

3 种栎属树种单木生长模型及树皮厚度模型研究

谭灿灿¹, 聂 稳¹, 刘逸夫¹, 王 亚², 董 遥^{1,2}, 黄睿智^{1,2}, 刘建锋²,
史胜青², 常二梅², 赵秀莲², 江泽平¹, 贾子瑞²

(1. 中国林业科学研究院 森林生态环境与自然保护研究所, 北京 100091; 2. 中国林业科学研究院 林业研究所, 北京 100091)

摘要: 【目的】通过构建栎属 *Quercus* 单木生长模型, 分析栎树生长特征, 为栎属植物质量精准提升、结构优化与合理经营提供依据。【方法】汇总整理栎属 3 个树种(槲栎 *Q. aliena*、麻栎 *Q. acutissima*、栓皮栎 *Q. variabilis*) 解析木各阶段生长量信息, 分析栎树单木树高、材积、胸径生长特征; 选取 4 个理论生长方程、1 个经验方程及 3 个胸径处树皮厚度方程拟合并检验栎树单木的树高、材积、胸径与树皮厚度, 优选出适应性最强、稳定性最高的模型。【结果】①各栎树单木生长过程符合一般林木生长规律: 在前 40~50 a 树高与胸径生长速度较快, 之后随着平均生长量和连年生长量的降低逐渐减小; 材积各生长量始终保持随树龄的增大而增加的趋势。②栎树模型拟合结果为: 树高拟合最优模型多为逻辑斯蒂 (Logistic) 模型, 材积拟合最优模型多为坎派兹 (Compertz) 模型, 胸径拟合最优模型多为修正威布尔 (Weibull modified) 模型。③气候对栎树生长影响的结果表明: 气候差异导致山西省和河南省槲栎生长发生明显差异。④树皮厚度拟合最优模型为双对数模型和二元一次线性模型。【结论】树高模型对栎树生长拟合效果最佳, 实际意义较强; 槲栎对气候敏感性较强。图 5 表 4 参 23

关键词: 栎树; 生长特征; 生长模型; 树皮厚度

中图分类号: S758.1 文献标志码: A 文章编号: 2095-0756(2023)03-0589-09

Tree growth model and bark thickness model of three *Quercus* species based on trunk analysis

TAN Cancan¹, NIE Wen¹, LIU Yifu¹, WANG Ya², DONG Yao^{1,2}, HUANG Ruizhi^{1,2}, LIU Jianfeng²,
SHI Shengqing², CHANG Ermei², ZHAO Xiulian², JIANG Zeping¹, JIA Zirui²

(1. Ecology and Nature Conservation Institute, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China; 2. Research Institute of Forestry, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China)

Abstract: [Objective] This study, with the construction of a growth model and the analysis of the growth pattern of *Quercus*, is aimed to provide reference for accurate quality improvement, structure optimization and rational management of *Quercus*. [Method] First, with the original data of trunk analysis of three species of *Quercus* (*Q. aliena*, *Q. acutissima* and *Q. variabilis*) at each period collected, an investigation was conducted of the growth pattern of tree height, volume and diameter at breast height (DBH). Then, four theoretical growth equations, one empirical growth equation and three bark thickness equations were selected for the fitting and testing of the growth process of the height, volume, DBH and bark thickness of the wood so as to find out the most suitable tree growth model. [Result] (1) The single tree growth process of *Quercus* accorded with the

收稿日期: 2022-07-08; 修回日期: 2022-12-29

基金项目: 国家自然科学基金面上资助项目 (42071065); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项 (CAFYBB2018ZB001); 国家自然科学基金青年基金资助项目 (31500540)

作者简介: 谭灿灿 (ORCID: 0000-0001-9584-2590), 从事树木生理生态研究。E-mail: tancan1999@163.com。通信作者: 贾子瑞 (ORCID: 0000-0002-5190-1488), 副研究员, 博士, 从事林木遗传改良和树皮生物学研究。E-mail: jiazirui646@163.com

generally regular pattern of forest growth, with the growth of height and DBH being faster in the first 40–50 years and then slowing down with the decrease of average growth and annual growth while the tree volume kept increasing with the increase of tree age; (2) As was shown in model fitting results, the optimal growth equation of the height was the Logistic equation, the optimal growth equation of the volume was the Compertz equation whereas the optimal growth equation of the DBH was the Weibull modified equation; (3) As for the impact of climate on *Quercus* growth, climate variation led to significant differences of *Q. aliena* growth as was shown in those growing in Shanxi Province and Henan Province respectively; (4) The optimal bark thickness fitting model was Binary linear model. [Conclusion] The tree height equation, with strong fitting effect on *Quercus* growth, has strong practical significance and *Q. aliena* is more sensitive to climate. [Ch, 5 fig. 4 tab. 23 ref.]

