

云杉属 4 个树种不同分布区生长过程及树皮厚度模拟研究

聂 稳¹, 江泽平¹, 刘逸夫¹, 王 亚^{2,3}, 王军辉^{2,3}, 贾子瑞^{2,3*}

(1. 中国林业科学研究院 森林生态环境与保护研究所, 北京 100091; 2. 中国林业科学研究院 林业研究所, 北京 100091;
3. 林木遗传育种国家重点实验室, 北京 100091)

摘 要:以云杉属 4 个树种(白杉、青杉、云杉、丽江云杉)为对象,通过查阅文献资料收集了这 4 个树种主要分布省份(山西省、甘肃省、四川省、云南省)的树木生长量调查信息,并汇总了单木生长过程及胸径处树皮厚度数据,分析各树种树高、胸径、材积的平均生长量和连年生长量变化规律,同时对 3 个生长指标的总生长量以及树皮厚度进行模型拟合与精度检验。结果表明:1)云杉属 4 个树种在不同分布区单木生长过程符合一般林木生长规律,并且 0~40 a 的树高、胸径连年生长量增长速率较快,而材积连年生长量在 40 a 后增长速率较快,除白杉外其他树种在不同分布区的总生长量无显著性差异;2)各树种单木生长方程和树皮厚度模型拟合精度较高,树高与胸径拟合最优模型多为二次曲线模型,而材积拟合最优模型多为理查德模型,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。研究可为云杉属的人工林经营与管理提供理论参考。

关键词:云杉属;生长规律;CurveExpert 软件;模型评价;树皮厚度

中图分类号:S791.18 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-7461(2022)05-0095-09

A Simulation Study on the Growth Process and Bark Thickness of 4 Tree Species of *Picea* in Different Distribution Areas

NIE Wen¹, JIANG Ze-ping¹, LIU Yi-fu¹, WANG Ya^{2,3}, WANG Jun-hui^{2,3}, JIA Zi-rui^{2,3}

(1. Research Institute of Forest Ecology, Environment and Protection, Chinese Academy of Forestry, 100091, Beijing, China;
2. Research Institute of Forestry, Chinese Academy of Forestry, 100091, Beijing, China;
3. State Key Laboratory of Tree Genetics and Breeding, 100091, Beijing, China)

Abstract: In this paper, four species of *Picea* (*P. meyeri*, *P. wilsonii*, *P. asperata*, and *P. likiangensis*) were taken as the research objects. By consulting documents, the investigation information of tree growth in the four tree species in the main distribution provinces (Shanxi, Gansu, Sichuan, and Yunnan) were collected, the data of single tree growth process and bark thickness at DBH were summarized. Meanwhile, the average growth of the tree height, DBH and volume as well as the regular pattern of annual growth were analyzed for each tree species. Moreover, mathematical empirical equations were fitted about the total growth of above three growth indexes and bark thickness, and their accuracies was tested. The results showed that 1) the single tree growth process of four *Picea* species in different distribution areas was accorded with the generally regular pattern of forest growth, and the annual growth rate of tree height and DBH from 0 to 40 years was faster, while the annual growth rate of volume was faster after 40 years. There was no significant difference in the total growth of other species in different provinces except for *P. meyeri*. 2) The model fitting accuracies of growth and bark thickness of single tree were all relatively high for each tree species. The best fitting models of tree height and DBH were mostly quadratic curve models,

收稿日期:2021-08-11 修回日期:2021-09-23

基金项目:林业和草原科技成果推广项目(2020133110);国家自然科学基金青年项目(31500540)。

第一作者:聂 稳。研究方向:树木生理生态。E-mail:wenniec@163.com

*通信作者:贾子瑞,博士,助理研究员。研究方向:林木遗传改良和树皮生物学。E-mail:jiazirui646@163.com

while the best fitting models of volume were mostly Richard model types, and the best fitting models of bark thickness were both Bouble logarithmic model and Binary linear model. This study can provide a theoretical reference for the construction and management of *Picea* plantation.

Key words: *Picea*; growth pattern; CurveExpert software; model evaluation; bark thickness

随着统计软件的快速发展,国内外很多学者将数学模型运用到单木生长过程及树皮厚度拟合中,目前对于大多数树种的单木生长模型构建主要使用舒马克模型(schumacher)^[1]、理查德模型(richard)^[2]、逻辑斯蒂模型(logistic)^[3]、二次曲线模型(quadratic)^[4]、坎派兹模型(gompertz)^[5]、韦布尔模型(weibull)^[6-7]等,对于胸径处树皮厚度模型的构建主要使用线性模型^[8]、非线性模型^[9]、多元模型^[10-11]等,由于树木的生长呈现非均匀性,树皮厚度往往随着树高而改变,因此任意高度处树皮厚度、相对树皮厚度、树皮率以及带皮直径的估计也同等重要^[9,12-14]。研究表明,湿地松和西南桦人工林任意高度处树皮厚度、相对树皮厚度和去皮直径等树皮厚度模型拟合精度较高^[15-16]。

云杉属(*Picea*)分布范围广泛,中国有7个特有种^[17]。从19世纪开始,国内外开始进行云杉林的研究,涉及范围包括云杉林的组成、分布、结构、种群竞争、扦插育苗等,并取得了重要的研究成果,但对于云杉属树种生长规律模型和树皮厚度模型的研究很少。根据云杉属各种生长特点,前人分别对川西云杉(*P. likiangensis* var. *balfouriana*)^[18]、紫果云杉(*P. purpurea*)^[19]、雪岭云杉(*P. schrenkiana*)^[20-21]的单木生长模型进行了研究。有关树皮厚度模型也做了相关研究,特别地, T. Malone *et al*^[22]发现基于不同地点的白云杉(*P. glauca*)树皮厚度拟合结果各不相同。另外, U. Kohnle *et al*^[23]研究发现不同种源、不同环境因素对树皮比率有显著影响,因此树皮厚度的种源特异性变化对于准确计算材积非常重要,且具有重要的生态学意义。

