

鄂西山区柳杉人工林全林整体模型研建与应用^{*}

孙拥康¹ 汤景明¹ 王 怡¹ 张宗立²
林 华³ 冯 骏⁴ 蒲元志³

(1. 湖北省林业科学研究院, 湖北 武汉 430075; 2. 利川市林业局, 湖北 利川 445400; 3. 恩施市国有大山顶林场, 湖北 恩施 445000; 4. 建始县国有长岭岗林场, 湖北 恩施 445300)

摘要 在对鄂西山区柳杉 *Cryptomeria fortunei* 人工林 60 块标准地立地分级基础上, 采用非线性度量误差联立方程组法建立了柳杉人工林全林整体模型, 保证了模型的相容性和无偏估计; 模型检验结果表明各林分因子的平均相对误差和相对均方误差均在 6.5% 以下, 模型参数稳定性及预测精度均较高; 同时, 应用全林整体模型可对不同初始条件的柳杉人工林林分生长进行模拟预测、定量间伐作业设计以及绘制不同立地条件的林分密度控制图。

关键词 全林整体模型; 柳杉人工林; 林分密度控制图; 鄂西山区

中图分类号: S791.31 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-2053 (2023) 01-0041-07

Research and Application of the Integrated Stand Growth Model of *Cryptomeria fortunei* Plantation in the Mountainous Area of Western Hubei

SUN Yongkang¹ TANG Jingming¹ WANG Yi¹ ZHANG Zongli²
LIN Hua³ FENG Jun⁴ PU Yuanzhi³

(1. Hubei Academy of Forestry, Wuhan, Hubei 430075, China; 2. Lichuan Forestry Bureau, Lichuan, Hubei 437100, China; 3. State-owned Dashan Mountain Forest Farm in Enshi City, Enshi, Hubei 445000, China; 4. State-owned Changlinggang Forest Farm in Jianshi County, Enshi, Hubei 445300, China)

Abstract Based on the site classification of 60 standard plots of *Cryptomeria fortunei* plantation in the mountains area of Western Hubei, an integrated stand growth model of *C. fortunei* plantation was established by using the method of nonlinear measurement error simultaneous equations, which ensured the compatibility and unbiased estimation of the model; The model test results show that the average relative error and relative mean square error of each stand factor were below 6.5%, and the stability and prediction accuracy of model parameters were high; At the same time, the integrated stand growth model can be used to simulate and predict the growth of *C. fortunei* Plantations under different initial conditions, design quantitative thinning operations, and draw stand density control diagrams under different site conditions, providing a scientific reference for the efficient and sustainable management of *C. fortunei* plantations in the study area.

Key words integrated stand growth model; *Cryptomeria fortunei* plantation; stand density control diagram; mountain area in Western Hubei

^{*} 基金项目: 湖北省林业科技支撑重点项目 ([2022]LYKJ02), 中央财政林业科技推广示范资金项目 (鄂 [2020] TG07)。

第一作者: 孙拥康 (1987—), 男, 助理研究员, 主要从事森林可持续经营研究, E-mail:cssyk2011@163.com。

通信作者: 汤景明 (1963—), 男, 研究员, 主要从事森林培育和森林经营研究, E-mail:1625248288@qq.com。

柳杉 *Cryptomeria fortunei* 材质优良、树姿优美、适生性强，是鄂西山区海拔 1 200 m 以上理想的杉木替代树种之一，现已在鄂西山区中高海拔地区得到广泛推广栽植^[1]。研究柳杉林分生长与收获过程既是实现其科学经营的重要基础，也是充分发挥其经济、社会、生态等综合效益最大化的重要保障^[2-3]。林宁^[4]、黄奎^[5]、陈必勇^[6]等基于解析木数据对柳杉人工林生长规律进行了研究；江希钿^[7]、赵晓云^[8]等对柳杉人工林单木生长模型进行了研究；黄煌增^[9]等对柳杉全林分生长模型进行了研究，这些研究为柳杉人工林阶段性发展和科学经营提供了坚实基础，但也存在着一定的问题和局限性：一是没有解决模型间的相容性问题；二是没有考虑自变量也有误差的情形。传统的利用最小二乘法对这些模型分别估计时，由于缺乏统一的系统考虑而往往会产生明显的系统偏差^[10]。直至 21 世纪初，出现了较好的非线性联立方程组解法后，上述问题才得以逐步解决^[11]。我国唐守正院士等进一步研究了度量误差对模型参数估计的影响，提出了基于非线性度量误差联立方程组的全林整体生长模型，该方法也逐渐发展成为当前我国人工林生长预测及森林经营决策的重要研究方法^[12-13]。本研究以鄂西山区柳杉人工林为研究对象，采用非线性度量误差联立方程组方法对鄂西山区柳杉人工林全林整体模型进行了研建与应用探讨，以期为该地区柳杉人工林的可持续经营与高质量发展提供决策依据与科学参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究地区为湖北省西部柳杉主要栽培区（襄阳、宜昌、恩施），地理位置介于东经 108°21′~110°58′，北纬 29°27′~31°57′之间，该区地质上属华夏体系第三隆起中段，第二阶梯东缘，由秦岭山脉东延部分的武当山、大巴山、荆

