

中南林业科技大学学报

Journal of Central South University of Forestry & Technology

ISSN 1673-923X，CN 43-1470/S

《中南林业科技大学学报》2026年第6期

Doi:10.14067/j.cnki.1673-923X.2026.06.009

论文标题： 基于立地和气候效应的杉木优势木胸径生长模型

作　　者： 何星谊，刘恩林，吕 勇，等

收稿日期： 2025-04-06

引文格式： 何星谊,刘恩林,吕勇,等.基于立地和气候效应的杉木优势木胸径生长模型[J].中南林业科技大学学报,2026,46(6):91-102,183.

HE X Y, LIU E L, LYU Y, et al. A diameter at breast height growth model for dominant Chinese fir trees incorporating site and climatic effects[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2026,46(6):91-102,183.

相关论文推荐

Recommended articles

基于气候与立地效应的杉木人工林平均木树高生长模型

Average tree height growth model of *Cunninghamia lanceolata* plantation based on climate and site effects

基于竞争与气候效应的中国亚热带杉木人工林断面积生长模型

Basal area growth model of Chinese fir plantation in subtropical China based on competition and climatic effects

含气候效应的湖南杉木人工林断面积生长模型

Basal area growth model of *Cunninghamia lanceolata* plantation in Hunan Province with climate effect

基于立地与密度效应的湖南栎类天然林平均木胸径生长模型

A growth model of average tree diameter at breast height of *Quercus* natural forests in Hunan based on site and density effects

基于平均优势木胸径的湖南杉木人工林立地质量评价模型

Site quality evaluation model of Chinese fir plantation in Hunan based on the DBH of average dominant trees

基于竞争与立地效应的湖南栎类天然林冠幅模型

Crown diameter model of Hunan *Quercus* natural forest based on competition and site effect

Doi:10.14067/j.cnki.1673-923x.2026.06.009
http: //qks.csuft.edu.cn

基于立地和气候效应的杉木优势木胸径生长模型

何星谊[1]，刘恩林[2]，吕　勇[1]，张雄清[3]，朱光玉[1]

（1. 中南林业科技大学 林学院，湖南 长沙 410004；2. 国家林业和草原局中南调查规划院，湖南 长沙 410014；
3. 中国林业科学研究院 林业研究所，北京 100091）

摘　要：【目的】为了精准预测杉木的生长动态，构建反映立地和气候条件的杉木优势木胸径生长模型，为杉木人工林可持续经营和碳汇功能评估提供指导。【方法】以 129 块杉木人工林样地的 1 121 组杉木优势木胸径生长数据为研究对象，结合地形、土壤和气候等环境因子，采用数量化方法Ⅰ筛选出影响杉木优势木胸径生长的显著性环境因子；基于树木生长理论方程确定最优基础模型；运用 K-means 聚类算法将立地类型和气候类型聚类为立地类型组和气候类型组；采用非线性混合效应回归建模法，将立地类型、气候类型、立地类型组和气候类型组分别或同时作为随机效应构建优势木胸径生长模型。【结果】筛选出海拔、坡向、哈格里弗斯气候水汽亏损和极端最低气温等 7 个影响优势木胸径生长的主导因子；6 个基础模型中，Korf 模型拟合效果最优，确定系数 R^2 为 0.782 0；75 种立地类型和 173 种气候类型分别聚类为 5 组立地类型组和 7 组气候类型组；在构建的各混合效应模型中，仅含立地类型组和仅含气候类型组的随机效应模型的 R^2 分别为 0.822 9 和 0.839 1，同时包含立地和气候因子的随机效应模型 R^2 为 0.854 3，明显优于其余模型。【结论】本研究所构建的基于立地和气候效应的非线性混合效应模型综合了影响杉木优势木胸径生长的环境因子，不仅能为预估杉木优势木胸径生长提供科学指导，同时也可为考虑环境因子对亚热带杉木人工林生长的影响和预测提供可推广的建模框架。

关键词：杉木人工林；非线性混合效应；立地类型组；气候类型组；优势木胸径生长模型

中图分类号：S758.62　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1673-923X(2026)06-0091-12

A diameter at breast height growth model for dominant Chinese fir trees incorporating site and climatic effects

HE Xingyi[1], LIU Enlin[2], LYU Yong[1], ZHANG Xiongqing[3], ZHU Guangyu[1]

(1. School of Forestry, Central South University of Forestry & Technology, Changsha 410004, Hunan, China;
2. Central South Inventory and Planning Institute, National Forestry and Grassland Administration, Changsha 410014, Hunan, China;
3. Research Institute of Forestry, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China)

Abstract:【Objective】To accurately predict the growth dynamics of Chinese fir and construct a dominant tree diameter at breast height (DBH) growth model that integrates site and climatic conditions, and to provide guidance for sustainable management and carbon sequestration assessment of Chinese fir plantations.【Method】 Utilizing 1 121 DBH-age datasets from 129 Chinese fir plantation plots, topographic, edaphic and climatic factors were incorporated. Significant environmental drivers affecting DBH growth were identified through Quantification Theory I. The optimal theoretical growth equation was selected from six candidate models. Site types and climate types were clustered into site type groups and climate type groups using the k-means algorithm. Nonlinear mixed-effects regression models were developed by incorporating site type, climate type, and their clustered groups as random effects, either individually or in combination.【Result】Seven leading factors influencing DBH growth of dominant trees, including altitude, aspect, Climatic moisture deficit and extreme minimum temperature, were screened. Among the six basic models, the Korf model had the best fitting effect, with a determination coefficient R^2 of 0.782 0, 75 site types and 173 climate types clustered into 5 site type groups and 7 climate type groups, respectively, and the random effect model R^2 with site factor groups and climate factor groups only was 0.822 9 and 0.839 1, respectively, and the random effect model with site and climate factors was R^2= 0.854 3 which was significantly better than the other models.【Conclusion】The nonlinear mixed-effects model developed in this study, which integrates site- and climate-effects, comprehensively incorporates environmental factors influencing the DBH growth of dominant Chinese fir trees. This model not only provides scientific guidance for predicting the DBH growth of dominant Chinese fir trees, but also establishes a generalizable modeling framework for analyzing and forecasting environmental impacts on the growth of subtropical Chinese fir plantations.

Keywords: Chinese fir plantations; nonlinear mixed-effects; site type groups; climate type groups; DBH growth model of dominant trees

收稿日期（Received）：2025-04-06　　**修订日期**（Revised）：2025-06-30

基金项目：国家重点研发计划项目（2022YFD2200501-03）。

第一作者：何星谊（1258723009@qq.com），硕士研究生。　**通信作者：**朱光玉（zgy1111999@163.com），教授，博士，博士研究生导师。

引文格式：何星谊 , 刘恩林 , 吕勇 , 等 . 基于立地和气候效应的杉木优势木胸径生长模型 [J]. 中南林业科技大学学报 ,2026,46(6):91-102,183.
HE X Y, LIU E L, LYU Y, et al. A diameter at breast height growth model for dominant Chinese fir trees incorporating site and climatic effects[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2026,46(6):91-102,183.