建立林木生长方程模型及树皮厚度模型是研究单木生长规律及木材销量的一种重要手段,但前人研究多集中在单个树种的单个分布区生长规律与树皮厚度变化研究,对同属树种进行不同分布区的系统研究较少。本研究通过收集云杉属4个树种在分布区内树高、胸径、材积生长过程及胸径处树皮厚度数据,开展各树种不同分布区单木生长过程及相关模型研究,以期云杉属树种在不同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

云杉属4个树种的树干解析资料来源于中国及

部分省份主要树木生长量汇编书籍,对书籍中各种树种生长过程信息进行提取与汇总。4个树种包括白扦(*P. meyeri*)^[24-26]、青扦(*P. wilsonii*)^[24,26-27]、云杉(*P. asperata*)^[25-26]、丽江云杉(*P. likiangensis*)^[28],其中云杉、丽江云杉以10 a为1个龄阶,白扦、青扦以5 a为1个龄阶,为了减小误差,不同省区数据按3:1分为拟合数据和检验数据,并将各树种树高、胸径、材积生长量全部取平均值作为单个解析木,同时利用方差分析来比较各省区的总生长量差异。由于数据量原因,胸径处树皮厚度拟合选取具有统计意义的省区进行拟合与评价。所有拟合分析均采用Curve Expert 2.6软件完成,统计分析在R软件(Ver. 3.6.3)中完成,作图在Graph Pad Prism 8.0中完成。

1.2 单木生长模型构建方法

通过查阅文献并收集获得5个单木生长模型^[1,2,4,6,29-34]用于树木生长规律模型拟合,同时收集3个胸径处树皮厚度模型^[8-9,11]用于树皮厚度变化拟合,所有模型表达式如下。

舒马克模型(schumacher model)

$$y = A \times e^{-\frac{B}{T}} \quad (1)$$

理查德模型(richard model)

$$y = A \times (1 - e^{-B \times T})^C \quad (2)$$

逻辑斯蒂模型(logistic model)

$$y = \frac{A}{1 + B \times e^{-C \times T}} \quad (3)$$

二次曲线模型(quadratic curve model)

$$y = A + B \times T + C \times T^2 \quad (4)$$

坎派兹模型(gompertz model)

$$y = A \times e^{-B \times e^{-C \times T}} \quad (5)$$

线性模型(linear model)

$$B_{BT} = A + B \times D_{BH} \quad (6)$$

二元一次线性模型(binary linear model)

$$B_{BT} = A + B \times D_{BH} + C \times H \quad (7)$$

双对数模型(double logarithmic model)

$$\ln B_{BT} = A + B \times \ln D_{BH} \quad (8)$$

式中: y 代表单木树高、胸径、材积生长量, T 代表年龄, B_{BT} 代表胸径处树皮厚度, D_{BH} 代表胸径, H 代表树高, e 为自然指数, A 、 B 、 C 代表随机参数。

其中模型(1)–(5)为单木生长模型,模型(6)–(8)为胸径处树皮厚度模型。

1.3 模型精度评价

为了让模型更加合理与客观,对模型进行精度评价与检验,各模型采用决定系数(R^2)和赤池信息准则(akaike information criterion, AIC)对拟合模型精度进行评价,采用均方根误差(RMSE,公式中用 R_{MSE} 表示)、平均误差(ME,公式中用 M_E 表示)、平均绝对误差(MAE,公式中用 M_{AE} 表示)3项检验指标对模型精度进行检验评价。其中精度检验指标的计算公式如下:

$$R_{MSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n}} \quad (9)$$

$$M_E = \sum_{i=1}^n \left(\frac{y_i - \hat{y}_i}{n} \right) \quad (10)$$

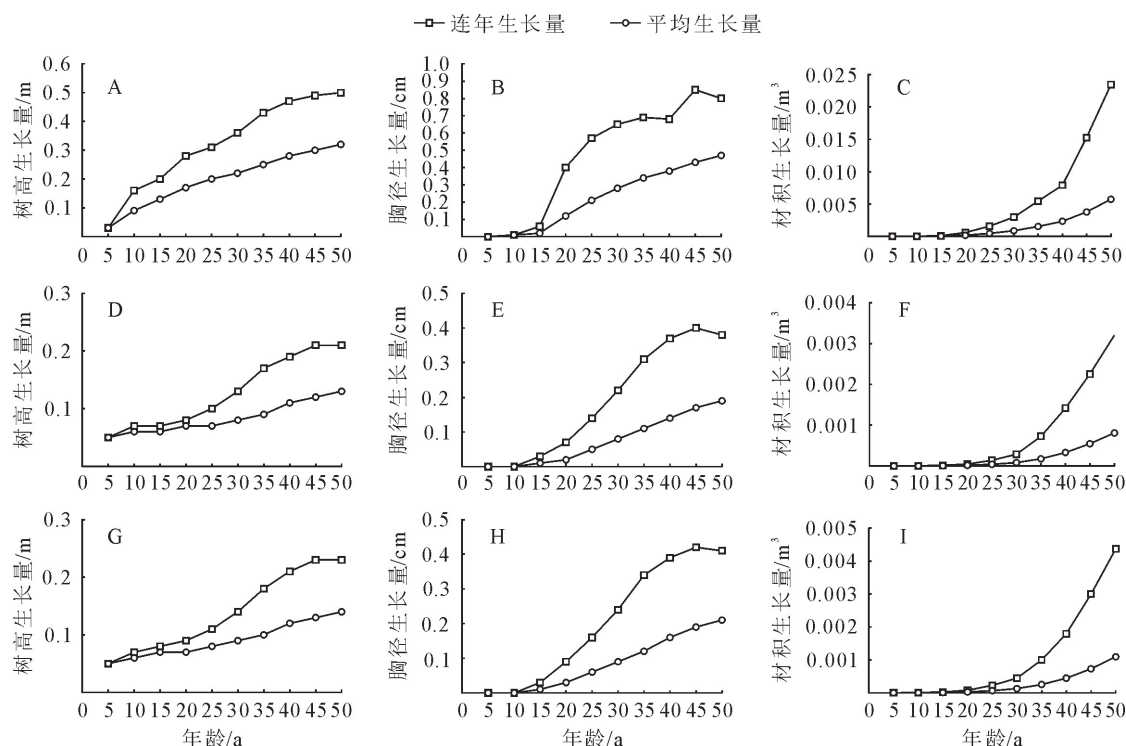
$$M_{AE} = \sum_{i=1}^n \left| \frac{y_i - \hat{y}_i}{n} \right| \quad (11)$$