山山脉以及云贵高原东延部分的齐岳山、八面山、武陵山脉组成。海拔起伏较大，属北亚热带季风气候区，年均气温为 15~18℃，年降水量 1 000~1 200 mm，相对湿度达 60%~89%，土壤属于红黄壤与黄棕壤地带。该区植被类型丰富，除典型的亚热带常绿落叶阔叶混交林外，山地垂直带上还有落叶阔叶林、亚高山暗针叶林等植被类型。由于柳杉具有生长迅速、材质优良、适应强等特点，自 20 世纪 60 年代以来，柳杉逐渐发展成为鄂西地区替代杉木的理想树种，得到了大面积栽植与推广，目前研究区柳杉人工林栽植面积达 3.3 万 hm²，发展势头强劲，已成为鄂西山区重要的速生丰产用材树种之一^[14]。

1.2 数据来源

课题组于 2016 年在恩施、宜昌等地开展了柳杉人工林专题调查，分别选取不同立地、不同年龄代表性柳杉人工林进行了样地设置与调查，共设置面积为 0.06 hm² 标准地 60 块，其中，固定标准地 40 块、临时标准地 20 块，并于 2019 年对所有标准地进行了复测。两次监测期间，除 5 块固定标准地（幼龄林 2 块、中龄林 2 块、成熟林 1 块）和 4 块临时标准地（幼龄林 1 块、中龄林 3 块）因雪灾等原因进行过抚育间伐，其余标准地均未经间伐和遭受人为干扰，基本呈自然林分生长状态。本研究采用固定标准地调查数据作为建模数据，采用临时标准地数据对模型进行拟合检验。标准地调查内容包括林分常规测树因子（如：胸径、树高、冠幅、年龄、公顷株数、公顷蓄积等）和立地因子（经纬度、海拔、坡度、坡向、坡位、土层厚度等）。各标准地（含临时标准地）林分概况见表 1。

1.3 研究方法

1.3.1 全林整体模型 全林整体模型由唐守正院士于 1991 年提出，是描述林分主要调查因子及其生长过程相互关系的模型系统^[11]。该模型系统是由 3 个基本函数式和 5 个统计模型构成的一组非

表 1 柳杉人工林各标准地林分概况
Tab.1 General situation of standard ground forest of *C. fortunei* plantation

调查时间 Time	平均年龄 /a Average age	平均直径 /cm Diameter	平均树高 /m Height	株数 / (株·hm ⁻²) Number	蓄积 / (m ³ ·hm ⁻²) Volume
2016 年	7~41	8.8~38.2	5.3~22.5	575~2 970	48.6~655.6
2019 年	10~44	10.3~41.8	6.4~23.2	525~2 375	62.9~742.5

线性联立方程组，8 个非线性模型方程式如下^[15]：

断面积模型：

$$G = b_1 \times L^{b_2} \times \left[1 - \exp \left(-b_4 \left(\frac{S}{10\,000} \right) \right)^{b_3} \times (\text{age} - t_0) \right]^{b_3} \quad (1)$$

密度指数定义：

$$S = N \times \left(\frac{D}{20} \right)^\beta \quad (2)$$

断面积公式：

$$G = N \times D^2 \times \left(\frac{\Pi}{40000} \right) \quad (3)$$

自稀疏模型：

$$\left(\frac{sf}{N} \right)^r - \left(\frac{D}{20} \right)^{\beta r} = C \quad (4)$$

