、 MRE 、 $RMSE$ 和 MPE 的值越小, 说明该模型拟合精度越高^[6,19]。

在确定各省区最优模型后, 模型验证部分采用 5 折交叉验证法, 具体步骤为: 首先将全部数据平均分成 5 份, 每次从 5 份数据中拿出 4 份用来建模, 剩下的 1 份作为验证数据, 重复进行 5 次, 共建模 5 次得到 5 个子模型, 应用 5 个子模型的交叉检验估计值计算各误差指标, 依据 MAE 、 MRE 、 $RMSE$ 和 MPE 越小越好的原则, 来评价选择的各省区最优模型的预测能力。

3 结果与分析

3.1 最优模型的筛选

最优模型的选取遵循模型拟合精度最高同时误差最小的规则, 综合权衡 R^2 , MAE , MRE 、 $RMSE$ 和 MPE 5 个指标, 以及模型参数的取值是否符合生物学规律, 得出各省区最优树高-胸径模型。各省区最优平均木树高-胸径模型建模结果和误差分析见表 3。可以看出, 各省区最优模型并不相同, 最优模型以模型 16 (Mitscherlich 方程) 为主, 各省区的拟合结果均具有较高的精度, 每个省区最优模型的 R^2 介于 0.602~0.807 之间, MAE 介于 0.94~1.53 m 之间, MRE 介于 -2.93%~-4.72%

表 3 各省区最优平均木树高-胸径模型的拟合结果

Table 3 Error analysis of the optimal average tree height - diameter model in each province

省区 Provincial area	最优模型编号 Best model No.	最优模型 Best model	评价指标 Evaluation indicators				
			R^2	MAE/m	$MRE/\%$	$RMSE/m$	$MPE/\%$
苏徽豫	14	Hossfeld	0.618	0.94	-2.93	1.23	0.50
浙江	16	Mitscherlich	0.646	1.01	-3.47	2.00	0.61
福建	14	Hossfeld	0.712	1.29	-4.00	1.69	0.52
江西	16	Mitscherlich	0.657	1.05	-3.47	1.37	0.67
湖北	11	Logistic	0.807	1.53	-3.33	1.89	2.49
湖南	16	Mitscherlich	0.619	1.18	-3.27	1.54	0.59
广东	8	双曲线	0.602	1.29	-4.38	1.66	1.13
广西	16	Mitscherlich	0.638	1.50	-3.70	1.99	2.77
四川	16	Mitscherlich	0.704	1.28	-3.03	1.68	2.20
贵州	13	Gompertz	0.641	1.37	-4.42	1.81	1.43
云南	16	Mitscherlich	0.753	1.22	-3.48	1.64	1.54
渝陕	16	Mitscherlich	0.611	1.44	-4.72	1.85	1.76

之间, $RMSE$ 介于 1.23~2.00 m 之间, MPE 介于 0.50%~2.77% 之间。江苏省、安徽省和河南省的 MAE 最小, 各省的 MRE 均小于 $\pm 5\%$, $RMSE$ 均小于 2.00 m, MPE 均小于 3%。其中湖北省最优模型拟合结果精度最高, 最优模型为模型 11 (Logistic 方程), R^2 达到 0.807, MAE , MRE , $RMSE$ 和 MPE 分别为 1.53 m, -3.33%, 1.89 m, 2.49%; 广东省最优模型的拟合结果精度最低,

R^2 为 0.602, MAE , MRE , $RMSE$ 和 MPE 分别为 1.29 m, -4.38%, 1.66 m, 1.13%。

15 个省区最优模型的树高预测值-残差的分布如图 1 所示, 残差点较为平均地落在残差值为 0 的标准线的上下两端, 大部分都分布在 ± 4 的残差值之内, 也有少数残差值较大的样本, 但并无明显的异质性, 表明模型的拟合效果较好, 能够应用于实际的拟合预测。