Key words: *Quercus*; growth characteristics; growth model; bark thickness

构建树木生长模型对林业生产和经营管理有重要意义^[1]。根据立木生长的预估结果,生长模型可分为全林分模型、径阶生长模型、单木生长模型^[2]。近年来,混合效应模型被广泛应用于林业中,陈哲夫等^[3]以湖南马尾松 *Pinus massoniana* 次生林为研究对象,比较基础模型与混合效应模型的优劣,得出含样地效应的混合效应模型拟合效果和预测精度均优于基础模型,具有更高的适用性。树皮对植物起到重要的保护作用^[4]。研究发现树皮厚度会随着地理格局发生变异^[5]。且树皮大约占木材体积的 12%~20%,不同树种间存在一定差异^[6]。精准测算树皮厚度对林业生产至关重要。

栎属 *Quercus* 约 450 种^[7],是壳斗科 Fagaceae 最大的属,分布极为广泛。中国有 51 种 14 变种 1 变型^[8],它们分布于全国各地,是组成森林的重要树种。其中栓皮栎 *Q. variabilis*、麻栎 *Q. acutissima*、槲栎 *Q. aliena* 既是中国主要生态树种,又具有重要的经济价值。目前,已有不少针对栎属植物生长模型的研究^[9–12],发现栎树树高最优模型以理查德 (Richards) 模型和考夫 (Korf) 模型拟合效果最佳,材积最优模型以 Richards 模型最佳,胸径最优模型以坎派兹 (Compertz) 模型最佳。以上模型能较好地拟合栎树的生长,但缺少不同区域、立地条件对林木生长影响的考虑。本研究以栓皮栎、麻栎、槲栎 3 种栎属植物为研究对象,通过搜集早期主要分布区(山西、河南、山东和陕西等地)的解析木数据,拟合单木树高、材积、胸径和树皮厚度生长方程,以期准确预估 3 个树种林分的生长过程,并为其在不同生境地点合理的森林经营管理提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 数据收集

从全国及各省份主要树木生长量汇编书籍《中国主要树木生长量汇编(第1辑)》《中国主要树木生长量汇编(第3辑)》《山西省主要树木生长量汇编》《陕西主要树种树木生长资料集》收集槲栎、麻栎、栓皮栎 3 个树种的树干解析数据。提取与汇总树木生长过程信息,槲栎、栓皮栎以 10 a 为 1 个龄阶,麻栎以 2 a 为 1 个龄阶。为了更好地模拟效果,数据的 2/3 用于拟合模型,数据的 1/3 用于验证。将树高(H)、材积(V)、胸径(DBH)与树龄(Y)进行拟合,树皮厚度(BT)与胸径进行拟合,建立栎树人工林树高、材积、胸径、树皮厚度模型。

各采集地 1981—2010 年的基本气候数据由国家气象科学数据中心 (<http://data.cma.cn/>) 提供,统计各采集地的年平均降水量与年平均气温,作为栎属植物生长的气候数据。

1.2 单木生长模型的构建

林木的生长方程是描述树木各生长量随林分年龄生长变化规律的数学模型,反映的生长量变化大致呈“S”型。根据林木生长特征,用理查德、坎派兹、逻辑斯蒂(Logistic)、单分子式(Mistcherlich)等 4 个理论生长方程,以及 1 个拟合效果较好的经验方程(Weibull modified,修正威布尔)作为栎属植物单木树高、材积和胸径生长的基础模型;线性模型(Linear)、二元一次线性模型(Binary linear)、双对数模型(Double logarithmic)等 3 个胸径处树皮厚度模型用于树皮厚度变化模拟。模型的拟合及其参数计算在 CurveExpert 2.6 软件完成。本研究收集了各树种解析木树高、胸径和材积的数据,利用定期平均生长量

代替了连年生长量，因此出现 0~10 a 的连年生长量和平均生长量相等的情况。

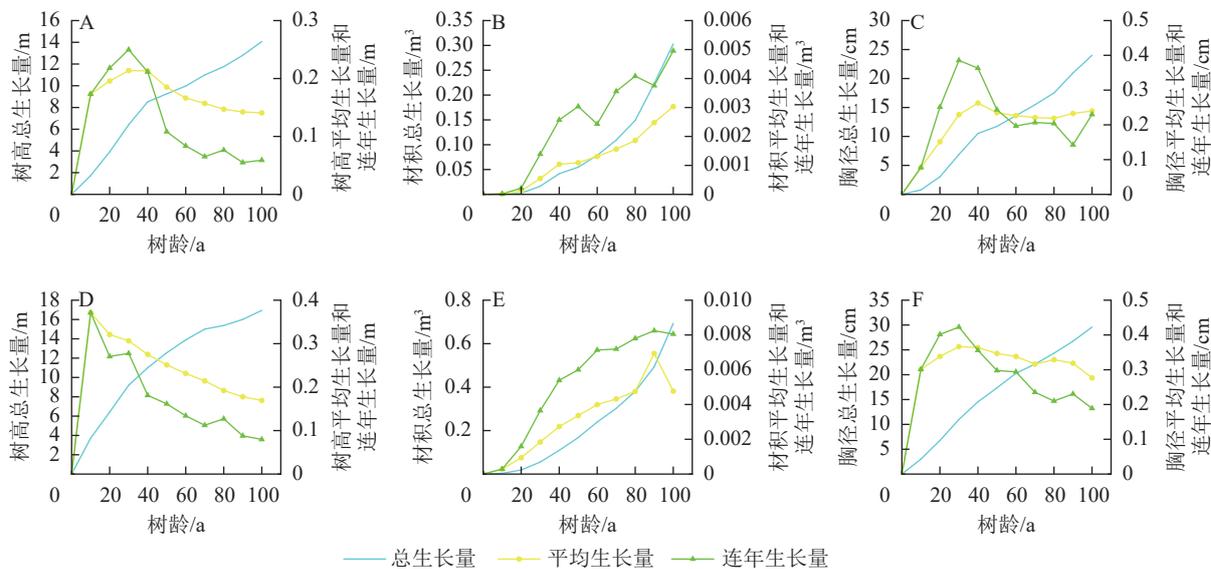
1.3 模型验证与评价

为了对模拟结果做出客观合理的评价，本研究采用决定系数 (R^2) 和赤池信息准则 (Akaike information criterion, AIC) 对拟合模型精度进行评价， R^2 越大，AIC 越小说明模型拟合效果越好；采用均方根误差 (RMSE)、平均决定误差 (MAE)、平均误差 (ME) 等 3 个指标作为模型的精度检验指标。用 SPSS 26 统计分析，Origin 2022 作图。

