

辽宁章古台樟子松生长过程分析

雷泽勇¹, 韩艳刚¹, 赵国军², 周晏平¹, 张岩松¹, 于德良¹

(1. 辽宁工程技术大学 环境科学与工程学院, 辽宁 阜新 123000; 2. 辽宁省固沙造林研究所, 辽宁 阜新 123000)

摘要: 樟子松 *Pinus sylvestris* var. *mongolica* 引种至沙地, 经过 60 多年的生长已经到了生命周期的末期。及时总结第 1 代沙地樟子松的生长过程, 可以更好地为沙地樟子松的推广、更新、经营管理提供理论依据。选择引种地辽宁章古台不同立地条件下 30 a 以上樟子松人工林标准地(11 块)的平均木作为解析木(11 株), 求解 Richards 模型的参数并检验模型的拟合性, 运用建立的 Richards 模型求解沙地樟子松的各种特征值, 从而揭示沙地樟子松的生长进程。结果表明: ①樟子松的生长能够用 Richards 模型很好地模拟, 残差符合正态分布, 显著性均大于 0.05。模型的参数值分别为树高: 14.179, 0.084, 2.803; 胸径: 19.379, 0.075, 1.712; 材积: 0.296, 0.062, 5.926。②引种到章古台沙地的第 1 代樟子松, 树高在第 12.3 年连年生长量达到最大值 $0.54 \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$, 第 21.4 年平均生长量达到最大值 $0.39 \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$; 胸径平均在 6.6 a 后开始生长, 第 14.0 年连年生长量达到最大值 $0.77 \text{ cm} \cdot \text{a}^{-1}$, 第 26.0 年时平均生长量达到最大值 $0.47 \text{ cm} \cdot \text{a}^{-1}$; 材积生长在 12.0 a 之前生长缓慢, 第 29.0 年其连年生长量达到最高值 $0.007 4 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$, 平均生长量在第 47.0 年达到最大(即林木数量成熟年龄), 最大平均生长量达 $0.004 5 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$ 。樟子松引种到章古台后, 生长进程加快, 生命周期缩短, 成熟期提前。图 2 表 3 参 28

关键词: 森林测计学; Richards 模型; 沙地; 樟子松; 树高; 胸径; 材积; 生长过程

中图分类号: S727.23

文献标志码: A

文章编号: 2095-0756(2018)02-0324-07

Growth of Mongolian pine in Zhanggutai of Liaoning Province

LEI Zeyong¹, HAN Yangang¹, ZHAO Guojun², ZHOU Yanping¹, ZHANG Yansong¹, YU Deliang¹

(1. College of Environmental Science and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, Liaoning, China;

2. Liaoning Province Sand-Fixation and Afforestation Research Institute, Fuxin 123000, Liaoning, China)

Abstract: The aim is to summarize the growth process for first generation Mongolian pine (*Pinus sylvestris* var. *mongolica*) on sandy land, where its life cycle ends after about 60 years, and to provide a theoretical basis for promotion, regeneration, and management of a Mongolian pine plantation. 11 trees were selected for analysis, chosen from standard plots of 11 Mongolian pine plantation stands (>30 a) with different site conditions in Zhanggutai of Liaoning Province. Then parameters for Richards model were solved and the goodness-of-fit was tested. To reveal the growth process of Mongolian pine, eigenvalues of Mongolian pine trees were used in Richards Equation. Results of height, diameter at breast height (DBH), and volume of Mongolian pine were simulated by Richards model with the parameter estimated values of 14.179, 0.084, and 2.803 for height; 19.379, 0.075, and 1.712 for DBH; and 0.296, 0.062, and 5.926 for volume. For tree height growth of first generation Mongolian pine introduced to Zhanggutai, the relative growth rate reached its maximum of $0.54 \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$ at year 12.3, and the average growth rate achieved its peak at year 21.4 with $0.39 \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$. Growth of DBH for trees started at year 6.6 with the relative growth rate reaching its maximum of $0.77 \text{ cm} \cdot \text{a}^{-1}$ at year 14.0 and the average growth rate achieving its peak at year 26.0 with $0.47 \text{ cm} \cdot \text{a}^{-1}$. Volume growth was very slow before age 12.0 with the relative growth rate reaching its maximum of $0.007 4 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$ at 29.0 years, the average growth rate

