

DOI: 10.20103/j.stxb.202304250868

李佳怡, 阮红玉, 邱思玉, 梁瑞婷, 朱兆廷, 文毅, 王成雨, 王轶夫, 孙玉军. 基于经验模型和机理模型的杉木人工林生物量估测对比研究. 生态学报, 2024, 44(8): 3502-3514.

Li J Y, Ruan H Y, Qiu S Y, Liang R T, Zhu Z T, Wen Y, Wang C Y, Wang Y F, Sun Y J. Comparative study on biomass estimation of *Cunninghamia lanceolata* plantations based on empirical model and mechanism model. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(8): 3502-3514.

基于经验模型和机理模型的杉木人工林生物量估测对比研究

李佳怡¹, 阮红玉², 邱思玉¹, 梁瑞婷¹, 朱兆廷¹, 文毅¹, 王成雨¹, 王轶夫^{1,*}, 孙玉军¹

1 北京林业大学森林资源和环境管理国家林业和草原局重点实验室, 北京 100083

2 吉水县石阳林场, 吉安 331600

摘要:为了揭示间伐干扰下杉木人工林生物量的变化规律,研究利用江西省吉水县石阳林场的 36 块杉木人工林样地的实测数据和研究区气候数据,通过基于经验的引入地位指数(SI)的生物量生长方程组和基于机理的 3-PG 模型,模拟并预估林分生物量,分析在间伐和非间伐的情况下,不同立地的林分其生物量 0—50a 的变化。结果表明:(1)构建了生物量生长方程组,并在参数 a 、 b 、 c 中引入地位指数 SI,发现改进后的模型对于基础模型拟合精度更高,且对数似然比检验表明,改进效果显著($P < 0.05$)。(2)通过对 3-PG 模型预测精度验证发现,预估值和实测值之间有很高的一致性,各因子的决定系数(R^2)在 0.65—0.96 之间,其中,胸径和树高的 R^2 均高于 0.92;各因子的平均相对误差(MRE)不超过 26%。(3)通过比较经验模型和机理模型的生物量预测发现,经验模型的预测误差 MRE 为 16.50%,机理模型为 23.52%,经验模型预估精度更高。进一步对未来预测对比分析表明,机理模型预估高于经验模型。(4)两个模型模拟的杉木人工林生物量规律一致,即随着林龄的增加,杉木人工林林分总生物量均表现出先快速增加,后逐渐平稳的趋势;并且间伐不会改变这种趋势,但间伐林分在间伐后的生物量生长速率高于无间伐林分。此外,由于 SI 对经验模型影响显著,改进模型拟合效果更好,更具有生态学意义。参数化后的 3-PG 模型模预估精度较高,能够为江西杉木人工林生长规律研究提供依据。虽然经验模型和机理模型在对研究区杉木人工林生物量的预估上均具有较好的表现,但各具特点和局限性。经验模型参数较易获得,且经验模型预测生物量、林分胸高断面积和林分平均树高的 R^2 、MRE 均优于机理模型;但模型对于建模数据内的评价效果较好,对于建模数据外的应用具有局限性,即经验模型更适合模拟生长期间的某一阶段的林分生物量。机理模型虽然需要的参数较多,但是考虑了生态学原理,弥补了经验模型的不足,可较好解释和模拟环境因子对树木生长的影响,对校正数据之外生长阶段的林分生物量预测更有优势。

关键词:生物量生长方程组;3-PG 模型;杉木人工林;间伐;林分生长

Comparative study on biomass estimation of *Cunninghamia lanceolata* plantations based on empirical model and mechanism model

LI Jiayi¹, RUAN Hongyu², QIU Siyu¹, LIANG Ruiting¹, ZHU Zhaoting¹, WEN Yi¹, WANG Chengyu¹, WANG Yifu^{1,*}, SUN Yujun¹

1 State Forestry and Grassland Administration Key Laboratory of Forest Resources and Environmental Management, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

2 Jishui County Shiyang Forest Farm, Ji'an 331600, China

Abstract: In order to reveal the variation patterns of biomass of *Cunninghamia lanceolata* plantations under thinning interference and provide theoretical supports for the biomass prediction of *Cunninghamia lanceolata* plantations after

基金项目:江西省林业局科技创新专项([2021]33);国家自然科学基金项目(31800536)

收稿日期:2023-04-25; 网络出版日期:2023-12-11

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wyfbing@163.com

thinning, this study used the measured data of 36 *Cunninghamia lanceolata* plantations plots and the climate data in Shiyang Forest Farm, Jishui county, Jiangxi province. Through the biomass growth equations with the site index (*SI*) introduced and the 3-PG model, the biomass of the stand was simulated and estimated, and the forest stand biomass in different sites was analyzed under the condition of thinning and non-thinning from 0 to 50 years. The results showed that: (1) The biomass growth equations were constructed, and the site index (*SI*) was introduced into the parameters *a*, *b* and *c*. It was found that the improved model had higher fitting accuracy compared with the basic model, and the logarithmic likelihood ratio test showed that the improvement effect was significant ($P < 0.05$). (2) Through the verification of the prediction accuracy of the 3-PG model, there was strong consistency between the predicted values and the measured values. The determination coefficient (R^2) of the linear regression equations between the measured and estimated values of each factor ranged from 0.65 to 0.96. The R^2 of diameter at breast height (DBH) and tree height was higher than 0.92. The mean relative error (MRE) of each component was less than 26%. (3) By comparing the biomass prediction of the empirical model and the mechanism model, it was found that the prediction error MRE of the empirical model was 16.50%, and the mechanism model was 23.52%. The prediction accuracy of the empirical model was higher. Further comparative analysis of future predictions showed that the estimated value of the mechanism model was higher than that of the empirical model. (4) The trend of biomass of *Cunninghamia lanceolata* plantations simulated by the two models was consistent, that is, with the increase of forest age, the forest biomass showed a trend of rapid increase first and then gradually stable. Thinning would not change this trend, but the biomass growth rate of thinned stands after thinning was higher than that of non-thinned stands. Furthermore, due to the significant impact of *SI* on empirical models, the improved model has better fitting effect and more ecological significance. The parameterized 3-PG model has high prediction accuracy and can provide a basis for the study of the growth law of *Cunninghamia lanceolata* plantations in Jiangxi. Although both the empirical model and the mechanism model have good performance in predicting the biomass of *Cunninghamia lanceolata* plantations in the study area, they have their own characteristics and limitations. The parameters of the empirical model were easy to obtain, and the R^2 and MRE of biomass, basal area and average height of forest stand predicted by the empirical model were better than those of the mechanism model. However, the model had better evaluation effect within the modeling data, and had limitations for applications outside the modeling data, that is, the empirical model is more suitable for simulating the stand biomass at a certain stage during the growth period. Although the mechanism model needs more parameters, it considers the ecological principle and makes up for the deficiency of the empirical model. It can better explain and simulate the influence of environmental factors on forest stand growth, and has more advantages in predicting stand biomass in the growth stage other than the corrected data.