2 结果与分析

2.1 槲栎生长特征分析及生长模型构建

2.1.1 槲栎生长特征分析 如图 1 所示：槲栎在山西省与河南省的树高、材积、胸径总生长量随树龄的增大而增加。山西省树高连年生长量与平均生长量 (后用“2 种生长量”) 先增大后减小，2 种生长量在 30 a 时达到最大值，分别为 0.250 与 0.214 m。30 a 后 2 种生长量快速下降，且连年生长量下降速度大于平均生长量。河南省树高 2 种生长量最大值出现在 10 a，为 0.371 m，随后 2 种生长量逐渐减小。山西省胸径连年生长量 30 a 时达到最大值，为 0.386 cm，平均生长量在 40 a 时最大，为 0.263 cm。60 a 后 2 种生长量趋于稳定。河南省胸径 2 种生长量在 30 a 时最大，分别为 0.423 与 0.366 cm，随后逐年下降。山西省材积 2 种生长量总体上保持随年龄的增加而增大。河南省材积 2 种生长量在 90 a 时发生减小的现象，但不能确定其变化趋势，还需更长年限的观测。两省材积连年生长量与平均生长量在统计年限内均没有出现交点，说明 100 a 槲栎还未达到数量成熟龄，还不能确定主伐年龄。两省材积的总生长量一直处于上升的状态，没有出现变缓现象，说明 100 a 时的槲栎依旧处于生长旺盛阶段。



A~C 代表山西省槲栎生长过程；D~F 代表河南省槲栎生长过程。

图 1 不同分布区槲栎生长过程曲线

Figure 1 Growth curves of *Q. aliena* in different distribution areas

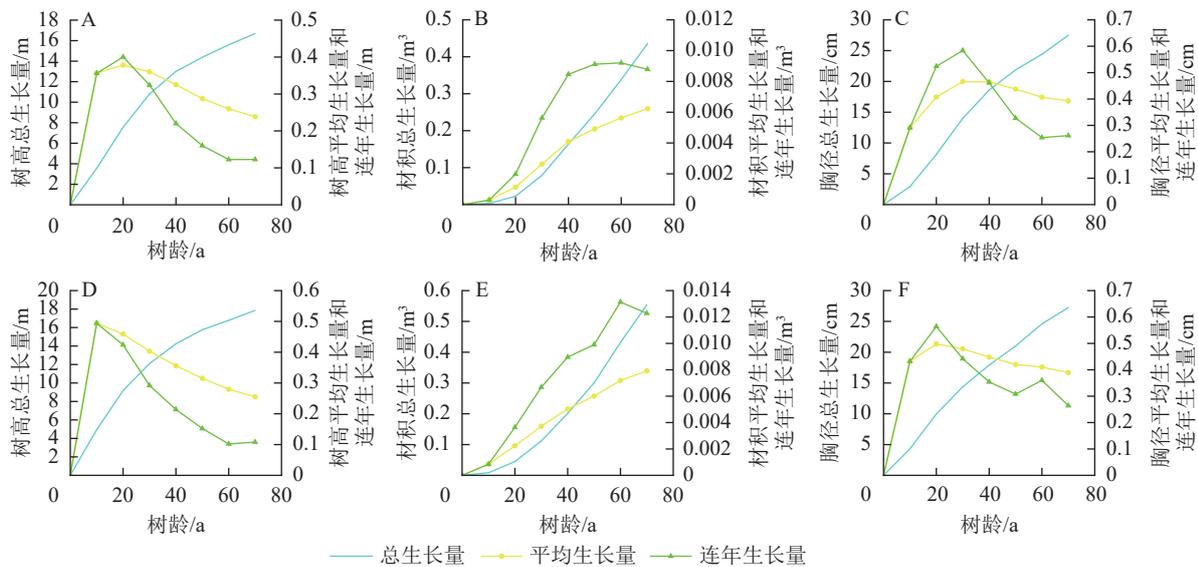
2.1.2 槲栎生长模型构建 由表 1 可知：在拟合精度上，山西省拟合效果更佳，树高最优生长方程为逻辑斯蒂模型， R^2 达 0.94，材积最优生长方程为坎派兹模型， R^2 为 0.784，胸径最优生长方程为修正威布尔模型， R^2 为 0.928。河南省槲栎拟合情况则较差。山西省与河南省槲栎树高、材积与胸径拟合最优模型均相同，分别为逻辑斯蒂模型、坎派兹模型与修正威布尔模型，可以用于槲栎生长过程模拟。

