

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7期

Doi:10.14067/j.cnki.1673-923X.2026.07.002

论文标题： 江西省崇义县亚热带阔叶次生林栲属优势树种生长模型构建

作　　者： 贺 鹏，陈鼎泸，邹凯伦，等

收稿日期： 2025-07-04

引文格式： 贺鹏,陈鼎泸,邹凯伦,等.江西省崇义县亚热带阔叶次生林栲属优势树种生长模型构建[J].中南林业科技大学学报,2026,46(7):13-21,132.

He P, Chen D L, Zou K L, et al. Development of growth models for dominant *Castanopsis* species in subtropical broadleaf secondary forests in Chongyi County, Jiangxi Province[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2026,46(7):13-21,132.

相关论文推荐

Recommended articles

广西十万大山山地常绿阔叶林优势种空间分布格局与关联性

Spatial distribution pattern and correlation of dominant species of evergreen broad-leaved forest in Shiwandashan mountain

亚热带常绿落叶阔叶混交林木本植物生物量模型meta分析

Meta-analysis of woody plant biomass model of subtropical evergreen deciduous broadleaf mixed forests

小兴安岭南部2种红松天然林优势树种的空间结构和生态位特征

Spatial structure and niche characteristics of dominant species in natural *Pinus koraiensis* forest in southern Xiaoxing'an mountains

鄂西南常绿落叶阔叶混交林超级优势种和大树对生物量和生产力的主导作用

Dominant role of hyperdominance and large-sized trees in standing biomass and productivity of evergreen and deciduous broadleaf mixed forests in southwestern Hubei

苍山西坡常绿阔叶林乔木层优势种生态位特征及种间联结

Niche and interspecific association of dominant species in tree layer of broad□ leaved evergreen forests on the western slope of the Cangshan mountain

Doi:10.14067/j.cnki.1673-923x.2026.07.002
http: //qks.csuft.edu.cn

江西省崇义县亚热带阔叶次生林栲属优势树种生长模型构建

贺　鹏[1]，陈鼎泸[2]，邹凯伦[3]，王占印[4]，宁金魁[5]，吴亚通[5]，臧　颢[5]，杨　璐[3]，刘宪钊[3]

（1. 国家林业和草原局 中南调查规划院，湖南 长沙 410014；2. 崇义县林业技术推广中心，江西 崇义 341300；3. 中国林业科学研究院 a. 资源信息研究所；b. 林木资源高效生产全国重点实验室；c. 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；4. 江西省森林资源保护中心，江西 南昌 330036；5. 江西农业大学 林学院，江西 南昌 330045）

摘　要：【目的】揭示江西省崇义县亚热带阔叶次生林中 3 种栲属树种的生长节律与生态策略差异，为该地区及类似亚热带次生林的分类经营、结构调控和可持续管理提供理论依据，并为小样本条件下开展多维度树木生长模拟提供方法参考。【方法】以江西省崇义县亚热带阔叶次生林中丝栗栲 *Castanopsis fargesii*、罗浮锥 *C. faberi* 和米槠 *C. carlesii* 共 3 个优势树种的优势木为研究对象，采用树干解析法获取年轮宽度等高精度生长动态数据。基于年轮时间序列，选用 Logistic、Gompertz、Hossfeld Ⅳ、Korf 和 Richards 5 种经典生长模型，分别对 3 个树种的胸径、树高和材积的生长过程进行拟合，通过拟合效果筛选出各生长指标的最优模型。基于最优基础模型，构建胸径 - 树高 - 材积的联立非线性相容性模型，并采用似乎不相关回归（Seemingly unrelated regression，SUR）方法进行联合建模；同时引入对数变换对异速生长方程进行误差校正，提升模型拟合稳定性。结合模型结果，进一步分析 3 个树种在生长速率与成熟节律方面的差异特征。【结果】Richards 模型在 3 个树种的多个生长维度中表现出最佳拟合效果。基于 SUR 方法构建的相容性模型显示，胸径与材积（相关系数为 0.875 1）、胸径与树高（相关系数为 0.682 0）之间存在显著残差相关性，验证了联合建模的合理性。异速生长方程经对数变换后，平均系统误差显著降低（降幅达 18.7% ～ 56.7%），模型决定系数（R^2）保持在较高水平，拟合稳定性和精度显著提升。生长特征分析表明，罗浮锥和米槠具备更强的早期生长潜力与快速成熟优势，适合用于追求材积积累的林分经营目标；然而，丝栗栲虽生长较慢，但生态适应性强，适宜配置于生态功能型林分。【结论】本研究在样本量有限的条件下，成功构建了 3 种优势槠栲类树种胸径、树高与材积的非线性相容性模型，并通过 SUR 方法有效识别了生长维度间的耦合关系。同时，引入对数变换优化了异速生长建模效果。在此基础上，通过对连年生长量与平均生长量的综合分析，进一步揭示 3 种栲属树种在胸径、树高与材积生长速率及成熟节律上的显著差异；其中，罗浮锥和米槠表现为快速生长型策略，丝栗栲则表现为稳定保守型策略，体现了不同树种在资源利用方式及环境适应策略上的差异。

关键词：亚热带阔叶次生林；树干解析；优势木；相容性生长模型

中图分类号：S758.5　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1673-923X(2026)07-0013-09

Development of growth models for dominant *Castanopsis* species in subtropical broadleaf secondary forests in Chongyi County, Jiangxi Province

He Peng[1], Chen Dinglu[2], Zou Kailun[3], Wang Zhanyin[4], Ning Jinkui[5], Wu Yatong[5], Zang Hao[5], Yang Lu[3], Liu Xianzhao[3]

(1. Central South Academy of Inventory and Planning, National Forestry and Grassland Administration, Changsha 410014, Hunan, China; 2. Chongyi County Forestry Technology Extension Center, Chongyi 341300, Jiangxi, China; 3.a. Institute of Forest Resource Information Techniques; b. State Key Laboratory of Efficient Production of Forest Resources; c. Key Laboratory of Forest Management and Growth Modelling, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China; 4. Jiangxi Forest Resources Protection Center, Nanchang 330036, Jiangxi, China; 5. College of Forestry, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, Jiangxi, China)

Abstract:【Objective】To reveal the differences in growth rhythms and ecological strategies among three dominant *Castanopsis* species in the subtropical broadleaved secondary forests of Chongyi County, Jiangxi Province, and to provide a theoretical basis for classified

收稿日期（Received）：2025-07-04　　**修订日期**（Revised）：2025-09-23

基金项目：国家重点研发计划项目（2022YFD2200504）；国家自然科学基金项目（32271878）。

第一作者：贺鹏（694186588@qq.com），高级工程师，硕士。　　**通信作者：**邹凯伦（zoukailun@ifrit.ac.cn），博士研究生。

引文格式：贺鹏 , 陈鼎泸 , 邹凯伦 , 等 . 江西省崇义县亚热带阔叶次生林栲属优势树种生长模型构建 [J]. 中南林业科技大学学报 ,2026,46(7):13-21,132.

