

DOI:10.12403/j.1001-1498.20230097

青海省不同生境下青海云杉胸径生长模型研究

马浩¹, 陈科屹², 徐干君¹, 党禹杰¹, 何友均², 王建军^{2*}

(1. 国家林业和草原局西北调查规划院, 陕西西安 710048; 2. 中国林业科学研究院林业科技信息研究所 北京 100091)

摘要: [目的] 研究不同生境压力下青海云杉的林木胸径生长规律及生长模型, 为有效保护、合理经营青海云杉林提供经验模型。[方法] 利用青海地区青海云杉的树轮数据, 计算单木胸径生长量, 分析不同起源、不同坡位条件下胸径生长规律, 构建单木胸径生长模型, 对比与评价不同模型的拟合优度结果。随后选取基础模型, 建立考虑起源和坡位的青海云杉单木胸径混合效应模型, 采用全部数据对模型进行检验。[结果] 总体来看, 青海云杉生长到胸高位置后, 单木胸径生长量随着年龄的增加呈现下降后平缓变化趋势; 青海云杉天然林、人工林单木生长的速生期分别为 29—44 a、29—39 a, 连年生长量 (CAI) 和平均生长量 (MAI) 均在 0.40 cm 以上, 随后天然林单木 CAI 和 MAI 的变化平缓, 人工林的变化幅度较大。不同坡位的单木胸径生长趋势具有差异。生长模型结果显示, 不同起源、坡位条件下各树种最优胸径生长模型的决定系数 (R^2) 均在 0.913 以上, 总体相对误差 (TRE) 和平均系统误差 (MSE) 均在 $\pm 2\%$ 以内, 平均预估误差 (MPE) 大多在 5% 以内, 平均百分标准误差 (MPSE) 在 35% 以内。以 Gompertz 模型为基础模型构建的混合效应模型的 R^2 为 0.702, 拟合效果优于基础模型; 检验指标 TRE 为 0.03%, MSE 为 -0.30%, MPE 为 4.23%, MPSE 为 29.54%, 较基础模型分别下降 89.3%、83.5%、20.6%、15.1%。[结论] 不同生境条件下青海云杉的胸径生长规律具有差异, 天然林的快速生长期持续时间长; 所构建的单木胸径生长混合效应模型, 可以用于估算青海省不同生境条件下青海云杉的林木胸径生长量变化。

关键词: 胸径生长量; 生长规律; 单木生长模型; 混合效应模型; 青海

中图分类号: S758.5

文献标识码: A

文章编号: 1001-1498(2024)01-0119-11

单木生长模型以单木为基本单位, 通过数学模型来模拟林木的生长过程, 揭示林木生长规律, 并且能够提供较详细的林分结构特征及动态变化信息, 对于森林经营管理和保护等方面有十分重要的实践价值^[1-3]。例如, 李慧婷^[2]采用 5 种理论生长方程建立了青海海东地区华北落叶松的树干材积生长模型。与非线性回归方法相比, 混合效应模型能够有效提高模型的估计精度^[3-8]。李春明和唐守正等^[4]建立了考虑样地的随机效应、观测数据的时间序列相关性及间伐强度的落叶松云冷杉林断

面积生长混合模型, 结果表明混合效应模型显著地提高了林分断面积的预估精度。

单木生长模型在区域水平上的应用具有一定的局限性, 其影响因素主要有树木立地条件、人为经营措施、空间结构多样性等^[9-11]。张雷等^[12]研究发现, 随海拔的升高, 祁连山北坡青海云杉林的结构出现明显变化, 平均胸径增加, 平均树高呈“单峰”变化。张中惠等^[13]探究宁夏六盘山华北落叶松单木树高生长对立地因子的响应, 发现影响最大的立地因子是海拔, 其次是坡向、坡度。海拔、坡向与

收稿日期: 2023-03-13 修回日期: 2023-07-18

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (31570633)

* 通讯作者: 王建军, 博士, 助理研究员。主要研究方向: 森林生长收获与模型模拟。Email: dreamjwang@163.com

坡位在地形上改变了温度、湿度、光照等资源的分配,进而影响植被分布与林木生长发育^[14]。因此,研究林木在不同环境下的生长特点,不仅对科学描述林木生长动态十分重要,还能为森林多种功能与效益的发挥提供基础参考。

青海云杉 (*Picea crassifolia* Kom.) 是青海地区主要的森林更新树种和造林树种,在涵养水源、水土保持、改善环境等方面的作用显著。国内外学者对该树种的生理生态特征、树轮生长特性等方面进行了广泛研究^[15-17]。但是,关于青海云杉单木生长模型的相关研究较少^[2]。因此,本研究以青海云杉为研究对象,分析不同起源、不同坡位下单木胸径生长的规律,构建单木胸径生长模型和考虑起源和坡位影响的混合效应模型,旨在为今后有效保护、合理经营青海云杉林提供经验模型和有益参考。

1 研究区概况

青海位于我国西北部,地理坐标为 31°36'~39°19' N, 89°35'~103°04' E,属于高原大陆性气候,冬季寒冷干燥,夏季短暂且凉爽湿润,日照时间长,太阳辐射强。年平均气温-5.1~9.0℃,年均降水量 15~750 mm,降水分布由东南向西北逐渐减少^[18]。该地区的地形、地貌复杂多样,地势总体呈西北高东南低,东部多山,西部为高原和盆地,河流湖泊分布多,平均海拔 3 000 m 以上^[18-19]。主要的植被类型有常绿针叶林、落叶阔叶林、高寒灌丛、高寒草甸等,主要建群种有青海云杉、祁连圆柏 (*Juniperus przewalskii* Kom.)、青杨 (*Populus cathayana* Rehd.)、油松 (*Pinus tabulaeformis* Carr.) 等,主要灌木有沙棘 (*Hippophae rhamnoides* Linn.)、柠条 (*Caragana korshinskii* Kom.)、锦鸡儿属 (*Caragana* Fabr.) 等。

2 材料与方 法

2.1 数据收集与处理

采样点位于青海省 3 个县:尖扎县、祁连县、大通回族土族自治县(简称“大通县”)。采样点选取受人为干扰少、远离道路及防火道、环境较为稳定的地带。在不同起源、不同立地条件下的典型林分中选取标准木作为样木。其中,以坡位划分,在不同海拔、坡向、坡度内进行采样,保证数据的区域代表性和均匀性。于 2022 年 7 月采集青海云杉