式中: y_i 表示第 i 个实测值, \hat{y}_i 为第 i 个预估值, \bar{y}_i 为实测值的平均值。

2 结果与分析

2.1 单木生长规律及地区差异比较

2.1.1 白桦单木生长规律 白桦在甘肃和山西两省份树高、胸径、材积平均生长量与连年生长量都随树龄增大而增加(图1)。甘肃省白桦树高连年生长量与平均生长量都较大,树高连年生长量最大为0.5 m,而山西省对应指标最大仅为0.2 m左右,胸径和材积生长量都具有“滞后性”;2个省份胸径在0~15 a生长都较慢,在15 a之后具有明显增长趋势;胸径连年生长量在0~50 a变化趋势基本一致,且都在45 a后开始减小,而胸径平均生长量一直处于增长状态,甘肃省白桦胸径连年生长量最大为0.8 cm,山西省对应指标最大只有0.38 cm;材积方面,0~15 a生长量变化趋势基本一致,15~50 a,甘肃省材积平均生长量大于山西省,且增长速度也更快。



注:A—C代表甘肃省的生长过程;D—F代表山西省的生长过程;G—I代表2个省份汇总的生长过程。

图1 不同分布区白桦生长过程曲线

Fig. 1 Growth curves of *P. meyeri* in different distribution areas

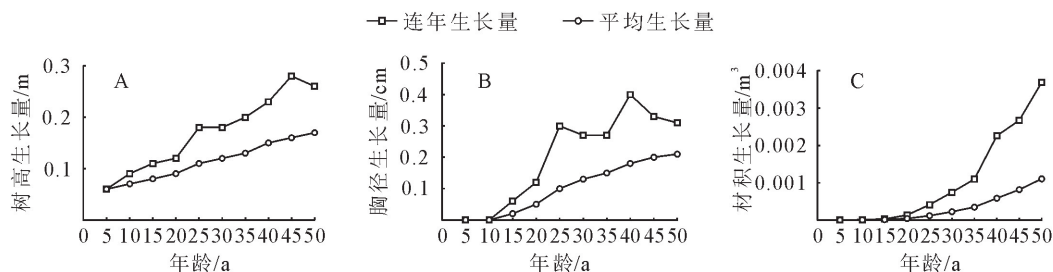
2.1.2 青杉单木生长规律 青杉在山西省的单木树高、胸径、材积生长趋势不同(图2),从树高生长量来看,连年生长量与平均生长量变化都较为平缓,无大波动。而胸径连年生长量出现明显的“波浪形”,25 a与40 a分别出现峰值,峰值大小分别为0.3 cm和0.4 cm。从材积生长量来看,连年生长量与平均生长量在0~20 a内增长速度较为缓慢,20 a后连年生长量大于平均生长量,且无明显拐点

出现,连年生长量与平均生长量均不超过0.05 m³。

2.1.3 云杉单木生长规律 总体上,树高和胸径的连年生长量都在40 a出现拐点,达到最大值(图3),基本在60 a后趋于稳定状态;材积生长量一直处于递增,且材积连年生长量与平均生长量之间无明显交点。四川省云杉生长树高连年生长量在60 a出现最小值,材积连年生长量在70~80 a出现最小值,而胸径连年生长量在10~20 a增长速率最大,

此时胸径处于快速生长阶段。2 个省份材积连年生长量差异明显,四川省云杉材积连年生长量呈现“波浪型”,第 1 次波峰在 60 a,0~60 a 内连年生长量增长较快,第 2 次波峰在 90 a。四川省与甘肃省云杉

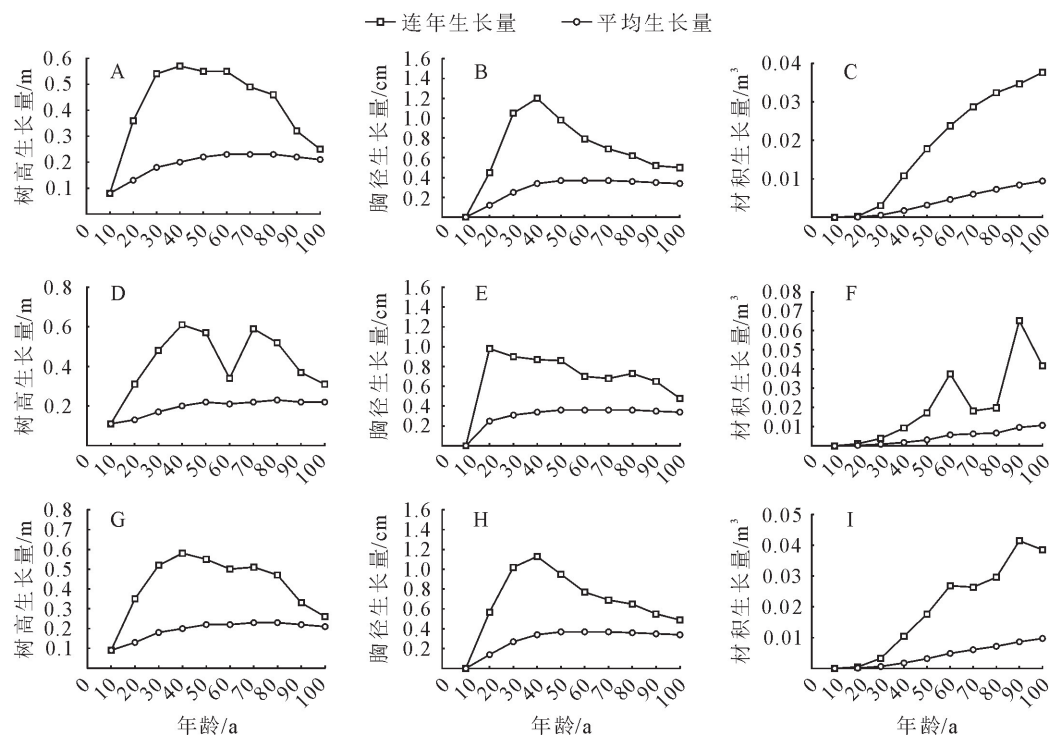
胸径连年生长量分别在 20 a 和 40 a 到达峰值,但 2 个省份云杉的材积连年生长量与平均生长量在 100 a 还未相交,说明 100 a 可能还未达到数量成熟期。