2.2 栓皮栎生长特征分析及生长模型构建

2.2.1 栓皮栎生长特征分析 如图 2 所示：两省栓皮栎树高、材积、胸径随树龄的增加而增大。前 20 a 河南省栓皮栎树高 2 种生长量逐渐增加，20 a 达到最大平均生长量 (0.378 m) 和最大连年生长量 (0.400 m)，20 a 后逐年变小。陕西省树高 2 种生长量在 10 a 时最大，10 a 后逐年变小。河南省栓皮栎胸径在 30 a 时 2 种生长量达到最大值，分别为 0.584 与 0.466 cm，随后 2 种生长量逐年减小，于 60~70 a 时趋于平

表1 榿栎生长拟合模型与检验

省份	生长因子	最优方程	拟合参数				拟合精度		检验指标		
			<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	R^2	AIC	RMSE	ME	MAE
山西	树高	逻辑斯蒂	10.187	16.079	0.114		0.940	-50.708	0.127	-0.283	0.665
	材积	坎派兹	77.307	2.817	0.081		0.784	590.919	15.743	-1.550	10.308
	胸径	修正威布尔	12.268	12.279	0.000	2.601	0.928	105.343	0.533	0.142	0.145
河南	树高	逻辑斯蒂	14.192	5.046	0.065		0.637	199.063	0.532	2.178	3.027
	材积	坎派兹	686.131	1.912	0.037		0.566	480.526	129.004	-0.523	88.680
	胸径	修正威布尔	33.549	34.348	0.006	1.228	0.762	316.900	3.730	-0.081	3.131



A~C代表河南省栓皮栎生长过程；D~F代表陕西省栓皮栎生长过程。

图2 不同分布区栓皮栎生长过程曲线

Figure 2 Growth curves of *Q. variabilis* in different distribution areas

稳。陕西省栓皮栎胸径2种生长量在20 a达到最大值，分别为0.564与0.498 cm，20 a后逐年减小。河南省栓皮栎材积连年生长量在前40 a迅速增大，40 a后趋于平稳，材积平均生长量始终保持随树龄增加而增大，增加速度慢于连年生长量。陕西省材积2种生长量随树龄增加而增大，且连年生长量大于平均生长量。两省栓皮栎在70 a内连年生长量与平均生长量均未相交，说明70 a时栓皮栎还未达到数量成熟龄，即还不能确定主伐年龄。两省的材积总生长量随着树龄增加而增大，其增长呈越来越快的趋势，说明70 a时两省栓皮栎还处于生长旺盛阶段。

2.2.2 栓皮栎生长模型构建 由表2可知：河南省栓皮栎树高、材积、胸径最适的模型分别为修正威布尔模型、坎派兹模型、坎派兹模型。陕西省栓皮栎树高、材积、胸径最适的模型分别为逻辑斯蒂模型、逻辑斯蒂模型、单分子式模型。相较下，河南省栓皮栎各生长因子的拟合效果优于陕西省，其中河南省树高拟合最佳的修正威布尔模型 R^2 为0.906，且各检验指标都较小，优于其他拟合效果。并且河南省拟合的数据量更大，更能反映栓皮栎的生长过程。因此，选择河南省单木生长拟合结果代表栓皮栎生长过程。

2.3 麻栎生长特征分析及生长模型构建

2.3.1 麻栎生长特征分析 如图3所示：山东省麻栎树高2种生长量均在0.6 m上下波动，平均生长量最大值为0.694 m，最小值为0.613 m；连年生长量最大值为0.753 m，最小值为0.475 m。麻栎胸径平均生长量0~6 a呈随树龄增加而增大，6 a后保持在0.6 cm上下；连年生长量在0~4 a迅速增加，4 a时连年生长量达最大值，为0.850 cm，4~8 a逐渐减小，8 a后连年生长量存在一定起伏，保持在0.6 cm左右。麻栎材积2种生长量在前4 a增长较慢，4 a后材积连年生长量迅速增加，18 a时达0.007 m³，材积

表 2 栓皮栎生长拟合模型与检验

Table 2 Growth fitting models and testing of *Q. variabilis*

省份	生长因子	最优方程	拟合参数				拟合精度		检验指标		
			<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	R^2	AIC	RMSE	ME	MAE
河南	树高	修正威布尔	19.654	21.409	0.027	1.016	0.906	36.800	2.019	-0.043	1.824
	材积	坎派兹	628.946	1.989	0.040		0.685	388.626	82.641	32.626	60.320
	胸径	坎派兹	31.163	1.297	0.052		0.786	131.282	5.350	-4.430	4.596
陕西	树高	逻辑斯蒂	15.717	5.389	0.088		0.435	89.211	5.481	5.142	5.142
	材积	逻辑斯蒂	1818.274	1.618	0.018		0.446	314.928	387.132	270.674	279.043
	胸径	单分子式	44.174	0.011			0.597	105.523	10.394	8.607	8.819