He P, Chen D L, Zou K L, et al. Development of growth models for dominant *Castanopsis* species in subtropical broadleaf secondary forests in Chongyi County, Jiangxi Province[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2026,46(7):13-21,132.

management, structural regulation, and sustainable management of this region and similar subtropical secondary forests, as well as methodological references for multidimensional tree growth simulation under small-sample conditions.【Method】Three dominant *Castanopsis* species-*C. fargesii*, *C. faberi*, and *C. carlesii*-in the subtropical secondary forests of Chongyi County were selected for analysis. Sample trees were subjected to stem analysis to obtain precise time-series data of annual radial growth. Five classic growth functions (Logistic, Gompertz, Hossfeld IV, Korf, and Richards) were applied to fit and compare the growth processes of DBH, height, and volume for each species. The Richards model, identified as the best-fitting function in most cases, was used to construct a system of nonlinear compatible growth equations. These equations were then estimated using the seemingly unrelated regression (SUR) method. Additionally, logarithmic transformation was introduced to correct heteroscedasticity in allometric growth models, thereby improving model stability. Based on the modeling results, growth rate and maturation patterns of the three species were further compared and analyzed.【Result】Among the five tested models, the Richards function provided the best fit across multiple growth dimensions. The SUR-based compatible model revealed significant residual correlations between DBH and volume (r=0.875 1), and between DBH and height (r=0.682 0), validating the necessity of joint modeling. After logarithmic transformation, the allometric models exhibited a substantial reduction in mean systematic error (18.7% to 56.7%), while maintaining high R^2 values and stable fitting performance. Growth pattern analysis showed that *C. faberi* and *C. carlesii* had stronger early growth potential and faster maturation, making them suitable for timber-oriented management. In contrast, *C. fargesii* exhibited a slower growth rate but demonstrated strong ecological adaptability, making it ideal for deployment in ecological conservation forests.【Conclusion】Under limited sample conditions, this study successfully developed nonlinear compatible models for DBH, height, and volume of three dominant *Castanopsis* species, and effectively identified interrelationships among growth dimensions using the SUR method. The introduction of logarithmic transformation significantly improved the performance of the allometric models by reducing heteroscedasticity. Furthermore, through a comprehensive analysis of current annual increment and mean annual increment, the study further reveals significant differences among the three *Castanopsis* species in growth rates of diameter at breast height, tree height, and stem volume, as well as in maturation patterns. *C. faberi* and *C. carlesii* exhibit a fast-growing strategy, whereas *C. fargesii* shows a stable and conservative strategy, reflecting interspecific differences in resource utilization and environmental adaptation.

Keywords: subtropical broadleaf secondary forest; stem analysis; dominant trees; compatibility growth model

随着全球气候变化与生态系统退化问题日益严峻，森林资源的可持续经营已成为全球生态与环境研究的焦点[1]。森林作为陆地生态系统碳汇库和生物多样性栖息地，在维持生态平衡、调节气候、水源涵养等方面发挥着不可替代的生态功能[2]。在中国，天然林资源持续恢复，全国天然林面积已达 14 041.52×10^4 hm^2，其中幼龄林占比高达 60.94%，但 94% 的天然林属于强度采伐或自然干扰（如火灾、病虫害）后的次生林或过伐林[3]。这类天然林普遍具有树种多样性高、林分结构复杂、年龄级差异大等特征，导致其生长过程呈现高度的异质性与不确定性[4-6]，显著不同于结构相对单一、生长过程可控的人工林。

在天然林中，林木生长受生境异质性[7]、种间竞争强度[8-9]、密度调节过程[10]及群落演替[11]等多重因素共同作用，呈现出空间结构动态性强、个体差异显著的特点。多项研究表明，天然林中单木的胸径、树高与材积生长并无统一变化规律，而是受树种生态策略与局地环境共同调控[12-13]。在此背景下，大径级树木往往在林分结构和生长动态中占据主导地位[14-15]，为此学界逐步应用并完善了目标树经营理论[16]，用以突出天然林中关键个体的培育与调控。然而，传统林分层次的生长模型难以精准揭示天然林单木的生长响应机制，难以满足目标树精准经营的需求。因此，建立天然林单木尺度的生长模型具有重要意义，不仅有助于深入揭示个体树木的生长规律，而且能够为目标树经营提供定量化支撑。

近年来，部分学者提出在天然林中选取优势木、孤立木作为代表性样本进行树干解析研究[17]。该方法利用优势木与孤立木受竞争影响较小、形态稳定性较高的特点，可较真实地反映树种的潜在生长能力与生长节律，现已逐步成为天然林生长建模的重要技术手段。基于优势木年轮宽度与采样高度数据进行推算，可有效获取其胸径、树高与材积的时间序列信息，为建立多维度、全过程的生长模型提供了可靠的数据基础[18]。

基于上述背景，本研究以江西省崇义县典型亚热带阔叶次生林中的 3 种优势槠栲类树种（丝栗栲 *Castanopsis fargesii*、罗浮锥 *Castanopsis faberi* 和米槠 *Castanopsis carlesii*）的优势木为对象，采用树干解析法获取高精度年轮序列数据，系统分析其胸径、树高和材积的年龄相关增长规律。本研究通过揭示 3 种槠栲类树种的生长过程及种间差异，阐明其生长节律、生态适应机制与生长策略分化特征，为亚热带天然次生林的分类经营、适地适树配置提供理论依据。研究成果亦能为区域天然次生林的精准经营与小样本条件下的单木生长建模提供理论依据和实证参考。

1　材料与方法

1.1　研究区概况及数据来源

本研究选取江西省崇义县石罗林场、密溪林场和桐梓林场的天然阔叶次生林内分布的丝栗栲、罗浮锥和米槠为研究对象。研究区（25°40′55″N，114°18′29″E）地处亚热带季风气候区，地貌类型以低山丘陵为主，土壤类型主要为黄壤和红壤。研究区内天然阔叶次生林的优势树种包括丝栗栲、罗浮锥和米槠等。

研究区内的天然阔叶次生林具有较高的结构复杂性，且林分年龄结构尚不明确。因此，本研究采用典型取样法，从上述 3 个优势树种中选取 27 株健康大径级优势木作为解析木（包括 13 株丝栗栲，9 株米槠，5 株罗浮锥）。解析木伐前数据详见表 1。