单木生长模型是通过量化林分内单株木与相邻木的动态竞争关系，构建单株林木生长过程的模型[1]，是判断每株林木的生长状态以及生长潜力的有力手段，对于指导森林的合理经营具有极大的价值[2]。胸径作为预估林木生长量的核心变量，其优势主要体现在两个方面：其一，胸径的获取具有操作便捷与数据可靠的优势，操作便捷主要体现在单木的胸径数据可以通过胸径尺的测量来快速获取。数据可靠主要体现在可以通过查询森林资源清查中的胸径资料来获取胸径数据，为生长建模提供基础支撑；其二，胸径与树干材积存在稳定的相关性，可精准推算出林分蓄积量，为制定森林经营方案提供量化依据。因此，胸径被普遍应用于林木生长模型中[3-6]。

目前，关于构建胸径生长模型的研究中，部分研究者选择直接基于树木理论生长方程构建胸径生长模型，即根据树木的年龄与胸径之间的数学关系进行拟合建立模型。但胸径的生长并不是单一的，其生长往往会受到立地、气候和竞争等因子的影响，而这种直接构建的方式并未考虑这些因子对胸径生长的影响[7-8]。为了解决这些不足，部分研究者考虑了立地因子对胸径生长的影响，将立地因子作为随机效应添加在模型参数上，构建基于立地因子的胸径混合效应生长模型。何静等[9]构建了栎类天然林优势木胸径混合效应生长模型，得出了立地因子对湖南栎类天然林优势木胸径生长影响显著的结论。汤维[10]通过构建基于立地混合效应的杉木人工林胸径生长模型，筛选出适合培育杉木大径材的立地类型。由此可知，立地因子对林木胸径的生长影响显著。随着全球气温不断升高，影响林木胸径生长的因子不再局限于立地因子，气候因子也具有重要的影响。宁鹏[11]利用 5 个典型生长方程拟合出 4 个优势树种的最优胸径生长模型，其中年均最高气温、相对湿度、年降水量等因子对各优势树种胸径生长的影响显著。臧颢等[12]构建了包含竞争因子和气候因子的胸径生长模型，结果表明最低温度和降水量对杉木人工林胸径生长量具有显著影响。上述研究虽然在构建胸径生长模型中考虑了部分因子的影响，但并未同时考虑立地和气候因子对胸径生长的影响。因此，本研究构建含立地和气候因子的胸径生长模型，不仅能够更为全面地解决构建胸径生长模型中存在的不足之处，同时也能够为其他研究者提供参考依据。

杉木 *Cunninghamia lanceolata* 是我国亚热带地区重要的速生用材树种，兼具材质优良、栽培历史久远、经济价值突出等优势[13]。根据第九次森林资源清查结果，我国杉木人工林的面积占比为 17.33%，约占人工林总面积的 1/5[14]。杉木除了有较高的经济效益，还具有重要的生态价值，对水源涵养、木材生产、碳汇功能、净化环境及生态修复至关重要[15]，在我国木材供给和平衡亚热带森林生态系统等方面发挥着重要作用[16]。因此，本研究以亚热带地区杉木人工林为对象，构建基于立地和气候效应的杉木优势木胸径生长模型，可为研究不同环境条件下的杉木人工林生长情况提供有效的参考价值和模型指导依据。

1 研究区域概况

本研究聚焦亚热带核心分布区，选取福建、广西、贵州、湖南、江西及云南为研究区域（102°42′ ～ 114°18′E，20°54′ ～ 28°41′N），北接鄂皖渝川 4 省市，南邻广东，西濒缅甸，东接浙江，呈现典型地板块状地理格局。研究区域属亚热带湿润季风气候带，水热资源丰沛，年均气温 15 ～ 20 ℃，最冷月（1 月）均温高于 0 ℃，最热月（7 月）均温约 25 ℃；年降水量约 1 200 mm，雨季（5—9 月）降水量占全年的 70% 以上。地貌以山地丘陵为主（占比＞ 80%），成土母质多为花岗岩与砂页岩，发育典型黄壤、黄红壤及红壤剖面。植被群落层次结构复杂，乔木层以杉木为建群种，伴生种包括马尾松 *Pinus massoniana*、湿地松 *Pinus elliottii*、木荷 *Schima superba*、青冈 *Cyclobalanopsis glauca* 及枫香 *Liquidambar formosana* 等；林下灌木层以柃木 *Eurya spp.* 和杜鹃 *Rhododendron spp.* 为主，草本层以芒萁 *Dicranopteris pedata* 为优势种，构成完整的亚热带森林生态系统。

2 材料与方法

2.1 数据采集

模型构建所用的数据截止日期均为 2023 年，来源于上述 6 个省区 8 个县市的 129 块杉木人工林样地。分别为顺昌县、南丹县、黎平县、城步县、祁阳市、宁乡市、安福县和马关县。主要调查了样地的经纬度坐标、坡度、海拔、土壤类型和土层厚度等基本样地因子，以及林龄、胸径（≥ 5 cm）和树高等样木因子，具体因子见表 1。

表 1　林分因子调查统计表
Table 1　Statistics of stand survey factors

变量 Variable	最小值 Minimum value	最大值 Maximum value	平均值 Average value	标准差 Standard deviation
胸径 DBH /cm	17.2	36.6	24.3	4.1
年龄 Age /a	10	38.0	21.1	6.9
海拔 Altitude /m	146.0	1 460.0	751.6	473.7
坡度 Slope /(°)	4.0	43.0	24.0	24.2

根据调查结果，选取生长正常、无病虫害、不断梢的杉木作为解析木，其中优势木数量为 114 株。读取每棵优势木各个圆盘的年龄，再根据每个圆盘所读取出的年龄，通过胸径处（1.3 m 高）的圆盘推导得出各个圆盘所对应年龄的胸径值，总计 1 121 组优势木胸径样本数据，再按照近似 4∶1 的比例随机划分为 897 组建模数据和 224 组检验数据，具体如表 2 所示。

表 2　建模数据和检验数据统计表
Table 2　Statistics of train data and test data factors

变量 Variable	建模数据 Modeling data		检验数据 Validation data	
	胸径 DBH /cm	林龄 Age /a	胸径 DBH /cm	林龄 Age /a
最小值 Minimum value	0.3	1.0	0.5	1.0
最大值 Maximum value	36.6	38.0	31.2	35.0
平均值 Average value	14.6	11.3	14.6	11.6
标准差 Standard deviation	7.3	6.9	6.9	6.8

各样地每年的气候因子是利用 Wang 等 [17] 研发的 ClimateAP 软件提取获得，根据各个解析木对应的年龄段，将 1 121 组样本数据的经纬度和海拔逐个输入，获取对应时间段的年平均降水量（MAP）、相对湿度（RH）、最暖月平均温度（MWMT）、年平均温度（MAT）等 12 项气候因子数据，再计算出平均气候因子。具体气候因子分布情况如表 3 所示。

表 3　样地气候因子统计量
Table 3　Statistics of climate factors in the study area

变量 Variable	最小值 Minimum	最大值 Maximum	平均值 Average	标准差 Standard deviation
年平均降水量 MAP /mm	910.0	2 440.0	1 527.8	280.5
相对湿度 RH /%	82.0	67.0	74.9	2.7
最暖月平均温度 MWMT /℃	31.0	21.6	26.9	2.4
年平均温度 MAT /℃	21.3	13.4	17.8	1.7

2.2　研究方法

2.2.1　立地因子和气候因子等级划分

为方便划分立地类型，将调查得到的坡向、坡度和土层厚度等 6 个立地因子，参照《测树学》中的分级标准将各类因子进行分级 [18]。具体等级如表 4 所示。

表 4　立地因子等级划分
Table 4　Site factor classification

立地因子 Site factor	符号 Symbol	划分标准 Standard of division
海拔 Altitude /m	HB	100 m 一级
坡度 Slope gradient /(°)	PD	＜ 5、5 ～ 14、15 ～ 24、25 ～ 34、35 ～ 44、≥ 45
坡位 Slope position	PW	脊部、上坡、中坡、下坡、山谷
坡向 Slope aspect /(°)	PX	阳坡、阴坡、无坡向
土壤类型 Soil type	LX	红黄壤、红壤、黄壤、黄棕壤
土壤厚度 Soil thickness /cm	HD	＜ 40 cm、40 ～ 79 cm、≥ 80 cm

为方便划分气候因子，参照齐战涛等 [19] 的划分标准将获取的 12 项气候因子进行分级。具体划分标准如表 5 所示。

表 5　气候因子等级划分
Table 5　Climatic factor classification

气候因子 Climatic factor	划分标准 Standard of division
年平均温度 MAT /℃	每 1℃为 1 级
最暖月平均温度 MWMT /℃	每 1℃为 1 级
最冷月平均温度 MCMT /℃	每 1℃为 1 级
最暖月与最冷月平均温度的差值 TD /℃	每 1℃为 1 级
年平均降水量 MAP /mm	每 100 mm 为 1级
年热力水分指数 AHM	每单位为 1 级
5℃以上的积温 DD5	每 200 单位为 1 级
18℃以上的积温 DD18	每 200 单位为 1 级
极端最低气温 EMT /℃	每 -2℃为 1 级
哈格里弗斯参考蒸发量 Eref /mm	每 20 mm 为 1 级
哈格里夫斯气候水汽亏损 CMD	每 20 单位为 1 级
相对湿度 RH /%	每单位为 1 级