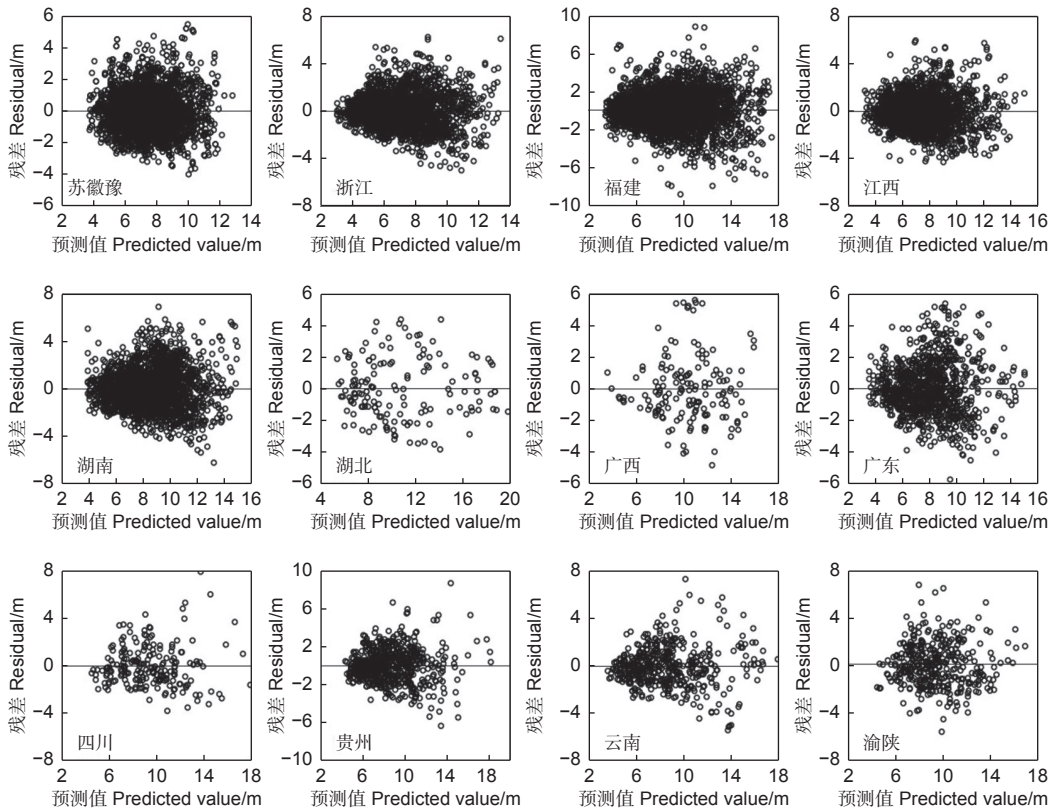


图 1 15 个省区杉木最优生长模型预测值的残差分布

Fig. 1 Residual distribution of predicted values of optimal tree height curve models for *Cunninghamia lanceolata* in 15 provinces

3.2 模型的评价与验证结果

为检验模型的适用性, 采用 5 折交叉验证法对各省区 5 次建模的最优模型预测能力进行检验, 用 5 个子模型的交叉检验估计值计算相关误差指标, 得到各省区的误差精度指标以及建模结果见表 4。从表 4 可以看出, MAE 在 0.94~1.57 m 之间, MRE 在 -2.93%~ -4.65% 之间, $RMSE$ 在 1.23~2.00 m 之间, MPE 在 0.41%~2.77% 之间, 各省区最优模型的检验结果大体与建模数据的分析结果一致, 同时所有模型的 MRE 在 $\pm 5\%$ 以内, 满足精度要求, MAE 均在 2.00 m 以内, $RMSE$

均小于或等于 2.00 m, MPE 均小于 3%, 说明模型预测效果好, 所有模型的误差较小, 得出的 15 个省区的最优树高-胸径模型有较强的适用性, 可以在实际中应用。

4 讨论

树高-胸径模型是立地质量评价和反演复杂模型的基础。不同于以往的杉木小区域建模, 本研究建立了杉木人工林分布的各省区的大尺度的树高生长模型。小区域建模的研究范围一般为林场或区县, 数据量较少, 受环境差异影响较小, 虽然适用

表 4 各省区最优平均木树高-胸径模型及交叉验证结果

Table 4 Optimal average tree height - diameter model in each province and cross-validation results