收稿日期: 2017-02-28; 修回日期: 2017-03-31

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(31570709)

作者简介: 雷泽勇, 教授, 从事森林生态工程与荒漠化研究。E-mail: zeyonglei@163.com

achieving its peak at year 47.0 with $0.004\ 5\ \text{m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$. The quantitative maturity age, when the maximum of average growth rate of volume appears, was 47.0 years of Mongolian pine in Zhanggutai. We drew a conclusion that the maximum of relative growth rate of height, DBH and volume of Mongolian pine appear at the age of 12.3 a, 14.0 a and 29.0 a, respectively. The maximum of average growth rate of height, DBH and volume appear at the age of 21.4, 26.0 and 47.0 years, respectively. The quantitative maturity appears in the 47th year after planting. [Ch, 2 fig. 3 tab. 28 ref.]

Key words: forest measurement; Richards model; sandy land; *Pinus sylvestris* var. *mongolica*; tree height; diameter at breast height; volume; growth process

樟子松 *Pinus sylvestris* var. *mongolica* 主要天然分布区为中国黑龙江大兴安岭海拔 400~900 m 山地及海拉尔以西、以南一带沙丘地区, 于 20 世纪 50 年代被成功地引种到辽宁省阜新市彰武县章古台(科尔沁沙地东南前缘)。樟子松喜光、抗旱、耐寒、耐瘠薄、干形优良、生长迅速、根系发达, 迅速成为中国北方地区重要的造林树种。作为中国最早引种成功樟子松的地区, 辽宁省章古台现已发展成为樟子松国家良种基地, 每年生产数以亿株优良的樟子松苗木和优良种子供应中国北方 19 省(自治区、直辖市)造林和用种。引种的同时, 学者们先后开展了樟子松对引种地环境的适应性、引种地栽植密度、种源选择、林分自然稀疏规律、人工林群落稳定性、引种地樟子松提早衰退原因、幼苗生理生态、人工林土壤营养等方面的科学研究^[1-9], 取得了显著的成就。经过 60 多年的生长, 引种的第 1 代沙地樟子松人工林逐渐退出了历史舞台, 为了给推广地区沙地樟子松林的营建以及下一代人工林的更新及经营管理提供理论依据, 有必要对第 1 代沙地樟子松的生长过程进行总结。林木或林分生长受立地、气候等多种因子的影响^[10-13], 通过测定树高或胸径因子, 计算材积大小, 利用生长函数能够揭示立地或气候等影响因子对林分高(或林木高)或胸径的影响规律^[11,14-16]。诸多函数中, Richards 模型由于具有广泛的适应性、合理的解析性和良好的拟合性而应用广泛^[17-22], 同时樟子松生长曲线为“S”或反“J”型^[22], 而 Richards 函数是单调递增函数, 存在 1 个拐点, 具备“S”或反“J”型。因此, 本研究选择不同立地条件下 30 a 以上的第 1 代沙地樟子松人工林标准地进行每木调查, 每块标准地选出 1 株平均木做解析木, 获取平均木的树高、胸径、材积数据, 建立 Richards 模型并检验, 然后运用建立的模型计算沙地樟子松生长过程中的特征值, 利用特征值分析第 1 代沙地樟子松的生长过程。