优势高生长模型：

$$\text{UH} = L \times \exp \left(-\frac{b}{\text{age}} + \frac{b}{\text{baseage}} \right) \quad (5)$$

平均高模型：

$$\text{PH} = \frac{\text{UH} - a_1}{a_2} \quad (6)$$

林分蓄积量公式：

$$M = fH \times G \quad (7)$$

形高模型：

$$fH = \left(c_1 + \frac{c_2}{\text{PH} + 2} \right) \times \text{PH} \quad (8)$$

式中，age 表示年龄， N 表示株数， D 表示胸径， PH 表示平均高， UH 表示优势高， fH 表示形高， L 表示立地指数， t_0 表示平均高达到胸高的年龄， C 为常数， baseage 表示立地基准年龄， b_1 、 b_2 、 b_3 、 b_4 、 b_5 、 sf 、 β 、 γ 、 b 、 a_1 、 a_2 、 c_1 、 c_2 是参数。

1.3.2 模型参数估计与检验 在 Forstat2.1 软件支持下，利用非线性度量误差联立方程组方法对带有度量误差的全林整体模型进行参数估计，可以避免传统最小二乘法估计产生的系统偏差，保证参数估计的渐进无偏性^[16-17]。受样本数量和观测次数的限制，本研究采用刀切法对模型精度进行了检验。模型检验统计量采用平均偏差（ E_{MD} ）、平均绝对偏差（ E_{MAD} ）、平均相对误差（ E_{MRD} ）、均方误（ E_{MSE} ）、相对均方误（ E_{RMSE} ）和决定系数 R^2 ^[18]。数学表达式如下：

平均偏差

$$E_{\text{MD}} = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i) / n \quad (9)$$

平均绝对偏差

$$E_{\text{MAD}} = \sum_{i=1}^n (|y_i - \hat{y}_i|) / n \quad (10)$$

平均相对误差

$$E_{\text{MRD}} = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i) / \sum_{i=1}^n y_i \quad (11)$$

均方误

$$E_{\text{MSE}} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 / n - 1} \quad (12)$$

相对均方误

$$E_{\text{RMSE}} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 / n - 1} / \sum_{i=1}^n y_i / n \quad (13)$$

决定系数

$$R^2 = \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i|^2 / \sum_{i=1}^n |y_i - \bar{y}_i|^2 \quad (14)$$

式中 n 为样本数， y_i 为观测值， $\hat{y}_i$ 为预测值， $\bar{y}_i$ 为预测值的平均值。

2 结果与分析

2.1 立地类型划分

在建立全林整体模型之前，需要对建模标准地的立地进行分级，以避免模拟结果与实际产生较大差异。通常在合理的密度范围内，优势高的生长只与立地有关。用优势高的绝对值来反映立地生产力等级，用立地指数代替立地类型，是林业科研与生产中常用立地分类方法^[19]。本研究即基于该方法，在 Forstat2.1 软件支持下，按照 2 m 指数距，利用理查德曲线模型研建了柳杉人工林优势高与年龄关系的立地指数曲线簇方程，并对各参数进行了估计。立地指数曲线簇方程如下：

$$H_L = A_L \times (1 - \exp(-C_L \times \text{age}))^{B_L} \quad (L=12, 14, 16, \dots, 28)$$

式中， H_L 为优势高，age 为年龄， A_L 、 B_L 、 C_L 为待估参数， L 为不同立地指数。

基于该立地指数曲线簇方程确定的研究区柳

杉人工林立地指数范围和年龄范围，对收集的 60 块标准地立地类型进行了划分，划分结果见表 2。由表 2 可知，研究区 60 块标准地可划分为 3 个立地类型，其中属于 2 和 3 立地类型的标准地数量较多。

2.2 全林整体模型参数估计

基于固定标准地数据并采用刀切法对鄂西山区柳杉人工林全林整体模型参数进行了模拟估计（表 3）。由表 3 可知：断面积模型的参数 b_1 为 21.490 8， b_2 为 9.948 8， b_3 为 0.145 2， b_4 为 1.367 7， b_5 为 6.886 3；自稀疏模型的参数 sf 为 1 923， β 为 1.711 8， γ 为 2.742 3；优势高模型的参数 b 为 8.613 9；平均高模型的参数 a_1 为 0.985 8， a_2 为 1.286 3；形高模型的参数 c_1 为 0.371 3， c_2 为 1.996 0；其中参数 b_1 、 b_2 变动较大，其余参数则相对比较稳定。柳杉人工林达到胸高