表 1　解析木伐前数据概况
Table 1　Overview of pre-felling data of stem analysis trees

树种 Species	带皮胸径 DBH over bark /cm			树高 Tree height /m		
	均值 ± 标准差 Mean±standard deviation	最大值 Max	最小值 Min	均值 ± 标准差 Mean±standard deviation	最大值 Max	最小值 Min
丝栗栲 *C. fargesii*	38.3±4.5	45.5	29.1	22.1±1.6	25.4	20.0
罗浮锥 *C. faberi*	43.1±6.9	54.8	34.9	22.8±2.4	27.1	20.1
米槠 *C. carlesii*	36.1±5.6	46.3	29.1	23.4±3.3	26.7	17.4
树种 Species	冠幅 Crown width /m			树龄 Tree age /a		
	均值 ± 标准差 Mean±standard deviation	最大值 Max	最小值 Min	均值 ± 标准差 Mean±standard deviation	最大值 Max	最小值 Min
丝栗栲 *C. fargesii*	10.6±2.5	13.9	6.9	52.7±15.1	68	24
罗浮锥 *C. faberi*	10.9±2.2	14.1	8.5	44.0±8.3	51	29
米槠 *C. carlesii*	8.9±1.5	11.2	6.8	39.9±9.1	50	24

本研究以 30 cm 胸径为起测径阶，设置 2 cm 径阶整化区间，按上限排外法对林木实测胸径进行径阶整化与归类统计，各树种径阶分布如图 1 所示。由图 1 可见，3 种优势树种的个体主要集中在 30 ～ 46 cm 径阶，整体上呈现较为均匀的分布格局。需要说明的是，本研究特意选取大径级个体作为解析木。大径木能够完整表征阔叶次生林单木长期生长动态，因此样本未纳入小径级林木。丝栗栲在多个径阶中有分布，反映其较强的天然更新能力；米槠和罗浮锥个体数量相对较少，但在中、大径阶仍具代表性，表明其在群落中保持了一定竞争地位。整体而言，该径阶分布与林分的演替阶段和优势树种的生态特性相符，具有合理性。针对每株解析木，在获取胸径段和底盘样本后，采用 2 m 间隔取样法沿树干纵向截取圆盘样本，经打磨抛光处理后进行树轮扫描。树轮宽度分别在南北和东西 2 个垂直方向进行测量，并运用交叉定年法进行校正，以此构建单木年轮宽度时间序列。基于所得解析木时间序列数据，采用 ForStat 2.2 软件的树干解析模块，计算各年龄段的生长量。所得丝栗栲数据 659 条，米槠数据 342 条，罗浮锥数据 218 条，数据概况详见表 2。本研究所有模型拟合及参数估计均采用去皮胸径与去皮材积实测数据完成。

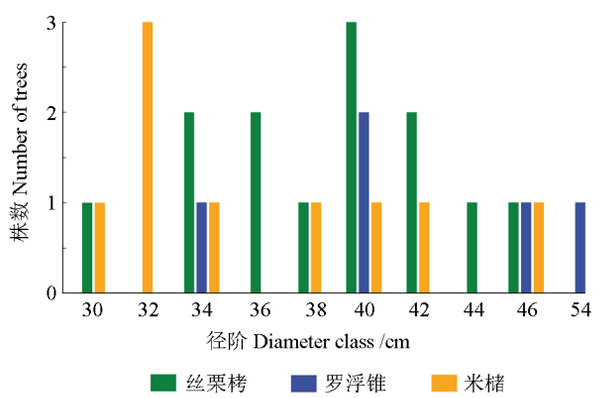


图 1　解析木径阶分布
Fig. 1　Diameter class distribution of sample trees

1.2　研究方法

1.2.1　不同生长维度的相容性生长模型构建

本研究选取了 Logistic、Gompertz、Hossfeld Ⅳ、Korf 和 Richards 5 种理论生长模型作为候选基础模型（表 3）。这些模型均为林木生长研究中应用最为广泛的非线性拟合模型，能够较好刻画树木 S 形或近 S 形生长规律。此外，鉴于统计建模对样本量具有一定要求，而单个树种的数据量相对有限，且本研究 3 个树种同属，生长规律具有一定相似性，因此在分别对 3 个树种的胸径、树高和材积进行初步建模的基础上，综合对比筛选出拟

合效果最佳的基础模型。尽管不同树种和因变量在独立拟合时最优模型存在差异，但为了保证后续跨树种比较和系统方程估计的一致性，需要在总体分析中采用统一的模型框架。因此，在独立拟合的基础上，本研究根据各候选模型作为最优模型的出现频度，选择最具代表性的模型作为统一的基础模型。在此基础上，引入树种哑变量，分别建立胸径、树高和材积 3 个维度的总体生长平均模型。

表 2 解析木生长数据概况
Table 2 Overview of the sample tree data

树种 Species	去皮胸径 DBH inside bark /cm			树高 Tree height /m		
	均值 ± 标准差 Mean±standard deviation	最大值 Max	最小值 Min	均值 ± 标准差 Mean±standard deviation	最大值 Max	最小值 Min
丝栗栲 *C. fargesii*	18.4±11.1	42.1	0.4	13.6±6.2	25.4	1.4
罗浮锥 *C. faberi*	21.5±14.2	56.0	0.4	15.0±6.4	27.1	1.5
米槠 *C. carlesii*	19.3±11.3	42.5	0.5	15.4±6.6	26.7	1.6
树种 Species	去皮材积 Volume inside bark /m^3			树龄 Tree age /a		
	均值 ± 标准差 Mean±standard deviation	最大值 Max	最小值 Min	均值 ± 标准差 Mean±standard deviation	最大值 Max	最小值 Min
丝栗栲 *C. fargesii*	0.343 839±0.352 751	1.487 059	0.000 041	30±17	68	1
罗浮锥 *C. faberi*	0.519 438±0.627 328	2.761 195	0.000 056	23±14	51	1
米槠 *C. carlesii*	0.374 894±0.361 035	1.392 198	0.000 083	22±12	50	2

表 3 基础模型
Table 3 Basic models

表达式编号 Expression No.	模型来源 Model resource	表达式 Expression	说明 Illustrate
E1	Logistic	$Y=\frac{a}{1+c\cdot e^{-bA}}+\varepsilon$	*Y* 代表因变量，包括胸径、树高或材积；*A* 代表自变量，为单木年龄；e 代表自然常数；ε 代表误差项；*a*、*b* 和 *c* 为模型参数
E2	Gompertz	$Y=a\cdot e^{-c\cdot e^{-bA}}+\varepsilon$	
E3	Hossfeld Ⅳ	$Y=\frac{a}{1+c\cdot A^{-b}}+\varepsilon$	
E4	Korf	$Y=a\cdot e^{-c\cdot A^{-b}}+\varepsilon$	
E5	Richards	$Y=a(1-e^{-bA})^{c}+\varepsilon$	