Key Words: biomass growth equations; 3-PG model; *Cunninghamia lanceolata*; thinning; stand growth

全球变暖是当今世界面临的最严峻环境问题之一,大气 CO₂ 浓度升高是导致全球变暖的最主要原因^[1-2]。作为陆地生态系统的主体,森林为吸收和固定大气 CO₂、维持全球碳平衡做出了重大贡献^[3-4]。相反,气候变化也影响着森林的结构、生产力,以及森林的各种功能。森林生物量的存量和生长量是森林固碳能力的直接体现,准确估算森林生物量尤为重要^[5]。由于树种组成、立地条件、密度、结构等的复杂性,采用模型估算森林生物量已成为一种重要方法。当前,国内外关于森林生物量建模的研究非常多,根据建模方法不同,可分为经验模型、机理模型和混合模型^[6-10]。

常见的用于生物量估算的经验方法包括 2 类:一是生物量转换因子法,通过实验获得生物量与蓄积量之间的转换系数,即生物量换算因子(BEF),再利用测得的森林蓄积量乘以 BEF 得到森林生物量,此法可以较为准确的估算区域尺度森林生物量^[11-12];二是生物量方程法,根据树木各调查量之间的相对生长关系,构建单木生物量及各组分(干材、树皮、树枝、树叶、树根等)生物量与胸径、树高等因子之间的回归方程,即生物量

方程,也称生物量相对生长方程、生物量异速生长方程,再利用测得的林分(或样地)中所有林木的胸径、树高等信息,按生物量方程计算林分(或样地)的生物量,此法具有破坏少、使用简便且相对精度较高的优点^[13-16]。

随着研究的不断发展,树木生长建模已从简单的经验模型发展到以生长过程为基础的机理模型。它是对光合作用、呼吸作用等过程的数学表达为基础,研究和模拟林分生理生态全过程及其与环境因子的关系,又称为过程模型。作为模拟气候变化对森林影响的重要工具,机理模型能够预测未来气候变化对森林生长收获的影响,从而制定适应气候变化的森林经营管理策略^[17]。Grace 等利用 BIOMASS 模型,将模型预测结果与树冠下瞬时辐照度的测量结果进行比较,发现新西兰辐射松林在土壤肥沃的立地上截获的光合有效辐射能与地上干物质生产量之间存在线性关系^[18];Aber 等提出的 PnET 模型系列,是一个简单的、以一个月为步长的森林碳平衡模型,通过 10 个温带和北方森林生态系统的实地数据验证,发现将气候数据聚合到月尺度、将叶片特征等聚合到生态系统水平,相对于长期的、平均的生态系统响应而言,均不会造成显著的信息损失^[19];Landsberg 等研发的 3-PG 模型,是基于生理生态过程,模拟不同气候条件、立地条件和经营措施下林分平均树高、胸径和组分生物量等的月尺度变化,以及林分结构变化和树种分布情况等^[20-21]。就数据规模和计算复杂度而言,3-PG 模型使用方便,所需输入数据量较小,参数获取相对容易,在全球各种森林类型和立地条件中广泛应用,已被各国用作指导森林经营管理的实用工具^[8,17,20-22]。国外学者基于 3-PG 模型模拟了桉树、花旗松、湿地松等树种的生长状况^[23-25];国内学者也已将该模型应用于杉木、长白落叶松等树种的生长预测^[8,22,26-28]。然而,应用于江西地区杉木人工林的 3-PG 模型研究较少^[22],也少有将经验模型与机理模型进行对比分析林分生长状况及预测的研究。

混合模型建模方法是将经验模型与机理模型进行融合,从而实现树木或林分生长量和木材产量的短期预测,和生长过程的长期模拟^[23]。常见的混合模型包括 FullCAM 模型^[9]、TRIPLEX 模型等。Waterworth 和 Richards 通过将 FullCAM 与遥感土地覆盖数据、场地信息和时间序列数据链接起来,估算出农业、林业和两者之间的过渡生产空间和时间上明确的碳储量和排放量^[29];Peng 等人开发了森林生长和碳动态混合模型 TRIPLEX^[30],以月为时间尺度,主要被用于预测生长和收获、量化碳收支及模拟气候变化所带来的影响,但模型简化了森林种群动态(即再生、死亡率等)过程,可能导致研究结果的偏差,限制了对气候变化影响森林生态系统动态变化的理解^[31]。

杉木(*Cunninghamia lanceolata*)是我国南方的重要用材树种,根据第 9 次全国森林资源清查,我国杉木人工林蓄积量达 7.55 亿 m^3 ,在中国森林资源结构中占有重要地位。研究表明,杉木不仅生长快、木材产量高,且具有很高的固碳潜力,浙江、福建、江西、湖南 4 省的杉木人工林在未来 100 年将固碳 0.23Pg^[32]。然而,杉木的固碳潜力受立地条件、经营措施等因素的影响较大^[32-33]。因此,进一步探明影响杉木人工林碳储量的因素十分重要。

鉴于此,本研究以江西省杉木人工林为研究对象,从机理和经验的视角,利用引入林龄和地位指数的生物量生长方程组和 3-PG 模型,研究各组分生物量与立地条件、林龄之间的关系,模拟不同立地条件中杉木人工林生物量变化情况,对比经验方法和机理方法在杉木人工林碳储量预估中的适用性和优越性。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

研究区位于江西省吉安市吉水县石阳林场(26°52'—27°33'N,114°38'—115°36'E),属于亚热带季风气候,温和湿润,光照充足,四季分明,年平均无霜期 290d,年日照时数为 1711h,年降雨量为 1541.8mm,年蒸发量为 1547.2mm,年平均气温 21.5℃。

1.2 样地数据

于 2022 年 8 月和 2023 年 7 月,在研究区设置并调查了 36 块杉木人工林固定样地,其中幼龄林样地 15

块、中龄林样地 12 块、成熟林样地 9 块,样地大小为 20m×30m,样地调查因子包括样地位置、平均胸径、平均树高等,样木调查因子包括胸径、树高、位置、冠幅等。从样本中随机抽取 25 块样地作为建模样本(或校正样本),用于经验模型的拟合和 3-PG 模型的参数化;剩余 11 块样地作为检验样本,用于两个模型预测精度验证。

1.3 气象数据

本研究中,3-PG 模型所需的气象数据来自 3 个数据源,其中,月均最高温、月均最低温、月降雨量、降雨日数、霜冻日数以及水汽压差数据来自中国气象数据网 1981—2010 年气象数据逐月数据集中吉水站的观测数据;太阳辐射数据参考刘坤的研究^[26];大气 CO₂浓度数据来自政府间气候变化专门委员会(IPCC)的 RCP 数据库(<http://www.iiasa.ac.at/>)(表 1)。

表 1 研究区 1981—2010 年气象数据均值

Table 1 The mean value of meteorological data from 1981 to 2010 in the study area