2.2.2　数量化法 I 筛选因子

采用数量化方法 I，利用 Forstat 2.2“统计之林”软件对影响杉木优势木胸径生长的立地和气候因子进行显著性分析，剔除 $P > 0.01$ 的因子，保留对杉木优势木胸径影响极显著的立地和气候因子。

2.2.3　基础模型筛选

基于树木理论生长方程，采用 R 语言进行模

型拟合。通过评价指标，如平均绝对误差（MAE）、均方根误差（RMSE）和确定系数（R^2）等，从 6 个候选基础模型中筛选出最优生长模型。筛选出选取的各候选基础模型的名称和表达式如表 6 所示。

表 6 候选基础模型 †
Table 6 Basic models candidate

模型 Model	模型名称 Model name	模型表达式 Model expression
M1	Mitscherlich	$D=a\times[1-b\times\exp(-c\times AGE)]$
M2	Logistic	$D=a/[1+b\times\exp(-c\times AGE)]$
M3	Korf	$D=a\times\exp(-c/AGE^{b})$
M4	Richards	$D=a\times[1-\exp(-b\times AGE)]^{c}$
M5	Schumacher	$D=a\times\exp(-c/AGE)$
M6	Gompertz	$D=\mathrm{a}\times\exp[-\mathrm{c}\times\exp(-b\times AGE)]$

† D 为优势木胸径（cm）；AGE 为优势木林龄（a）；a、b、c 为模型待求参数。
D is the diameter at breast height (cm) of superior trees, AGE is the age (a) of superior trees, a, b, c are the parameters to be calculated in the model.

2.2.4 混合效应模型构建

非线性混合效应模型（Nonlinear mixed effects models，NLMEMs）是同时考虑固定效应参数和随机效应参数的依据回归函数来构建变量间的非线性关系该模型，其形式一般为 [20]：

$$Y_i=f(\beta,\mu_i,X_i)+\varepsilon \quad (1)$$

式中：Y_i 与 X_i 分别代表第 i 个样地的因变量向量和自变量向量；ε 是误差变量；β 和 μ_i 分别为固定效应参数向量和随机效应参数向量。

本研究所构建的非线性混合效应模型，采用胸径作为因变量向量，林龄作为自变量向量，所筛选出的主导因子作为随机效应参数向量，一般表达式为：

$$D=f(\mu_i,AGE)+\varepsilon \quad (2)$$

式中：D 和 AGE 分别代表因变量向量和自变量向量；ε 是误差变量；μ_i 为随机效应参数向量。

2.2.5 K-means 聚类

K-means 算法本质上是将聚类视为密度估计问题的一种概率方法，即一种基于样本集合划分的聚类算法，假设样本来自如下形式的混合模型 [21]：

$$(X|\theta)=\sum_{j=1:k}P(C_j)\rho_j(x|\theta,C_j) \quad (3)$$

式中：$\theta=(\theta_1,\cdots\cdots\theta_k)$ 是待估值的参数向量；先验概率 $P(C_j)$ 为混合因子；条件概率密度 $\rho_j(x|\theta,C_j)$ 为分量密度，表示类别 j 的概率密度形式，且参数向量 θ_j 未知。

因此，本研究采用 K-means 聚类法将影响相近的主导因子进行聚类，从而有效解决因初始主导因子类型过多而导致的模型冗余问题，进一步提升混合效应模型的精度。

2.2.6 模型精度评价

本研究的模型精度评价选用赤池信息准则（AIC）、贝叶斯信息准则（BIC）、确定系数（R^2）、平均绝对误差（MAE）和均方根误差（RMSE）。其中，R^2 值越大说明模型的拟合效果更好，精度更高，其余指标则反之，值越小精度越高，拟合效果越优。5 个评价指标公式如下：

$$R^2=1-\frac{\sum_{i=1}^{n}(y_i-\hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(y_i-\overline{y})^2} \quad (4)$$

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

$$RMSE=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(y_i-\hat{y}_i)^2}{n-1}} \quad (6)$$

$$AIC=-2\ln l+2p \quad (7)$$

$$BIC=-2\ln l+\ln n\times p \quad (8)$$

式中：y_i 为第 i 个样本的实测值；$\overline{y}$ 为样本的平均值；$\hat{y}_i$ 为第 i 个样本的预估值；n 为样本的数量；p 为模型参数的个数；l 为模型极大似然函数值。

3 结果与分析

3.1 显著性分析及因子类型划分

3.1.1 立地因子分析

不同的立地因子对杉木优势木胸径生长的影响存在显著差异，因此，本研究以胸径为因变量，立地因子为自变量，林龄为协变量，采用数量化方法Ⅰ进行分析。其中，6 项立地因子中海拔（HB）、坡向（PX）、坡度（PD）和土壤类型（LX）表现为极显著影响（$P<0.01$），其显著性顺序为 HB ＞ PX ＞ PD ＞ LX（表 7）。

3.1.2 气候因子分析

气候因子对杉木优势木胸径的生长也具有一定的影响，经过筛选，12 项气候因子中影响杉木优势木胸径生长极显著的气候因子有 CMD、DD18 和 EMT，其显著性顺序为 CMD ＞ EMT ＞ DD18。结果如表 8 所示。

表 7　立地因子显著性检验
Table 7　Significance testing of site factors

立地因子 Site factor	平方和 Sum of squares	自由度 Degree of freedom	均方 Mean square	*F* 值 *F* value	Pr ＞ F
HB	282.429 5	10	28.243 0	3.644 1	＜ 0.000 1
PD	200.054 1	4	50.013 5	6.453 0	＜ 0.000 1
PW	85.665 5	4	21.416 4	2.763 3	0.026 6
PX	499.782 7	8	62.472 8	5.890 7	＜ 0.000 1
LX	380.043 3	3	126.681 1	16.345 1	＜ 0.000 1
HD	58.564 5	2	29.282 3	12.761 1	0.063 7

表 8　气候因子显著性检验
Table 8　Significance testing of climatic factors

气候因子 Climate factor	平方和 Sum of squares	自由度 Degree of freedom	均方 Mean square	*F* 值 *F* value	Pr ＞ F
AHM	210.224 4	16	13.139 0	1.695 3	0.042 2
CMD	525.887 0	25	21.035 5	2.714 1	＜ 0.000 1
DD18	149.473 7	7	21.353 4	2.755 1	0.007 8
DD5	116.192 5	12	9.682 7	1.249 3	0.244 0
EMT	378.825 7	3	126.275 2	16.292 7	＜ 0.000 1
Eref	71.674 5	3	23.891 5	3.082 6	0.026 7
MCMT	144.466 9	13	11.112 8	1.433 8	0.137 2
MAP	178.444 9	14	12.746 1	1.644 6	0.062 1
MAT	118.474 1	7	16.924 9	2.183 7	0.033 5
MWMT	125.165 5	10	12.516 6	1.615 0	0.097 4
RH	165.706 8	14	11.836 2	1.527 2	0.094 8
TD	203.782 7	16	12.736 4	1.643 3	0.052 3

3.2　基础模型的拟合与确定

以优势木胸径（*D*）为因变量，林龄（*AGE*）为自变量，将表 6 中的候选基础模型通过 R 语言进行拟合，再根据评价指标 R^2、MAE 和 RMSE 筛选出最优基础模型。模型拟合结果如表 9 所示。

由表 9 和表 10 可知，除 Schumacher 模型拟合精度较低外，其余模型的 R^2 均在 0.75 以上，其中 Korf 模型的拟合效果最优（R^2=0.782 0、MAE=23.293 1、RMSE=3.416 1）。因此，选定 Korf 模型为最优基础模型，模型的参数 *a*、*b*、*c* 值分别为 66.290 1、0.432 6 和 4.034 3。

3.3　基于立地类型的非线性混合效应模型

由上述显著性立地因子筛选结果可知，海拔、坡向、坡度和土壤类型对杉木优势木胸径生长的影响极显著。将这些主导因子进行排列组合，共有 75 种初始立地类型，再通过 R 语言中的非线性混合效应模块，将立地类型作为随机效应添加在基础模型的各个参数上或多个参数上进行拟合。并通过模型评价指标 AIC 和 BIC 选取精度最优的模型。拟合结果如表 11 所示。