1 试验地概况及数据整理

试验地位于辽宁省固沙造林研究所章古台试验基地($42^{\circ}43' \sim 43^{\circ}20' \text{N}$, $122^{\circ}22' \sim 123^{\circ}22' \text{E}$), 该区地处科尔沁沙地东南前缘, 年平均降水量 1959–1965 年为 512.2 mm, 1983–1987 年为 499.7 mm, 2005–2015 为 518.24 mm, 年平均蒸发量为 1 762 mm, 年平均气温为 6.2 $^{\circ}\text{C}$, $\geq 10\ ^{\circ}\text{C}$ 年积温平均为 2 890 $^{\circ}\text{C}$, 无霜期平均为 154 d, 土壤主要为生草固定风沙土和流动风沙土, 流动风沙土的物理性沙粒占 94.7%, 物理性黏粒占 5.3%, 养分含量比较低, 有机质质量分数为 0.6~1.6 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 全氮质量分数为 0.17~0.38 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 磷(P_2O_5)质量分数为 0.12~0.27 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。代表性植物主要有蒺藜梗 *Agriophyllum squarrosum*, 小黄柳 *Salix gordejewii*, 差巴蒿 *Artemisia halodendron*, 拂子茅 *Calamagrostis epigeios*, 山杏 *Armeniaca sibirica*, 榆树 *Ulmus pumila* 等。由于树干解析对于研究较大年龄树木生长具有巨大优势, 所以于 2014 年 9 月选择了 30 年生以上的不同立地的樟子松标准地 11 块进行每木调查, 每块样地的平均木作为解析木, 共计 11 株解析木。各解析木伐根处取 0 号圆盘, 0.5 m 处取 1 号圆盘, 1.3 m 处取 2 号圆盘, 1.5 m 处取 3 号圆盘, 以后隔 1 m 取 1 个圆盘。量测直径时, 2 a 为 1 个龄阶, 东西和南北 2 个方向上同一龄阶的平均值即为该龄阶的直径, 各龄阶的树高用内插法按比例计算得到, 各龄阶的材积按伐倒木区分求积法计算得到。解析木信息如表 1。

2 研究方法

通过解析木资料得到各龄阶树高、胸径、材积生长量值, 计算 11 株解析木各龄阶对应的树高、胸径、材积生长量的平均值, 通过 SPSS 20 的非线性回归方法求出模型各参数值和决定系数, 然后运用模

型计算沙地樟子松的各特征值并进行分析。

2.1 生长模型的建立

2.1.1 总生长量函数 Richards 模型是基于 Bertalanffy 生长理论扩展而来,生物生长的实质是同化与异化综合作用的结果,由于树木生长的不可逆性,其同化作用效果必定大于或等于异化作用效果,同时由于树木生长的阻滞性,树木同化作用效果一般与其大小的 m 次幂呈正比,即 $m < 1$,树木异化作用的效果一般与其大小成线性递增关系。因此,树木的生长能够表达为:

$$\frac{dy}{dt} = \alpha y^m - \beta y. \quad (1)$$

式(1)中: y 为树木总生长量,包括树高(m),胸径(cm)和材积(m^3), t 为树木年龄(a), α , β , m 是参数,实际上,树木的瞬间生长量经常用期间生长量代替。对应的生长方程为:

$$\begin{cases} y = A(1 - \gamma e^{-kt})^{\frac{1}{1-m}} \\ A = (\frac{\alpha}{\beta})^{\frac{1}{1-m}} \\ k = \beta(1-m) \\ \gamma = e^{kt_0} \end{cases} \quad (2)$$

式(2)中: A 是当 $t \rightarrow \infty$ 的一条渐近线, k 是和生长率相关的参数, m 是形状参数, t_0 为 $y=0$ 时的年龄,如果 $t_0=0$,那么 $\gamma=1$ 。对于树木来说,树高和材积生长满足 $t=0$ 时, $y=0$ 的初始条件,同时满足 $y=0$ 时, $t_0=0$; 胸径生长满足 $t=t_0$ (生长至 1.3 m 所需的年龄), $y=0$ 。令 $1/(1-m)=c$, 得到树高和材积生长方程为式(3), 胸径生长方程为式(4)。

$$y = A(1 - e^{-kt})^c; \quad (3)$$

$$y = A(1 - e^{-k(t-t_0)})^c. \quad (4)$$

2.1.2 连年生长量函数 连年生长量 Z_t 是说明树木在某一年的实际生长速度,即连年生长量是树木年龄 t 的函数,其生长函数为:

$$Z_t = \frac{dy(t)}{dt}. \quad (5)$$

式(5)是对式(3)和式(4)取一阶导数得到。即树高和材积连年生长量方程为:

$$Z_t = \frac{dy(t)}{dt} = A k c (1 - e^{-kt})^{c-1} e^{-kt}. \quad (6)$$

胸径的连年生长量方程为:

$$Z_t = \frac{dy(t)}{dt} = A k c (1 - e^{-k(t-t_0)})^{c-1} e^{-k(t-t_0)}. \quad (7)$$