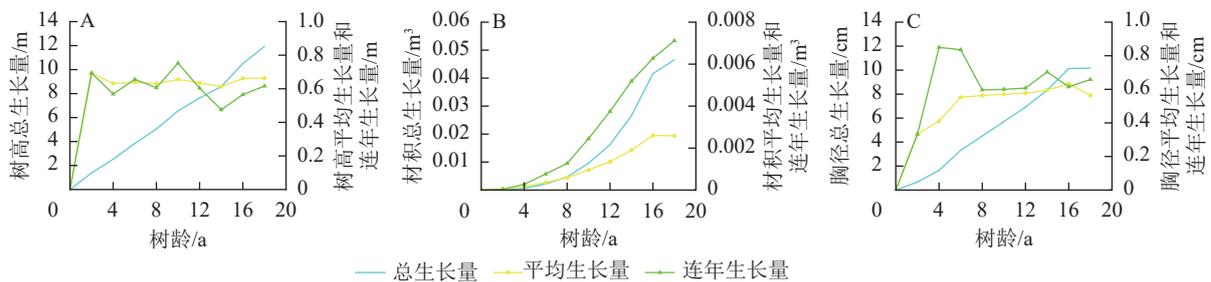


图 3 山东省麻栎生长过程曲线

Figure 3 Growth curves of *Q. acutissima* in Shandong Province

平均生长量随着树龄的增加而增大，但增加量始终小于连年生长量。麻栎材积总生长量随着树龄增加而增大，其增长呈越来越快的趋势，16 a 后有所变缓。麻栎树高、材积与胸径总生长量始终保持增大，且没有变缓的趋势，但由于解析木测得的年限较短，并不能代表麻栎整个生长过程，若要进一步揭示麻栎生长过程特征应结合树高树龄麻栎生长信息综合分析。

2.3.2 麻栎生长模型构建 由表 3 可知：麻栎树高拟合效果均较好， R^2 在 0.918 以上，通过比较 AIC 与其检验指数，单分子式模型的 AIC 为-3.837，检验指数整体表现较好，因此单分子式模型为麻栎树高拟合效果最佳的模型。同理，麻栎材积最适模型为逻辑斯蒂模型，其 $R^2=0.719$ 和赤池信息准则 (AIC=140.673) 均表现最佳。麻栎胸径最适模型为修正威布尔模型和逻辑斯蒂模型，决定系数修正威布尔模型稍大于逻辑斯蒂模型，在 AIC 值和检验指标方面逻辑斯蒂模型表现稍好。因此，2 种拟合结果均可代表胸径的生长过程。

表 3 麻栎生长拟合模型与检验

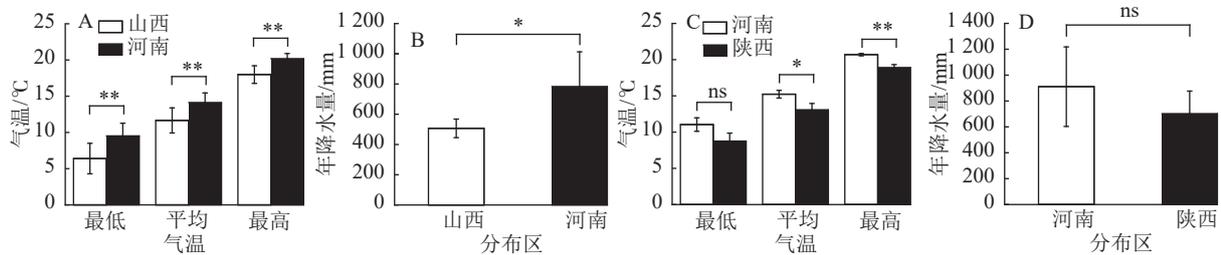
Table 3 Growth fitting models and testing of *Q. acutissima*

树种	生长因子	拟合方程	拟合参数				拟合精度		检验指标		
			<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	R^2	AIC	RMSE	ME	MAE
麻栎	树高	单分子式	463.309	0.001			0.919	-3.837	0.401	0.186	0.186
		修正威布尔	39.515	39.169	0.012	1.174	0.919	0.829	0.392	0.179	0.324
		坎派兹	16.428	1.099	0.118		0.918	-1.216	0.399	0.192	0.347
	材积	逻辑斯蒂	43.142	675.535	0.522		0.719	140.673	6.133	0.213	3.689
		坎派兹	50.770	3.116	0.264		0.710	141.742	5.977	0.310	3.800
		修正威布尔	46.909	47.262	0.0001	3.482	0.710	144.137	5.994	0.067	3.897
	胸径	修正威布尔	10.774	10.906	0.014	1.813	0.818	31.947	1.813	0.281	0.677
		逻辑斯蒂	10.033	20.861	0.354		0.812	20.321	0.907	0.293	0.763
		单分子式	870.542	0.001			0.794	31.183	0.807	0.494	0.720