为了同时考虑不同树种或不同因变量间潜在的误差项相关性，本研究进一步采用似乎不相关法（Seemingly unrelated regression，SUR）进行系统方程估计。SUR 的基本思想是通过估计方程组的误差协方差矩阵，并采用可行广义最小二乘法进行参数估计，从而在存在跨方程相关性的条件下提高估计效率。通过这种方式，不仅提升了参数估计的有效性，也增强了模型在多树种、多因变量情境下的适用性与相容性。

以 Richards 模型为例，3 个树种胸径、树高、材积总体平均相容性模型公式如下：

$$\begin{cases} D=a_{11}\cdot(1-e^{-(b_{11}+b_{12}\cdot S_{P1}+b_{13}\cdot S_{P2})\cdot A})^{c_{11}}+\varepsilon_1 \\ H=a_{21}\cdot(1-e^{-(b_{21}+b_{22}\cdot S_{P1}+b_{23}\cdot S_{P2})\cdot A})^{c_{21}}+\varepsilon_2 \\ V=a_{31}\cdot(1-e^{-(b_{31}+b_{32}\cdot S_{P1}+b_{33}\cdot S_{P2})\cdot A})^{c_{31}}+\varepsilon_3 \end{cases} 。（1）$$

式中，*D* 为去皮胸径，*H* 为树高，*V* 为去皮材积。S_{Pi} 为区分树种的哑变量：当 $S_{P1}=S_{P2}=0$ 时表示树种为丝栗栲；当 $S_{P1}=1$ 且 $S_{P2}=0$ 时表示树种为罗浮锥；当 $S_{P1}=0$ 且 $S_{P2}=1$ 时表示树种为米槠。a_{11}、b_{11}、b_{12}、b_{13}、c_{11} 是因变量 *D* 的子模型的模型参数，ε_1 是该子模型的误差项；a_{21}、b_{21}、b_{22}、b_{23}、c_{21} 是因变量 *H* 的子模型的模型参数，ε_2 是该子模型的误差项；a_{31}、b_{31}、b_{32}、b_{33}、c_{31} 是因变量 *V* 的子模型的模型参数，ε_3 是该子模型的误差项。

1.2.2 关于材积生长的异速生长模型构建

异速生长方程（Allometric equation）是描述生物体不同器官或性状之间生长关系的数学模型，主要用于研究某一性状（如胸径、树高、生物量等）与另一性状（如树高、胸径等）之间的比例关系。在林业建模中，异速生长方程被广泛应用于构建树木材积模型，成为森林资源调查和经营规划的重要工具。其计算公式如下：

$$V=a\cdot D^{b}\cdot H^{c}+\varepsilon。 \quad (2)$$

解析木数据普遍存在异方差性问题，因此在模型参数求解过程中通常需采用对数变换或加权

回归等方法以消除异方差的影响[19]。为了便于参数估计并消除异方差的影响，通常对异速生长方程进行对数变换，将其转化为线性模型形式：

$$\ln(V)=\ln(a)+b\cdot\ln(D)+c\cdot\ln(H)+\varepsilon' 。 \quad (3)$$

式中：ε' 为对数变换后的误差项。

然而，经对数变换后的模型在预测材积时会产生系统偏差。这是因为对数变换会改变误差项的分布特性，导致反变换后的预测值偏离真实值。针对这一问题，曾伟生等[19]详细探讨了非线性模型对数回归的偏差校正原理与方法。本研究采用 Baskerville[20] 提出的校正因子对模型进行校正，以减小预测偏差，提高模型的预测精度。该方法可有效消除对数变换带来的偏差，确保模型预测结果的准确性和可靠性。具体校正方法如下：

$$V_{校正}=\mathrm{e}^{\ln(a)+b\cdot\ln(D)+c\cdot\ln(H)}\cdot F_C 。 \quad (4)$$

式中：F_C 为校正因子，通常取值 $\mathrm{e}^{s^2/2}$；s 为模型残差的标准差。

1.2.3　优势树种生长分析

通过对 3 个优势树种的生长分析，可以揭示不同树种的生长特性和优势，为森林管理和保护提供科学依据。在本研究中，通过分析 3 个优势树种的胸径、树高和材积的连年生长量（Current annual increment，CAI）与平均生长量（Mean annual increment，MAI）评估其生长特征。

1.2.4　模型评价

本研究所有模型拟合均采用十折交叉验证法。模型评价指标采用决定系数（R^2）、均方根误差（Root mean square error，RMSE）和平均系统误差（Mean systematic error，MSE）[19]。

2　结果与分析

2.1　不同生长维度的相容性生长模型拟合结果

本研究采用 Logistic、Gompertz、Hossfeld Ⅳ、Korf 和 Richards 5 种理论生长模型，分别对丝栗栲、罗浮锥和米槠 3 个优势树种的胸径、树高及材积生长过程进行拟合。本研究筛选出所有模型参数均通过显著性检验（$P < 0.05$），且模型评价指标表现较优的生长模型（R^2 相对较高，RMSE 相对较低），各模型拟合结果如表 4 所示。

根据表 4 的结果，选择 Richards 模型作为基础模型，建立 3 个槠栲类树种胸径、树高和材积总体平均相容性模型。采用 SUR 进行拟合，其计算结果如表 5 所示。该模型的残差相关性矩阵为：

$$\mathbf{R}=\begin{pmatrix}1.000\,0 & 0.682\,0 & 0.875\,1\\ 0.682\,0 & 1.000\,0 & 0.576\,9\\ 0.875\,1 & 0.576\,9 & 1.000\,0\end{pmatrix} 。$$

其中，残差相关性较高的有胸径与材积（0.875 1）、胸径与树高（0.682 0），说明 3 个联立方程之间存在显著残差相关性，验证了采用似乎不相关法进行联合建模的合理性。

2.2　异速生长方程拟合结果

通过对 3 个树种的异速生长方程拟合结果进行分析（表 6），可以看出各树种的生长特征差

表 4　单木胸径、树高和材积生长模型筛选结果

Table 4　Screening results of individual tree DBH, height, and volume growth models