对连年生长量式(6)和式(7)取一阶导数,并令导数值为 0,可以得到连年生长量达到极大值时的年龄 $t_{Z_{\max}}$ 和极大值 $Z_{\max}$ 。即对于树高和材积连年生长量有:

$$\text{令 } \frac{dZ(t)}{dt} = \frac{d^2y(t)}{dt^2} = (kc)^2 y(t) \left[1 - \left(\frac{A}{y(t)} \right)^{\frac{1}{c}} \right] \left[1 - \left(\frac{c-1}{c} \right) \left(\frac{A}{y(t)} \right)^{\frac{1}{c}} \right] = 0.$$

得到:

$$t_{Z_{\max}} = \frac{\ln c}{k}; \quad (8)$$

$$Z_{\max} = A k \left(\frac{c-1}{c} \right)^{c-1}. \quad (9)$$

同理, 胸径连年生长量为:

$$t_{Z_{\max}} = t_0 + \frac{\ln c}{k}. \quad (10)$$

表 1 沙地樟子松解析木信息

Table 1 Stem analysis information of Mongolian pine

立地	年龄/a	数量/株	树高/m	胸径/cm
沙丘顶部	30~35	1	9.0	14.94
	40	1	11.6	19.10
平坦沙地	35	1	13.2	22.75
	34	1	12.4	20.55
丘间低地	40~50	2	14.2~15.5	19.90~20.65
沙丘中部	30~40	1	9.8	18.00
	30~40	2	9.9~10.3	14.40~16.80
	50~60	2	13.0~13.3	20.90~22.80

将式(10)代入式(7)得到胸径连年生长量极大值 $Z_{\max}$ 。

2.1.3 平均生长量函数 平均生长量函数 $\theta(t)$ 是说明树木在某一时刻 t 的平均生长速度，即总平均生长量是树木年龄 t 的函数。其方程为：

$$\theta(t)=\frac{y(t)}{t}=\frac{A}{t}(1-e^{-kt})^c。$$

(11)

对式(11)求一阶导数，并令一阶导数值为 0，可得到平均生长量达到极大值时的年龄 $t_{\theta\max}$ 和极大值 $\theta_{\max}$ 。即树高和材积平均生长量为：

$$\frac{d\theta(t)}{dt}=\frac{A}{t}(1-e^{-kt})^{c-1}\left[cke^{-kt}-\frac{1}{t}(1-e^{-kt})\right]=0。$$

(12)

式(12)运用迭代法在 MATLAB 上运算求解，得到 $t_{\theta\max}$ ，代入式(11)求出 $\theta_{\max}$ 。同理求出胸径的平均生长量达到极大值时的年龄 $t_{\theta\max}$ 和极大值 $\theta_{\max}$ 。

2.2 生长模型评价

检验一：利用解析木资料得到模型参数后，计算残差(R_e)= $y_j-\hat{y}_j$ ，检验残差值是否满足正态分布。
检验二：计算决定系数 R^2 值， $R^2=S_{SR}/S_{SJ}$ 。 S_{SR} 为回归平方和， S_{SJ} 为总平方和。 R^2 越大，说明模型拟合越好。

3 结果与分析

通过综合不同立地条件的解析木数据，得到生长模型参数估计值和决定系数值(表 2)，检验结果显示残差值满足正态分布。因此，所建 Richards 模型可以用来拟合沙地樟子松的生长，拟合结果见图 1。将所得到的模型参数代入式(3)，令 $y=1.3$ m，求出时间 t ， t 即为树木长到 1.3 m 时所需要的时间 $t_0=6.6$ a。将所得到的模型参数代入式(8)式(9)式(10)并求解得到树高、胸径、材积连年生长量最大值及达到最大值的时间，用模型参数及迭代法解式(12)得到树高、胸径、材积平均生长量最大值及达到最大值的年龄，将这些沙地樟子松生长的特征值一并列入表 3。同时将树高、胸径、材积的连年生长量与平均生长量曲线绘制成图 2。