2.4 气候因子对栎树单木生长过程的影响

选择 80 a 时榿栎与 60 a 时栓皮栎各生长因子数据与气候因子数据进行分析，探究气候因子对单木生

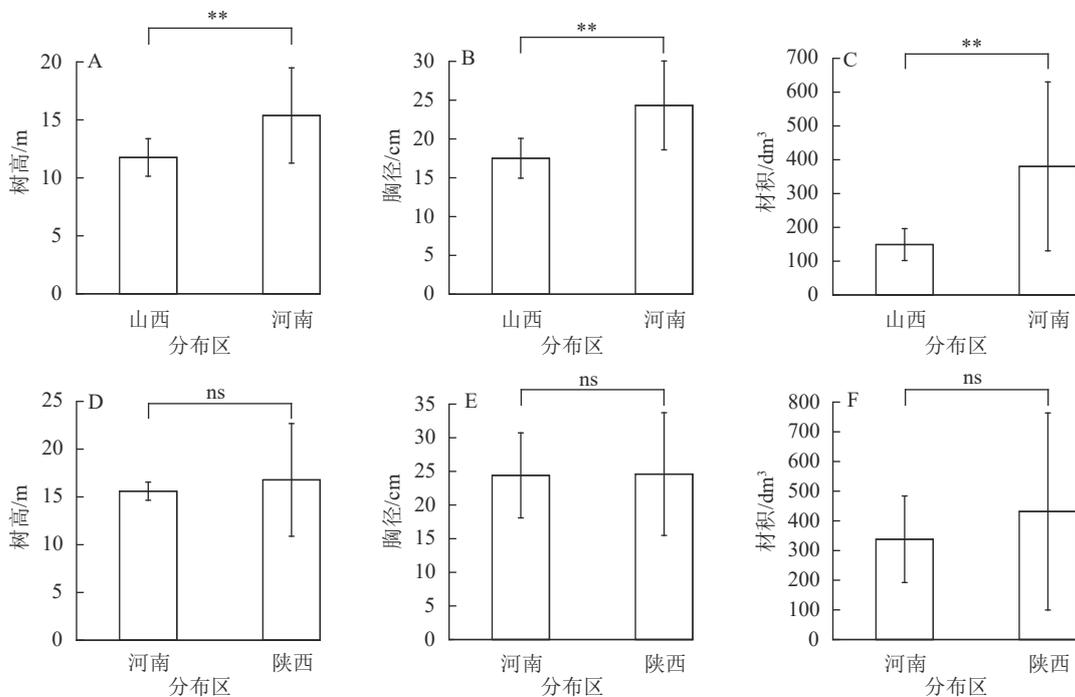
长的影响。由图4~5可知：槲栎分布区山西省和河南省的年降水量与气温差异显著。两省在树高、材积与胸径上均存在显著差异。栓皮栎分布区河南省和陕西省在平均气温和最高气温存在差异，年降水量没有差异。栓皮栎树高、材积与胸径在两省间均无明显差异。说明气候差异会影响槲栎生长过程，而不同省份的气候差异未能影响栓皮栎生长。



A和B表示槲栎分布区的气候差异; C和D表示栓皮栎分布区的气候差异。*和**分别表示在0.05和0.01水平差异显著, ns表示差异不显著。

图4 槲栎和栓皮栎不同分布区气候差异柱状图

Figure 4 Climate difference of *Q. aliena* and *Q. variabilis* in different distribution area



A~C表示槲栎; D~F表示栓皮栎。*和**分别表示在0.05和0.01水平差异显著, ns表示差异不显著。

图5 槲栎和栓皮栎不同分布区生长差异柱状图

Figure 5 Growth difference of *Q. aliena* and *Q. variabilis* in different distribution area

2.5 树皮厚度模型拟合及检验

由表4可知：槲栎树皮厚度最优模型为双对数模型；麻栎树皮厚度最优模型为二元一次模型；栓皮栎树皮厚度最优模型为二元一次模型。其中，麻栎树皮厚度拟合精度最优，在山东省 R^2 为0.83，2个省总体水平的 R^2 为0.847，主要原因是麻栎树皮厚度数据集中在20~30 a。栓皮栎在河南省和陕西省的 R^2 分别为0.615和0.798，因为二元一次模型包含树高和胸径2个参数，因此栓皮栎树皮厚度更适合二元一次模型。槲栎拟合效果相对麻栎和栓皮栎较差，在河南省和陕西省汇总数据的 R^2 均约0.5。

3 讨论与结论

本研究以不同分布区栎属3个树种为研究对象，通过对栎树树高、材积与胸径进行拟合，探究栎树各生长因子的最适模型。槲栎拟合结果表明：树高、材积、胸径最优模型分别为逻辑斯蒂模型、坎派兹模型与修正威布尔模型。栓皮栎各生长指标的最优模型分别为修正威布尔模型、坎派兹模型、坎派兹模

表 4 栎属 3 个树种的树皮厚度模型拟合与检验

Table 4 Bark thickness model fitting and testing of three *Quercus* species

树种	省份	最优模型	拟合参数			拟合精度		检验指标		
			<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	R^2	AIC	RMSE	ME	MAE
槲栎	河南	双对数	-2.163	0.731		0.512	-36.113	0.458	0.144	0.391
	汇总	双对数	-1.699	0.598		0.440	-59.204	0.416	-0.006	0.355
麻栎	山东	二元一次	0.214	0.019	0.034	0.830	-58.266	0.204	-0.156	0.177
	汇总	二元一次	0.246	0.008	0.042	0.847	-43.117	0.251	-0.179	0.225
栓皮栎	河南	双对数	-1.821	0.775		0.615	-23.429	0.507	0.345	0.385
	汇总	二元一次	-0.005	0.072	0.023	0.798	-35.455	0.952	-0.170	0.586