因变量 Dependent variable	树种 Species	表达式编号 Expression No.	a	b	c	R^2	RMSE
D	丝栗栲	E5	44.950 1	0.026 0	1.291 4	0.757 4	5.374 0
	罗浮锥	E3	83.217 9	1.300 6	161.727 7	0.699 6	7.700 7
	米槠	E4	60.028 4	0.875 5	16.145 2	0.888 0	3.706 2
H	丝栗栲	E4	61.986 5	0.395 6	5.470 6	0.798 6	2.924 7
	罗浮锥	E5	31.122 9	0.026 3	0.833 5	0.902 6	2.014 2
	米槠	E4	70.781 4	0.446 9	5.749 7	0.951 0	1.581 1
V	丝栗栲	E5	1.612 0	0.029 6	3.180 7	0.713 2	0.187 8
	罗浮锥	E2	2.643 9	0.050 1	6.134 8	0.546 5	0.394 5
	米槠	E5	1.165 2	0.080 0	6.791 4	0.851 8	0.137 3

表 5　胸径、树高、材积总体平均相容性模型拟合结果

Table 5　Fitting results of the general average compatible models for DBH, tree height, and volume

因变量 Dependent variable	a	b	c	b_1	b_2	R^2	RMSE
D	52.068 9	0.021 2	1.322 0	0.013 0	0.009 6	0.764 2	5.498 3
H	30.604 4	0.018 3	0.860 9	0.010 1	0.012 4	0.842 1	2.505 9
V	3.106 0	0.016 9	2.640 1	0.011 7	0.007 5	0.686 5	0.220 9

表 6　异速生长方程拟合结果 †
Table 6　Fitting results of allometric growth equations

树种 Species	*a*	*b*	*c*	F_C	R^2	RMSE	MSE
丝栗栲 *C. fargesii*	99.673 5	1.742 6	0.964 7	1.026 7	0.989 7	0.230 1	−0.073 6
				1.000 0	0.989 8	0.227 7	0.170 1
罗浮锥 *C. faberi*	57.048 4	1.754 5	1.152 5	1.024 8	0.990 5	0.220 3	−0.078 7
				1.000 0	0.990 6	0.218 6	0.141 8
米槠 *C. carlesii*	90.495 5	1.836 1	0.873 5	1.024 4	0.990 7	0.210 8	−0.098 0
				1.000 0	0.990 9	0.208 5	0.120 6

†　当 F_C=1.000 0 时，表示未经校正的模型。When F_C=1.000 0, it indicates the uncorrected model.

异，且模型整体拟合效果良好。所有树种的拟合方程均具有较高的 R^2（大部分接近 0.99），表明模型能够较好地解释树木生长的异速特征。同时，RMSE 较小，进一步验证了拟合结果的准确性和可靠性。

在经过校正后的对数变换模型中，各树种的 MSE 均降低（变化幅度为 18.7% ～ 56.7%）。虽然 R^2 略有下降，RMSE 有所增加，但变化幅度较小（变化小于 1.5%），仍保持较为稳定。

综上所述，本研究所建立的异速生长方程能够有效描述研究区域内不同树种的生长规律，为森林经营和生态研究提供可靠的数学模型和数据支持。

2.3　优势树种生长分析结果

基于栲栲类胸径、树高、材积总体平均相容性模型（表 5），绘制 3 个优势树种的胸径、树高和材积生长曲线，如图 2 所示。进一步分析 3 个树种胸径、树高及材积的连年生长量与平均生长量（图 3），对各树种生长速率及数量成熟年龄进行综合评估。研究表明，不同树种在生长过程中的表现存在差异，这些差异对森林资源的合理利用和经营具有重要意义。

在胸径生长方面，罗浮锥展现出较高的生长速度，在胸径生长速度上表现最佳。米槠也展现了较强的竞争力，能够适应当前生长环境的压力，并在初期阶段能更有效地获取资源。罗浮锥和米槠的胸径数量成熟龄大致为 16、17 a，显示出较强的早期生长优势及较快的稳定生长阶段。相对来说，丝栗栲在胸径生长方面弱于其他 2 种栲栲类树种，其胸径成熟龄为 25 a。

在树高生长方面，3 个优势树种均表现出明显的初期速生特征，树高连年生长量以第 1 年达到峰值（树高连年生长量曲线及平均生长量曲线未能相交）。其中，米槠的树高初期生长速度最快（连年生长量极值最高），罗浮锥次之，丝栗栲居第 3。

在材积生长方面，3 个栲栲类树种分化较为明显。罗浮锥和米槠的早期生长速度较丝栗栲更为迅速，两者的连年生长量极值均高于丝栗栲；在数量成熟年龄上，罗浮锥和米槠的材积数量成熟年龄较丝栗栲更早，三者分别为 60、70、101 a。

3　讨　论

本研究采用似乎不相关回归建立了江西省崇义县亚热带阔叶次生林 3 个栲栲类树种（丝栗栲、罗浮锥、米槠）胸径、树高和材积相容性模型，证明了树木生长不同维度之间的相关性。这一研究结果说明在多维度建模中考虑生长变量之间的