3.1 沙地樟子松树高生长过程

一般认为，树高生长随年龄的增加而增加，到一定时期后，其生长率逐渐下降^[23]。引种地与原产地气候因子的差异，会导致树木因适应气候变化而发生响应^[24]。沙地樟子松从内蒙古红花尔基引种到科尔沁沙地的章古台后，树高生长从 6.0 a 后便进入旺盛生长期，连年生长量逐年加大。在 12.3 a 时连年生长量达最大，为 $0.54\text{ m}\cdot\text{a}^{-1}$ ；而且这种旺盛的生长一直持续(图 1，表 3)，到 21.4 a 时，即图 2 中连年生长量和平均生长量的交点，沙地樟子松平均生长量达最高峰，为 $0.39\text{ m}\cdot\text{a}^{-1}$ ；21.0 a 后，树木的平均生长量开始下降，树高的旺盛生长期结束，前后经历 15.0 a 的时间。这一结果和其他学者早期的研究结果相符合^[22,25]，实测和预测表明：到 40.0 a 后，沙地樟子松人工林的连年高生长量降低到 0.20 m 以下，这与学者早期预测的结果有明显出入^[26]。

3.2 沙地樟子松胸径生长过程

胸径是表征树木生长的另一个重要指标。图 1 表明：樟子松引种到章古台后，经过 6.6 a 就开始了胸径生长；第 10.0 年开始，胸径便进入旺盛生长阶段；到第 14.0 年连年生长量达最大，为 $0.77\text{ cm}\cdot\text{a}^{-1}$ ；到第 26.0 年时平均生长量达最大，为 $0.47\text{ cm}\cdot\text{a}^{-1}$ (表 3)。和树高相比，胸径进入旺盛生长的年龄晚 4.0 a，达到连年生长量最大的年龄比树高晚 2.0 a，达到平均生长量最大值的年龄比树高要晚 5.0 a。实测和预测值表明：44.0 a 后，胸径的连年生长量下降到 $0.2\text{ cm}\cdot\text{a}^{-1}$ 以下。

表 2 樟子松生长模型参数表

Table 2 Parameter estimates of Richards model on Mongolian pine

测树因子	A	k	c	$Sig.y_j-\hat{y}_j$	决定系数 R^2
树高	14.179	0.084	2.803	0.088	0.994
胸径	19.379	0.075	1.712	0.200	0.998
材积	0.296	0.062	5.926	0.139	0.996

表 3 樟子松树高、胸径、材积生长的特征值表

Table 3 Height (H), diameter at breast height (D_{BH}) and volume (V) growth eigen values on Mongolian pine

测树因子	$t_{Z\max}$	$Z_{\max}$	$t_{\theta\max}$	$\theta_{\max}$
树高	12.3	0.54	21.4	0.39
胸径	13.8	0.77	26.0	0.47
材积	28.7	0.007 4	46.8	0.004 5

3.3 沙地樟子松材积生长过程

材积是反映树木生长的一个综合指标,随树高、胸径的增加而增加^[27]。引种到章古台沙地的樟子松材积生长在 12.0 a 之前生长缓慢,随着树高和胸径的加快生长,12.0 a 之后材积开始加快生长(图 1),在第 29.0 年其连年生长量达最高值($0.0074 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$),而平均生长量达最大时的年龄为 47.0 a,平均最大生长量达 $0.0045 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$ (表 3)。在测树学上,材积连年生长量曲线和平均生长量曲线的交点(即平均生长量最大值点)有重要的意义,该点是树木达到数量成熟的时间点,因此,引种到章古台的沙地樟子松数量成熟年龄为 47.0 a。数量成熟后,树木的材积连年生长量便开始显著下降。实测值表明,第 48.0 年的连年生长量值只有 $0.0024 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$,第 50.0 年下降到 $0.0020 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$ 。相较于树高和胸径,材积旺盛生长的年龄比较晚,持续的时间比较长,但不论是达到连年生长量最大值时的年龄还是达到平均生长量最大值时的年龄均晚于树高和胸径。