月份 Month	月降水量 Monthly precipitation/ (mm/month)	降水日数 Monthly rain days/ (d/month)	月均最高温 Monthly average maximum temperature/°C	月均最低温 Monthly average minimum temperature/°C	霜冻日数 Frost days/ (d/month)	太阳辐射 Solar radiation/ (MJ m ⁻² d ⁻¹)	水汽压差 Vapor pressure deficit/mbar
1	79.3	13.6	10.2	3.7	5.0	7.10	0.27
2	112.1	15.3	12.5	6.0	1.4	8.62	0.31
3	184.9	18.9	16.5	9.4	0.4	10.97	0.42
4	232.1	18.7	23.1	15.2	0.0	14.00	0.66
5	220.2	16.6	27.9	19.7	0.0	16.45	0.88
6	260.1	15.4	30.8	23.2	0.0	15.00	0.96
7	118.3	10.4	34.7	25.6	0.0	17.10	1.35
8	136.5	12.6	33.9	25.0	0.0	15.81	1.28
9	85.3	8.7	30.0	21.7	0.0	13.00	0.99
10	69.2	8.1	25.0	16.3	0.0	10.65	0.79
11	71.8	9.1	19.0	10.3	0.1	8.67	0.57
12	48.1	9.0	13.3	4.8	3.9	6.45	0.40

2 研究方法

2.1 生物量生长方程组

生物量生长方程组由生物量异速生长方程组和断面积、林分平均高生长过程模型组成,如公式(1)所示。

$$\begin{cases} B = f(BA, H) \\ BA = g_1(A) \\ H = g_2(A) \end{cases} \quad (1)$$

式中, B 为林分每公顷生物量, BA 为林分每公顷胸高断面积, H 为林分平均高, A 为林龄, f 为生物量异速方程, g_1 和 g_2 分别为 BA 和 H 的生长方程。

2.1.1 生物量异速生长方程

生物量总量的异速生长方程采用 CAR 函数作为基本形式^[34—35],以林分每公顷胸高断面积和林分平均高为自变量,其表达式为式(2)。

$$B = a \times BA^b \times H^c \quad (2)$$

式中, B 为林分每公顷生物量(t/hm²); BA 为林分每公顷胸高断面积(m²/hm²); H 为林分平均高(m); a 、 b 、 c 为参数。

2.1.2 生长过程模型

为了分析杉木林乔木层生物量分配随年龄的动态变化,以 Chapman-Richards 方程为基本形式(式 3),建

立林分单位面积胸高断面面积(BA)、林分平均高(H)与林龄(A)之间的关系模型,并分别在参数中引入(SI)因子,研究地位指数对它们之间关系的影响。

$$y = a \times (1 - e^{-b \times A})^c \quad (3)$$

式中, y 为林分每公顷胸高断面面积(m^2/hm^2)或林分平均高(m); A 为林龄(a); a 、 b 、 c 为参数。

2.1.3 地位指数的引入和模型再参数化

为了分析立地条件对异速生长关系和对 BA 、 H 生长过程的影响,在生物量生长方程组的参数中引入地位指数(SI),并进行再参数化。再参数化前后,参数的关系可以表达为公式(4)。

$$\beta = \beta_0 + k \times \beta_1 \times SI \quad (4)$$

式中, β 为再参数化前的参数向量, $\beta = [a, b, c, \dots]'$; β_0 和 β_1 为参数化后的参数向量, $\beta_0 = [a_0, b_0, c_0, \dots]'$,

$$\beta_1 = [a_1, b_1, c_1, \dots]'; k \text{ 为判别矩阵, } k = \begin{bmatrix} k_1 & & & \\ & k_2 & & \\ & & k_3 & \\ & & & \dots \end{bmatrix}, k_i = \begin{cases} 1, \text{第 } i \text{ 参数中引入 } SI \\ 0, \text{第 } i \text{ 参数中不引入 } SI \end{cases}, i = 1, 2, 3, \dots, \text{分}$$

别对应参数 a, b, c, \dots 。

2.1.4 模型评价

用决定系数(R^2)、赤池信息准则(AIC)、对数似然值(logLik)评价生物量生长方程组模型的拟合优度,采用最大似然比检验法检验改进模型是否优于基础模型。用模型预测值与实测值之间线性回归方程的决定系数(R^2)、平均绝对误差(MAE)、平均相对误差(MRE)评估模型预测精度。各预测精度评价指标的计算公式为式5—式7。

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_i)^2} \quad (5)$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i|}{n} \quad (6)$$

$$MRE = \frac{\sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i|}{n \times \sum_{i=1}^n y_i} \quad (7)$$

式中, \hat{y}_i 为模型预测值; y_i 为样地测量值; n 为样地个数。

2.2 3-PG 模型

3-PG 模型是一个基于生理和生态过程的模型,可以预测月尺度上的林分生长量,在全球变暖和大气中 CO_2 浓度增加的潜在影响下,模拟太阳辐射的逐级衰减、林分冠层所吸收碳的分配、水分循环与利用等一系列过程,从而模拟杉木人工林生态系统的生长和收获的年际变化^[8,17]。3-PG 模型的输入变量包括初始立地因子、初始林分因子、营林措施和气候因子四部分,模型的输出变量包括林分因子、树冠因子、林分各组分生物量、净初级生产力(NPP)及其分配和死亡率。

2.2.1 模型参数化

对于3-PG模型中的 P_2 、 P_{20} 、 a_s 、 n_s 、 η_{R_x} 、 η_{R_n} 、 γ_R 、 k 、 α_{C_x} 等参数值的设定,本研究参照相似树种,在参数允许范围内,客观、系统地进行参数优化调整,并利用校正样本验证上述参数取不同值时预估值与实测值之间的拟合效果,选取拟合效果最佳时的参数为最终参数;其他参数采用默认值或参考相关文献确定(表2)。