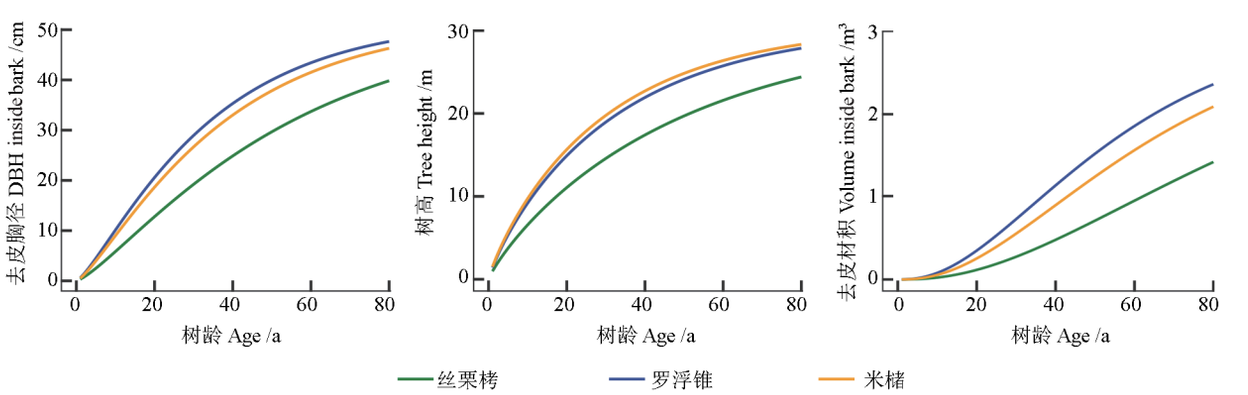
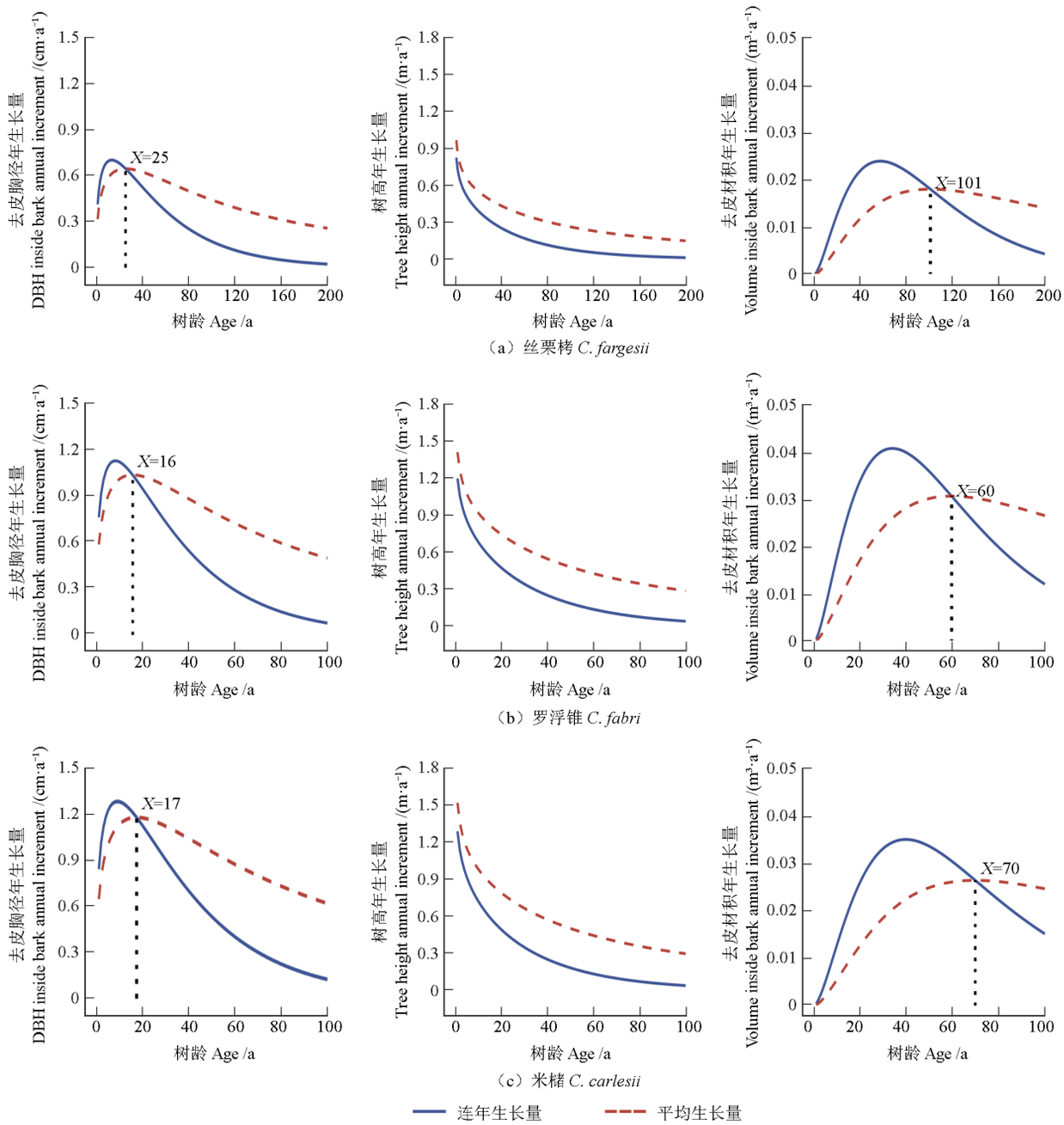


图 2　3 个树种胸径、树高和材积生长曲线
Fig. 2　Growth curves of DBH, height and volume of three species



X 为树木数量成熟龄。*X* denotes the quantitative maturity age.

图 3　3 个树种胸径、树高和材积年生长量变化

Fig. 3　Annual growth changes in DBH, height and volume of three species

相互关联具有重要意义，这与 Zhou 等 [21] 关于树木多生长变量存在相关性的研究结果一致。同时，本研究对异速生长方程进行了对数变换，显著降低了模型的平均系统误差，说明在存在异方差的情况下，采用对数变换是有效的解决方案，能够显著改善模型的拟合效果并降低误差的影响。这一结论也得到了曾伟生等 [19] 研究的支持。他们的研究同样表明，在处理异方差问题时，加权回归或对数变换方法能有效提高模型的精度和稳定性。

在树种生长特征分析方面，3 个优势树种（丝栗栲、罗浮锥、米槠）在胸径、树高和材积的生长速率及成熟节律上均表现出明显差异，体现出不同的生长策略和生态适应能力。这种种间差异不仅反映了各树种对资源利用和环境适应的生理特性，也反映了其在林分中的功能角色差异 [22]。罗浮锥与米槠在胸径与材积维度上展现出明显的早期生长优势，二者胸径数量成熟龄分别为 16、17 a，材积数量成熟龄分别为 60、70 a，适合用于追求快速木材积累的用材林经营目标。Chen 等 [23] 与罗小金 [24] 指出部分壳斗科 Fagaceae 植物具有早期快速生长的特点，适宜作为中南地区速生阔叶树种推广；其中，米槠在树高初期生

长速率上表现最为突出，表明其具备较强的光能利用效率与水分获取能力，适宜于光照竞争激烈或地形复杂的生态修复区。相较之下，丝栗栲虽胸径和材积生长速度较慢，成熟期分别为 25、101 a，表示其生长策略更偏向“稳定型”或“保守型”，在维持林分长期结构稳定及提升群落生态适应性方面具备独特优势 [25]。已有研究表明，丝栗栲在干旱胁迫下具备较强的木质部水分输导可塑性与气孔调节能力，可显著提升自身对气候波动及极端环境的耐受能力 [26]，在水源涵养林营建与生态敏感区植被配置中具有重要应用价值。此外，罗浮锥与米槠种子发芽能力显著高于丝栗栲 [27]。通常情况下，高发芽能力树种可形成更多幼苗，但其幼苗存活率往往更低 [28]，该规律与本次在崇义县亚热带阔叶次生林的野外踏查及采样结果一致。同时，较强的种子发芽能力有利于林木快速恢复生物量，抵御机械损伤并恢复生长进程，进而促进林分生物量的持续积累 [29]。该生物学特性也可较好地解释崇义县亚热带阔叶次生林中罗浮锥、米槠与丝栗栲间生长策略的分异规律。