样木共 172 株。其中,天然起源的青海云杉 74 株(上坡 19 株,中坡 9 株,下坡 22 株,平坡 24 株),人工起源的青海云杉 88 株(上坡 29 株,中坡 15 株,下坡 28 株,平坡 16 株)。在每 1 株样木的胸径高(1.3 m)的位置,用生长锥分别在南、北 2 个方向上钻取树芯,将树芯样本保存并分类编码,记录样木胸径(DBH)、树种、起源、坡位等信息。

将样本带回实验室后,按树轮年代法的标准方法进行风干、固定、切割/打磨等预处理;使用 LinTab 年轮分析仪对树轮宽度测定,测定精度为 0.01 mm。年轮条测量获得的测量值为某一方向上的半径生长量,对测量值的平均值乘以 2,得到该年龄下的胸径生长量。计算胸径平均生长量(MAI)和胸径连年生长量(CAI),龄阶间距为 5 a。样本信息见表 1。

此外,在典型天然林中选取 4 株标准木进行树干解析,记录树干长、胸径以及圆盘的直径与年龄,以确定林木地径生长到胸径位置时的年限。解析木的胸径范围为 25.9~34.8 cm,树龄范围为 69~135 a,树高范围为 16.1~26.5 m,到达胸径位置的年龄范围为 21~26 a。根据解析木数据分析,青海云杉地径生长到胸径位置时的年限为 24 a。树龄为树芯的年轮数加上林木生长到胸径位置时的年限。

2.2 研究方法

2.2.1 生长模型建立 结合树木的生长规律及前人的研究成果,本研究选取理查德(Richards)方程、逻辑斯蒂(Logistic)方程、考尔夫(Korf)方程、坎派兹(Gompert)方程和单分子式(Mitscherlich)方程 5 种树木生长理论方程对胸径生长量与年龄的关系曲线进行拟合^[2,20]。利用 ForStat 2.2 统计软件拟合生长模型。

2.2.2 非线性混合效应模型建立 非线性混合效应模型的建立考虑了回归函数依赖于固定和随机效应的非线性关系^[21]。多水平非线性混合效应模型的形式(以两水平模型为例)如下:

$$\left\{ \begin{array}{l} y_{ijk} = f(\varphi_{ijk}, v_{ijk}) + \varepsilon_{ijk}, i = 1, \dots, m; j = 1, \dots, m_j; \\ k = 1, \dots, n_{ij} \\ \varphi_{ijk} = A_{ijk}\beta + B_{i,jk}b_i + B_{jk}b_j \\ \varepsilon_{ij} \sim N(0, \sigma^2 R_{ij}) \\ b_i \sim N(0, D_1) \\ b_j \sim N(0, D_2) \end{array} \right.$$

表 1 样本信息

Table 1 Basic information of samples

采样点 Sample region	起源 Origin	坡位 Slope position	样本量 Sample size	树轮宽度 Tree-ring width/mm	时段 Period
尖扎县	天然	上坡	16	5.25/1.86/0.25	1933—2022
		中坡	3	9.57/1.53/0.21	1927—2022
		下坡	13	3.82/1.72/0.17	1941—2022
	人工	上坡	15	5.65/1.60/0.14	1969—2022
		下坡	13	5.00/1.90/0.28	1969—2022
		人工	14	2.78/0.90/0.13	1747—2022
祁连县	人工	中坡	15	3.22/0.80/0.10	1833—2022
		下坡	15	3.36/1.18/0.21	1824—2022
		上坡	3	3.39/1.76/0.16	1947—2022
大通县	天然	中坡	6	5.24/1.90/0.16	1950—2022
		下坡	9	5.54/2.13/0.37	1950—2022
		平坡	24	5.93/1.90/0.21	1941—2022
		人工	16	7.13/3.11/0.49	1965—2022

注: 树轮宽度表示为最大轮宽/平均轮宽/最小轮宽。

Note: Tree-ring width present as maximum tree-ring width/ mean tree-ring width/ minimum tree-ring width.

式中, y_{ijk} 是第 i 个第一水平中的第 j 个第二水平内的第 k 次观察值, m 、 m_i 分别是第一水平、第二水平的分组数量, n_{ij} 是第 i 个第一水平中的第 j 个第二水平内的观测次数, f 是含有参数向量 φ_{ijk} 和协变量向量 v_{ijk} 的非线性函数, A_{ijk} 是设计矩阵, β 是 $(p \times 1)$ 维固定效应向量, $B_{i,jk}b_i$ 、 $B_{i,jk}b_{ij}$ 分别是第一水平、第二水平的随机效应设计矩阵, b_i 、 b_{ij} 分别是第一水平、第二水平的随机参数向量, D_1 、 D_2 分别是第一水平、第二水平的随机参数方差-协方差矩阵, b_i 和 b_{ij} 不相关, ε_{ijk} 是服从正态分布的误差项, σ^2 是方差, R_{ij} 是第 i 个第一水平中的第 j 个第二水平内的方差-协方差矩阵。

对于参数效应的确定, 本研究将所有不同随机效应参数组合的模型都进行拟合。模型的拟合优度指标为赤池信息准则 (AIC)、贝叶斯信息准则 (BIC) 和对数似然值 (LogLik), 一般采用最小 AIC 和 BIC , 以及最大 Loglik 值的标准确定具有最优参数组合的模型。随机效应参数的方差-协方差矩阵 D 反映了随机效应在个体之间的差异性。采用常见的广义正定矩阵作为随机效应参数的方差-协方差矩阵。方差-协方差矩阵 R_{ij} 主要用于解决数据中存在的自相关和异方差问题^[22]。由于胸径生长量数据不是重复观测数据, 因此不考虑数据的自相关问题。通过加权回归方法来消除异方差问题, 常用

的异方差函数有常数加幂函数、幂函数和指数函数。利用 R 语言的 nlme 包进行混合效应模型的参数估计。

2.2.3 模型评价 为了对模型的拟合结果进行评价和比较, 采用的指标有决定系数 (R^2) 和均方根误差 ($RMSE$)。采用全部数据计算模型估计值的精度指标, 选择总体相对误差 (TRE)、平均系统误差 (MSE)、平均预估误差 (MPE) 和平均百分标准误差 ($MPSE$) 4 项误差指标对模型进行综合评价。根据 R^2 较大, $RMSE$ 、 TRE 、 MSE 、 MPE 和 $MPSE$ 较小原则选取最优模型。