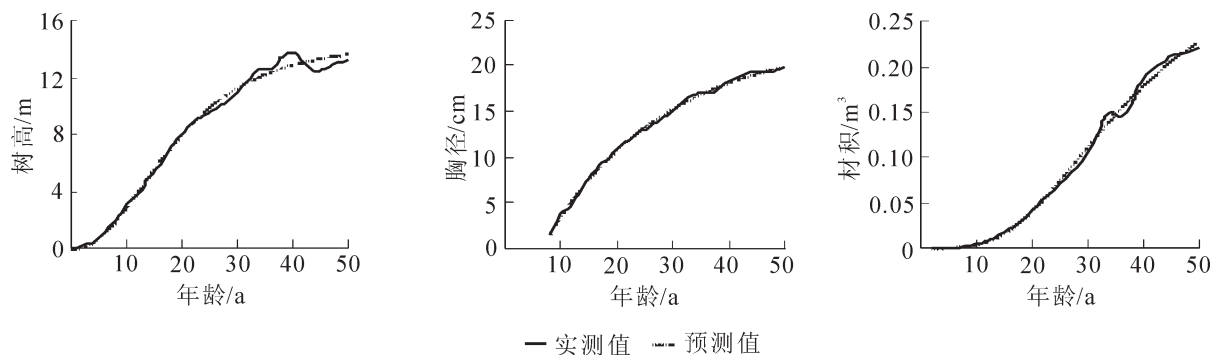


图 1 沙地樟子松树高、胸径、材积生长量观测值与模型预测值曲线

Figure 1 Measurement and predictive value of increment for H , D_{BH} and V of mongolian pine on sandy land

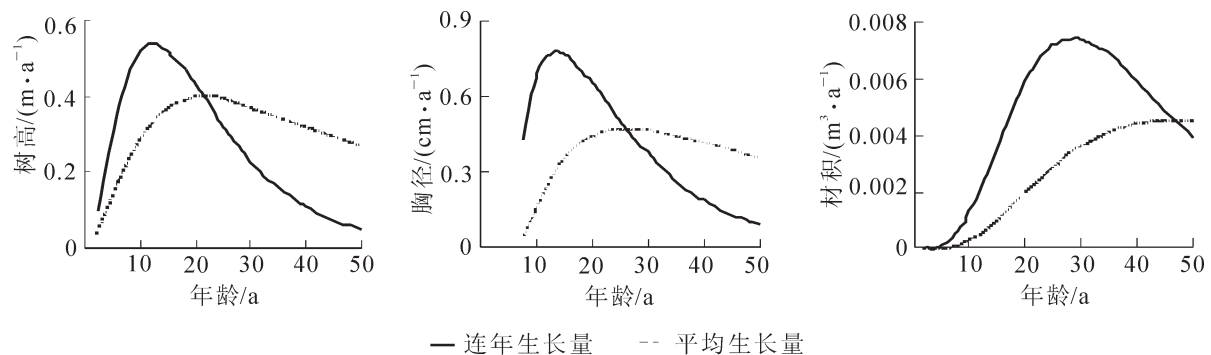


图 2 沙地樟子松人工林树高、胸径、材积连年生长量、平均生长量

Figure 2 Annual and average increment for H , D_{BH} and V of mongolian pine in sandy land

4 结论与讨论

选择引种地不同立地条件下 30 a 以上的樟子松人工固沙林为标准地,以标准地的平均木做解析木,求解 Richards 模型的参数并检验模型的拟合性,运用建立的 Richards 模型求解沙地樟子松的各种特征值,揭示沙地樟子松在引种地生长过程。结论如下:①建立的关于树高、胸径、材积生长的 Richards 模型拟合性好,决定系数分别达 0.994, 0.998, 0.996, 残差(R_e)符合正态分布,且显著性均大于 0.05, 3 个参数分别为树高: 14.179, 0.084, 2.803; 胸径: 19.379, 0.075, 1.712; 材积: 0.296, 0.062, 5.926。②樟子松引种到章古台后,树高在第 12.3 年连年生长量达最大,为 $0.54 \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$, 21.4 a 平均生长量达到最高峰,最大值为 $0.39 \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$; 经过 6.6 a 就开始了胸径生长,第 14.0 年连年生长量达最大,为 $0.77 \text{ cm} \cdot \text{a}^{-1}$, 第 26.0 年时平均生长量达最大,为 $0.47 \text{ cm} \cdot \text{a}^{-1}$; 材积在 12.0 a 之前生长缓慢,第 29.0 年其连年生长量达最高值,为 $0.0074 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$, 平均生长量达最大时的年龄为 47.0 a, 最大达 $0.0045 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$, 引种到章古台的沙地樟子松数量成熟年龄为 47.0 a。