表 2 杉木人工林 3-PG 模型参数

Table 2 Parameters for the 3-PG model for *Cunninghamia lanceolata* plantations

参数 Parameters	符号 Symbols	值 Values	来源 Sources
异速生长关系及分配 Allometric relationships and partitioning			
当胸径为 2cm 时的叶干质量比 Foliage; stem partitioning ratio when D=2cm	P_2	0.45	本研究
当胸径为 20cm 时的叶干质量比 Foliage; stem partitioning ratio when D=20cm	P_{20}	0.50	本研究
干质量与胸径的关系常数 Constant in the stem mass v. diam. relationship	a_s	0.19	本研究
干质量与胸径的幂指数 Power in the stem mass v. diam. relationship	n_s	2.05	本研究
净初级生产力(NPP)分配到根的最大比例 Maximum fraction of NPP to roots	η_{Rr}	0.45	本研究
NPP 分配到根的最小比例 Minimum fraction of NPP to roots	η_{Rn}	0.059	本研究
凋落物及根周转 Litterfall and root turnover			
最大叶凋落速率 Maximum litterfall rate	γ_{Fx}	0.03	赵梅芳,2008
林龄为 0 时叶凋落速率 Litterfall rate at t=0	γ_{F0}	0.001	赵梅芳,2008
叶凋落速率达 1/2 时林龄 Age at which litterfall rate has median value	$t_{\gamma F}$	96	赵梅芳,2008
月均根周转率 Average monthly root turnover rate	γ_R	0.015	本研究
温度调节 Temperature modifier			
生长最低温度 Minimum temperature for growth	T_{min}	3.7	气象资料
生长最适温度 Optimum temperature for growth	T_{opt}	17.6	气象资料
生长最高温度 Maximum temperature for growth	T_{max}	34.7	气象资料
肥力效应 Fertility effects			
肥力为 0 时 m 的值 Value of m when FR=0	m_0	0	默认值
肥力为 0 时 'fN' 的值 Value of fN when FR=0	f_{N0}	0.3	赵梅芳,2008
(1-FR)对 fN 的幂指数 Power of (1-FR) in fN	n_{fN}	1	赵梅芳,2008
林龄调节 Age modifier			
最大林龄 Maximum stand age used in age modifier	t_x	50	默认值
相对林龄对 fAge 的幂指数 Power of relative age in function for fAge	n_{age}	4	默认值
fAge=0.5 时相对林龄 Relative age to give fAge=0.5	r_{age}	0.95	默认值
比叶面积 Specific leaf area			
初期比叶面积 Specific leaf area at age 0	σ_0	8	赵梅芳,2008
成熟林比叶面积 Specific leaf area for mature leaves	σ_1	3.7	赵梅芳,2008
比叶面积达 (SLA ₀ +SLA ₁)/2 时林龄 Age at which specific leaf area=(SLA ₀ +SLA ₁)/2	t_{σ}	6	赵梅芳,2008
光截获 Light interception			
林冠吸收光合有效辐射的消光系数 Extinction coefficient for absorption of PAR by canopy	k	0.55	本研究
树冠郁闭时林龄 Age at canopy closure	t_c	0	默认值
生产及呼吸 Production and respiration			
冠层量子效率 Canopy quantum efficiency	α_{Cx}	0.028	本研究
净初级生产力/总初级生产力比例 Ratio NPP/GPP	Y	0.5	默认值
转换因子 Conversion factors			
对太阳辐射的拦截 Intercept of net v. solar radiation relationship	Q_a	-90	默认值
对太阳辐射的斜率 Slope of net v. solar radiation relationship	Q_b	0.8	默认值

2.2.2 模型精度验证

采用模型预测值与实测值之间线性回归方程的决定系数 (R^2)、平均绝对误差 (MAE)、平均相对误差 (MRE) 来评估模型的预测能力。

2.3 样地生物量的计算

本文采用《立木生物量模型及碳计量参数—杉木》^[36]中的江西省杉木人工林生物量模型,计算样木生物量,合计得到样地生物量。

2.4 间伐方案

为了研究间伐对林分生物量生长过程的影响,在 3-PG 模型中,对各林分在林龄为 10a、15a 时设置强度为 30% 的间伐 (HT, 30%), 并与无间伐 (NT, 0%) 的情况进行对照,模拟林分 0—50a 的生长过程,分析间伐对杉木人工林生物量生长的影响。

3 结果与分析

3.1 基于生物量生长方程组的林分生物量估测

3.1.1 生物量异速生长方程构建

构建生物量方程,在基础模型参数中引入地位指数 SI ; 采用对数似然比检验,对改进后模型的拟合优度进行检验。当检验显著时,说明改进模型与基础模型相比有显著改进,同时,也表明 SI 对异速生长关系有显著影响。

结果表明,与基础模型相比,改进模型 Mod_Bc、Mod_Bbc、Mod_Bac、Mod_Babc 的 AIC 低于基础模型, logLik 高于基础模型; 从对数似然比检验看,引入 SI 的生物量方程显著优于基础模型 ($P < 0.05$) (表 3)。尽管 Mod_Babc 的 LogLik 大于 Mod_Bac,但没有考虑增加了参数带来的复杂性,所以根据 AIC 的取值确定最终选用的模型,因此采用 Mod_Bac 模型作为计算 B 时的模型形式。验证 Mod_Bac 模型预测精度,发现 R^2 为 0.86, MRE 和 MAE 分别为 16.50 和 14.97,认为模型预测效果较好。

表 3 生物量独立模型拟合统计量

Table 3 Biomass independent model fit statistics

模型 Models	校正精度 Correction precision					预测精度 Prediction accuracy		
	R^2	AIC	LogLik	LRT		R^2	MRE/%	MAE
				χ^2	P			
Mod_B	0.997	125.319	-58.659					
Mod_Ba	0.997	125.552	-57.776	1.766	0.184			
Mod_Bb	0.998	124.438	-57.219	2.881	0.090			
Mod_Bc	0.998	122.329	-56.165	4.989	0.026			
Mod_Bab								
Mod_Bbc	0.998	118.213	-53.106	11.106	<0.01			
Mod_Bac	0.998	118.095	-53.047	11.224	<0.01	0.86	16.50	14.97
Mod_Babc	0.998	119.436	-52.718	11.883	<0.01			

Mod_B 是 B 和 BA 、 H 的基础模型, Mod_Ba、Mod_Bb、Mod_Bc、Mod_Bab、Mod_Bbc、Mod_Bac、Mod_Babc 是在基础模型参数 a 、 b 、 c 等引入 SI 后的改进模型, Mod_Bab 不收敛; 将显著性分为显著和不显著: 显著 ($P < 0.05$)、不显著 ($P \geq 0.05$)。 R^2 : 决定系数 determination coefficient; AIC: 赤池信息准则 Akaike Information Criterion; LogLik: 对数似然值 Log Likelihood; LRT: 对数似然比检验 likelihood ratio test; MRE: 平均相对误差 mean relative error; MAE: 平均绝对误差 mean absolute error

3.1.2 林分公顷胸高断面积和平均高生长方程构建

构建林分公顷胸高断面积和平均高生长方程,并在参数中引入 SI ,与基础方程相比,改进方程的 R^2 分别提高了 0.141 和 0.233, AIC 低于基础模型, LogLik 也有显著提高; 对数似然比检验结果也表明,改进模型相对于基础方程拟合优度具有显著提升 ($P < 0.05$) (表 4)。这也说明,立地条件对 BA 和 H 的生长过程有显著影响。根据 AIC 的取值,最终选用 Mod_BAabc 和 Mod_Habc 模型分别作为 BA 和 H 的生长过程模型。验证 Mod_BAabc、Mod_Habc 模型预测精度,结果表明,预测值与实测之间线性回归方程的 R^2 分别为 0.76 和 0.94, MRE 分别为 9.86% 和 10.36%, MAE 分别为 $3.47\text{m}^2/\text{hm}^2$ 和 0.96m , 模型预测效果较好。

3.1.3 林分生物量估测

经 3.1.1 和 3.1.2 模型评价结果选取出的 R^2 有显著提高的改进模型,作为最终的生物量生长方程组,基于这些模型进行林分生物量的估算 (式 8—10)。不同地位指数的杉木人工林总生物量 B 随林龄 (A) 之间的变