注:A-C代表山西省的生长过程。

图2 青杆生长过程曲线

Fig. 2 Growth curves of *P. wilsonii* in different distribution areas



注:A-C代表甘肃省的生长过程;D-F代表四川省的生长过程;G-I代表2个省份汇总的生长过程。

图3 不同分布区云杉生长过程曲线

Fig. 3 Growth curves of *P. asperata* in different distribution areas

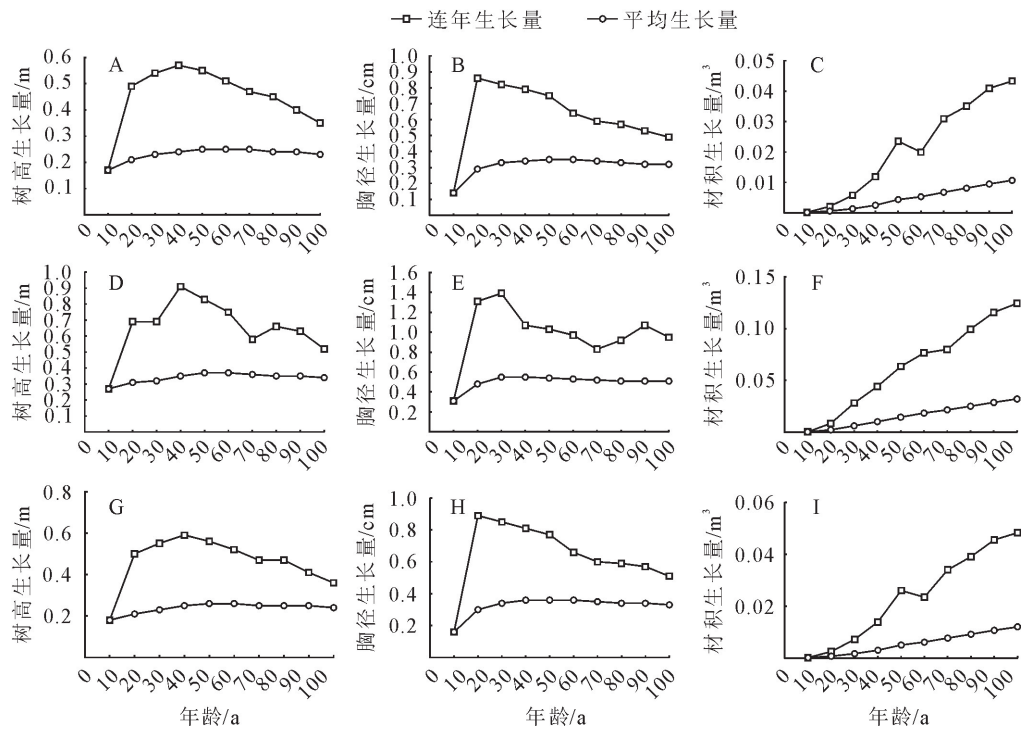
2.1.4 丽江云杉单木生长规律 丽江云杉在云南的树高平均生长量保持在 0.1~0.2 m(图 4),而在四川树高平均生长量保持在 0.2~0.3 m,两地树高连年生长量均在 40 a 达到峰值,峰值分别为 0.57 m 和 0.91 m。2 个省份胸径平均生长量基本一致,但丽江云杉在四川的连年生长量呈现波动状态,转折点分别在 30、70、90 a。材积平均生长量与连年生长量均处于递增状态,但四川较云南增量,从图 4 可以看出,云南省与四川省材积平均生长量与连年生长量 100 a 时比值均接近为 1:3,且都未到达数量成熟阶段。

2.1.5 地区生长差异分析 根据单木生长数据,进一步比较不同地区的单木生长量差异(图 5),3 个树种在不同生长区差异不同,白杆在 2 个省份的树高和胸径生长差异显著,云杉和丽江云杉在不同省份的生长均无显著差异,这说明白杆的气候敏感性相比于云杉、丽江云杉较强。

2.2 单木生长模型及检验

2.2.1 白杆单木生长模型及检验 总体上,白杆树高、胸径、材积拟合最优模型方程分别为二次曲线模型、二次曲线模型、逻辑斯蒂模型(表 1),对比存在差异,甘肃省,白杆树高、胸径、材积拟合最优的模型

方程分别为二次曲线模型、坎派兹模型、二次曲线模型;山西省,白杆树高、胸径、材积拟合最优的模型方程分别为理查德模型、舒马克模型、逻辑斯蒂模型。综合来看,白杆在山西省各生长指标拟合都较好,在甘肃省生长指标拟合相对较差,主要是因为山西省数据量多,变异系数也较小,2 个省份的总体状况相对于单个省份,除胸径拟合精度以外,树高和材积的精度均高于单个省份,说明甘肃省胸径生长变异较大。



注:A—C 代表云南省的生长过程;D—F 代表四川省的生长过程;G—I 代表 2 个省份汇总的生长过程。

图 4 不同分布区丽江云杉生长过程曲线

Fig. 4 Growth curves of *P. likiangensis* in different distribution areas

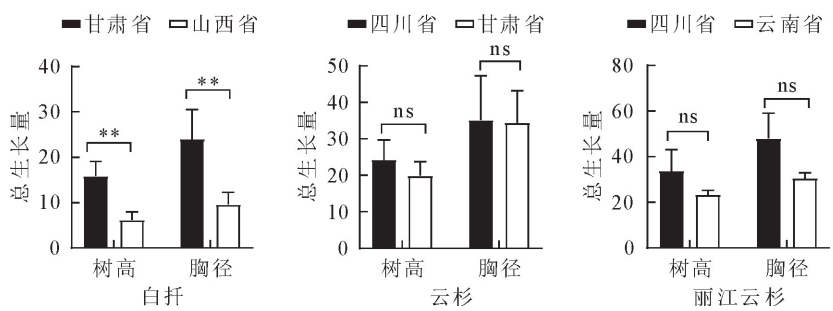


图 5 不同分布区云杉属树种生长差异

Fig. 5 Growth difference of 3 species of *Picea* in different distribution areas

2.2.2 青杆单木生长模型及检验 青杆树高、胸径、材积拟合方程中最优的模型方程分别为逻辑斯蒂模型、二次曲线模型、理查德模型(表 2)。树高和材积生长拟合效果相对较好,决定系数(R^2)均大于胸径生长拟合,而胸径拟合的决定系数最小,说明胸径总生长量变异较大,但是对比其他 3 个检验指标来看,模型检验效果也较好。