由于章古台和原产地的气候因子有较大差别^[5,23,26],樟子松自引种到章古台后,和原产地比较,引种

地的降水量、气温、蒸发量、无霜期等均增加, 生长季变长。樟子松为了适应新的生长环境, 不得不调整自身原有的生长节律, 树高、胸径、材积旺盛生长开始的时间提前^[22,26], 但持续的时间缩短。数量成熟年龄在原产地为 102.0 a^[23], 而在引种地, 数量成熟年龄仅为 47.0 a, 比朱教君等^[23]研究的 43.0 a 略长, 和姜凤岐等^[28]预测的 46.0 a 大致一致。因此, 樟子松引种到章古台后, 其生长进程加快, 生命周期缩短, 成熟期提前。这种变化与其说是生长环境导致的“早衰”, 不如说是樟子松引种到新的地区后, 为适应新的生长环境而做出的自身调整的结果。有必要及时发现树木本身的这种改变, 调整经营管理措施, 为树木更好地生长创造条件。

5 参考文献

- [1] 李蒙蒙, 丁国栋, 高广磊, 等. 樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica*)在中国北方 10 省(区)引种的适宜性[J]. 中国沙漠, 2016, **36**(4): 1021 – 1028.
LI Mengmeng, DING Guodong, GAO Guanglei, et al. Introduction suitability of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* in 10 northern provinces of China [J]. *J Des Res*, 2016, **36**(4): 1021 – 1028.
- [2] 移小勇, 赵哈林, 崔建垣, 等. 科尔沁沙地不同密度(小面积)樟子松人工林生长状况[J]. 生态学报, 2006, **26**(4): 1200 – 1206.
YI Xiaoyong, ZHAO Halin, CUI Jianyuan, et al. Growth of small area *Pinus sylvestris* var. *mongolica* artificial forest under different densities in Horqin sandy land, north of China [J]. *Acta Ecol Sin*, 2006, **26**(4): 1200 – 1206.
- [3] 曾德慧, 姜凤岐, 范志平, 等. 沙地樟子松人工林自然稀疏规律[J]. 生态学报, 2000, **20**(2): 235 – 242.
ZENG Dehui, JIANG Fengqi, FAN Zhiping, et al. Self-thinning of even-aged pure plantations of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* on sandy soil [J]. *Acta Ecol Sin*, 2000, **20**(2): 235 – 242.
- [4] 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 Dehui, JIANG Fengqi, FAN Zhiping, et al. Stability of Mongolian pine plantations on sandy land [J]. *Chin J Appl Ecol*, 1996, **7**(4): 337 – 343.
- [5] 焦树仁. 辽宁省章古台樟子松固沙林提早衰弱的原因与防治措施[J]. 林业科学, 2001, **37**(2): 131 – 138.
JIAO Shuren. Report on the causes of the early decline of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* shelterbelt and its preventative and control measures in Zhanggutai of Liaoning Province [J]. *Sci Silv Sin*, 2001, **37**(2): 131 – 138.
- [6] 朱教君, 康宏樟, 李智辉, 等. 水分胁迫对不同年龄沙地樟子松幼苗存活与光合特性影响[J]. 生态学报, 2005, **25**(10): 2527 – 2533.
ZHU Jiaojun, KANG Hongzhang, LI Zhihui, et al. Impact of water stress on survival and photosynthesis of Mongolian pine seedlings on sandy land [J]. *Acta Ecol Sin*, 2005, **25**(10): 2527 – 2533.
- [7] 康宏樟, 朱教君, 许美玲. 科尔沁沙地樟子松人工林幼树水分生理生态特性[J]. 干旱区研究, 2007, **24**(1): 15 – 22.
KANG Hongzhang, ZHU Jiaojun, XU Meiling. Study on water physiological properties of the artificially-planned saplings of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* in the Horqin sand land [J]. *Arid Zone Res*, 2007, **24**(1): 15 – 22.
- [8] 陈伏生, 曾德慧, 范志平, 等. 章古台沙地樟子松人工林土壤有效氮的研究[J]. 北京林业大学学报, 2005, **27**(3): 6 – 11.
CHEN Fusheng, ZENG Dehui, FAN Zhiping, et al. Available nitrogen in forest soil of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantations in Zhanggutai sandy lands [J]. *J Beijing For Univ*, 2005, **27**(3): 6 – 11.
- [9] 陈伏生, 曾德慧, 范志平, 等. 沙地不同树种人工林土壤氮素矿化过程及其有效性[J]. 生态学报, 2006, **26**(2): 341 – 348.
CHEN Fusheng, ZENG Dehui, FAN Zhiping, et al. Comparative nitrogen mineralization and its availability in certain woody plantations in Keerqin sand lands, China [J]. *Acta Ecol Sin*, 2006, **26**(2): 341 – 348.
- [10] ALLEN C D, MACALADY A K, CHENCHOUNI H, et al. A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests [J]. *For Ecol Manage*, 2010, **259**(4): 660 – 684.
- [11] CARNWATH G C, PETERSON D W, NELSON C R. Effect of crown class and habitat type on climate-growth relationships of ponderosa pine and Douglas-fir [J]. *For Ecol Manage*, 2012, **285**(1): 44 – 52.
- [12] DAS A. The effect of size and competition on tree growth rate in old-growth coniferous forests [J]. *Can J For Res*,