的年龄 $t_0=2.5$ ，立地基准年龄 $baseage=20$ ，根据模型参数估计结果，建议模型使用范围为：立地指数 12~22；年龄 4.0~61；密度指数 507~1 923。

2.3 模型精度检验

利用同期调查的 20 块柳杉人工林临时标准地实测林分因子数据：林分平均胸径、平均树高、林分断面积、株数和蓄积，对所建立的柳杉人工林全林整体模型参数进行了精度检验，检验结果见表 4。由表 4 可以看出，各林分因子的平均相对误差和相对均方误差均在 6.5% 以内，相关系数 R^2 均达到了 0.97 以上，说明模型对各林分因子的拟合效果较好。

2.4 全林整体模型的应用

在建立的柳杉人工林全林整体模型基础上，可以根据其模型参数，模拟柳杉人工林在不同立地条件下（在模型使用范围内）林分生长收获过

表 2 立地指数参数估计值及立地类型划分结果
Tab.2 Estimated values of site index parameters and site type classification results

立地编号 No.	立地指数 Site index	A	B	C	标准地数 Number of standard plots
1	14	20.708 77	0.872 77	0.050 88	7
2	18	23.667 17	0.872 77	0.050 88	21
3	20	26.625 57	0.872 77	0.050 88	12

表 3 柳杉人工林全林整体模型参数估计值
Tab.3 Estimated parameters of integrated stand growth model of *C. fortunei* plantation

模型 Model	参数 Parameter	刀切法 Jackknife				标准差 SD
		估计值 Estimated Value	平均值 Mean	最小值 Min	最大值 Max	
断面积模型	b_1	21.490 8	21.777 0	23.719 4	19.834 5	0.143 1
	b_2	9.948 8	9.699 1	11.886 5	7.511 7	0.124 9
	b_3	0.145 2	0.134 8	0.164 2	0.105 3	0.005 2
	b_4	1.367 7	1.354 7	1.576 9	1.132 5	0.006 5
	b_5	6.886 3	6.783 0	7.029 7	6.536 3	0.051 7
自稀疏模型	sf	1 923 0	1 923 0	1 923 0	1 923 0	0
	β	1.711 8	1.711 8	1.711 8	1.711 8	0
	γ	2.742 3	2.706 1	2.987 6	2.424 5	0.018 1
优势高模型	b	8.613 9	8.596 1	10.478 1	6.714 0	0.008 9
平均高模型	a_1	0.985 8	0.988 6	1.225 1	0.752 0	0.001 4
	a_2	1.286 3	1.266 9	1.513 5	1.020 2	0.009 7
形高模型	c_1	0.371 3	0.374 9	0.493 4	0.256 4	0.001 8
	c_2	1.996 0	1.991 8	2.159 8	1.823 7	0.002 1

表 4 实测数据与全林整体模型估计结果的比较
Tab.4 Comparison between measured data and estimated results of integrated stand growth model

林分因子 Stand factor	统计量 Statistic					
	平均偏差 (E_{MD}) Mean deviation	平均绝对偏差 (E_{MAD}) Mean absolute deviation	平均相对误差 (E_{MRD}) / % Mean relative deviation	均方误 (E_{MSE}) Mean square error	相对均方误 (E_{RMSE}) / % Relative mean square error	决定系数 R^2 Coefficient of determination
蓄积 / ($m^3 \cdot hm^{-2}$)	-2.70	12.45	-0.10	0.38	5.84	0.98
平均胸径 /cm	0.23	3.37	-0.05	0.35	2.00	0.99
平均树高 /m	-0.04	0.06	0.01	0.07	0.12	0.99
断面积 / ($m^2 \cdot hm^{-2}$)	-0.56	3.12	-0.29	1.04	1.62	0.98
株数 / (株 $\cdot hm^{-2}$)	-10.68	16.23	-1.33	4.01	6.27	0.97