表 9　基础模型拟合结果
Table 9　Fitting results of basic models

模型 Model	模型名称 Model name	建模数据 Modeling data			检验数据 Validation data		
		确定系数 R^2	平均绝对误差 MAE	均方根误差 RMSE	确定系数 R^2	平均绝对误差 MAE	均方根误差 RMSE
M1	Mitscherlich	0.780 7	23.341 8	3.426 9	0.768 5	5.896 8	3.290 2
M2	Logistic	0.754 6	25.843 5	3.635 7	0.749 3	6.062 7	3.432 1
M3	Korf	0.782 0	23.293 1	3.416 1	0.770 1	5.924 8	3.281 0
M4	Richards	0.780 3	23.576 4	3.431 1	0.768 2	5.885 5	3.292 8
M5	Schumacher	0.582 5	35.018 9	4.771 6	0.577 3	8.459 4	4.475 3
M6	Gompertz	0.768 1	24.694 6	3.527 3	0.761 0	5.918 7	3.345 3

由表 11 可以看出，将立地类型添加在基础模型的参数 *b* 上时，该模型拟合的效果最优。评价指标 AIC 值和 BIC 值均为最低，分别为 4 730.750 0 和 4 754.746 0。因此，基于立地类型的混合效应模型 M3-1 的模型结构式如下：

$$D = a \times exp(-c \times AGE^{(b+b_i \times LD)}) + \varepsilon \quad (9)$$

式中：*D* 为优势木胸径；*AGE* 为优势木林龄；*a*、*b*、*c* 为模型参数；b_i 为立地类型的随机效应参数；*LD* 为立地类型；*ε* 为误差项。

3.4 基于立地类型组的非线性混合效应模型

由表 11 可知，评价指标 AIC 值和 BIC 值虽有所下降，但并无显著下降。其原因是划分的立地类型共有 75 种，导致模型过于冗余，构建混合模型精度提升有限。为了进一步简化模型和提高模型的精度，采用聚类精度≥ 95% 的评判标准，通过 K-means 聚类法，将影响杉木优势木胸径生长相近或相同的 75 种初始立地类型聚类成立为地类型组（*LDZ*），具体结果如表 12 所示。

表 10 基础模型参数估计
Table 10 Parameter estimation of basic models

模型 Model	模型名称 Model name	参数 Parameter	参数值 Value
M1	Mitscherlich	*a*	28.714 8
		b	1.021 9
		c	0.075 2
M2	Logistic	*a*	23.803 1
		b	6.381 9
		c	0.231 7
M3	Korf	*a*	66.290 1
		b	0.432 6
		c	4.034 3
M4	Richards	*a*	29.059 3
		b	0.073 4
		c	1.028 6
M5	Schumacher	*a*	8.750 4
		c	-0.042 4
M6	Gompertz	*a*	24.982 5
		b	0.155 3
		c	2.476 3

表 11 基于立地类型的非线性混合效应模型拟合结果
Table 11 Nonlinear mixed-effects model fitting results based on site types

序号 No.	添加位置 Add location			评价指标 Evaluation index		参数 Parameter		
	a	*b*	*c*	AIC	BIC	*a*	*b*	*c*
1	*LD*			4 731.397 0	4 755.392 0	61.850 2	0.455 2	4.053 5
2		LD		4 730.750 0	4 754.746 0	68.858 7	0.422 6	4.053 3
3			LD	4 732.109 0	4 756.104 0	71.333 3	0.413 8	4.069 2
4	*LD*	*LD*		4 732.750 0	4 761.545 0	68.855 7	0.422 6	4.053 3
5	*LD*		*LD*	4 733.398 0	4 762.192 0	61.833 1	0.455 3	4.053 9
6		*LD*	*LD*	4 732.750 0	4 761.545 0	68.855 7	0.422 6	4.053 3
7	*LD*	*LD*	*LD*	4 734.750 0	4 768.344 0	68.855 7	0.422 6	4.053 3

表 12 立地类型聚类结果
Table 12 Cluster results of site types

聚类数 Number of cluster	精度 Precision	立地类型组 Site type group
1	0	I
2	73.2	II
3	87.4	III
4	93.2	IV
5	96.5	V

由表 12 可知，当聚类成 5 个立地类型组时，精度达到 96.5%，满足精度≥ 95% 的要求。将聚类后的立地类型组添加在基础模型 M3 的各个参数或多个参数上，构建基于立地类型组的混合效应模型（M3-2）。由表 13 可知，将立地类型组同时加在参数 *a* 和 *c* 上时，模型拟合效果最优，精度指标 AIC 和 BIC 均为最低，分别为 4 610.035 0 和 4 638.830 0。因此将立地类型组作为随机效应的模型表达式为：

$$D = (a + a_j \times LDZ) \times exp[-(c + c_j \times LDZ) \times AGE^b] + \varepsilon \quad (10)$$

式中：*D* 为优势木胸径；*AGE* 为优势木林龄；*a*、*b*、*c* 为模型参数；a_j、c_j 为立地类型组的随机效应参数；*LDZ* 为立地类型组；*ε* 为误差项。

根据表 13 的拟合结果可知，将立地类型聚类为立地类型组后，AIC 和 BIC 均有所下降，说明模型拟合效果更佳。与基础模型进行对比，模型精度 R^2 由 0.782 0 提升至 0.822 9，MAE 由 23.293 1 降低至 20.682 3，RMSE 由 3.416 1 降低至 3.079 2。由此说明，M3-2 的拟合精度明显优于 M3-1 和 M3。

表 13　基于立地类型组的非线性混合效应模型拟合结果
Table 13　Nonlinear mixed-effects model fitting results based on site type groups

序号 No.	添加位置 Add location			评价指标 Evaluation index		参数 Parameter		
	a	*b*	*c*	AIC	BIC	*a*	*b*	*c*
1	*LDZ*			4 611.134 0	4 635.129 0	56.912 5	0.480 5	4.076 7
2		LDZ		4 611.496 0	4 635.491 0	77.158 0	0.389 2	4.073 2
3			*LDZ*	4 620.087 0	4 644.083 0	83.664 6	0.376 2	4.170 6
4	*LDZ*	*LDZ*		4 613.133 0	4 641.927 0	56.920 9	0.480 4	4.076 7
5	*LDZ*		*LDZ*	4 610.035 0	4 638.830 0	58.852 6	0.476 2	4.152 3
6		*LDZ*	*LDZ*	4 611.638 0	4 640.432 0	81.453 5	0.380 7	4.138 8
7	*LDZ*	*LDZ*	*LDZ*	4 612.033 0	4 645.626 0	58.876 2	0.476 1	4.152 1

3.5　基于气候类型的非线性混合效应模型

通过显著性因子筛选可知，对杉木优势木胸径生长影响显著的气候因子有 CMD、DD18 和 EMT。将这 3 个主导因子进行排列组合，共组合出 173 种气候类型（*QH*）。按上述随机效应模型的拟合方法，将气候类型作为随机效应进行拟合。拟合结果如表 14 所示。

表 14　基于气候类型的非线性混合效应模型拟合
Table 14　Nonlinear mixed-effects model fitting results based on climate types

序号 No.	添加位置 Add location			评价指标 Evaluation index		参数 Parameter		
	a	*b*	*c*	AIC	BIC	*a*	*b*	*c*
1	*QH*			4 705.904 0	4 729.899 0	56.605 3	0.485 0	3.998 0
2		QH		4 706.300 0	4 730.295 0	69.147 8	0.418 7	3.972 9
3			*QH*	4 718.692 0	4 742.687 0	74.856 3	0.394 7	3.962 8
4	*QH*	*QH*		4 707.904 0	4 736.698 0	56.605 5	0.485 0	3.998 0
5	*QH*		*QH*	4 705.371 0	4 734.165 0	54.868 9	0.504 3	4.067 1
6		*QH*	*QH*	4 705.951 0	4 734.745 0	63.299 0	0.451 5	4.046 7
7	*QH*	*QH*	*QH*	4 707.952 0	4 741.546 0	63.316 1	0.451 5	4.046 6