型，其胸径拟合结果与陈亚文^[13]对栓皮栎胸径拟合结果不同，陈亚文^[13]拟合结果以威布尔模型最优， R^2 达 0.998，分析得知威布尔模型具有 4 个参数，从数学角度分析，参数越多拟合结果越逼近，但其缺点是威布尔为经验方程，参数无生物学意义。黄峰等^[14]对栓皮栎树高模拟预测结果表明：最优模型为改进的坎派兹模型，改进的坎派兹模型增加了立地因子，提高了栓皮栎的树高预测精度，但该研究是对活立木树高进行的拟合，而不是以解析木为研究对象。麻栎各生长指标拟合结果表明：树高最优模型为单分子式模型，材积最优模型为逻辑斯蒂模型，胸径最优模型为修正威布尔模型和逻辑斯蒂模型。刘小军等^[12]对麻栎生长模型的研究表明：逻辑斯蒂模型、坎派兹模型和理查德模型为材积的最优生长模型，与本研究结果相同；胸径最优模型坎派兹模型，树高最优模型考夫模型与本研究存在差异。分析发现该研究麻栎树龄为 59 a 的大树，而本研究的麻栎为 18 a 的幼树，比较得出：逻辑斯蒂模型方程适用于麻栎的幼树材积估算。对比 3 种栎树各生长因子的拟合结果，树高的拟合效果最好，因此树高方程适用于拟合栎树树高生长；材积的拟合效果最差，该结果与萨如拉等^[15]对大兴安岭兴安落叶松 *Larix gmelinii* 生长拟合的结果一致，这反映了材积受多种因子的影响。在生长特征方面，槲栎与栓皮栎各生长因子的总生长量始终保持随树龄的增大而增加，且分别在 100、70 a 时，材积平均生长量和连年生长量未出现交叉点，说明 2 个树种仍具一定生长潜力。

在探究气候因子对栎树生长的影响时，气候(气温、降水)差异会导致槲栎树高、胸径、材积的显著差异。该结果与前人的研究结果相似，即树木生长受气温和降水的共同作用^[16]。对栓皮栎的分析中，气温的差异未造成生长量的差异，可能是栓皮栎对气温变化不敏感，也可能是两省气温差异较小，未达到极显著水平。在探究气候因子对生长模型的影响方面，单凯丽^[17]在研究杉木 *Cunninghamia lanceolata* 人工林优势木单木生长模型时发现：气候因子会影响杉木生长过程。丁赵炜^[18]通过研究湖北省马尾松人工林单木胸径生长模型发现：加入气候因子后能提升模型精度；同样，余黎等^[19]研究了气候对单木胸径生长模型的影响，结果表明气候因子能解释胸径生长。综上，将气候因子纳入单木生长模型进行拟合精度会更优。本研究存在的不足为未深入探究影响槲栎各生长的主要气候因子，且模型中未加入立地因子、气候因子等重要参数。

树皮厚度作为树木的又一重要指标，具有重要利用价值。近年来，研究者们致力于开发能准确预测各树种树皮厚度的模型。JOUKO 等^[5]在模拟欧洲云杉 *Picea abies* 树皮厚度时发现：树皮厚度与胸径、树高有显著相关性，在木荷 *Schima superba*、落叶松、白桦 *Betula platyphylla* 的研究中也发现了类似的相关性^[20-22]。ROSELL^[23]在研究 18 个地方 640 个树种树皮厚度时也发现胸径大小是影响树皮厚度的主要因素。同样，本研究结果得出，能体现树高、胸径与树皮厚度关系的二元一次方程为最优模型。其主要优势是该方法应用简单，需要测定的参数较少，能用于快速测定树皮厚度，但主要的局限性是在模型选择方面直接选用了前人应用效果较好的经验方程，精确度有限，且没区分不同树种、立地类型和林分生长阶段的差异。因此，若想要有效提高建模效率及预测精度，应全面考虑气候、立地、季节性等因素，且针对不同的树种构建专项模型。

4 参考文献

- [1] 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.