程。模拟生长过程主要包括下面 4 种情况：（1）模拟该树种在某一个立地（指定的立地指数）条件下，各种造林密度的自然生长过程；（2）模拟该树种在某一立地（指定的立地指数）条件下，各种造林密度指定间伐作业（间伐次数、间伐株数强度、间伐断面积强度）后的林分生长过程。（3）模拟该树种的某一现实林分（已知立地指数、年龄、株数、平均直径）今后的生长过程。（4）模拟该树种的某一现实林分（已知立地指数、年龄、株数、平均直径）今后的指定间伐作业（间伐次数、间伐株数强度、间伐断面积强度）后林分生长过程及间伐收获。此外，还可绘制不同立

地条件下的林分密度控制图^[15]。
以情况 3 为例，选取一块林龄为 12 年、林分密度为 1 525 株 / hm^2 、优势木高为 13.5 m、立地指数=18 的柳杉人工林实测标准地，分别对其生长收获过程、定量间伐作业、林分密度控制图进行了应用研究。表 5 为对实测标准地柳杉林分从 8 年到 35 年自然生长、收获过程模拟结果，借助该表可对该林分未来各阶段生长状况进行预测评估，同时也可为制定合理的经营规划设计等提供参考依据。
在建立的全林整体模型基础上，还可根据林分生长收获过程表、立地指数表等经营数表，模

表 5 柳杉人工林生长收获过程
Tab.5 Summary of growth and harvest process of *C. fortunei* plantation

年龄 /a Age	蓄积 / m^3 Volume	平均生长量 / ($m^3 \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$) Average accretion	连年生长量 / ($m^3 \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$) Current annual increment	断面积 / ($m^2 \cdot hm^{-2}$) Sectional area	优势树高 / m Dominant height	树高 /m Height	直径 /cm Diameter	株数 Number / (株 $\cdot hm^{-2}$)	密度指数 Density index
8	96.572	12.072	24.979	22.336	9.4	7.4	12.4	1 852	816
9	122.757	13.64	26.184	26.075	10.6	8.3	13.5	1 827	930
10	149.452	14.945	26.695	29.625	11.7	9.2	14.5	1 797	1 035
11	176.086	16.008	26.635	32.962	12.6	9.9	15.4	1 763	1 131
12	202.210	16.851	26.123	36.069	13.5	10.6	16.3	1 725	1 217
13	227.484	17.499	25.275	38.940	14.3	11.2	17.2	1 684	1 295
14	251.675	17.977	24.191	41.576	15.0	11.7	18.0	1 641	1 365
15	274.637	18.309	22.962	43.982	15.6	12.2	18.7	1 597	1 427
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
35	526.573	15.045	6.940	65.312	21.6	16.9	30.1	918	1 848

拟柳杉人工林林分生长过程并准确测算其连年生长量的动态变化，计算出不同立地条件柳杉人工林间伐起始期、间隔期、间伐次数等，进而科学设计不同立地条件下适宜的柳杉定量间伐作业。表 6 为不同立地条件下柳杉人工林定量间伐统计结果。可以看出，鄂西山区不同立地条件柳杉人工林平均起始期为 9~11 年，平均间隔期为 4~6 年，假定柳杉人工林主伐年龄为 35 年，则在达到主伐年龄之前至少需要 4 次间伐。

此外，传统的林分密度控制图是不分立地指数的，然而不同立地林分树高是有差异的，进而蓄积也是有差异的，这就导致所建立的林分密度控制图不可避免的会产生结果偏差问题。而基于

全林整体模型推导并出的林分密度控制图是分立地指数编制的，它的精度与模型精度完全一致，适用性也较传统方法更为广泛。图 1 为在全林模型基础上，推导并绘制的鄂西山区部分不同立地条件下柳杉人工林林分密度控制图，根据密度控制图既可计算不同立地条件柳杉人工林生长过程，还可进行科学的定量间伐设计，为研究区柳杉人工林定向培育及高效可持续经营提供指导。

3 结论与讨论

3.1 在对鄂西山区柳杉人工林立地类型划分基础上，利用非线性度量误差联立方程组方法，建立了鄂西山区柳杉人工林全林整体模型。同时，采

表 6 柳杉人工林定量间伐作业
Tab.6 Quantitative thinning operation of *C. fortunei* plantation

项目 Item	起始期 /a Initiation stage	间隔期 /a Periodicity	间伐次数 / 次 Number of thinnings
柳杉 定量间伐作业	9~11	4~6	4