化趋势相同(图 1),随林龄的增大呈 S 型曲线增长,增长速度先快后慢,最后逐渐趋于平稳。在相同年龄时,地位指数越高,林分总生物量越大,且随着年龄的增大,各地位指数级林分生物量之间的差异有增加的趋势。

表 4 林分公顷胸高断面面积和林分平均高生长方程参数拟合结果

Table 4 Results of parameter fitting of the stand hectare breast height section and stand mean height growth equation

模型 Models	校正精度 Correction precision					预测精度 Prediction accuracy		
	R^2	AIC	LogLik	LRT		R^2	MRE/%	MAE
				χ^2	P			
Mod_BA	0.706	158.283	-75.142					
Mod_BAa	0.740	157.236	-73.618	3.048	0.081			
Mod_BAb	0.836	145.731	-67.865	14.553	<0.01			
Mod_BAc	0.765	154.747	-72.373	5.537	0.019			
Mod_BAab	0.841	146.956	-67.478	15.327	<0.01			
Mod_BAabc	0.840	147.087	-67.543	15.197	<0.01			
Mod_BAac	0.769	156.250	-72.125	6.034	0.05			
Mod_BAabc	0.847	147.967	-66.984	16.316	<0.01	0.76	9.86	3.47
Mod_H	0.756	165.554	-78.777					
Mod_Ha	0.988	58.354	-24.177	109.2	<0.01			
Mod_Hb	0.982	73.453	-31.726	94.101	<0.01			
Mod_Hc								
Mod_Hab	0.986	66.329	-27.164	103.22	<0.01			
Mod_Hbc	0.913	132.442	-60.221	37.112	<0.01			
Mod_Hac	0.983	72.704	-30.352	96.85	<0.01			
Mod_Habc	0.989	58.745	-22.373	112.81	<0.01	0.94	10.36	0.96

Mod_BA 是 BA—A 的基础模型, Mod_BAa、Mod_BAb、Mod_BAc、Mod_BAab、Mod_BAabc、Mod_BAac、Mod_BAabc 是在基础模型参数 a 、 b 、 c 等引入 SI 后的改进模型; H —A 的模型命名方式同上; Mod_Hc 不收敛; 将显著性分为显著和不显著: 显著 ($P < 0.05$)、不显著 ($P \geq 0.05$)

$$B = (0.791 - 0.018 \times SI) \times BA^{1.037} \times H^{(0.436+0.016 \times SI)} \tag{8}$$

$$BA = (48.68 - 0.526 \times SI) \times (1 - e^{-(0.07+0.022 \times SI) \times A})^{(14.68-0.65 \times SI)} \tag{9}$$

$$H = (-1.16 + 1.56 \times SI) \times (1 - e^{-(0.08-0.002 \times SI) \times A})^{(1.19-0.0097 \times SI)} \tag{10}$$

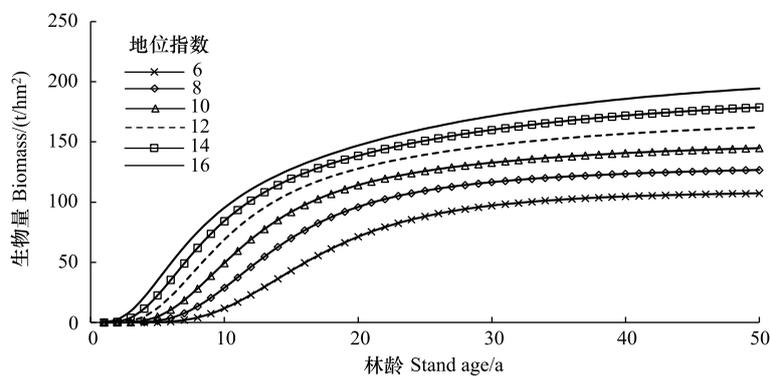


图 1 不同地位指数林分生物量与林龄的关系曲线

Fig.1 Relationship curves between biomass and age of stand with different status indices

3.2 基于 3-PG 模型的林分生物量估测

3.2.1 模型评价

将校正样本代入参数化的模型中,将模型预测值与实测值进行回归分析。结果表明,各因子的 R^2 均高于 0.82,其中胸径 R^2 最高为 0.98,各因子的 MRE 均在 28% 以内,表明调整后的模型参数可以很好的拟合样地生

物量变化情况。

将检验样本样地的气候参数、立地参数和校正后的杉木生理参数输入到模型中,模型能够同时预测验证样本在生长过程中每月的林分平均胸径、平均树高、总生物量等。通过验证结果可得,实测值和预估值之间有很高的相关性,所有因子的 R^2 在 0.65—0.96 之间,尤其是平均胸径和平均树高的 R^2 均高于 0.92; 各因子的 MRE 均在 26% 以内。因此,3-PG 模型对研究区杉木人工林的生长过程的模拟和预测效果较为良好,见表 5。

表 5 模型评价结果

Table 5 Model evaluation results

精度 Accuracy	统计量 Statistic	R^2	MAE	MRE/%
校正精度 Correction precision	胸径/cm	0.98	1.39	13.52
	胸高断面积/cm ²	0.82	7.14	20.87
	树高/m	0.96	1.22	14.13
	干生物量/(t/hm ²)	0.85	16.18	27.30
	总生物量/(t/hm ²)	0.85	22.08	26.10
	蓄积量/(m ³ /hm ²)	0.85	35.77	21.66
预测精度 Prediction accuracy	胸径/cm	0.96	1.58	14.67
	胸高断面积/cm ²	0.65	8.59	24.42
	树高/m	0.92	1.14	12.33
	干生物量/(t/hm ²)	0.81	5.16	25.61
	总生物量/(t/hm ²)	0.81	21.33	23.52
	蓄积量/(m ³ /hm ²)	0.78	39.69	21.76

3.2.2 基于 3-PG 模型的林分生物量预估

利用参数化的 3-PG 模型,模拟林分 0—50a 的生物量变化,将土壤肥力等级(FR)的变化梯度设定为 0.2、0.4、0.6、0.8,分析土壤肥力等级 FR 对林分生物量的影响(图 2)。结果表明,总生物量表现出类似“S”形的生长曲线。当林龄小于 10a 时,生长较为缓慢,但生长速度随林龄增加不断变大;当林龄在 10—40a 之间,生长旺盛;当林龄超过 40a 时,生长速度逐渐变缓。对不同 FR 的林分进行对比分析表明,相同林龄下, FR 值越高,生物量也越大,并且土壤肥力越高,增长速度越快。

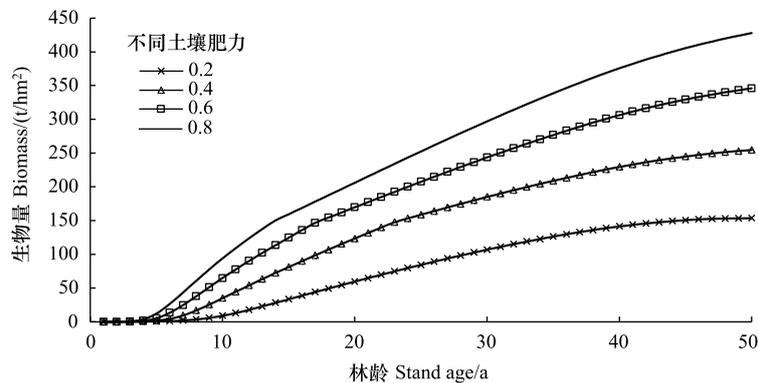


图 2 不同土壤肥力林分生物量与林龄的关系曲线

Fig. 2 The relationship curve between biomass and stand age of different soil fertility stands