从资源分配与生态功能角度看，不同树种在胸径、树高与材积的增长速率与动态过程中的差异反映了其对生境资源的不同权衡策略。Hiroki 等 [30] 通过光照试验比较了长果锥和尖叶栲的耐阴性，发现即使是同属树种，对环境的耐受性仍存在显著差异：尖叶栲更耐阴，长果锥更耐旱。这些差异进一步强调了“适地适树”与“分类经营”的必要性 [31]。在森林经营实践中，可针对不同林分目标（如水源涵养、生态修复、木材供给等）合理配置树种组合。对于追求短周期、高产量的用材林地，应优先配置罗浮锥与米槠；而对于生态功能型林地，则应保留如丝栗栲等具有稳定生长与抗逆能力的树种，以提升林分长期稳定性和生态弹性。

本研究在探讨崇义县亚热带阔叶次生林 3 个槠栲类树种的胸径、树高和材积生长特征及异速生长规律等方面取得了较为系统的结果，但仍存在一些局限性。首先，本研究受实地踏查条件限制，样本量相对较小，可能影响模型在区域推广中的稳健性；其次，研究对象仅涵盖 3 种优势树种，尚未考虑林分中其他树种的生长互动及潜在竞争效应，这可能限制对森林整体结构和动态过程的全面理解；再次，本研究构建的模型未纳入环境因子（如土壤类型、水分、微气候等），可能导致在不同微环境下的预测精度有所差异。未来研究可在扩大样本量和树种覆盖率的基础上，结合环境因子与林分结构，开展长期动态监测与多维度生长模拟，以进一步提升模型的泛化能力与应用价值。

4 结 论

1）基于 Richards 模型构建了 3 个生长维度的联立非线性方程，并采用似乎不相关回归法（SUR）进行联立建模。残差相关性分析显示，胸径与材积（相关系数为 0.875 1）、胸径与树高（相关系数为 0.682 0）之间存在显著残差相关性，验证了相容性建模和 SUR 方法在多维生长过程建模中的适用性与有效性。2）异速生长方程拟合结果显示，各树种均具有较高的拟合优度（R^2 接近 0.99），经过对数变换后模型的平均系统误差明显降低，验证了该方法在异方差控制中的可行性，为今后开展更高精度的单木建模提供了理论基础。3）从生长策略角度看，罗浮锥和米槠表现出更强的早期生长能力与较快的成熟速度，适宜用于追求高产和快速周转的用材林建设；丝栗栲虽然生长速度相对较慢，但其在干旱适应性和长期稳定性方面表现良好，更适合作为生态功能型树种配置于水源涵养林等特殊立地。各树种在生长速率、成熟年龄和资源利用效率方面的差异，体现出不同的生态适应策略。

参考文献：

[1] Keenan R J, Reams G A, Achard F, et al. Dynamics of global forest area: results from the FAO global forest resources assessment 2015[J]. Forest Ecology and Management,2015,352: 9-20.

[2] Xu W Q, Hao M H, He H J, et al. Scale-dependent mechanisms linking biodiversity to carbon accumulation in the temperate forests of northeast China[J]. Forest Ecology and Management, 2026,614:123815.

[3] 《中国次生林可持续经营技术指南》编写组 . 中国次生林可持续经营技术指南 [M]. 北京 : 中国林业出版社 , 2024:1-2. Editorial Group of Technical Guidelines for Sustainable Management of Secondary Forests in China. Technical guidelines for sustainable management of secondary forests in China[M]. Beijing: China Forestry Publishing House,2024:1-2.

[4] Matos F A R, Magnago L F S, Miranda C A C, et al. Secondary forest fragments offer important carbon and biodiversity cobenefits[J]. Global Change Biology,2020,26:509-522.

[5] 刘娜, 何春梅, 何水晴, 等 . 秦岭皇冠暖温性落叶阔叶林 2019—2024 年群落动态 [J]. 应用生态学报 ,2025,36(9):2703-2711.

Liu N, He C M, He S Q, et al. Community dynamics of warm deciduous broad-leaved forest in Huangguan of Qinling mountains, China, 2019-2024[J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2025,36(9): 2703-2711.

[6] 孙越 , 马宏博 , 程福山 , 等 . 东北中东部山区天然次生林乔木物种组成和群落结构特征 [J]. 中南林业科技大学学报 , 2024,44(1):140-150.
Sun Y, Ma H B, Cheng F S, et al. Tree species composition and community structure of natural secondary forests in the middle-eastern mountainous area of northeast China[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2024,44(1):140-150.

[7] Hekkala A M, Jönsson M, Kärvemo S, et al. Habitat heterogeneity is a good predictor of boreal forest biodiversity[J]. Ecological Indicators,2023,148:110069.

[8] Cudjoe E, Ruiz-Peinado R, Pretzsch H, et al. Neighborhood competition improves biomass estimation for Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) but not Pyrenean oak (*Quercus pyrenaica* Willd.) in young mixed forest stands[J]. Forest Ecosystems,2025,13:100317.

[9] 刘瑞婷 , 王冰 , 张秋良 , 等 . 兴安落叶松天然林林木竞争研究 [J]. 中南林业科技大学学报 ,2024,44(2):129-137.
Liu R T, Wang B, Zhang Q L, et al. Study on the tree competition of natural of *Larix gmelinii* forest[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2024,44(2): 129-137.

[10] Zhang Y X, Liu T R, Guo J P, et al. Changes in the understory diversity of secondary *Pinus tabulaeformis* forests are the result of stand density and soil properties[J]. Global Ecology and Conservation,2021,28:e01628.

[11] Zou K L, Xu Q G, He P, et al. Climate sensitive growth model for volume and carbon storage of subtropical broadleaf secondary forests in China[J]. Ecological Indicators,2025,170:113056.

[12] Zhang X J, Wang S L. Joint control of plant ecological strategy by climate, regeneration mode, and ontogeny in northeastern Chinese forests[J]. Ecology and Evolution,2021,11: 6703-6715.

[13] Augusto L, Borelle R, Boča A, et al. Widespread slow growth of acquisitive tree species[J]. Nature,2025,640:395-401.

[14] Lutz J A, Larson A J, Swanson M E, et al. Ecological importance of large-diameter trees in a temperate mixed-conifer forest[J]. PLoS One,2012,7(5):e36131.

[15] Lutz J A, Larson A J, Freund J A, et al. The importance of large-diameter trees to forest structural heterogeneity[J]. PLoS One,2013,8(12):e82784.