3 结果与分析

3.1 胸径生长过程

以林木生长到胸高位置的年龄为起始年限 (24 a), 5 a 为龄阶, 分析不同起源、坡位生长下青海云杉的胸径生长过程 (图 1)。CAI 与 MAI 均呈现“升—降—平缓变化”的趋势, MAI 大于 CAI。其中, 天然林内青海云杉的快速生长期为 29—44 a, CAI 与 MAI 均在 0.40 cm 以上; 29 a 时 CAI 与 MAI 相交且有最大值, 分别为 0.509 cm、0.515 cm。人工林内青海云杉的速生期在 29—39 a, CAI 与 MAI 均大于 0.40 cm, 34 a 时 CAI 与 MAI 有最大值, 分别为 0.473 cm、0.434 cm;

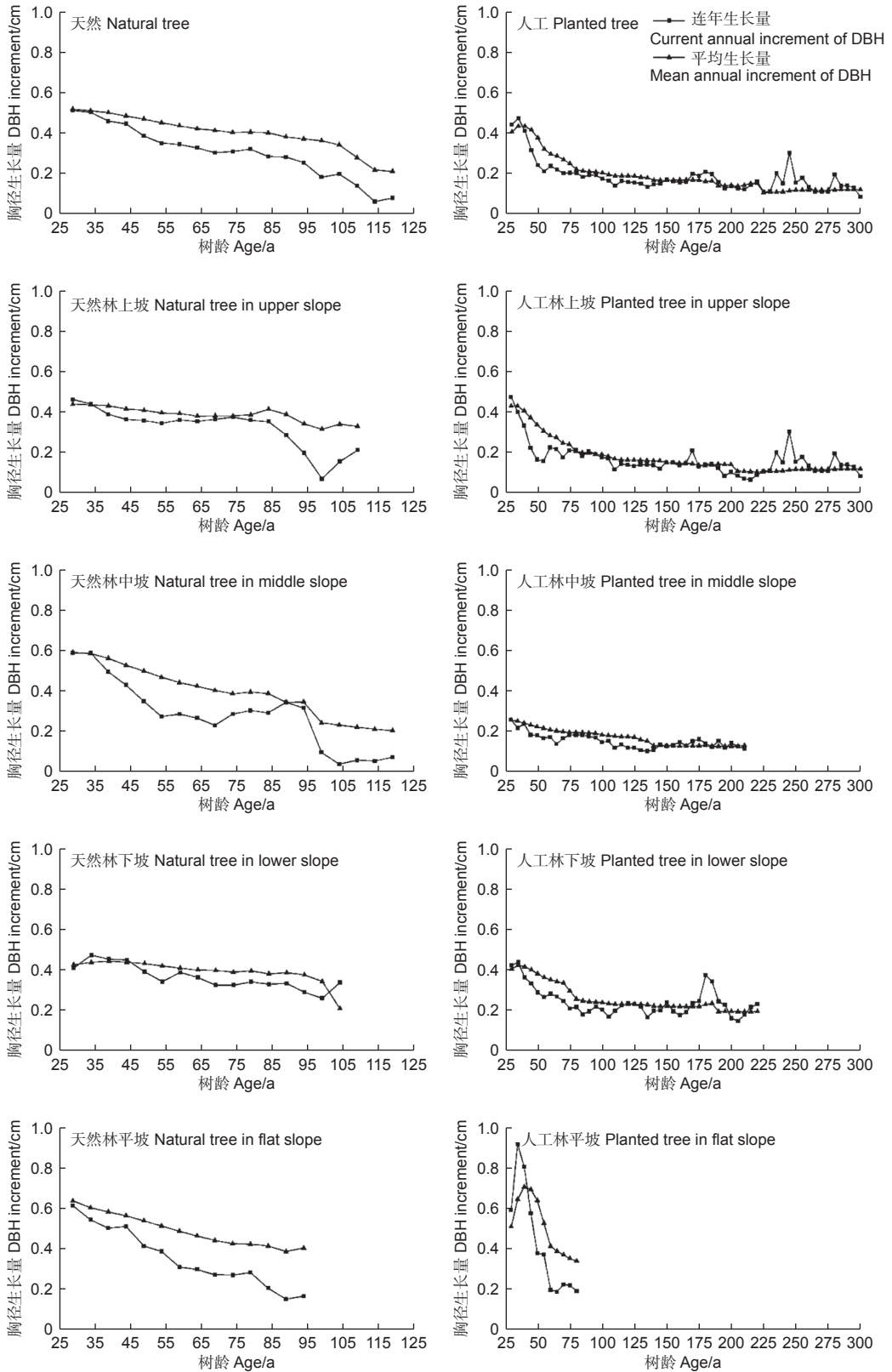


图 1 不同起源与坡位青海云杉单木胸径生长曲线

Fig. 1 Individual-tree DBH growth for *Picea crassifolia* at different origins and slope positions

CAI与MAI出现多个相交点, MAI在39 a快速下降后变化不大, CAI在树龄164—259 a波动较

大, 在244 a出现第2个峰值0.302 cm。天然林不同坡位中, 青海云杉在上坡的

CAI 与 MAI 在 29—84 a 均保持 0.35 cm 以上的较高值, 为生长速生期, 并且出现 2 个相交点; 82 a 之后 CAI 先降后升。在中坡的青海云杉速生期为 29—49 a, 其中 CAI 与 MAI 在 29—39 a 均大于 0.50 cm, 29—94 a 之间波动幅度较大, 出现 3 处相交点。在下坡的青海云杉的 CAI 与 MAI 变化平缓, 速生期为 29—64 a, 24—104 a 之间两者出现 3 个相交点。在平坡的青海云杉 CAI 与 MAI 逐年下降, 速生期为 29—54 a, 其中 CAI 与 MAI 在 29—44 a 均在 0.50 cm 以上。

人工林不同坡位中, 青海云杉 MAI 与 CAI 多次相交。在上坡的青海云杉 CAI 与 MAI 先降再平缓变化, 生长速生期为 29—39 a, CAI 与 MAI 均在 0.35 cm 以上; 229—289 a 之间 CAI 的波动幅度较大。在中坡的青海云杉 CAI 与 MAI 变化平

缓, 但两者均小于 0.30 cm。在下坡的青海云杉 CAI 与 MAI 逐年下降后平缓变化; 速生期为 29—39 a; CAI 波动幅度较大, 159—204 a 时期 CAI 先升后降。在平坡的青海云杉呈现先升后降的变化趋势, 速生期在 29—54 a, 出现 1 个相交点。