3.3 模型比较

对比两种模型的生物量估测结果(图 3)发现,二者模拟的杉木人工林林分总生物量变化均表现为先快速增加,然后逐渐趋于稳定;在生长后期,3-PG 模型模拟的生物量会高于异速生长方程的预估值。

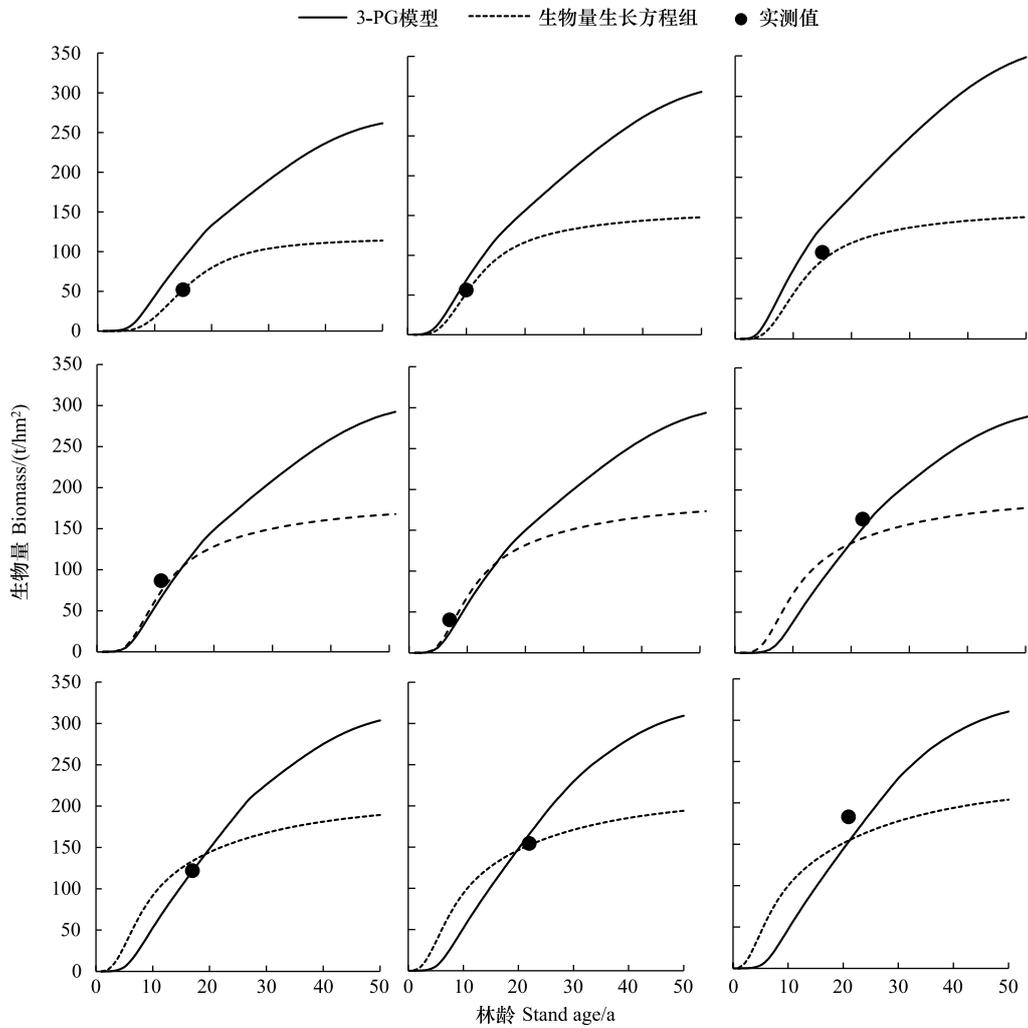


图3 模型生物量预测比较

Fig.3 Comparison of model biomass prediction

3.4 间伐对林分生长的影响

经营措施影响森林生态系统的结构和功能,3-PG 模型能够准确反映间伐对杉木的影响。利用参数化后的 3-PG 模型模拟杉木人工林林分生物量在当前气候情景下对间伐的响应,结果表明,随着林龄的增加,间伐林分和不间伐林分生物量均表现出先快速增加、后逐渐平稳的趋势;间伐林分在间伐后的短期内林分生物量生长速率高于间伐前,但逐渐趋于与未间伐林分一致。在整个模拟周期内,间伐林分低于未间伐林分。

4 讨论

4.1 林分生物量估测

本研究基于经验模型和机理模型对江西杉木人工林林分进行生物量生长预测。在生物量生长方程组中引入地位指数 (SI),发现立地条件对生物量生长过程的影响显著,在基础模型中引入 SI 后对模型的改进效果显著 ($P < 0.05$),模型精度明显提高。翁建宇通过构建引入林龄和地位指数的相容性生物量异速生长模型^[37],发现林龄和立地条件对树木各组分生物量的异速生长关系影响显著,陈东升通过将林龄加入到各组分生物量异速方程^[38],发现对干、枝、叶生物量方程有显著改善,与本研究结果一致。

本研究中 3-PG 模型的 P_2 、 P_{20} 、 a_s 、 n_s 、 η_{Rx} 、 η_{Rn} 、 γ_R 、 k 、 α_{Cx} 等参数取值是通过迭代方法选取最大决定系数对