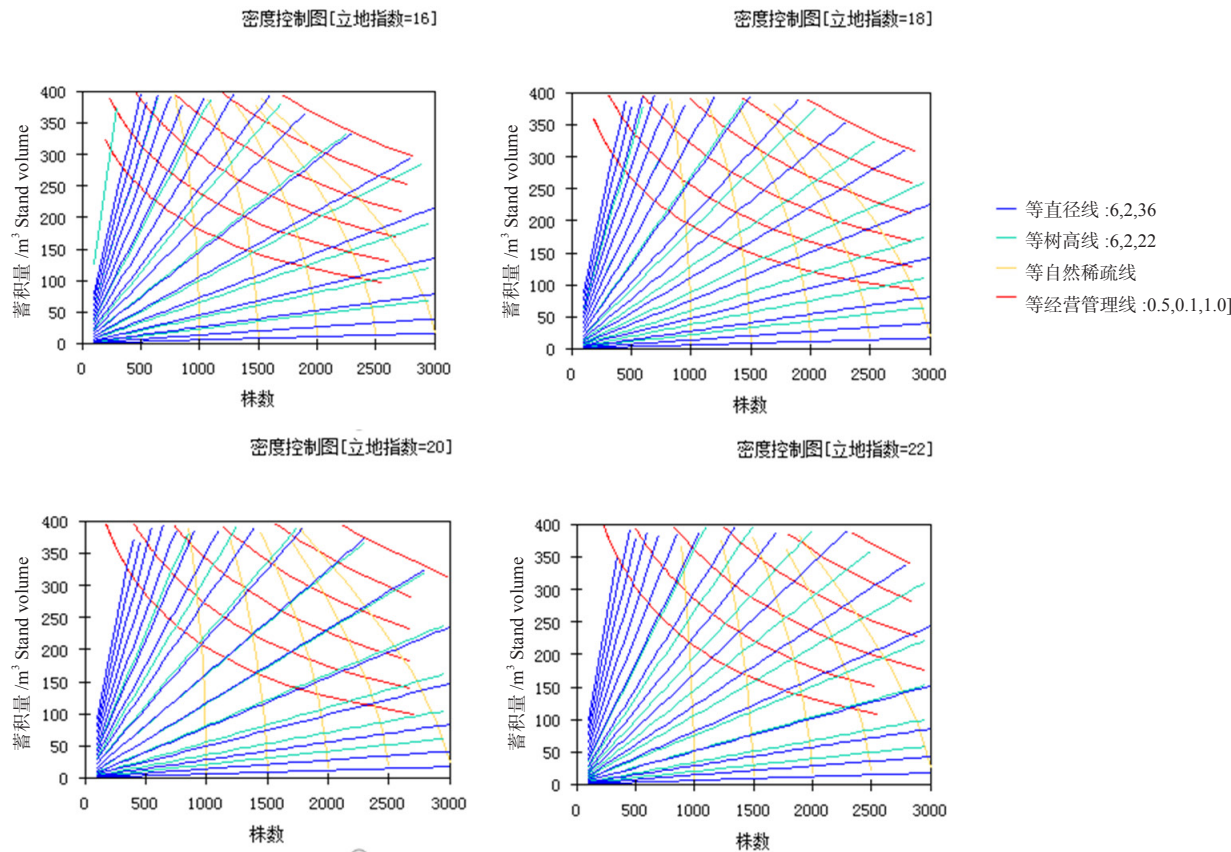


图 1 柳杉人工林密度控制（立地指数=16~22）
Fig.1 Density control chart of *C. fortunei* plantation (site index =16~22)

用刀切法和临时标准地数据对模型的参数稳定性及预测精度进行了检验,结果表明,各林分因子的平均相对误差和相对均方误差均在 6.5% 以下,其中,平均胸径和平均树高的估计效果最佳,相关系数达 0.99。模型拟合效果较好,可以用于研究区柳杉人工林的生长预测和经营决策。

3.2 利用建立的柳杉人工林全林整体模型对一个现实林分进行了应用研究,模拟并编制了其生长收获表,开展了其定量间伐作业设计,确定出柳杉人工林平均间伐起始期为 9~11 年,平均间伐间隔期为 4~6 年,这一结果与黄思猷等^[20]的研究结果基本一致,但间伐起始期略有不同,这主要是由于鄂西地区属中高山区,柳杉人工林初值密度一般较大,较早郁闭并产生林木竞争分化,使得间伐起始期相对提前。在建立的模型基础上,还绘制了不同立地条件的柳杉人工林林分密度控制图,避免了传统林分密度控制图由于不同立地林分树高差导致结果偏差较大的问题^[21]。