省区 Provincial area	模型表达式 Model fitting results	评价指标 Evaluation indicators			
		MAE/m	MRE/%	RMSE/m	MPE/%
苏徽豫	$H = 1.3 + \frac{14.73}{1+0.009693^{-1}D^{-1.884}}$	0.94	-2.93	1.23	0.50
浙江	$H = 1.3 + 15.15(1 - 1.212e^{-0.06456D})$	1.02	-3.47	1.34	0.41
福建	$H = 1.3 + \frac{24.54}{1+0.006737^{-1}D^{-1.714}}$	1.29	-3.99	1.69	0.52
江西	$H = 1.3 + 19.18(1 - 1.175e^{-0.05423D})$	1.05	-3.46	1.37	0.67
湖北	$H = 1.3 + \frac{19.48}{1+10.31e^{-0.1696D}}$	1.57	-3.05	1.93	2.54
湖南	$H = 1.3 + 19.51(1 - 1.106e^{-0.05029D})$	1.18	-3.26	1.54	0.59
广东	$H = 1.3 + 20.23\left(\frac{D}{1+D}\right)^{11.89}$	1.29	-4.35	1.66	1.13
广西	$H = 1.3 + 21.12(1 - 1.248e^{-0.06419D})$	1.51	-3.49	2.00	2.77
四川	$H = 1.3 + 29.94(1 - 1.077e^{-0.03276D})$	1.29	-3.11	1.70	2.25
贵州	$H = 1.3 + 20.63e^{-2.908e^{-0.08703D}}$	1.37	-4.41	1.82	1.44
云南	$H = 1.3 + 20.83(1 - 1.190e^{-0.05208D})$	1.23	-3.47	1.65	1.55
渝陕	$H = 1.3 + 23.95(1 - 1.111e^{-0.04344D})$	1.45	-4.65	1.86	1.77

范围有限, 但模型精度相对较高, R^2 通常在 0.8 以上^[20-23]。大尺度建模研究区域一般在整个省乃至全国范围内, 所用数据量较大, 适用范围广泛, 但省内或全国范围内各地环境存在差异, 因此建模精度相对较低, R^2 通常分布在 0.6~0.8 之间^[14,18,24]。本研究建立的各省区模型 R^2 在 0.610~0.834 之间, 平均值为 0.679, 建模精度在上述有关学者的大区域杉木建模精度范围内, 因此本研究建立的各省区的杉木树高-胸径生长模型可以预测不同径阶杉木的树高情况。本研究评价指标中, 平均相对误差 (MRE) 没有绝对值, 因此是存在正负的, 正值表示实测值大于预测值, 负值表示实测值小于预测值, 本研究 MRE 均为负数, 表明拟合模型的预测结果大部分都大于实测值, 但 MRE 整体均分布在 $\pm 5\%$ 之间, 结果符合精度要求。

交叉验证在模型检验中应用广泛, 操作简便, 本研究验证, 部分采用了 5 折交叉验证法, 充分利用样本数据, 能够更准确地检验选出的最优模型的预测能力, 但是交叉验证的折数是可以改变的, 不同折数不仅决定着建模和检验样本的多少, 还影响着误差指标的结果和计算的复杂程度, 本研究为便于计算, 选用了 5 折交叉验证法, 在未来的研究中, 可尝试 10 折交叉验证或其他验证方法进行验证。

本研究只考虑了杉木树高与胸径的关系, 只有

胸径一个自变量, 应用范围较广泛。同时, 杉木树高的生长情况还受多种因素影响, 如海拔高度、林分密度、气象条件、立地条件、经营目标、抚育间伐等^[25-27], 未来可以尝试建立包含多种林分因子 (包括因子间的相互作用) 的广义树高-胸径模型, 也许可以进一步提高模型的精度。由于本研究采用了两期数据, 存在相关性, 未采用混合效应模型, 因为混合效应模型需要进行新的随机参数估计, 会限制其在实际中的应用。另外, 本研究为便于模型的实际应用, 按行政区划进行建模, 未比较不同省份之间回归模型的差异显著性, 将来可在差异比较的基础上, 将差异不显著的省份合并建模, 尝试利用杉木产区划分进行建模。