[16] Pang L F, Wang G X, Sharma R P, et al. Simulation of thinning by integrating tree competition and species biodiversity for target tree-based management of secondary forests[J]. Forests, 2023,14:1896.

[17] 励龙昌 . 以潜能函数建立单木生长模型 [J]. 东北林业大学学报 ,1990,18(4):22-28.
Li L C. Construct individual tree growth model based on potential function[J]. Journal of Northeast Forestry University,1990,18(4): 22-28.

[18] 李凤日 . 测树学 [M].4 版 . 北京 : 中国林业出版社 ,2019:255-260.
Li F R. Forest mensuration[M]. 4th ed. Beijing: China Forestry Publishing House,2019:255-260.

[19] 曾伟生 , 唐守正 . 非线性模型对数回归的偏差校正及与加权回归的对比分析 [J]. 林业科学研究 ,2011,24(2):137-143.
Zeng W S, Tang S Z. Bias correction in logarithmic regression and comparison with weighted regression for non-linear models[J]. Forest Research,2011,24(2):137-143.

[20] Baskerville G L. Use of logarithmic regression in the estimation of plant biomass[J]. Canadian Journal of Forest Research,1972,2:49-53.

[21] Zhou Z Y, Fu L Y, Zhou C F, et al. Simultaneous compatible system of models of height, crown length, and height to crown base for natural secondary forests of northeast China[J]. Forests, 2022,13:148.

[22] Aiba M, Takafumi H, Hiura T. Interspecific differences in determinants of plant species distribution and the relationships with functional traits[J]. Journal of Ecology,2012,100:950-957.

[23] Chen R J, Guo X L, Ge Y X, et al. Tree species mixing effects on the radial growth of *Pinus massoniana* and *Castanopsis hystrix*: a comparison between even-aged and uneven-aged stands[J]. Forest Ecology and Management,2024,566:122058.

[24] 罗小金 . 不同地形次生阔叶林中钩栲生长状况分析 [J]. 林业勘察设计 ,2023,43(1):42-45.
Luo X J. Analysis on growth of *Castanopsis kawakamii* in secondary broad-leaved forest with different topography[J]. Forestry Prospect and Design,2023,43(1):42-45.

[25] Ramakrishnan P S, Shukla R P, Boojh R. Growth strategies of trees and their application to forest management[J]. Current Science,1982,51(9):448-455.

[26] Liang X Y, He P C, Liu H, et al. Precipitation has dominant influences on the variation of plant hydraulics of the native *Castanopsis fargesii* (Fagaceae) in subtropical China[J]. Agricultural and Forest Meteorology,2019,271:83-91.

[27] Nanami S, Kawaguchi H, Tateno R, et al. Sprouting traits and population structure of co-occurring *Castanopsis* species in an evergreen broad-leaved forest in southern China[J]. Ecological Research,2004,19:341-348.

（下转第 132 页）

Wang J B. Research of fine root growth characteristics in secondary subtropical evergreen broad-leaved forest with different restoration stages[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University,2020: 19-20.

[37] 王凯 , 宋立宁 , 吕林有 , 等 . 不同林龄沙地樟子松人工林细根垂直分布特征 [J]. 东北林业大学学报 ,2014,42(3):1-4.
Wang K, Song L N, Lyu L Y, et al. Fine root vertical distribution characters of different aged *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantations on sandy land[J]. Journal of Northeast Forestry University,2014,42(3):1-4.

[38] 冯慧芳 , 余明 , 薛立 . 外源性氮磷添加及林分密度对大叶相思林土壤酶活性的影响 [J]. 生态学报 ,2020,40(14):4894-4902.
Feng H F, Yu M, Xue L. Effects of nitrogen and phosphorus additions on soil enzyme activities in *Acacia auriculiformis* stands under different planting densities[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020,40(14):4894-4902.

[39] 陈婧 . 吉兰泰人工梭梭林下土壤养分和机械组成的时空分布规律 [D]. 呼和浩特 : 内蒙古农业大学 ,2019:45-46.
Chen J. Spatial and temporal distribution of soil nutrient and mechanical composition of *Haloxylon ammodendron* in Jilantai[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University,2019:45-46.

[40] 郭灵辉 , 王道杰 , 张云红 , 等 . 蒋家沟新银合欢人工林土壤养分分布及其与细根的关系 [J]. 中国水土保持 ,2010(12):46-49.
Guo L H, Wang D J, Zhang Y H, et al. Distribution of soil nutrient and relationship with thin root of *Leucaena leucocephala* plantation in Jiangjia gully[J]. Soil and Water Conservation in China, 2010(12):46-49.

[41] 郭钰 , 姚佳峰 , 董媛 , 等 . 油松和刺槐纯林及混交林根系分布特征 [J]. 应用生态学报 ,2023,34(11):2881-2888.
Guo Y, Yao J F, Dong Y, et al. Root distribution characteristics of monoculture and mixture of *Pinus tabuliformis* and *Robinia pseudoacacia* plantation[J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2023,34(11):2881-2888.

[42] Jackson R B, Moore L A, Hoffmann W A, et al. Ecosystem rooting depth determined with caves and DNA[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America,1999,96:11387-11392.

[43] 谷利茶 , 王国梁 , 景航 , 等 . 氮添加对油松不同径级细根分解及其养分释放的影响 [J]. 应用生态学报 ,2017,28(9):2771-2777.
Gu L C, Wang G L, Jing H, et al. Response of decomposition and nutrient release in different diameter fine roots of *Pinus tabuliformis* plantation to N addition[J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2017,28(9):2771-2777.

[本文编校：张雨朦]

（上接第 21 页）

[28] Kruger L M, Midgley J J, Cowling R M. Resprouters vs reseeders in South African forest trees; a model based on forest canopy height[J]. Functional Ecology,1997,11:101-105.

[29] Zimmerman J K, Everham Ⅲ E M, Waide R B, et al. Responses of tree species to hurricane winds in subtropical wet forest in Puerto Rico: implications for tropical tree life histories[J]. Journal of Ecology,1994,82:911-922.

[30] Hiroki S, Ichino K. Comparison of growth habits under various light conditions between two climax species, *Castanopsis sieboldii* and *Castanopsis cuspidata*, with special reference to their shade tolerance[J]. Ecological Research,1998,13:65-72.

[31] Vázquez-Veloso A, Ruano I, Bravo F. Trade-offs and management strategies for ecosystem services in mixed Scots pine and Maritime pine forests[J]. European Journal of Forest Research,2025,144:893-907.

[本文编校：张雨朦]