2.2.3 云杉单木生长模型及检验 云杉各生长指标对应最优生长方程的决定系数(R^2)均大于 0.9,说明模型的拟合度较好(表 3),从 2 个省份的总体情况来看,云杉树高、胸径、材积拟合最优的模型方

程分别为二次曲线模型、理查德模型、逻辑斯蒂模型,从不同省份比较来看,甘肃省云杉树高、胸径拟合的最优模型方程分别为二次曲线模型和舒马克模型,材积拟合结果中理查德模型的决定系数(R^2)为 0.999,AIC 值为-89.92,且理查德模型参数较多,理论上精度更高,故选择理查德模型作为材积生长方程。四川省云杉树高、胸径拟合的最优模型方程均为理查德模型,材积最优模型为舒马克模型。

综合来看,材积拟合精度较高,普遍 AIC 值最低,一方面,由于数据的变异较小,拟合精度较高;另一方面,材积生长量一般更接近理论方程的生长。

表 1 白栎生长拟合模型与精度检验

Table 1 Growth fitting models and their precision testing of *P. meyeri*

省份	生长因子	最优方程	拟合参数				拟合精度		检验指标		
			A	B	C	D	R ²	AIC	RMSE	ME	MAE
甘肃省	树高	二次曲线	-0.578	0.103	0.005	—	0.999	-42.77	2.769	1.917	2.292
	胸径	坎派兹	39.215	8 368.000	0.055	—	0.998	-15.49	6.139	5.144	5.158
	材积	二次曲线	0.055	-0.008	0.001	—	0.966	-76.22	0.092	0.074	0.078
山西省	树高	理查德	27.388	-0.277	0.026	-20	0.999	-53.04	0.300	-0.214	0.219
	胸径	舒马克	81.136	106.541	—	—	0.999	-57.17	0.101	0.075	0.076
	材积	逻辑斯蒂	0.113	1 189.86	0.129	—	0.992	-129.79	0.003	-0.002	0.002
汇总	树高	二次曲线	0.201	0.012	0.002	—	0.999	-54.4	0.290	-0.083	0.221
	胸径	二次曲线	0.415	-0.115	0.006	—	0.998	-34.16	0.451	0.374	0.380
	材积	逻辑斯蒂	0.153	1 699.164	0.137	—	0.997	-136.85	0.004	0.003	0.003

表 2 青栎生长拟合模型与精度检验

Table 2 Growth fitting models and their precision testing of *P. wilsonii*

省份	生长因子	最优方程	拟合参数				拟合精度		检验指标		
			A	B	C	D	R ²	AIC	RMSE	ME	MAE
山西省	树高	逻辑斯蒂	12.203	31.498	0.085	—	0.997	-34.48	1.174	-1.021	1.021
	胸径	二次曲线	-0.443	0.002	0.004	—	0.993	-19.21	1.440	-0.993	1.143
	材积	理查德	0.319	-0.83	0.043	-19.09	0.999	-151.63	0.010	-0.007	0.007

表 3 云杉生长拟合模型与精度检验

Table 3 Growth fitting models and their precision testing of *P. asperata*

省份	生长因子	最优方程	拟合参数				拟合精度		检验指标		
			A	B	C	D	R ²	AIC	RMSE	ME	MAE
甘肃省	树高	二次曲线	-2.966	0.312	-0.001	—	0.996	-11.07	3.844	-3.216	3.331
	胸径	舒马克	63.679	62.829	—	—	0.999	-26.72	1.605	-0.549	1.286
	材积	理查德	1.885	-0.056	0.026	-161.647	0.999	-89.92	0.040	0.013	0.030
四川省	树高	理查德	26.963	-0.008	0.029	-468.37	0.997	-12.89	3.919	2.489	2.631
	胸径	理查德	39.457	-0.004	0.032	-1146.05	0.993	7.52	3.891	-2.577	3.451
	材积	舒马克	7.537	197.963	—	—	0.987	-61.52	0.133	0.026	0.085
汇总	树高	二次曲线	-2.786	0.303	-0.001	—	0.996	-11.86	1.549	-1.318	1.424
	胸径	理查德	36.801	-0.003	0.039	-1636.65	0.996	2.86	2.325	-1.234	2.012
	材积	逻辑斯蒂	1.281	160.221	0.062	—	0.996	-71.85	0.074	0.014	0.054

2.2.4 丽江云杉单木生长模型及检验 丽江云杉在 2 个省份的总体水平上树高、胸径、材积拟合的最优模型方程分别为二次曲线模型、二次曲线模型、理查德模型(表 4),从不同省份比较来看,云南省丽江云杉树高、胸径、材积拟合的最优模型方程均为二次曲线模型。四川省丽江云杉树高、材积拟合的最优模型方程都为舒马克模型,胸径最优模型为二次曲线模型。

2.3 树皮厚度模型拟合及检验

不同树种树皮厚度拟合结果不同(表 5),白栎和丽江云杉因其数据量较大,树皮厚度模型拟合效果较好,而青栎和云杉数据量较小,拟合精度较差。从白栎来看,拟合最优的模型为模型(7),山西省和 2 个省份的总体水平的 AIC 值分别为 -23.19、

38.93,模型(7)中含有树高和胸径 2 个变量,所以拟合较好;青栎拟合最优的模型为模型(8),该模型为非线性模型,决定系数(R^2)只有 0.1 左右,拟合效果不好;云杉和丽江云杉树皮厚度拟合中甘肃省和 2 个省份的总体水平上最优模型为模型(7)和模型(8)。