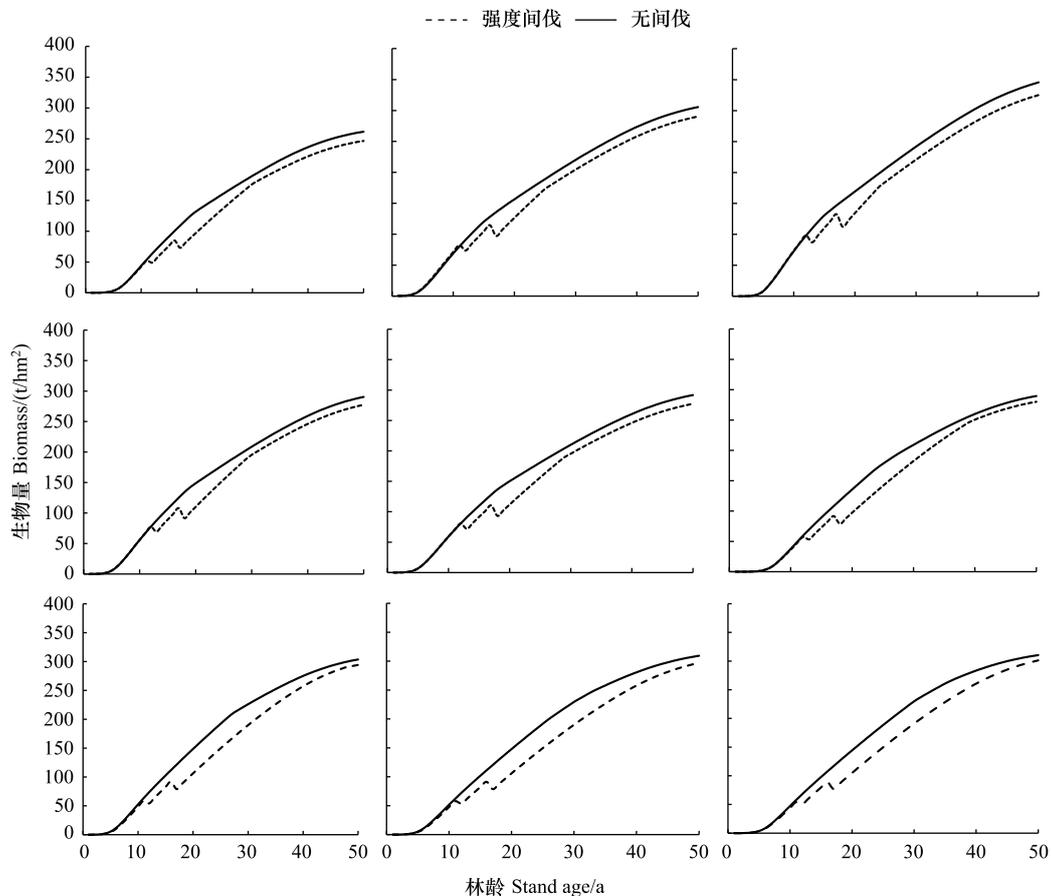


图4 杉木人工林对间伐的响应

Fig.4 Response of *Cunninghamia lanceolata* plantations to thinning

应的最优拟合参数得到,与夏晓运、白羽等使用的方法相同^[27-28]。通过模型结果可以看出,预测值与实测值一致性好,平均相对误差在26%以内。与以往研究结果相比,本研究拟合度有所提升,如刘坤对杉木人工林的研究中得到胸径的 R^2 为0.92^[26],本研究的 R^2 提高到了0.96;马莉燕对于3-PG模型进行改进^[39],得到的树高 R^2 为0.84,本研究的 R^2 为0.92。

林龄相同时,杉木人工林林分生物量随 SI 、 FR 增大而增加; SI 、 FR 相同时,生物量随林龄的变化趋势相同,即随林龄的增大呈S型曲线增长,增长速度先快后慢,最后逐渐趋于平稳,立地条件的差异不影响林分生长规律,与前人的研究结果一致^[8,37]。

4.2 经验与机理模型比较

本研究利用胸径、树高等的实测数据拟合得到模型参数,通过对两模型预测精度评价,发现经验模型预测 B 、 BA 和 H 的 R^2 、MAE、MRE均优于机理模型;在生长后期,3-PG模型模拟的生物量会高于异速生长方程的预估值,二者的预估值存在较大差异,推测这是由于经验模型高度依赖建模数据的分布范围所致。也就是说,经验模型参数是通过一个阶段的林分生长状况获得,不能代表整个林分生长周期的生长状况。因此,尽管经验模型所需参数较易获得,但只适用于模拟某一个生长阶段,当用来拟合整个林分生长过程时效果不佳^[8,27]。机理模型虽然需要的参数较多,本研究基于生态学原理,采用迭代优化等多种方法获取模型驱动参数,弥补了经验模型的不足,可较好解释和模拟环境因子对树木生长的影响^[40-41]。因此,在本研究中,更倾向于使用参数化的3-PG模型预测江西杉木人工林的生长情况,且模型对未来生物量动态变化模拟更加准确。

4.3 间伐对林分生长的影响

间伐通过改变林分结构,影响林木的生长。本研究结果表明,间伐后(从开始间伐至林龄为50a)林分生

物量明显低于对照无间伐林分,王有良等^[42]也发现杉木人工林生态系统总碳储量随着间伐强度的增加而减小,这是由于间伐后部分林木被移出林地,林地内林分密度减小,郁闭度下降,导致林地内的碳储量降低;但间伐后林分连年生长量有提高的趋势,黄雪蔓等^[43]认为间伐可有效促进林分生物量的生长的结果一致。本研究中,这种促进效果仅表现在间伐后的几年中,而后生物量生长量与无间伐时一致。

5 结论

本文利用生物量生长方程组和 3-PG 模型,探索了江西杉木人工林的生长规律。结论如下:

(1) 引入地位指数的生物量生长方程组,与基础模型相比,精度明显提高,模型拟合效果更好。

(2) 参数化后的 3-PG 模型能够准确模拟江西杉木人工林的生长过程,可以作为一种有效的森林管理工具,预测杉木人工林生物量生长随时间的变化,为江西杉木人工林生长规律研究提供依据,为森林经营提供科学指导。

(3) 在生长周期为 0—50a 时,更倾向于使用参数化的 3-PG 模型预测江西杉木人工林的生长情况。

(4) 立地条件不会改变林分生物量生长趋势,但在林龄相同时,立地条件较好的林分生物量高于较差的林分。

(5) 在本研究模拟周期内,间伐不仅会提高林分生长速率,还会使其生物量低于无间伐的情况,但不影响林分生长的整体趋势。

参考文献(References):