由表 4 可知，将气候类型同时添加在基础模型的参数 *a* 和 *c* 上时，拟合出的结果最优。评价指标 AIC 和 BIC 分别为 4 705.371 0 和 4 734.165 0，与其他添加位置相比，均为最低值。因此，基于气候类型的混合效应模型 M3-3 的模型结构式如下所示：

$$D=(a+a_k\times QH)\times exp[-(c+c_k\times QH)\times AGE^b]+\varepsilon \tag{11}$$

式中：*D* 为优势木胸径；*AGE* 为优势木林龄；*a*、*b*、*c* 为模型参数；a_k、c_k 为气候类型的随机效应参数；*QH* 为气候类型；*ε* 为误差项。

3.6　基于气候类型组的非线性混合效应模型

由于划分的初始气候类型共计 173 种，导致模型过于冗余，为了进一步提高模型的拟合精度，对 173 种气候类型进行聚类。由表 15 可知，当聚类数为 7 时，聚类精度为 95.9%，符合精度≥ 95% 的标准，因此将气候类型共聚类为 7 类，聚类结果如表 15 所示。

将聚类后的气候类型组（*QHZ*）作为随机效应分别添加在模型的各参数上，根据评价指标 AIC 和 BIC 选取最优的组合方式，得出最优拟合模型。由表 16 可知，当气候类型组添加在参数 *a* 和 *c* 上时，评价指标 AIC 和 BIC 均为最低，分别为 4 537.774 0 和 4 566.569 0，模型表达式为：

$$D=(a+a_m\times QHZ)\times exp[-(c+c_m\times QHZ)\times AGE^b]+\varepsilon \tag{12}$$

式中：*D* 为优势木胸径；*AGE* 为优势木林龄；*a*、*b*、*c* 为模型参数；a_m、c_m 为气候类型组的随机效应参数；*QHZ* 为气候类型；*ε* 为误差项。

表 15　气候类型聚类结果
Table 15　Cluster results of climate types

聚类数 Number of cluster	精度 Precision	气候类型组 Climate type group
1	0	I
2	58.9	II
3	76.7	III
4	87	IV
5	91.7	V
6	93.9	VI
7	95.9	VII

表 16 基于气候类型组的非线性混合效应模型拟合结果
Table 16 Nonlinear mixed-effects model fitting results based on climate type groups

序号 No.	添加位置 Add location			评价指标 Evaluation index		参数 Parameters		
	a	*b*	*c*	AIC	BIC	*a*	*b*	*c*
1	*QHZ*			4 550.771 0	4 574.767 0	61.414 7	0.458 9	4.136 2
2		QHZ		4 548.678 0	4 572.673 0	77.166 2	0.395 4	4.162 3
3			*QHZ*	4 543.041 0	4 567.037 0	89.165 7	0.371 1	4.312 5
4	*QHZ*	*QHZ*		4 550.678 0	4 579.472 0	77.166 2	0.395 4	4.162 3
5	*QHZ*		*QHZ*	4 537.774 0	4 566.569 0	60.430 0	0.474 4	4.279 0
6		*QHZ*	*QHZ*	4 539.386 0	4 568.181 0	86.945 5	0.373 1	4.270 1
7	*QHZ*	*QHZ*	*QHZ*	4 541.387 0	4 574.981 0	86.952 2	0.373 1	4.270 1

模型 M3-4 与模型 M3-3 相比，AIC 和 BIC 均有所下降，说明基于气候类型组的非线性混合效应模型优于基于气候类型的非线性混合效应模型。同时模型 M3-4 的拟合效果更优于基础模型 M3，其中，确定系数 R^2 由 0.782 0 提升至 0.839 1，MAE 和 RMSE 均有所下降，降幅分别为 17.55% 和 16.36%。

3.7 构建基于立地和气候类型组的非线性混合效应模型

虽然基于立地类型组（M3-2）或基于气候类型组（M3-4）的非线性混合效应模型相较于基础模型（M3）精度均有所提升，但添加的因子都是单一因子。因此，为进一步贴合现实情况，优化模型的拟合效果，在基础模型的各个参数上同时或分别添加上立地和气候类型组，构建基于立地和气候类型组的非线性混合效应模型，根据模型的 AIC 和 BIC 值选取拟合形式最优的模型，拟合结果如表 17 和表 18 所示。

由表 17 和表 18 可知，当立地类型组作为随机效应添加在参数 *a* 上，或同时将气候类型组作为随机效应添加在参数 *a*、*b*、*c* 上时，评价指标 AIC 和 BIC 在 13 种模型拟合形式中均为最低值，分别为 4 490.504 0 和 4 528.896 0。说明此模型拟合形式较其他模型更优，具有更高的拟合精度，其模型表达式为：

$$D=(a+a_j\times LDZ+a_m\times QHZ)\times exp[-(c+c_j\times QHZ)\times AGE^{(b+b_j\times QHZ)}]+\varepsilon \quad (13)$$

式中：*D* 为优势木胸径；*AGE* 为优势木林龄；*a*、*b*、*c* 为模型参数；b_j、c_j 为立地类型组的随机效应参数；a_m 为气候类型组的随机效应参数；*LDZ* 为立地类型组；*QHZ* 为气候类型组；ε 为误差项。

3.8 模型精度评价

为了更为清晰和直观地对比各模型的拟合结果，现将所有模型的拟合结果及参数值进行整理和汇总，具体结果如表 19 所示。

表 17 基于立地和气候类型组的非线性混合效应模型评价
Table 17 Evaluation of nonlinear mixed-effects models based on site and climate groups

序号 No.	添加位置 Add location			评价指标 Evaluation index	
	a	*b*	*c*	AIC	BIC
1	*LDZ*、*QHZ*	*LDZ*	*LDZ*	4 509.659 0	4 548.052 0
2	*LDZ*	*LDZ*、*QHZ*	*LDZ*	4 508.303 0	4 546.695 0
3	*LDZ*	*LDZ*	*LDZ*、*QHZ*	4 494.038 0	4 532.430 0
4	*LDZ*、*QHZ*	*QHZ*	*QHZ*	4 490.504 0	4 528.896 0
5	*QHZ*	*LDZ*、*QHZ*	*QHZ*	4 496.447 0	4 534.839 0
6	*QHZ*	*QHZ*	*LDZ*、*QHZ*	4 494.395 0	4 532.787 0
7	*LDZ*、*QHZ*	*LDZ*、*QHZ*	*LDZ*	4 510.324 0	4 553.515 0
8	*LDZ*	*LDZ*、*QHZ*	*LDZ*、*QHZ*	4 496.585 0	4 539.777 0
9	*LDZ*、*QHZ*	*LDZ*	*LDZ*、*QHZ*	4 494.601 0	4 537.792 0
10	*LDZ*、*QHZ*	*LDZ*、*QHZ*	*QHZ*	4 494.598 0	4 537.790 0
11	*QHZ*	*LDZ*、*QHZ*	*LDZ*、*QHZ*	4 498.447 0	4 541.638 0
12	*LDZ*、*QHZ*	*QHZ*	*LDZ*、*QHZ*	4 492.504 0	4 535.695 0
13	*LDZ*、*QHZ*	*LDZ*、*QHZ*	*LDZ*、*QHZ*	4 496.636 0	4 544.626 0

表 18　基于立地和气候类型组的非线性混合效应模型参数估计
Table 18　Parameter estimation of nonlinear mixed-effects models based on site and climate groups