3 结论与讨论

3.1 结论

白栎的气候敏感性更强,在不同地点的生长状况不一致,各生长指标最优模型方程多为二次曲线模型;青栎在山西省单木树高、胸径、材积生长趋势都不一致,胸径连年生长量在 25 a 与 40 a 分别出现波动,其各生长指标的最优模型方程分别为逻辑斯

蒂、二次曲线、理查德模型;云杉单木生长变化情况为树高与胸径前期生长较快,后期生长缓慢,材积则相反,其各生长指标的最优模型方程多为舒马克模型和理查德模型;丽江云杉树高与胸径生长趋势基本一致,材积生长量增长稳定,无明显波动,其各生长指标的最优模型方程多为二次曲线模型。4 个树种最优树皮厚度模型多为二元一次线性模型和双对数模型。

表 4 丽江云杉生长拟合模型与精度检验

Table 4 Growth fitting models and their precision testing of *P. likiangensis*

省份	生长因子	最优方程	拟合参数				拟合精度		检验指标		
			A	B	C	D	R ²	AIC	RMSE	ME	MAE
云南省	树高	二次曲线	-1.654	0.31	-0.001	—	0.999	-29.56	0.368	0.095	0.329
	胸径	二次曲线	-3.187	0.474	-0.001	—	0.999	-43.96	1.442	-0.904	1.022
	材积	二次曲线	0.015	-0.003	0.001	—	0.999	-93.37	0.075	-0.050	0.051
四川省	树高	舒马克	56.016	54.001	—	—	0.984	7.1	0.622	0.290	0.451
	胸径	二次曲线	-2.784	0.653	-0.001	—	0.998	-5.43	12.875	-11.244	11.244
	材积	舒马克	14.679	155.555	—	—	0.995	-49.27	0.389	-0.314	0.314
汇总	树高	二次曲线	-1.697	0.319	-0.001	—	0.999	-28.39	0.385	-0.278	0.327
	胸径	二次曲线	-3.162	0.486	-0.001	—	0.999	-40.2	2.108	-1.549	1.549
	材积	理查德	3.155	-0.04	0.02	-181.471	0.999	-80.9	0.141	-0.102	0.102

表 5 树皮厚度模型拟合与精度检验

Table 5 Fitting and precision testing of bark thickness model

树种	省份	最优模型	拟合参数			拟合精度		检验指标		
			A	B	C	R ²	AIC	RMSE	ME	MAE
白扦	山西省	模型(7)	1.736	0.316	-0.291	0.664	-23.19	0.89	-0.39	0.75
	汇总	模型(7)	0.264	0.048	0.332	0.502	38.93	1.07	-0.32	0.88
青扦	山西省	模型(8)	0.334	0.502	—	0.162	12.86	2.28	-0.01	1.68
	汇总	模型(8)	0.407	0.448	—	0.113	14.23	2.31	0.33	1.54
云杉	甘肃省	模型(8)	0.741	0.268	—	0.162	5.33	2.69	0.58	2.63
	汇总	模型(7)	-4.708	0.010	0.410	0.574	16.07	3.85	0.76	3.25
丽江云杉	云南省	模型(7)	11.807	0.539	-0.652	0.472	100.01	3.18	-1.29	2.85
	汇总	模型(8)	-0.048	0.715	—	0.352	109.45	3.64	-2.31	2.57

3.2 讨论

研究区涵盖了山西、甘肃、四川、云南等主要省区^[17]。50 年生白扦、青扦与 100 年生云杉、丽江云杉均未出现材积连年生长量与平均生长量的交点和明显的最大值,表明分布区内云杉属树种材积生长速率均较低,在 50 a 或 100 a 仍未达到材积平均生长量最高峰,因此无法判断数量成熟龄。比较不同树种生长发现,白扦和青扦树高、胸径连年生长量与平均生长量在山西生长变化趋势基本一致,相比之下,云杉与丽江云杉树高连年生长量与平均生长量最高峰均推迟 20 a 左右,这可能与云杉属树种各生长指标随树龄变化具有阶段性有关^[18,35]。在此过程中应该合理的疏伐,适当追肥促进林木树高与胸径协调生长,保证木材产量最大化。

单木生长方程拟合结果显示,树高、胸径、材积的拟合决定系数(R²)基本在 0.9 以上,说明拟合精度较高,不同省区拟合效果不同,可能的原因:一是与林木生物学特性相关,二是林木生长受到水热条

件的影响。另外林木生长还受不同造林方式和林分内竞争的影响,H. Sterba *et al*^[36]研究挪威云杉林分时发现,将林木自身的大小(胸径、树冠比)、竞争因子、立地因子对模型构建也非常有用,这说明林分生长参数也较为重要。本研究由于数据量有限,未考虑到此方面。另外,林木生长还受林分枯损量影响,马志海等^[37]在东北地区利用混交林单木枯损率模型拟合显示,各树种的直径越大,枯损概率越小,说明林分枯损量也与单木生长状况有关。

不同地区树皮厚度拟合结果不同,这与 T. Malone *et al*^[23]研究不同地点的白云杉树皮厚度模型时的拟合结果类似。本研究中白扦和丽江云杉均表明基于树高和胸径的多变量拟合较为精确,这与王晓林等^[11]利用多元逐步回归的方法建立落叶松人工林树皮厚度模型得出的结论相同;另一方面,树皮厚度大小往往随着树高而改变,因此任意高度处树皮厚度、相对树皮厚度的估算也很有必要^[9],本研究由于数据原因未考虑此方面。

综合云杉属 4 个树种所有拟合结果发现,树高与胸径拟合最优模型为二次曲线模型,而材积拟合最优模型为理查德模型;树皮厚度拟合中,基于树高和胸径的二元一次线性模型拟合效果较好。同时本研究也存在局限性,例如,在模型选择方面多为前人研究过程中拟合较好的经验模型,在拟合过程中没有考虑到树种差异造成的拟合误差,而且一些参数无法直接用生物学原理去解释,因此在以后的研究过程中应结合树木自身的生物学要求全方面分析其生长过程,逐步提高模型预测精度^[38]。