3.2 胸径生长模型的拟合与评价

3.2.1 胸径生长模型的拟合与评价 采用 5 种生长模型拟合不同起源青海云杉单木胸径生长量与年龄关系曲线, 模型拟合效果良好 (表 2, 图 2)。天然林单木生长模型中, Gompertz 模型的拟合结果表现最好, R^2 为 0.915; 对于人工林, Korf 模型的拟合效果最优, R^2 为 0.946。2 个模型的 TRE 在 $\pm 1\%$ 以内, MSE 在 $\pm 2\%$ 以内, MPE 均在 3% 以内, MPSE 在 35% 以内。

表 2 不同起源最优单木胸径生长模型参数及评价指标

Table 2 The parameter estimates and evaluation indices of optimal individual-tree DBH growth models at different origins

起源 Origin	模型 Model	参数预估值 Parameter estimates			评价指标 Evaluation indices					
		a	b	c	R^2	RMSE	TRE/%	MSE/%	MPE/%	MPSE/%
天然 Natural	Gompertz	24.25	2.888 8	0.056 3	0.915	2.32	-0.09	-0.10	2.39	29.72
人工 Planted	Korf	228.75	6.374 4	0.202 6	0.946	1.81	0.48	1.22	1.92	34.76

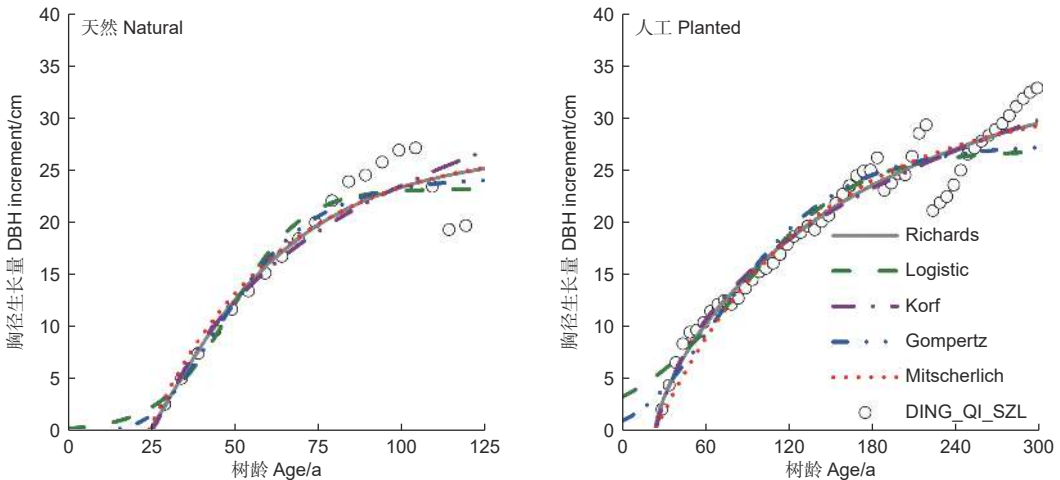


图 2 不同起源单木胸径生长拟合曲线对比

Fig. 2 The fitting curves for Individual-tree DBH growth models at different origins

不同坡位青海云杉单木胸径生长模型的拟合结果如表 3、图 3~4 所示。上坡青海云杉单木胸径生长拟合效果最优的生长模型是 Richards 模型, 中坡的最优生长模型是 Logistic 模型, 下坡的最优

生长模型是 Gompertz 模型, 平坡的最优生长模型是 Korf 模型。其 R^2 分别为 0.982、0.915、0.913、0.996, TRE 和 MSE 在 $\pm 2\%$ 以内, MPE 在 6% 范围内, MPSE 大部分在 35% 范围内。人工林不同

坡位下, 上坡、中坡、下坡和平坡的最优模型分别是 Korf 模型、Richards 模型、Korf 模型、Logistic

模型。其 R^2 分别为 0.940、0.973、0.980、0.955, TRE 和 MSE 在 $\pm 2\%$ 以内, MPE 在 5% 范围内,

表 3 不同坡位青海云杉最优单木胸径生长模型参数及评价指标

Table 3 The parameter estimates and evaluation indices of optimal individual-tree DBH growth models at different slope positions

起源 Origin	坡位 Slope position	模型 Model	参数预估值 Parameter estimates			评价指标 Evaluation indices					
			a	b	c	R^2	RMSE	TRE/%	MSE/%	MPE/%	MPSE/%
天然 Natural	上坡 Upper slope	Richards	56.54	1.018 5	0.008 3	0.982	1.18	0.19	-0.10	4.12	26.84
	中坡 Middle slope	Logistic	20.28	8.330 2	0.108 6	0.915	1.84	1.16	0.56	5.76	27.12
	下坡 Lower slope	Gompertz	24.07	3.104 2	0.054 8	0.913	2.43	0.51	0.32	5.09	35.28
	平坡 Flat slope	Korf	938.03	7.604 9	0.179 5	0.996	0.48	0.58	0.31	3.75	23.19
人工 Planted	上坡 Upper slope	Korf	3 020.36	8.385 8	0.104 4	0.940	1.88	1.18	1.95	2.85	33.90
	中坡 Middle slope	Richards	27.40	0.957 6	0.008 6	0.973	1.05	0.29	0.34	2.90	25.05
	下坡 Lower slope	Korf	15 768.94	10.470 7	0.103 6	0.980	1.51	0.90	1.72	2.55	28.41
	平坡 Flat slope	Logistic	16.42	17.207 7	0.233 5	0.955	1.18	-0.41	-0.28	4.40	19.90