序号 No.	添加位置 Add location			参数 Parameter		
	a	*b*	*c*	*a*	*b*	*c*
1	*LDZ*、*QHZ*	*LDZ*	*LDZ*	53.308 55	0.516 82	4.216 1
2	*LDZ*	*LDZ*、*QHZ*	*LDZ*	94.189 73	0.357 28	4.258 78
3	*LDZ*	*LDZ*	*LDZ*、*QHZ*	95.731 06	0.351 19	4.236 6
4	*LDZ*、*QHZ*	*QHZ*	*QHZ*	66.274 75	0.440 62	4.167 17
5	*QHZ*	*LDZ*、*QHZ*	*QHZ*	110.927 9	0.325 1	4.301 78
6	*QHZ*	*QHZ*	*LDZ*、*QHZ*	73.047 71	0.417 48	4.220 35
7	*LDZ*、*QHZ*	*LDZ*、*QHZ*	*LDZ*	94.297 0	0.357 06	4.259 25
8	*LDZ*	*LDZ*、*QHZ*	*LDZ*、*QHZ*	99.640 78	0.343 6	4.251 95
9	*LDZ*、*QHZ*	*LDZ*	*LDZ*、*QHZ*	87.015 8	0.370 61	4.202 36
10	*LDZ*、*QHZ*	*LDZ*、*QHZ*	*QHZ*	87.000 39	0.370 65	4.202 31
11	*QHZ*	*LDZ*、*QHZ*	*LDZ*、*QHZ*	110.929 3	0.325 1	4.301 79
12	*LDZ*、*QHZ*	*QHZ*	*LDZ*、*QHZ*	66.274 68	0.440 62	4.167 17
13	*LDZ*、*QHZ*	*LDZ*、*QHZ*	*LDZ*、*QHZ*	87.230 66	0.370 08	4.203 11

表 19　各模型拟合结果
Table 19　Fitting results of each model

数据 Data	模型 Model	参数 Parameter	参数值 Value	评价指标 Evaluation indicator				
				AIC	BIC	R^2	MAE	RMSE
建模数据 Modeling data	M3	*a*	66.290 1	4 757.502 0	4776.698 0	0.782 0	23.293 1	3.416 1
		b	0.432 6					
		c	4.034 3					
	M3-1	*a*	68.858 7	4 730.750 0	4754.746 0	0.797 4	22.774 8	3.347 3
		b	0.422 6					
		c	4.053 3					
	M3-2	*a*	58.852 6	4 610.035 0	4 638.830 0	0.822 9	20.682 3	3.079 2
		b	0.476 2					
		c	4.152 3					
	M3-3	*a*	54.868 9	4 705.371 0	4 734.165 0	0.799 1	22.390 9	3.279 6
		b	0.504 3					
		c	4.067 1					
	M3-4	*a*	60.430 0	4 537.774 0	4 566.569 0	0.839 1	19.815 4	2.9358
		b	0.474 4					
		c	4.279 0					
	M3-5	*a*	66.274 8	4 490.504 0	4 528.896 0	0.854 3	18.773 0	2.792 9
		b	0.440 6					
		c	4.167 2					
检验数据 Validation data	M3	*a*	43.691 6	1 175.961 0	1 189.607 0	0.770 0	5.924 8	3.280 9
		b	0.579 0					
		c	4.103 1					
	M3-1	*a*	39.635 5	1 169.214 0	1 186.552 0	0.784 7	5.615 2	3.175 8
		b	0.648 6					
		c	4.388 3					
	M3-2	*a*	36.277 2	1 160.747 0	1 177.806 0	0.800 6	5.338 2	3.058 2
		b	0.716 4					
		c	4.640 9					
	M3-3	*a*	40.119 8	1 173.988 0	1 191.046 0	0.779 0	5.779 6	3.217 2
		b	0.642 1					
		c	4.298 7					
	M3-4	a	36.599 7	1 146.616 0	1 167.086 0	0.820 3	5.026 9	2.901 8
		b	0.709 4					
		c	4.642 9					
	M3-5	*a*	60.070 6	1 145.202 0	1 179.318 0	0.845 9	4.767 1	2.687 9
		b	0.446 9					
		c	3.919 1					

由表 19 可以看出，建模数据和检验数据的各项模型评价指标保持一致，均为 M3-5 明显优于其他模型。因此，本研究最终确定模型 M3-5 为基于立地和气候效应的杉木优势木胸径生长模型。

通过绘制表 19 中各模型的预测值 - 残差图，能够更为直观地反映出各模型的拟合效果，每个模型的残差图如下所示：

从图 1 ～图 4 可以明显看出，6 个模型的残差分布都随机地在横坐标上下浮动，未出现明显的异方差性。与其他图片进行对比，图 4 中模型 M3-5 得到残差分布更为紧密集中，且分布范围更小，也更为均匀，说明模型 M3-5 较其余模型拟合效果更为优良。由此可见，基于立地效应和气候效应的杉木优势木胸径生长模型可以有效地改进残差，同时极大地提高模型精度。

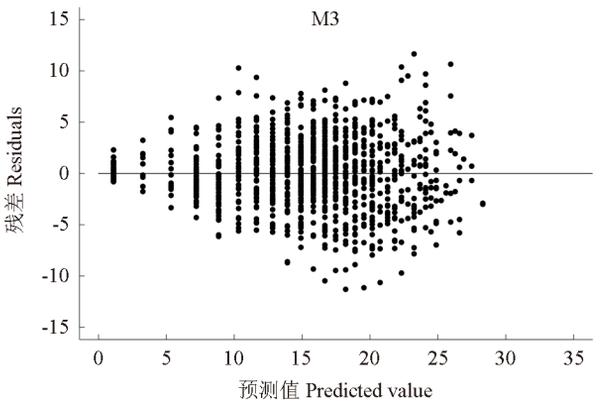


图 1　基础模型 M3 残差分布

Fig. 1　Residual distribution plot of basic model M3

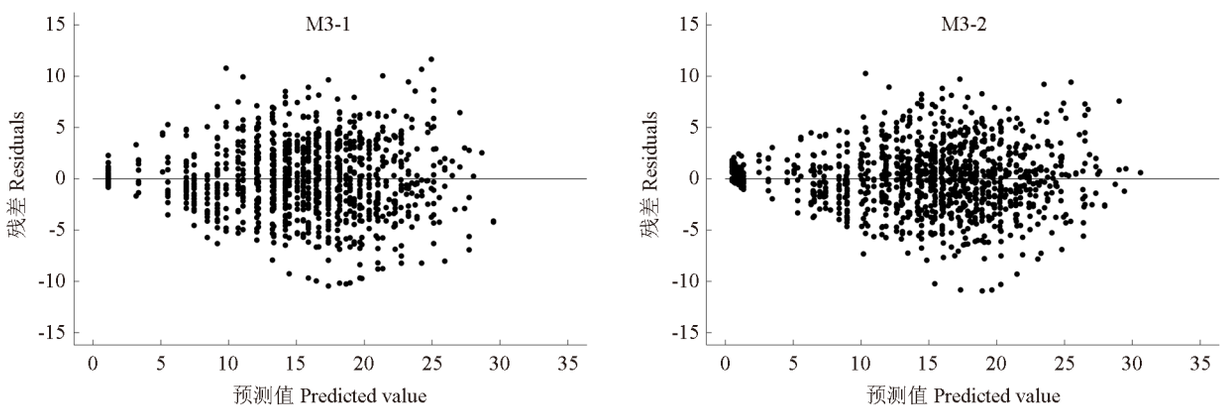


图 2　基于立地类型 M3-1 和基于立地类型组 M3-2 残差分布

Fig. 2　Residual distribution plots of models based on site type M3-1 and site type groups M3-2

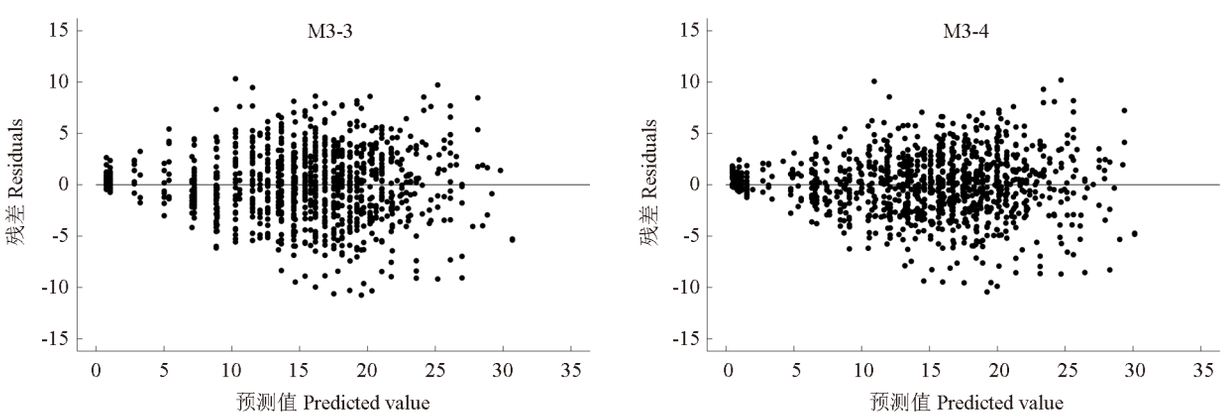


图 3　基于气候类型 M3-3 和基于气候类型组 M3-4 残差分布

Fig. 3　Residual distribution plots of models based on climate type M3-3 and climate type groups M3-4