5 结论

本研究基于第六次、第七次全国森林一类清查固定样地数据, 以杉木人工林分布的 15 个省区为研究区, 利用 18 种基础生长方程, 分别对各省区杉木平均木树高-胸径数据进行拟合, 然后根据模型的决定系数 (R^2)、平均绝对误差 (MAE)、平均相对误差 (MRE)、均方根误差 (RMSE) 和平均预估误差 (MPE) 这 5 个评价指标, 并参考树高预测值-残差分布图, 最终决定各省区适宜的模型, 建立了全国杉木各省区平均木树高-胸径关系模型。结果表明: 各省区的最优平均木树高-

胸径模型不尽相同, 模型的决定系数 R^2 在 0.602~0.807 之间, MAE 在 0.94~1.53 m 之间, MRE 在 -2.93%~-4.72% 之间, $RMSE$ 在 1.23~2.00 m 之间, MPE 在 0.50%~2.77% 之间。经检验, 模型拟合效果较好, 参数取值范围合理, 对于杉木树高-胸径的拟合效果较好, 可以作为全国各省区基本的最优杉木人工林平均木树高-胸径模型。

参考文献:

- [1] 李文毅, 朱开明. 论杉木林的目标经营[J]. 湖南林业科技, 2004, 31(6): 84-85, 89.
- [2] 袁晓红, 李际平. 杉木人工林南北坡向树高-胸径生长曲线研究[J]. 西北林学院学报, 2012, 27(2): 180-183.
- [3] 陈卫军, 李志辉, 王佩兰, 等. 杉木人工中龄林及近熟林地植物多样性分析[J]. 中南林业科技大学学报, 2014, 34(11): 37-40.
- [4] 李鑫, 陈先刚, 王艳霞, 等. 退耕还林杉木林土壤有机碳含量与理化性质敏感性分析[J]. 广东农业科学, 2015, 42(18): 49-55.
- [5] 沈子奕, 林杰. 基于哑变量回归和混合效应的杉树树高-胸径模型[J]. 济南大学学报(自然科学版), 2022, 36(1): 80-85.
- [6] 魏晓慧, 孙玉军, 马炜. 基于Richards方程的杉木树高生长模型[J]. 浙江农林大学学报, 2012, 29(5): 661-666.
- [7] 黄其城. 福州市杉木人工林相对树高曲线模型研究[J]. 安徽农学通报, 2017, 23(4): 58-59 + 65.
- [8] Lappi J. A longitudinal analysis of height/diameter curves[J]. Forest Science, 1997, 43(4): 555-570.
- [9] Lynch T B, Holley G A, Stevenson D J. A random-parameter height-dbh model for cherrybark oak[J]. Southern Journal Applied Forestry, 2005, 29(1): 22-26.
- [10] Trincado G, Vanderschaaf C L, Burkhart H E. Regional mixed-effects height-diameter models for loblolly pine (*Pinus taeda* L.) plantation[J]. European Journal Forest Research, 2007, 126(2): 253-262.
- [11] Dorado F C, Dieguez-Aranda U, Anta M B, et al. A generalized height-diameter model including random components for radiata pine plantations in northwestern Spain[J]. Forest Ecology and Management, 2006, 229(1-3): 202-213.
- [12] Mehtatalo L. A longitudinal height-diameter model for Norway spruce in Finland[J]. Canadian Journal Forest Research, 2004, 34(1): 131-140.
- [13] 覃阳平, 李华, 李永亮, 等. 云南省主要针叶树种树高曲线模型研建[J]. 林业资源管理, 2019(4): 46-51.
- [14] 李海奎, 法蕾. 基于分级的全国主要树种树高-胸径曲线模型[J]. 林业科学, 2011, 47(10): 83-90.
- [15] 张英凯, 刘鹏举, 刘长春, 等. 基于空间聚类的杉木生长预测方法[J]. 林业科学, 2019, 55(11): 137-144.
- [16] 王明亮, 李希菲. 非线性树高曲线模型的研究[J]. 林业科学研究, 2000, 13(1): 78-82.
- [17] 马武, 雷相东, 徐光, 等. 蒙古栎天然林单木生长模型的研究——II. 树高-胸径模型[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2015, 43(3): 83-90.
- [18] 袁慧, 杜超群, 李斌成, 等. 湖北省杉木生长模型研究[J]. 中国农学通报, 2019, 35(34): 50-58.
- [19] Song T T, Chen G S, Shi S Z, et al. Effects of soil warming on specific respiration rate and non-structural carbohydrate concentration in fine roots of Chinese fir seedlings[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018, 79(6): 1043-1051.
- [20] 梁瑞婷, 孙玉军, 李芸. 深度学习和传统方法模拟杉木树高-胸径模型比较[J]. 林业科学研究, 2021, 34(6): 65-72.
- [21] 王景弟, 杨蕊, 田育新. 枫香和杉木树高-胸径模型的拟合与评价[J]. 湖南林业科技, 2021, 48(4): 64-67.
- [22] 黎良财, 邓利, 关键超. 南方杉木人工林树高曲线模型研究[J]. 广东农业科学, 2011, 38(21): 169-171.
- [23] 马学欣, 侯建花, 易晓梅. 不同地貌杉木人工林胸径树高生长曲线研究[J]. 华东森林经理, 2019, 33(1): 71-74.
- [24] 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.
- [25] Scaranello M A, Alves L F, Vieira S A, et al. Height-diameter relationships of tropical Atlantic moist forest trees in south-eastern Brazil[J]. Scientia Agricola, 2012, 69(1): 26-37.
- [26] Thomas S C, Martin A R, Mycroft E E, et al. Tropical trees in a wind-exposed island ecosystem: height-diameter allometry and size at onset of maturity[J]. Journal of Ecology, 2015, 103(3): 594-605.
- [27] Banin L, Feldpausch T R, Phillips O L, et al. What controls tropical forest architecture? Testing environmental, structural and floristic drivers[J]. Global Ecology & Biogeography, 2012, 21(12): 1179-1190.