3.3 由于样本数量和观测数据仍较有限,还需进一步在增加样本数量以及加强对固定标准地定期连续性监测的情况下,对所建模型的参数及精度进行修正与验证。同时,随着研究区森林质量提升工程的不断深入,传统人工同龄纯林的造林方式正在向异龄复层混交造林方式转变,如何构建适用于异龄林的全林整体模型,并将其用于异龄林的生长收获预估、定量抚育间伐等还有待进一步研究^[22-24]。

参考文献

- [1] 艾训儒,姚兰,易咏梅,等.恩施州柳杉人工林碳汇储量研究[J].湖北民族学院学报(自然科学版),2011,29(2): 209-212.
- [2] 王璞,段劼,马履一,等.森林生长与收获模型国内外研究进展[J].广东农业科学,2012,39(17): 173-177.
- [3] 马丰丰,贾黎明.林分生长和收获模型研究进展[J].世界林业研究,2008,21(3): 21-27.
- [4] 林宁,秦武明,蒋林,等.桂东南地区柳杉人工林生长规律研究[J].南方农业学报,2012,43(7): 1013-1016.
- [5] 黄奎.三种密度柳杉人工林生长与经济效益对比研究[D].南宁:广西大学,2015.
- [6] 陈必勇.霞浦县柳杉人工林生长规律的研究[J].福建林业科技,2006,33(3): 52-55,64.
- [7] 江希钿,林文清,陈兆算,等.柳杉人工林单木材积生长模型的研究[J].福建林学院学报,1995,15(4): 380-385.
- [8] 赵晓云.柳杉单立木生长模型拟合的初步研究[J].四川林业科技,2004,25(1): 55-58.
- [9] 黄煌增.柳杉人工林林分生长模型的研究[J].福建林学院学报,2007,27(1): 74-79.
- [10] 张雄清.北京地区油松林分生长、枯损和进界模型的研究[D].北京:中国林业科学研究院,2012.
- [11] 洪玲霞,雷相东,李永慈.蒙古栎林全林整体生长模型及其应用[J].林业科学研究,2012,25(2): 201-206.
- [12] 李永慈,唐守正.度量误差对模型参数估计值的影响及参数估计方法的比较研究[J].生物数学学报,2006,21(2): 285-290.
- [13] 李永慈,唐守正.带度量误差的全林整体模型参数估计研究[J].北京林业大学学报,2006,28(1): 23-27.
- [14] 艾训儒,易咏梅,彭诚,等.柳杉树冠特征及承雪能力研究[J].湖北民族学院学报(自然科学版),2008,26(4): 436-439.
- [15] 唐守正,郎奎建,李海奎.统计和生物数学模型计算(Forstat教程)[M].北京:科学出版社,2009,343-354.
- [16] 李永慈,唐守正.度量误差对全林整体模型的影响研究[J].林业科学,2005,41(6): 169-172.
- [17] ROSE C E, LYUCH T B. Estimating parameters for tree basal area growth with a system of equations and seemingly unrelated regressions[J].Forest Ecology and Management,2001,148(1): 51-61.
- [18] 李安明,郭小龙,张岗岗,等.小陇山林区日本落叶松人工林全林整体模型的建立与验证[J].西北林学院学报,2016,31(6): 26-29,40.
- [19] 朱光玉,康立.森林立地生产力评价指标与方法[J].西北林学院学报,2016,31(6): 275-281.
- [20] 黄思猷.柳杉生长收获与大径材经营模式研究[D].福州:福建农林大学,2016.
- [21] 洪玲霞.由全林整体生长模型推导林分密度控制图的方法[J].林业科学研究,1993(5): 510-516.
- [22] 刘洋,亢新刚,郭艳荣,等.异龄林生长动态研究进展[J].西北林学院学报,2012,27(6): 146-151.
- [23] 邓成,梁志斌.森林生长收获模型发展中存在的问题及相关建议[J].世界林业研究,2015,28(1): 92-96.
- [24] 沈剑波,雷相东,王虎威,等.针阔混交异龄林林分优势高的确定方法[J].林业与环境科学,2019,35(1): 43-48.