参考文献:

- [1] 李凤日. 广义 Schumacher 生长方程的推导及其应用[J]. 北京林业大学学报, 1993(3): 148-154.
- [2] 何潇, 赵嘉诚, 曹磊, 等. 广东省枫香单木干材生物量生长模型的研建[J]. 西北林学院学报, 2018, 33(6): 236-242.
HE X, ZHAO J C, CAO L, *et al.* Construction of individual bole biomass growth models for *Liquidambar formosana* in Guangdong province[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2018, 33(6): 236-242. (in Chinese)
- [3] TSOULARIS A, WALLACE J. Analysis of logistic growth models[J]. Mathematical biosciences, 2002, 179(1): 21-55.
- [4] 陈丽聪, 邓华锋, 黄国胜, 等. 不同起源马尾松与杉木林分树高曲线的拟合及对比[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2014, 42(1): 57-64.
CHEN L C, DENG H F, HUANG G S, *et al.* Fitting and comparison of tree height curves of *Pinus massoniana* Lamb and *Cunninghamia lanceolata* with different origins[J]. Journal of Northwest A&F University: Natural Science Edition, 2014, 42(1): 57-64. (in Chinese)
- [5] WINSOR C P. The Gompertz curve as a growth curve[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 1932, 18(1): 1.
- [6] 方子兴. 韦布尔分布及其参数估计[J]. 林业科学研究, 1993(4): 423-430.
- [7] 王元邢, 邢黎峰, 法永乐, 等. Weibull 分布描述直径生长及其合理性研究[J]. 山东林业科技, 1997(Supp. 1): 60-63.
- [8] WILLIAMS V L, WITKOWSKI E T F, BALKWILL K. Relationship between bark thickness and diameter at breast height for six tree species used medicinally in south Africa[J]. South African Journal of Botany, 2007, 73(3): 449-465.
- [9] LAASASENAHO J, MELKAS T, ALDEN S. Modelling bark thickness of *Picea abies* with taper curves[J]. Forest Ecology and Management, 2005, 206(1/3): 35-47.
- [10] SONMEZ T, KELES S, TILKI F. Effect of aspect, tree age and tree diameter on bark thickness of *Picea orientalis*[J]. Scandinavian Journal of Forest Research, 2007, 22(3): 193-197.
- [11] 王晓林, 蔡可旺, 姜立春. 落叶松树皮厚度变化规律的研究[J]. 森林工程, 2011, 27(2): 8-11.
WANG X L, CAI K W, JIANG L C. Study on bark thickness of *Dahurian larch*[J]. Forest Engineering, 2011, 27(2): 8-11. (in Chinese)
- [12] BROOKS J R, JIANG L. Comparison of prediction equations for estimating inside bark diameters for yellow-poplar, red maple, and red pine in west Virginia[J]. Northern Journal of Applied Forestry, 2009, 26(1): 5-8.
- [13] MAGUIRE D A, HANN D W. Bark thickness and bark volume in southwestern Oregon Douglas-fir[J]. Western Journal of Applied Forestry, 1990, 5(1): 5-8.
- [14] LI R, WEISKITTEL A R. Estimating and predicting bark thickness for seven conifer species in the Acadian Region of north America using a mixed-effects modeling approach: comparison of model forms and subsampling strategies[J]. European Journal of Forest Research, 2011, 130(2): 219-233.
- [15] 严铭海, 方静仪, 李睿宇, 等. 福州市湿地松人工林树皮厚度模型研究[J]. 西南林业大学学报: 自然科学, 2018, 38(5): 124-131.
YAN M H, FANG J Y, LI R Y, *et al.* Bark thickness model of *Pinus elliottii* plantation in Fuzhou[J]. Journal of Southwest Forestry University: Natural Sciences, 2018, 38(5): 124-131. (in Chinese)
- [16] 唐诚, 王春胜, 庞圣江, 等. 西南桦人工林树皮厚度模型模拟[J]. 林业科学, 2017, 53(7): 85-93.
TANG C, WANG C S, PANG S J, *et al.* Simulating bark thickness for *Betula alnoides* plantations[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2017, 53(7): 85-93. (in Chinese)
- [17] 中国科学院中国植物志编辑委员会编著. 中国植物志第 7 卷[M]. 北京: 科学出版社, 2016: 544.
- [18] 白文斌, 廖超英, 康乐, 等. 西藏昌都地区川西云杉林木生长规律研究[J]. 西北林学院学报, 2012, 27(5): 158-162.
BAI W B, LIAO C Y, KANG L, *et al.* Growth regularity of *Picea likiangensis* var. *balfouriana* in Changdu of Tibet[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2012, 27(5): 158-162. (in Chinese)
- [19] 辛永清, 穆德智, 杨菁. 紫果云杉单立木生长模型拟合的初步研究[J]. 青海农林科技, 2002(Supp. 1): 69-70.
- [20] 陈国栋, 杜研, 丁佩燕, 等. 基于混合效应模型的新疆天山云杉单木胸径预测模型构建[J]. 北京林业大学学报, 2020, 42(7): 12-22.
CHEN G D, DU Y, DING P Y, *et al.* Predicting model construction of single tree DBH of *Picea schrenkiana* in Xinjiang of northwestern China based on mixed effects model[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2020, 42(7): 12-22. (in Chinese)
- [21] 兰洁, 肖中琪, 李吉玫, 等. 天山雪岭云杉生物量分配格局及异速生长模型[J]. 浙江农林大学学报, 2020, 37(3): 416-423.
LAN J, XIAO Z Q, LI J M, *et al.* Biomass allocation and allometric growth of *Picea schrenkiana* in Tianshan Mountains[J]. Journal of Zhejiang A&F University, 2020, 37(3): 416-423. (in Chinese)
- [22] KOHNLE U, HEIN S, SORENSEN F C, *et al.* Effects of seed source origin on bark thickness of Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii*) growing in southwestern Germany[J]. Canadian Journal of Forest Research, 2012, 42(2): 382-399.
- [23] MALONE T, LIANG J. A bark thickness model for white spruce in Alaska northern forests[J]. International Journal of