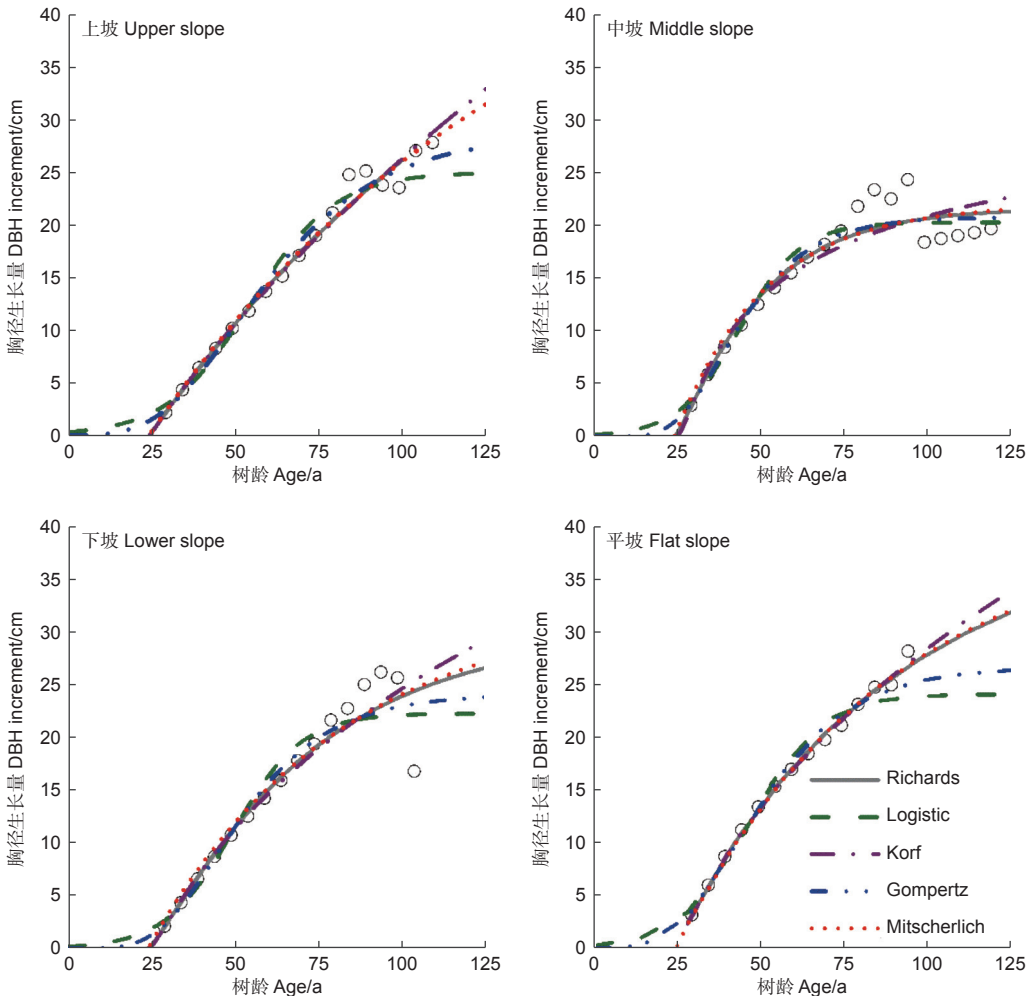


图 3 不同坡位青海云杉天然林单木胸径生长拟合曲线对比

Fig. 3 The fitting curves for Individual-tree DBH growth model for *Picea crassifolia* natural forests at different slope positions

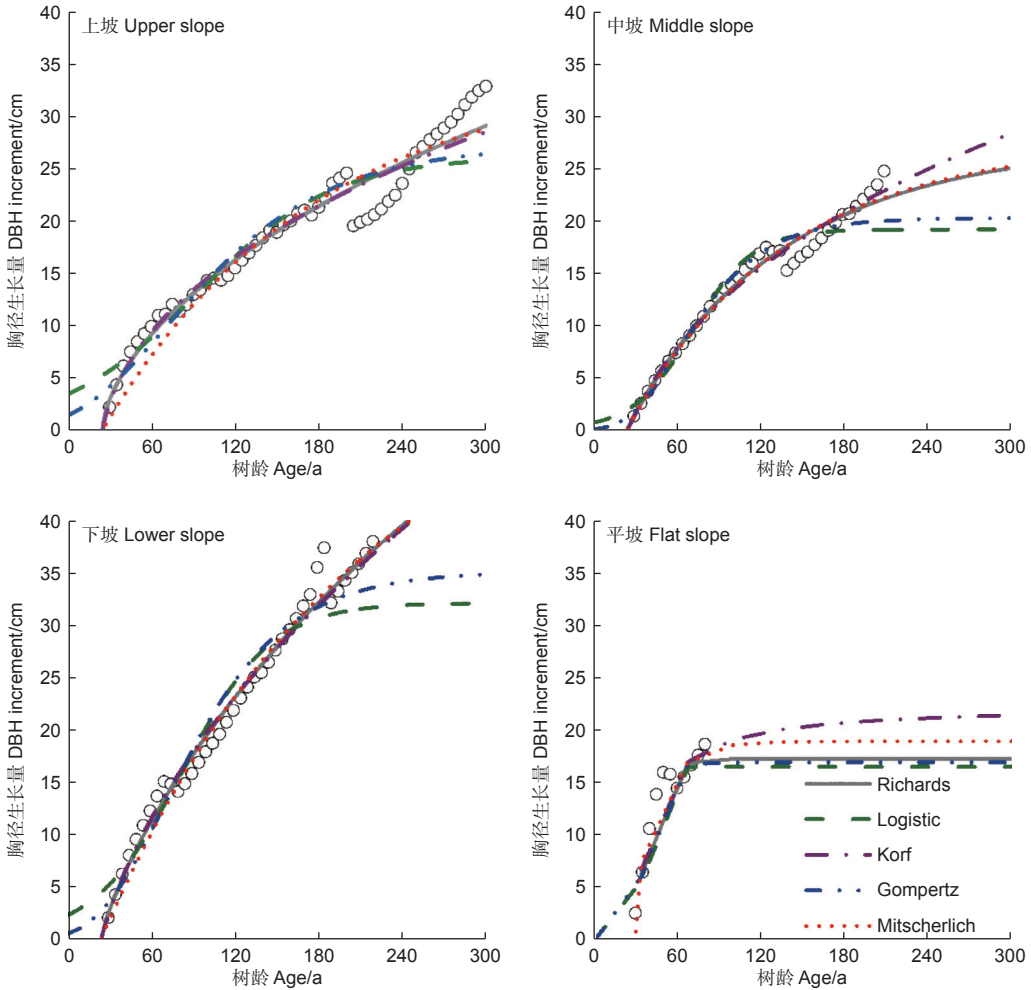


图 4 不同坡位青海云杉人工林单木胸径生长拟合曲线对比

Fig. 4 The fitting curves for Individual-tree DBH growth model for *Picea crassifolia* plantations at different slope positions

MPSE 在 35% 范围内。

3.2.2 混合效应模型的拟合与评价 根据生长模型拟合结果, 本研究分别以 Gompertz 模型、Korf 模型和 Logistic 模型作为基础模型, 采用全部数据, 在基础模型中考虑起源、坡位的混合效应, 对所有不同随机参数组合进行拟合和检验, 各基础模型的最优模型结果见表 4。由表可知, 混合效应模型的检验结果均优于基础模型, 考虑混合效应显著提高了模型的拟合效果。Gompertz 模型、Korf 模型、Logistic 模型的最优随机参数组合分别为 (a、c)、(b)、(b、c)。以 Korf 模型为基础模型的混合效应模型具有最小的 AIC、BIC 和最大的 LogLik, 但是 Korf 模型在考虑异方差函数过程中不收敛。因此, 选择拟合结果其次的 Gompertz 模型 ($AIC = 12700.520$, $BIC = 12757.610$, $\text{LogLik} = -6340.259$), 并进行异方差校正。由表 4 可知, 3 种异方差函数