4　讨　论

本研究通过数量化方法 I 筛选出了影响杉木优势木胸径生长的立地和气候因子，立地因子中影响显著的因子与宋争等 [22] 构建的含立地因子的湖南丘陵平原区杉木多形立地指数模型的显著性结果一致，均为坡向、海拔、坡度和土壤类型。影响杉木优势木胸径生长的气候因子包括 CMD、DD18 和 EMT，其中 DD18 和 EMT 均与温度有关，说明温度较降水量对优势木胸径生长的影响更大。导致这一结果的原因可能是研究区域均位于亚热带地区，各地的降水量充沛，但由于纬度的差异性，

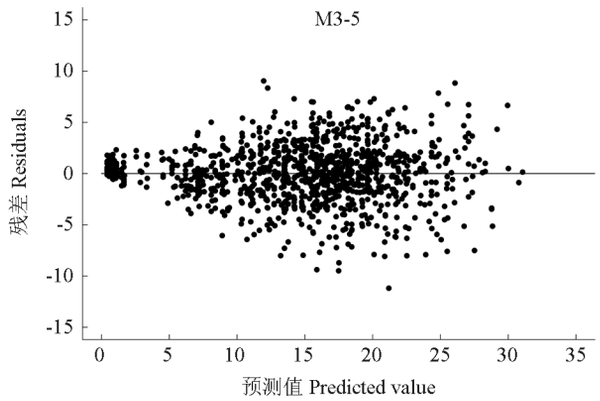


图 4　基于立地效应和气候效应 M3-5 残差分布
Fig. 4　Residual distribution plot of models based on site and climate effects M3-5

造成较大的温度差，导致杉木优势木胸径的生长出现差异。这与单凯丽等 [23] 构建的杉木人工林优势木单木基于气候变化下的生长模型研究结果一致，均是温度对杉木人工林的影响较大，降水量次之。

利用 K-means 聚类简化了初始立地类型和气候类型，将初始立地和气候类型聚类为立地类型组和气候类型组，解决了初始类型过多而导致的模型冗余问题。吴旭平等 [24] 也采用此方法解决了初始立地类型过多的问题，拟合效果与本文研究一致。混合效应模型被广泛应用于林木生长模型中，拟合效果明显高于传统模型 [25-26]，不仅有利于提高模型精度，还可以提升模型适用性。本研究将立地和气候因子作为随机效应添加在基础模型中，提升了模型的拟合精度（R^2 由 0.782 0 提升至 0.854 3），更优地反映出在不同立地和气候条件下杉木优势木胸径的生长情况。

目前，关于杉木胸径生长的研究，学者们通常只考虑单一环境因子对杉木胸径生长的影响，汤维等 [27] 仅考虑了立地因子对杉木优势木胸径生长的影响，而郭常酉等 [28] 仅考虑了气候因子对杉木单木胸径生长的影响。但杉木胸径的生长是一个复杂的过程，不仅受立地因子的影响，同时气候因子对其生长也具有一定的影响。本研究同时将立地因和气候因子的作为随机效应构建模型，突破了单一环境因子建模的局限性，可为研究杉木优势木胸径生长提供建模思路和参考依据。

尽管本研究所构建的模型整合了立地和气候因子，表现出优越的性能，但未考虑林分密度和相对直径等竞争因子，以及间伐周期和间伐强度等经营措施的动态影响。如张宁等 [29] 构建了基于竞争指数的杉木林分生长模型，分析了竞争因子对杉木胸径生长的影响。徐雪蕾等 [30] 研究了间伐对杉木胸径生长的调控作用，结果表明间伐强度对胸径的生长影响显著。所以，在后续研究中可构建包含环境因子、竞争因子和经营措施的混合效应模型，从而优化和提升杉木优势木胸径生长模型的预测精度。

5　结　论

本研究以亚热带 6 省区 129 块样地的 1 121 组杉木优势木胸径生长数据为基础，通过 R 语言筛选出 Korf 模型为最优基础模型。基于 Korf 方程，构建基于包含立地效应和气候效应的非线性混合效应模型，具体模型表达形式为 $D=(a+a_j\times LDZ+a_m\times QHZ)\times exp[-(c+c_j\times QHZ)\times AGE^{(b+b_j\times QHZ)}]+\varepsilon$，模型精度 R^2=0.854 3，MAE=18.773 0，RMSE=2.792 9。相较于基础模型，拟合精度更优，R^2 有明显提升，MAE 和 RMSE 均有明显下降，说明立地因子和气候因子作为随机效应，并结合 K-means 聚类法构建的非线性混合效应模型，能够显著地提升模型的预测精度和实用性。因此，本研究可为研究亚热带地区杉木优势木胸径的生长提供一种新的建模思路和方法。

参考文献：

[1] 黄家荣 . 马尾松人工林生长的人工神经网络模型研究 [D]. 北京 : 北京林业大学 ,2005.
HUANG J R. Study on growth modeling with artificial neural network for masson pine plantation[D]. Beijing: Beijing Forestry University,2005.

[2] 于秀勇 . 杉木人工林单木生长模型的研究 [D]. 福州 : 福建农林大学 ,2009.
YU X Y. Study of individual tree growth model of Chinese fir plantation[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University,2009.

[3] 惠刚盈 , 盛炜彤 . 林分直径结构模型的研究 [J]. 林业科学研究 ,1995,8(2):127-131.
HUI G Y, SHENG W T. Stand diameter structure modeling[J]. Forest Research,1995,8(2):127-131.

[4] 董薇 . 银杏单木可视化生长模型的研究与开发 [D]. 南京 : 南京林业大学 ,2010.
DONG W. The visualization growth model individual Ginkgo tree[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University,2010.

[5] 杨锦昌 , 江希钿 , 许煌灿 , 等 . 马尾松人工林直径分布收获模型及其应用研究 [J]. 林业科学研究 ,2003,16(5):581-587.
YANG J C, JIANG X D, XU H C, et al. Diameter distribution yield model of *Pinus massoniana* plantation and its application[J].

Forest Research,2003,16(5):581-587.

[6] 李凤日 . 兴安落叶松天然林直径分布及产量预测模型的研究 [J]. 东北林业大学学报 ,1987,15(4):8-16.
LI F R. Study on diameter distribution and models predicting yields for natural Dahurian larch stands[J]. Journal of Northeast Forestry University,1987,15(4):8-16.

[7] 萨如拉 , 王雪鑫 , 徐加睿 , 等 . 大兴安岭兴安落叶松天然林单木生长规律与模型研究 [J]. 西南林业大学学报 (自然科学), 2020,40(2):111-116.
SA R L, WANG X X, XU J R, et al. Study on the growth and models of single tree of *Larix gmelinii* natural forest in Daxing'an mountains[J]. Journal of Southwest Forestry University (Natural Science),2020,40(2):111-116.

[8] 彭其龙 , 陈哲夫 , 陈端吕 . 湖南栎类 - 马尾松天然混交林单木生长模型研究 [J]. 林业资源管理 ,2020(2):94-102,134.
PENG Q L, CHEN Z F, CHEN D L. A study on the growth model of individual trees in natural mixed forests of oak and *Pinus massoniana* in Hunan[J]. Forestry Resources Management, 2020(2):94-102,134.

[9] 何静 , 朱光玉 , 张学余 , 等 . 基于立地与密度效应的湖南栎类天然林平均木胸径生长模型 [J]. 中南林业科技大学学报 , 2021,41(10):75-82.
HE J, ZHU G Y, ZHANG X Y, et al. A growth model of average tree diameter at breast height of *Quercus* natural forests in Hunan based on site and density effects[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2021,41(10):75-82.