- Forestry Research, 2010, 2009: 1-5.
- [24] 山西省林业厅林业调查队. 山西省主要树木生长量汇编[G]. 太原: 山西省林业厅林业调查队, 1965.
- [25] 中央人民政府林业部. 中国主要树木生长量汇编第1辑[M]. 北京: 中国林业出版社, 1951.
- [26] 中央人民政府林业部. 中国主要树木生长量汇编第2辑[M]. 北京: 中国林业出版社, 1952.
- [27] 中央人民政府林业部. 中国主要树木生长量汇编第3辑[M]. 北京: 中国林业出版社, 1954.
- [28] 中央人民政府林业部. 中国主要树木生长量汇编第4辑[M]. 北京: 中国林业出版社, 1958.
- [29] 段爱国, 张建国, 童书振. 6种生长方程在杉木人工林分直径结构上的应用[J]. 林业科学研究, 2003, 16(4): 423-429.
- DUAN A G, ZHANG J G, TONG S Z. Application of six growth equations on stands diameter structure of Chinese fir plantations[J]. Forest Research, 2003, 16(4): 423-429. (in Chinese)
- [30] RICHARDS F J. A flexible growth function for empirical use[J]. Journal of experimental Botany, 1959, 10(2): 290-301.
- [31] 洪滔, 吴承祯, 胡喜生. 安曹下杉木丰产林不同阶段生长比较研究[J]. 福建林学院学报, 2008(1): 19-22.
- HONG T, WU C Z, HU X S. Compared study on the growth in different stages of the *Cunninghamia lanceolata* forest in Ancaoxia[J]. Journal of Fujian College of Forestry, 2008(1): 19-22. (in Chinese)
- [32] 林丽平, 徐期瑚, 罗勇, 等. 广东省樟树立木生长规律和生长模型研究[J]. 中南林业科技大学学报, 2018, 38(6): 23-29.
- LIN L P, XU Q H, LUO Y, *et al.* Study on the growth laws and models of *Cinnamomum camphora* in Guangdong Province[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2018, 38(6): 23-29. (in Chinese)
- [33] 马武, 雷相东, 徐光, 等. 蒙古栎天然林单木生长模型研究——I. 直径生长量模型[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2015, 43(2): 99-105.
- MA W, LEI X D, XU G, *et al.* Growth models for natural *Quercus mongolica* forests——I. Diameter growth model[J]. Journal of Northwest A&F University: Natural Science Edition, 2015, 43(2): 99-105. (in Chinese)
- [34] 杨锦昌, 尹光天, 李荣生, 等. 5种生长方程在2种藤林生长模型中的应用[J]. 福建林学院学报, 2007(3): 217-221.
- [35] 杨秋香, 牛云. 青海云杉连年生长模型的分析[J]. 河西学院学报, 2003(5): 83-86.
- [36] STERBA H, KOROL N, RÖSSLER G. Preliminary evaluation of an individual tree growth model for Norway spruce stands[J]. European Journal of Forest Research, 2001, 120(1): 406-421.
- [37] 马志海. 东北林区天然混交林单木生长模型的研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2006.
- [38] 包昱君, 亢新刚, 杜志, 等. 天然林单木生长模型研究综述[J]. 林业调查规划, 2013, 38(2): 1-5.
- (上接第35页)
- [27] 邢存旺, 黄选瑞, 李玉灵, 等. 黄羊滩人工固沙林防护期分析与评价[J]. 林业科学, 2012, 48(11): 134-139.
- XING C W, HUANG X R, LI Y L, *et al.* Analysis and assessment on protection period of sand-fixation plantations in Huangyangtan[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2012, 48(11): 134-139. (in Chinese)
- [28] 马增旺. 冀北人工固沙林分特征与综合评价研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2013.
- [29] 侯贵荣. 坝上张北典型杨树人工林恢复重建技术基础研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2017.
- [30] 曾德慧, 姜凤岐, 范志平, 等. 樟子松人工固沙林稳定性的研究[J]. 应用生态学报, 1996, 7(4): 337-343.
- ZENG D H, JIANG F Q, FAN Z P, *et al.* Stability of mongolian pine plantation on sandy land[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 1996, 7(4): 337-343. (in Chinese)
- [31] 张全锋, 支恩波, 顾新庆, 等. 北京杨在河北坝上地区的生长表现[J]. 河北林业科技, 2010, (5): 19-21.
- [32] 李娜, 康永祥, 曾商春, 等. 太白红杉林窗更新与环境因子的关系研究[J]. 西北林学院学报, 2019, 34(6): 30-36.
- LI N, KANG Y X, ZENG S C, *et al.* Relationship between the regeneration of *Larix chinensis* and environmental factors in forest gaps [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2019, 34(6): 30-36.
- [33] 遂川县大坑林站. 杉木实生幼林萌蘖的原因及防治[J]. 江西林业科技, 1984(2): 32-34.
- [34] 符婵娟. 神农架巴山冷杉群落更新特点及影响因素研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2010.
- [35] 王妍. 呼伦贝尔沙地天然樟子松林更新研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2009.
- [36] 王妍, 卢琦, 吴波, 等. 呼伦贝尔沙地樟子松更新苗分布特征研究[J]. 水土保持研究, 2010, 17(5): 86-91.
- WANG Y, LU Q, WU B, *et al.* Seedling dispersal pattern research of the natural mongol scotch Pine individual plant in Hulun Buir Sandland[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2010, 17(5): 86-91. (in Chinese)
- [37] 潘磊磊, KWON SEMYUNG, 刘艳书, 等. 沙地樟子松天然林南缘分布区林木竞争、空间格局及其更新特征[J]. 生态学报, 2019, 39(10): 3687-3699.
- PAN L L, KWON S, LIU Y S, *et al.* Tree competition, spatial pattern and regeneration of a Mongolian pine natural forest in the southern geographical edge[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(10): 3687-3699. (in Chinese)
- [38] 宋鸽. 科尔沁沙地南缘樟子松人工林土壤种子库及天然更新特征[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2018.
- [39] 闫德仁, 袁立敏, 胡小龙, 等. 浑善达克沙地东南缘樟子松人工林天然更新调查[J]. 内蒙古林业科技, 2018, 44(3): 8-11.