均能改善模型的拟合效果。其中, 添加幂函数的混合效应模型的拟合结果最优, AIC 为 12 394.490, BIC 为 12 457.300, LogLik 为 -6 186.247。

青海云杉胸径生长基础模型和混合效应模型的参数估计以及拟合结果如表 5 所示。从表中可以看出, 最优混合效应模型具有更好的拟合精度, 其 R^2 为 0.702, 较基础模型提高了 32.7%; RMSE 为 4.14, 较基础模型下降了 20.8%。十折交叉验证法检验结果显示, 混合效应模型的检验指标均优于基础模型。混合效应模型 TRE、MSE、MPE、MPSE 的降幅分别为 89.3%、83.5%、20.6%、15.1%。

3.2.3 模型的预测 利用最优模型对青海云杉胸径的生长拟合见图 5。由图可以看出, 青海云杉胸径总生长量随年龄逐渐增大, 其中天然林上坡和人工林下坡的单木胸径生长趋势较好。天然林整体、天然林中坡和天然林下坡的单木连年生长量

表 4 混合效应模型的模拟结果
Table 4 Fitting results of mixed-effect model

模型 Model	混合效应参数 Mixed-effects parameters	异方差函数 Heteroscedasticity function	AIC	BIC	LogLik
Logistic	无	无	13 742.680	13 765.520	-6 867.341
	b、c	无	12 798.950	12 856.050	-6 389.477
Korf	无	无	13 657.260	13 680.090	-6 824.628
	b	无	12 675.170	12 709.420	-6 331.584
Gompertz	a、c	无	13 709.540	13 732.380	-6 850.770
		无	12 700.520	12 757.610	-6 340.259
		常数加幂函数	12 396.490	12 465.000	-6 186.246
		幂函数	12 394.490	12 457.300	-6 186.247
		指数函数	不收敛		

表 5 基础模型和混合效应模型的参数估计及拟合统计量

Table 5 Parameter estimation and Goodness-of-fit of based model and mixed effect model

项目 Items	参数 Parameter	基础模型 Based model	混合效应模型 Mixed effect model
固定参数	a	20.24 ($p < 0.000 1$)	23.45 ($p < 0.000 1$)
	b	2.194 4 ($p < 0.000 1$)	2.558 4 ($p < 0.000 1$)
	c	0.044 8 ($p < 0.000 1$)	0.046 7 ($p < 0.000 1$)
异方差函数	幂函数		0.550 1
拟合统计量	R^2	0.529	0.702
	RMSE	5.23	4.14
	TRE/%	-0.28	0.03
检验指标	MSE/%	-1.82	-0.30
	MPE/%	5.33	4.23
	MPSE/%	34.79	29.54

CAI 先增大后减小, 平均生长量 MAI 逐年下降; 天然林上坡与平坡的单木 CAI 和 MAI 均呈现逐年下降趋势。除了人工林平坡, 人工林的单木 CAI 和 MAI 均逐年下降。

4 讨论

总体来看, 青海云杉生长到胸高位置后 (24 a), 单木胸径生长量随着年龄的增加而逐渐减少 (图 1)。青海云杉生长缓慢, 树龄 20 a 左右的林木树高约 1.4 m^[23-24]。温度、降水、光、空间等是该地区林木生长的限制因素^[25-27]。随着胸径生长量的增大, 林木个体在林分中能够获取的可利用资源变少, 养分吸收的有效性降低, 使得林木在后期生长缓慢。不同起源对比, 天然起源的青海云杉在树龄 29—44 a 保持相对较高的单木胸径生长

量, CAI 和 MAI 均在 0.40 cm 以上, 比人工林的持续时间长 (29—39 a); 随后 CAI 和 MAI 的变化趋势平缓 (图 1)。在西北地区已有类似的研究结果^[28-30]。王学福^[29]研究发现祁连山青海云杉胸径连年生长量高峰期在 40—50 a, 平均生长量高峰期在 90—110 a。杨文娟^[30]指出青海云杉单木胸径的最大连年生长量出现在 40 a 时, 最大平均生长量出现在 70 a 时, 分别为 0.30 cm、0.22 cm。不同坡位条件下, 胸径的生长规律具有差异 (图 1)。坡位上的差异主要表现在土壤肥力和土壤水分方面, 其中低坡位能够最有效地提供林木生长所需的养分, 进而促进林木的径向生长^[31-33]。苏妮尔等^[32]指出下坡位的土壤养分含量最高, 是大径材红皮云杉培育的最优坡位。

单木胸径生长模型的拟合结果显示, 不同生境压力下林木生长过程具有不同的理论生长方程, 但是大部分都符合传统的“S”形生长曲线 (除了 Mitscherlich 模型)。各最优胸径生长模型的 R^2 均在 0.913 以上, TRE 和 MSE 均在 $\pm 2\%$ 以内, MPE 大多在 5% 以内, MPSE 在 35% 以内 (表 2~3)。这与同一地区生长模型研究得到的结果接近。马克西等^[34]构建了青海省 4 个主要树种组的胸径生长率模型, 其中模型的 R^2 均在 0.93 以上, MPE 均在 0.3% 之内; 胸径生长量预估的 MPE 均在 2% 之内, MPSE 均在 60% 左右。

在基础模型上考虑起源和坡位对胸径生长量的影响, 建立了青海云杉单木胸径生长量混合效应模型, 结果显示混合模型的拟合效果均优于基础模型 (表 4~5)。在模型检验中, 混合模型仍然呈现较高的拟合精度, 其 TRE、MSE、MPE 和 MPSE