[10] 汤维 . 杉木人工林大径材培育立地条件选择研究 [D]. 长沙 : 中南林业科技大学 ,2024.
TANG W. Study on site selection of large-diameter timber cultivation in Chinese fir plantation[D]. Changsha: Central South University of Forestry & Technology,2024.

[11] 宁鹏 . 中条山优势树种包含气候因子的生长模型构建与动态预测 [D]. 晋中 : 山西农业大学 ,2023.
NING P. study on the growth models including climatic factors and dynamic prediction of dominant tree species in Zhongtiao mountains[D]. Jinzhong: Shanxi Agricultural University,2023.

[12] 臧颢 , 刘洪生 , 黄锦程 , 等 . 竞争和气候及其交互作用对杉木人工林胸径生长的影响 [J]. 林业科学 ,2021,57(3):39-50.
ZANG H, LIU H S, HUANG J C, et al. Effects of competition, climate factors and their interactions on diameter growth for Chinese fir plantations[J]. Scientia Silvae Sinicae,2021,57(3): 39-50.

[13] 黄开勇 , 刘达峰 . 杉木 : 广西优良用材树种 [J]. 广西林业 , 2011(9):43-44.
HUANG K Y, LIU D F. Chinese fir: a key timber species in Guangxi[J]. Forestry of Guangxi,2011(9):43-44.

[14] 国家林业和草原局 . 中国森林资源报告 (2014—2018)[M]. 北京 : 中国林业出版社 ,2019.
National Forestry and Grassland Administration. National forest inventory of China(2014-2018)[M]. Chinese Forestry Publishing House,2019.

[15] 王兵 , 马向前 , 郭浩 , 等 . 中国杉木林的生态系统服务价值评估 [J]. 林业科学 ,2009,45(4):124-130.
WANG B, MA X Q, GUO H, et al. Evaluation of the Chinese fir forest ecosystem services value[J]. Scientia Silvae Sinicae,2009, 45(4):124-130.

[16] 徐彤 . 气候敏感的杉木人工林直径分布动态预测模型研究——以崇义县为例 [D]. 南昌 : 江西农业大学 ,2023.
XU T. Climate-sensitive dynamic prediction model of diameter distribution of *Cunninghamia lanceolata* plantation: a case study of Chongyi County[D]. Nanchang: Jiangxi Agricultural University,2023.

[17] WANG T L,WANG G Y, INNES J L, et al. Climate AP: an application for dynamic local downscaling of historical and future climate data in Asia Pacific[J]. Frontiers of Agricultural Science and Engineering,2017,4(4):448-458.

[18] 孟宪宇 . 测树学 [M].3 版 . 北京 : 中国林业出版社 ,2006.
MENG X Y. Forest measurement[M]. 3rd ed. Beijing: China Forestry Press,2006.

[19] 齐战涛 , 朱光玉 , 许冰冰 , 等 . 含气候效应的湖南杉木人工林断面积生长模型 [J]. 中南林业科技大学学报 ,2021,41(5): 66-73.
QI Z T, ZHU G Y, XU B B, et al. Basal area growth model of *Cunninghamia lanceolata* plantation in Hunan Province with climate effect[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2021,41(5):66-73.

[20] 符利勇 , 唐守正 . 非线性混合效应模型统一标准形式及应用 [J]. 中国科学 : 数学 ,2020,50(1):15-30.
FU L Y, TANG S Z. A general formulation of nonlinear mixed effect models and its application[J]. Scientia Sinica: Mathematica,2020,50(1):15-30.

[21] 雷小锋 , 谢昆青 , 林帆 , 等 . 一种基于 k-means 局部最优性的高效聚类算法 [J]. 软件学报 ,2008,19(7):1683-1692.
LEI X F, XIE K Q, LIN F, et al. An efficient clustering algorithm based on local optimality of k-means[J]. Journal of Software, 2008,19(7):1683-1692.

[22] 宋争 , 黄朗 , 胡松 , 等 . 基于立地混合效应的湖南丘陵平原区杉木多形立地指数模型研究 [J]. 林业科学研究 ,2022,35(5): 172-179.
SONG Z, HUANG L, HU S, et al. Polymorphic site-index model with site mixed effects for Chinese fir plantations in Hunan hilly plains[J]. Forest Research,2022,35(5):172-179.

（下转第 183 页）

Conference on Machine Learning, Lile, Jul 6th-11st, 2015. Lile: PMLR,2015:1180-1189.

[21] ZHU Y C, ZHUANG F Z, WANG J D, et al. Deep subdomain adaptation network for image classification[J]. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, 2021,32(4):1713-1722.

[22] CUI S H, WANG S H, ZHUO J B, et al. Towards discriminability and diversity: batch nuclear-norm maximization under label insufficient situations[C]//Proceedings of the 31st IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Seattle, Jun 14th-19th, 2020. Seattle: IEEE,2020:3940-3949.

[23] CHEN L, CHEN H A, WEI Z X, et al. Reusing the task-specific classifier as a discriminator: discriminator-free adversarial domain adaptation[C]//Proceedings of the 33rd IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, New Orleans, Jun 19th-24th, 2022. New Orleans: IEEE,2022:7171-7180.

[24] ZHENG Z J, WU H, LYU L S, et al. ICCL: independent and correlative correspondence learning for few-shot image classification[J]. Knowledge-Based Systems,2023,266:110412.

[本文编校：吴　彬]

（上接第 102 页）

[23] 单凯丽 . 基于气候变化下的杉木人工林优势木单木生长模型研究 [D]. 南昌 : 江西农业大学 ,2020.
SHAN K L. Study on individual tree growth model of dominant trees in Chinese fir plantation based on climate change[D]. Nanchang: Jiangxi Agricultural University,2020.

[24] 吴旭平 , 吕勇 , 张雄清 , 等 . 基于立地因子的杉木人工林断面积生长混合效应模型研究 [J]. 林业资源管理 ,2021(2):75-82.
WU X P, LYU Y, ZHANG X Q, et al. Research on growth mixed effect model for basal area of *Cunninghamia lanceolata* plantation based on site factors[J]. Forest Resources Management, 2021(2):75-82.

[25] ZHU G Y, HU S, CHHIN S, et al. Modelling site index of Chinese fir plantations using a random effects model across regional site types in Hunan Province, China[J]. Forest Ecology and Management,2019,446:143-150.

[26] FU L Y, LEI X D, SHARMA R P, ZHU G Y, et al. Comparing height-age and height-diameter modelling approaches for estimating site productivity of natural uneven-aged forests[J]. Forestry,2018,91:419-433.

[27] 汤维 , 黄朗 , 杨浩 , 等 . 基于平均优势木胸径的湖南杉木人工林立地质量评价模型 [J]. 中南林业科技大学学报 , 2024,44(5):26-34.
TANG W, HUANG L, YANG H, et al. Site quality evaluation model of Chinese fir plantation in Hunan based on the DBH of average dominant trees[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2024,44(5):26-34.

[28] 郭常酉 , 郭宏仙 , 王宝华 . 基于气候因子的杉木单木胸径生长模型构建 [J]. 南京林业大学学报 (自然科学版),2023,47(1): 47-56.
GUO C Y, GUO H X, WANG B H, Study on increment model of individual-tree diameter of *Cunninghamia lanceolata* in consideration of climatic factors[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition),2023,47(1):47-56.

[29] 张宁 , 张怀清 , 林辉 , 等 . 基于竞争指数的杉木林分生长可视化模拟研究 [J]. 林业科学研究 ,2013,26(6):692-697.
ZHANG N, ZHANG H Q, LIN H, et al. Visual simulation of growth process in *Cunninghamia lanceolata* based on competition index[J]. Forest Research,2013,26(6):692-697.

[30] 徐雪蕾 . 间伐对杉木人工林的生长调控作用研究 [D]. 北京 : 北京林业大学 ,2020.
XU X L. Regulation of thinning on the tree growth in Chinese fir plantations[D]. Beijing: Beijing Forestry University,2020.

[本文编校：吴　彬]