- [1] Dixon R K, Solomon A M, Brown S, Houghton R A, Trexler M C, Wisniewski J. Carbon pools and flux of global forest ecosystems. *Science*, 1994, 263(5144): 185-190.
- [2] 冯源,肖文发,朱建华,黄志霖,鄢徐欣,吴东. 林龄和气候变化对三峡库区马尾松林蓄积量的影响. *北京林业大学学报*, 2019, 41(11): 11-21.
- [3] 左舒翟,任引,王效科,张小全,罗云建. 中国杉木林生物量估算参数及其影响因素. *林业科学*, 2014, 50(11): 1-12.
- [4] 周佳玉,袁川,马杰敏等. 温带森林乔木生物量估算: Logistic 模型优于 Allometric 模型. *生态学报*, 2023, 43(22): 1-14.
- [5] 王姣娇,高唤唤,康宏樟. 杉木人工林碳储量影响因素研究进展. *西北林学院学报*, 2018, 33(3): 74-81.
- [6] Bi H Q, Turner J, Lambert M J. Additive biomass equations for native eucalypt forest trees of temperate Australia. *Trees*, 2004, 18(4): 467-479.
- [7] Fu L Y, Zeng W S, Tang S Z, Sharma R P, Li H K. Using linear mixed model and dummy variable model approaches to construct compatible single-tree biomass equations at different scales-A case study for Masson pine in Southern China. *Journal of Forest Science*, 2012, 58(3): 101-115.
- [8] 赵梅芳. 基于 3-PG 机理模型的杉木林碳固定及蒸散量模拟研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2008.
- [9] Richards GP, Evans DMW. Development of a carbon accounting model (FullCAM vers. 1.0) for the Australian continent. *Australian Forestry*, 2004, 67(4): 277-283.
- [10] 何潇,雷相东,段光爽,丰庆荣,张逸如,冯林艳. 气候变化对落叶松人工林生物量生长的影响模拟. *南京林业大学学报: 自然科学版*, 2023, 47(3): 120-128.
- [11] 曾鸣,聂祥永,曾伟生. 中国杉木相容性立木材积和地上生物量方程. *林业科学*, 2013, 49(10): 74-79.
- [12] 曾伟生,陈新云,蒲莹,杨学云. 基于国家森林资源清查数据的不同生物量和碳储量估计方法的对比分析. *林业科学研究*, 2018, 31(1): 66-71.
- [13] 吴举扬,朱江,艾训儒,姚兰,郭秋菊,闫凤辰,薛卫星. 亚热带常绿落叶阔叶混交林木本植物生物量模型 meta 分析. *中南林业科技大学学报*, 2023, 43(4): 111-122.
- [14] Zeng W S, Tang S Z. Modeling compatible single-tree aboveground biomass equations of Masson pine (*Pinus massoniana*) in South China. *Nature Precedings*, 2012, 23(4): 593-598.
- [15] 符利勇,曾伟生,唐守正. 利用混合模型分析地域对国内马尾松生物量的影响. *生态学报*, 2011, 31(19): 5797-5808.
- [16] 李海奎,宁金魁. 基于树木起源、立地分级和龄组的单木生物量模型. *生态学报*, 2012, 32(3): 740-757.
- [17] Xie Yalin. 基于 3-PG_{mix} 模型的气候变化和间伐对落叶松林生长收获的影响[D]. 北京: 北京林业大学, 2020.
- [18] Grace J C, Jarvis P G, Norman J M. Modelling the interception of solar radiant energy in intensively managed stands. *New Zealand Journal of Forestry*

- Science, 1987, 17(2/3): 193-209.
- [19] Aber J D, Federer C A. A generalized, lumped-parameter model of photosynthesis, evapotranspiration and net primary production in temperate and boreal forest ecosystems. *Oecologia*, 1992, 92(4): 463-474.
- [20] Landsberg J J, Waring R H. A generalised model of forest productivity using simplified concepts of radiation-use efficiency, carbon balance and partitioning. *Forest Ecology and Management*, 1997, 95(3): 209-228.
- [21] Waring R H, Running S W. Forest ecosystem analysis at multiple time and space scales. *Forest Ecosystems*. Amsterdam: Elsevier, 2007: 1-16.
- [22] 郭明春, 刘建锋. 杉木人工林林分生长模拟. *福建林学院学报*, 2011, 31(1): 65-68.
- [23] Almeida A C, Smethurst P J, Siggins A, Cavalcante R B L, Borges N Jr. Quantifying the effects of Eucalyptus plantations and management on water resources at plot and catchment scales. *Hydrological Processes*, 2016, 30(25): 4687-4703.
- [24] Coops N C, Waring R H, Law B E. Assessing the past and future distribution and productivity of ponderosa pine in the Pacific Northwest using a process model, 3-PG. *Ecological Modelling*, 2005, 183(1): 107-124.
- [25] Gonzalez-Benecke C A, Jokela E J, Cropper W P, Bracho R, Leduc D J. Parameterization of the 3-PG model for *Pinus elliottii* stands using alternative methods to estimate fertility rating, biomass partitioning and canopy closure. *Forest Ecology and Management*, 2014, 327: 55-75.
- [26] 刘坤, 曹林, 汪贵斌, 申鑫, 曹福亮. 基于 3-PG 模型的杉木人工林各器官生物量和 LAI 估算. *西北农林科技大学学报: 自然科学版*, 2015, 43(9): 57-64.
- [27] 夏晓运, 庞勇, 黄庆丰, 吴荣, 陈东升, 白羽. 基于 3-PG 模型的长白落叶松生物量生长预测. *林业科学*, 2021, 57(3): 67-78.
- [28] 白羽, 庞勇, 夏晓运, 贾炜玮. 长白落叶松解析木数据参数化 3-PG 模型. *林业科学*, 2022, 58(1): 98-110.
- [29] Waterworth R M, Richards G P. Implementing Australian forest management practices into a full carbon accounting model. *Forest Ecology and Management*, 2008, 255(7): 2434-2443.
- [30] Peng C H, Liu J X, Dang Q L, Apps M J, Jiang H. TRIPLEX: a generic hybrid model for predicting forest growth and carbon and nitrogen dynamics. *Ecological Modelling*, 2002, 153(1/2): 109-130.
- [31] 焦文星. 基于改进的过程模型模拟林分密度和土壤条件对苏北杨树人工林碳分配的影响[D]. 南京: 南京林业大学, 2022.
- [32] 邱富宏. 中国南方杉木人工林碳动态模拟研究. *西北农林科技大学学报: 自然科学版*, 2016, 44(8): 127-134, 142.
- [33] 蔡兆炜. 福建杉木人工林生物量模型研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2014.
- [34] 符利勇, 雷渊才, 曾伟生. 几种相容性生物量模型及估计方法的比较. *林业科学*, 2014, 50(6): 42-54.
- [35] 刘琼阁, 彭道黎, 黄国胜, 曾伟生, 王雪军. 东北云杉相容性立木材积和地上生物量模型研建. *北京林业大学学报*, 2015, 37(2): 8-15.
- [36] 国家林业局. LY/T 2264—2014 立木生物量模型及碳计量参数——杉木. 北京: 中国标准出版社, 2014.
- [37] 翁建宇. 林龄和立地条件对杉木林乔木层生物量分配的影响. *福建林业科技*, 2022, 49(1): 30-39.
- [38] 陈东升, 孙晓梅, 金英博, 张扬, 张守攻. 林龄和竞争对日本落叶松各组分生物量异速关系的影响. *生态学报*, 2020, 40(3): 843-853.
- [39] 马莉燕, 张怀清, 李永亮, 郭明春, 张晔理. 基于单木过程模型的杉木林分生长模拟研究. *林业科学研究*, 2015, 28(4): 551-556.
- [40] 薛海连, 田相林, 曹田健. 利用经验-过程混合建模方法优化华山松过程模型的参数. *林业科学*, 2021, 57(9): 21-33.
- [41] Forrester D I, Tang X L. Analysing the spatial and temporal dynamics of species interactions in mixed-species forests and the effects of stand density using the 3-PG model. *Ecological Modelling*, 2016, 319: 233-254.
- [42] 王有良, 林开敏, 宋重升, 崔朝伟, 彭丽鸿, 郑宏, 郑鸣鸣, 任正标, 邱明镜. 间伐对杉木人工林生态系统碳储量的短期影响. *南京林业大学学报: 自然科学版*, 2022, 46(3): 65-73.
- [43] 黄雪蔓, 尤业明, 蓝嘉川, 刘世荣, 贾宏炎, 朱宏光, 温远光. 不同间伐强度对杉木人工林碳储量及其分配的影响. *生态学报*, 2016, 36(1): 156-163.