- PENG Qilong, CHEN Zhefu, CHEN Duanlü. A study on the growth model of individual trees in natural mixed forests of oak and *Pinus massoniana* in Hunan [J]. *Forest Resources Management*, 2020(2): 94 – 102.
- [2] 张瑜, 贾黎明. 栎属树种生长模型研究进展[J]. *世界林业研究*, 2013, 26(2): 48 – 53.
- ZHANG Yu, JIA Liming. Study advances in growth models of *Quercus* spp. [J]. *World Forestry Research*, 2013, 26(2): 48 – 53.
- [3] 陈哲夫, 肖化顺, 龙时胜. 基于混合效应的湖南马尾松次生林单木生长模型[J]. *中南林业科技大学学报*, 2021, 41(1): 100 – 108.
- CHEN Zhefu, XIAO Huashun, LONG Shisheng. Growth model for individual tree of secondary *Pinus massoniana* forest in Hunan Province based on mixed effect [J]. *Journal of Central South University of Forestry and Technology*, 2021, 41(1): 100 – 108.
- [4] 聂稳, 江泽平, 刘逸夫, 等. 木本植物树皮研究进展[J]. *世界林业研究*, 2021, 34(4): 14 – 19.
- NIE Wen, JIANG Zeping, LIU Yifu, et al. Research progress in bark of woody plants [J]. *World Forestry Research*, 2021, 34(4): 14 – 19.
- [5] JOUKO L, TIMO M, SARI A. Modelling bark thickness of *Picea abies* with taper curves [J]. *Forest Ecology and Management*, 2004, 206(1): 35 – 47.
- [6] HEATH L S, HANSEN M, SMITH J E, et al. Investigation into calculating tree biomass and carbon in the FIADB using a biomass expansion factor approach [C]//MCWILLIAMS W, MOISEN G, CZAPLEWSKI R. *Forest Inventory and Analysis (FIA) Symposium 2008*. Park City: Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station, 2009.
- [7] WILLIS J C, AIRY SHAW H K. *A Dictionary of the Flowering Plants and Fern* [M]. London: Cambridge University Press, 1973.
- [8] 徐永椿, 任宪威. 中国植物志: 第22卷[M]. 北京: 科学出版社, 1998.
- XU Yongchun, REN Xianwei. *Flora of China Vol. 22* [M]. Beijing: Science Press, 1998.
- [9] 陈天成, 李新平, 郝向春, 等. 山西省辽东栎单株木生长模型研究[J]. *林业建设*, 2022(2): 36 – 43.
- CHEN Tiancheng, LI Xinping, HAO Xiangchun, et al. Growth model of individual *Quercus wutaishansea* Mary in Shanxi Province [J]. *Forestry Construction*, 2022(2): 36 – 43.
- [10] 高东启, 邓华锋, 程志楚, 等. 蒙古栎间伐林分和未间伐林分生长模型研究[J]. *中南林业科技大学学报*, 2014, 34(2): 50 – 54.
- GAO Dongqi, DENG Huafeng, CHENG Zhichu, et al. Study on growth models for thinned and un-thinned stands of *Quercus mongolica* [J]. *Journal of Central South University of Forestry and Technology*, 2014, 34(2): 50 – 54.
- [11] 钟栋明, 黄华蓉, 李临兵, 等. 基于混合效应的湖南栎类与杉木单木断面面积生长模型研究[J]. *林业与环境科学*, 2020, 36(4): 18 – 23.
- ZHONG Dongming, HUANG Huarong, LI Linbin, et al. Study on growth model of individual tree basal area of *Quercus* sp. and *Cunninghamia lanceolata* forest based on mixed effect in Hunan Province [J]. *Forestry and Environmental Science*, 2020, 36(4): 18 – 23.
- [12] 刘小军, 刘平宇, 赵苗苗, 等. 天然麻栎次生林生长规律研究[J]. *西北林学院学报*, 2019, 34(1): 175 – 179.
- LIU Xiaojun, LIU Pingyu, ZHAO Miaomiao, et al. Growth law of natural *Quercus acutissima* secondary forest [J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2019, 34(1): 175 – 179.
- [13] 陈亚文. 栓皮栎次生林林分结构与生长模型研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2011.
- CHEN Yawen. *Study on Stand Structure and Growth Model of the Quercus variabilis Secondary* [D]. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2011.
- [14] 黄峰, 徐爱俊, 唐丽华. 改进栓皮栎树高预测混合效应模型研究[J]. *林业资源管理*, 2018(5): 54 – 62.
- HUANG Feng, XU Aijun, TANG Lihua. An improved height prediction mixed effect model for *Quercus variabilis* [J]. *Forest Resources Management*, 2018(5): 54 – 62.
- [15] 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 Rula, WANG Xuexin, XU Jiarui, 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 Sciences)*, 2020, 40(2): 111 – 116.

- [16] 韩艳刚, 周旺明, 齐麟, 等. 长白山树木径向生长对气候因子的响应[J]. *应用生态学报*, 2019, **30**(5): 1513 – 1520.
HAN Yangang, ZHOU Wangming, QI Lin, *et al.* Tree radial growth-climate relationship in Changbai Mountain, Northeast China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, **30**(5): 1513 – 1520.
- [17] 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.
DAN Kaili. *Study on Individual Tree Growth Model of Dominant Trees in Chinese Fir Plantations based on Climate Change* [D]. Nanchang: Jiangxi Agricultural University, 2020.
- [18] 丁赵炜. 包含气候因子的湖北省马尾松人工林单木胸径生长模型[D]. 武汉: 华中农业大学, 2021.
DING Zhaowei. *Pinus massoniana Plantation DBH Growth Models including Climatic Factors in Hubei Province* [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2021.
- [19] 余黎, 雷相东, 王雅志, 等. 基于广义可加模型的气候对单木胸径生长的影响研究[J]. *北京林业大学学报*, 2014, **36**(5): 22 – 32.
YU Li, LEI Xiangdong, WANG Yazhi, *et al.* Impact of climate on individual tree radial growth based on generalized additive model [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2014, **36**(5): 22 – 32.
- [20] 张伟志, 吴宏伟, 黄光灿, 等. 基于哑变量的木荷人工林树皮厚度模型研究[J]. *热带作物学报*, 2020, **41**(12): 2562 – 2570.
ZHANG Weizhi, WU Hongwei, HUANG Guangcan, *et al.* Bark thickness model of *Schima superba* plantation based on dummy variable [J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2020, **41**(12): 2562 – 2570.
- [21] 张兴龙. 人工兴安落叶松树皮厚度变化规律的研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2015.
ZHANG Xinglong. *Study on the Variation Regularity of Larch Bark Thickness* [D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2015.
- [22] 王晓明. 兴安落叶松、白桦树皮厚度与胸径关系研究[J]. *林业科技情报*, 2017, **49**(4): 45 – 47.
WANG Xiaoming. Relationship between bark thickness and diameter at breast height of larch and birch in Xing'an [J]. *Forestry Science and Technology Information*, 2017, **49**(4): 45 – 47.
- [23] ROSELL J A. Bark thickness across the angiosperms: more than just fire [J]. *New Phytologist*, 2016, **211**(1): 90 – 102.