Average Tree Height-Diameter Models of *Cunninghamia lanceolata* in China Based on Continuous Forest Inventory Plot Data

NIU Si-yuan^{1,2}, LIU Peng-ju^{1,2}, LEI Xiang-dong^{1,2}, REN Yi³, GAO Ying^{1,2}

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

2. Key Laboratory of Forest Management and Growth Modelling, NFGA, Beijing 100091, China; 3. Academy of Forestry Inventory and Planning, NFGA, Beijing 100714, China)

Abstract: [Objective] Based on the national permanent forest plots, the basic average tree height - diameter models of *Cunninghamia lanceolata* was established by province for predicting tree height. [Methods] There was a total of 23 239 samples distributed in 15 provinces in this study. Eighteen candidate base growth equations were used to fit height-diameter relationship in each province. The coefficient of determination (R^2), mean absolute error (MAE), mean relative error (MRE) and root mean square error (RMSE) combining with the residual plots were used for model evaluation. In addition, the 5-fold method was used to test the optimal model in each province. [Result] The best height-diameter model in each province was not the same. The best model for Chinese fir in Sichuan, Yunnan, Chongqing, Shanxi, Zhejiang, Jiangxi, Hunan and Guangxi was the Mitscherlich equation. For Jiangsu, Anhui, Henan and Fujian, the best model was the Hossfeld equation. And for Guangdong, Hubei and Guizhou, the best model was hyperbolic equation, Logistic equation and Gompertz equation, respectively. The R^2 of the model ranged from 0.602 to 0.807, MAE ranged from 0.94 to 1.53 m, MRE ranged from -4.72 to -2.93%, RMSE ranged from 1.23 to 2.00 m, and MPE ranged from 0.50 to 2.77. These models performed well and had biological significance, which indicated that these models could be used as the basic height-diameter models of *C. lanceolata* plantation in each province [Conclusion] height-diameter models of *C. lanceolata* distributed in 15 provinces are developed in this study, which simulates well the average tree height of *C. lanceolata* in each province, and can be used as basic models of height-diameter for *C. lanceolata* plantation in each province in China.

Keywords: continuous inventory plot data; *Cunninghamia lanceolata*; height-diameter model

(责任编辑: 彭南轩)