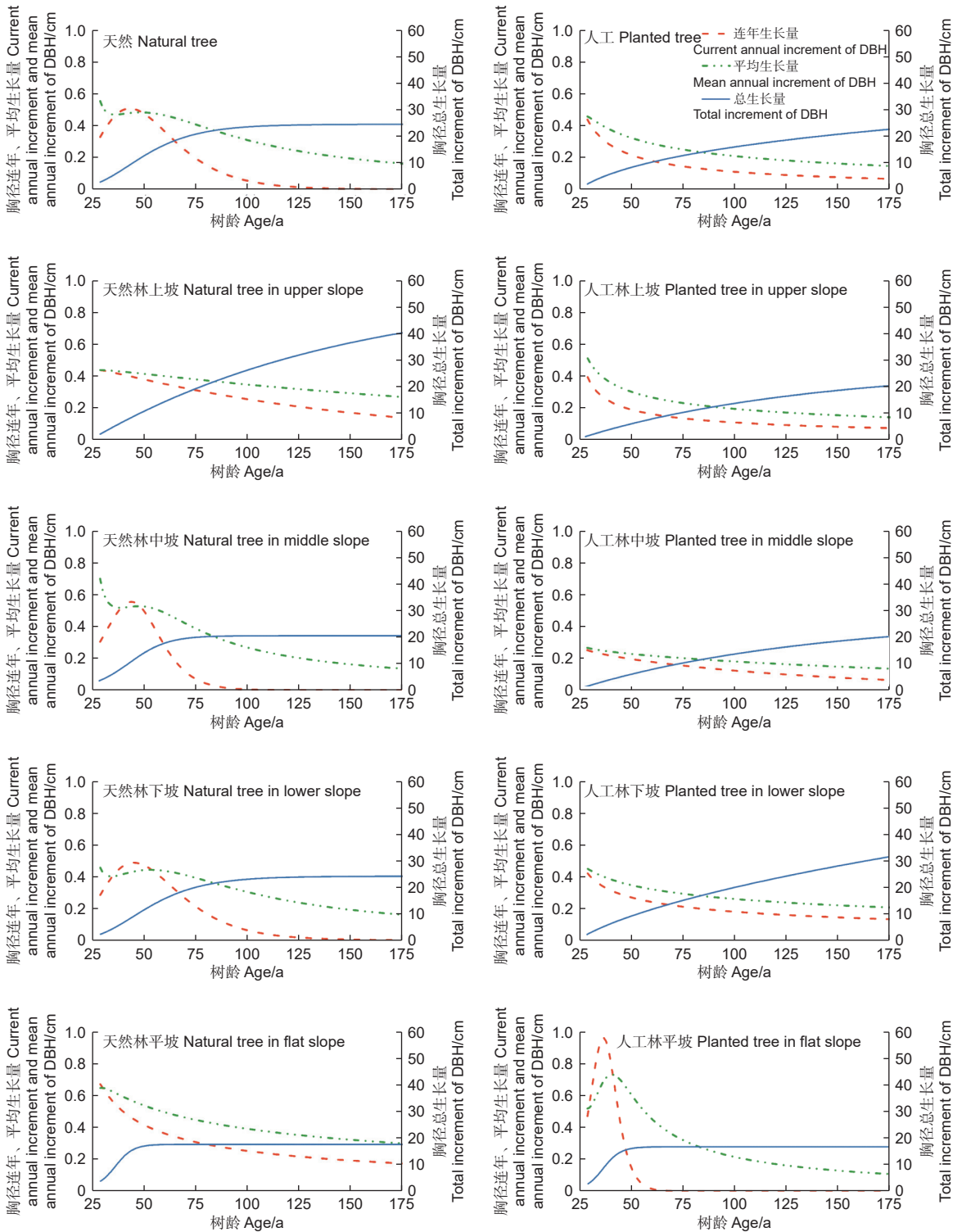


图 5 青海云杉单木胸径生长拟合曲线

Fig. 5 Individual-tree DBH growth curve for *Picea crassifolia*

较基础模型分别下降 89.3%、83.5%、20.6%、15.1%。这与大多数学者的研究结论一致^[4,6,8,21,26]。此外,模型拟合的精度还可能受到海拔、温度、降水、干旱等因素的影响^[12,17,35]。因此,未来气候变化下的森林管理与保护应充分考虑更多的地形、气

候差异对林木生长的影响。

5 结论

不同生境压力下的青海云杉胸径生长有不同的变化规律。单木胸径生长量随着年龄的增加而下

降,其中天然林的速生期较人工林的持续时间长,不同坡位条件下胸径生长规律具有差异。青海云杉单木胸径混合效应模型的拟合效果优于基础模型。因此,在未来的森林经营及保护中,这些模型适用于青海省不同生境压力下青海云杉的林木胸径生长量估算。

参考文献:

- [1] Sharma R P, Vacek Z, Vacek S, *et al.* Modelling individual tree diameter growth for Norway spruce in the Czech Republic using a generalized algebraic difference approach[J]. *Journal of Forest Science*, 2017, 63(5): 227-238.
- [2] 李慧婷. 青海华北落叶松林直径结构及生长模型研究[J]. *福建林业科技*, 2018, 45(2): 91-97.
- [3] 吕沅杭, 伊利启, 王儒林, 等. 基于空间结构参数的大兴安岭天然落叶松单木直径生长模型[J]. *林业科学研究*, 2021, 34(2): 81-91.
- [4] 李春明, 唐守正. 基于非线性混合模型的落叶松云冷杉林分断面积模型[J]. *林业科学*, 2010, 46(7): 106-113.
- [5] 曾伟生, 唐守正, 夏忠胜, 等. 利用线性混合模型和哑变量模型方法建立贵州省通用性生物量方程[J]. *林业科学研究*, 2011, 24(3): 285-291.
- [6] 姜立春, 刘瑞龙. 基于非线性混合模型的落叶松树干削度模型[J]. *林业科学*, 2011, 47(4): 101-106.
- [7] 张冬燕, 王冬至, 张志东, 等. 不同龄组华北落叶松人工林径向生长模型构建[J]. *山东农业大学学报(自然科学版)*, 2017, 48(3): 449-455.
- [8] 聂璐毅, 董利虎, 李凤日, 等. 基于两水平非线性混合效应模型的长白落叶松削度方程构建[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2022, 46(3): 194-202.
- [9] Lhotka J M, Loewenstein E F. An individual-tree diameter growth model for managed uneven-aged oak-shortleaf pine stands in the Ozark Highlands of Missouri, USA[J]. *Forest Ecology and Management*, 2011, 261(3): 770-778.
- [10] 吕延杰, 杨 华, 张 青, 等. 云冷杉天然林分空间结构对胸径生长量的影响[J]. *北京林业大学学报*, 2017, 39(9): 41-47.
- [11] 王 蒙, 李凤日. 基于抚育间伐效应的长白落叶松人工林单木直径生长模型[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2018, 42(3): 28-36.
- [12] 张 雷, 于澎涛, 王彦辉, 等. 祁连山北坡青海云杉中龄林生物量随海拔的变化[J]. *林业科学*, 2015, 28(4): 557-564.
- [13] 张中惠, 王彦辉, 郭建斌, 等. 六盘山华北落叶松单木树高对立地因子和林分特征的响应[J]. *林业科学研究*, 2022, 35(1): 1-9.
- [14] 方精云, 沈泽昊, 崔海亭. 试论山地的生态特征及山地生态学的研究内容[J]. *生物多样性*, 2004(1): 10-19.
- [15] 张 涛, 安黎哲, 陈 拓, 等. 不同海拔青海云杉与祁连圆柏叶片抗氧化系统[J]. *植物生态学报*, 2009, 33(4): 802-811.
- [16] 赵长明, 高贤良, 马仁义, 等. 祁连圆柏和青海云杉幼苗生理生态特征对土壤干旱胁迫的响应[J]. *冰川冻土*, 2012, 34(1): 147-154.
- [17] 夏敬清, 勾晓华, 王玲玲, 等. 祁连山西部青海云杉径向生长对气候因子的响应[J]. *应用生态学报*, 2021, 32(10): 3585-3593.
- [18] 杜龙全, 刘 峰, 史 舟, 等. 大面积高寒山区土壤养分空间预测与管理分区[J]. *土壤*, 2022, 54(6): 1273-1282.
- [19] 冶晓娟, 王永辉, 潘红忠, 等. 青海省植被NEP时空变化及驱动因素分析[J]. *干旱区研究*, 2022, 39(5): 1673-1683.
- [20] 孟宪宇. 测树学(第三版)[M]. 北京: 中国林业出版社, 2006.
- [21] 符利勇, 张会儒, 李春明, 等. 非线性混合效应模型参数估计方法分析[J]. *林业科学*, 2013, 49(1): 114-119.
- [22] Fang Z, Bailey R L. Nonlinear Mixed Effects Modeling for Slash Pine Dominant Height Growth Following Intensive Silvicultural Treatments[J]. *Forest Science*, 2001, 47(3): 287-300.
- [23] 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, 19(5): 83-86.
- [24] 兰 洁, 张毓涛, 李吉玫, 等. 新疆天山不同区域云杉树高、胸径、年龄相关关系研究[J]. *西部林业科学*, 2019, 48(2): 135-140.
- [25] 张守攻, 王军辉, 刘娇妹, 等. 青海云杉强化育苗技术研究[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2005(5): 33-38.
- [26] King D A, Davies S J, Noor N S M. Growth and mortality are related to adult tree size in a Malaysian mixed dipterocarp forest[J]. *Forest Ecology and Management*, 2006, 223(1): 152-158.
- [27] 刘兰娅, 勾晓华, 张 芬, 等. 升温对祁连山东部青海云杉径向生长的影响[J]. *应用生态学报*, 2021, 32(10): 3576-3584.
- [28] 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.
- [29] 王学福, 郭生祥. 祁连山青海云杉个体生长过程分析[J]. *林业实用技术*, 2014(7): 10-13.
- [30] 杨文娟. 祁连山青海云杉林空间分布和结构特征及蒸散研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2018.
- [31] Mei X, Zhu Q, Ma L, *et al.* Effect of stand origin and slope position on infiltration pattern and preferential flow on a Loess hill-slope[J]. *Land Degradation & Development*, 2018, 29(5): 1353-1365.
- [32] 苏妮尔, 沈海龙, 丁佩军, 等. 不同坡位红皮云杉林木生长与土壤理化性质比较[J]. *森林工程*, 2020, 36(2): 6-11 + 19.
- [33] 张梦旭, 刘 蔚, 朱 猛, 等. 祁连山森林草原带土壤属性和植被生物量对坡向和坡位的响应[J]. *冰川冻土*, 2021, 43(1): 233-241.
- [34] 马克西, 曾伟生, 侯晓巍. 青海省林木胸径生长量与生长率模型研究[J]. *林业资源管理*, 2018(4): 22-27.
- [35] Wang B, Yu P, Zhang L, *et al.* Differential Trends of Qinghai Spruce Growth with Elevation in Northwestern China during the Recent Warming Hiatus[J]. *Forests*, 2019, 10(9): 1-14.

Diameter Growth Models of *Picea crassifolia* from Different Habitats in Qinghai Province

MA Hao¹, CHEN Ke-yi², XU Gan-jun¹, DANG Yu-jie¹, HE You-jun², WANG Jian-jun²

(1. Survey & Planning Institute of National Forestry and Grassland Administration, Xian 710048, Shanxi, China; 2. Research Institute of Forestry Policy and Information, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China)

Abstract: [Objective] The growth regularity and diameter at breast height (DBH) growth model of *Picea crassifolia* from different habitats were studied, which will provide empirical models and reference basis for forest protection and management. [Method] Base on the tree-ring data of *Picea crassifolia* in Qinghai province, the increment of tree DBH was used to analyze tree growth in different habitats. Then, five kinds of individual-tree growth models were constructed, and compared according to the model goodness of fit and indexes. Finally, origin and slope position effects were considered to develop mixed effects models, and the evaluation indices of different models were used. [Result] When trees grew to breast height, the increment of individual trees decreased with age and then changed gently. The fast-growing period of *Picea crassifolia* natural forests and plantations was 29—44 a and 29—39 a, respectively. The current annual increment of DBH (CAI) and mean annual increment of DBH (MAI) of natural *Picea crassifolia* were above 0.40 cm. CAI and MAI of natural forests changed slowly, while the trees growth of plantations had relatively large variation ranges. The trend of DBH increment of *Picea crassifolia* were different among four slope positions. The results of optimal individual-tree growth models developed along different habitats showed that the determination coefficients (R^2) were above 0.913, the total relative error (TRE) and the average system error (MSE) were within $\pm 2\%$, the average prediction errors (MPE) were less than 5% mostly, and the average percentage standard errors (MPSE) were less than 35%. Based on the Gompertz model, the R^2 of mixed effects model was 0.702, the TRE, MSE, MPE and MPSE of mixed effect model were 0.03%, -0.30%, 4.23% and 29.54%, respectively, decreased by 89.3%, 83.5%, 20.6% and 15.1% compared with that of based model. [Conclusion] The growth patterns of *Picea crassifolia* are different under different habitats. The *Picea crassifolia* of natural forests have a longer vigorous growing period than that plantations. The mixed effect model of individual-tree growth of DBH considering the different habitats, can be used to estimate the changes of DBH for *Picea crassifolia* in Qinghai province.

Keywords: diameter increment; growth regularity; individual-tree growth model; mixed effect model; Qinghai Province

(责任编辑: 彭南轩)