- 2012, **42**(11): 1983 – 1995.
- [13] FORD K R, BRECKHEIMER I K, FRANKLIN J F, *et al.* Competition alters tree growth responses to climate at individual and stand scales [J]. *Can J For Res*, 2017, **47**(1): 53 – 62.
- [14] ALLEN M G II, BURKHART H E. Comparison of alternative data sources for modeling site index in loblolly pine plantations [J]. *Can J For Res*, 2015, **45**(8): 1026 – 1033.
- [15] GARCÍA O, BURKHART H E, AMATEIS R L. A biologically-consistent stand growth model for loblolly pine in the Piedmont physiographic region, USA [J]. *For Ecol Manage*, 2011, **262**(11): 2035 – 2041.
- [16] 姜立春, 杜书立. 基于非线性混合模型的东北兴安落叶松树高和直径生长模拟[J]. 林业科学研究, 2012, **25**(1): 11 – 16.
- JIANG Lichun, DU Shuli. Height and diameter growth modeling of dahurian larch based on nonlinear mixed model in northeastern China [J]. *For Res*, 2012, **25**(1): 11 – 16.
- [17] 段爱国, 张建国, 童书振. 6种生长方程在杉木人工林林分直径结构上的应用[J]. 林业科学研究, 2003, **16**(4): 423 – 429.
- DUAN Aiguo, ZHANG Jianguo, TONG Shuzhen. Application of six growth equations on stands diameter structure of Chinese fir plantations [J]. *For Res*, 2003, **16**(4): 423 – 429.
- [18] 孙晓梅, 张守攻, 孔凡斌, 等. 日本落叶松家系对树高生长模型参数的影响[J]. 林业科学, 2005, **41**(1): 78 – 84.
- SUN Xiaomei, ZHANG Shougong, KONG Fanbin, *et al.* Analyzing parameters of height-age models for open-pollinated Japanese larch families [J]. *Sci Silv Sin*, 2005, **41**(1): 78 – 84.
- [19] 张雄清, 张建国, 段爱国. 基于贝叶斯法估计杉木人工林树高生长模型[J]. 林业科学, 2014, **50**(3): 69 – 75.
- ZHANG Xiongqing, ZHANG Jianguo, DUAN Aiguo. Tree-height growth model for Chinese fir plantation based on Bayesian method [J]. *Sci Silv Sin*, 2014, **50**(3): 69 – 75.
- [20] 姚丹丹, 雷相东, 张则路. 基于贝叶斯法的长白落叶松林分优势高生长模型研究[J]. 北京林业大学学报, 2015, **37**(3): 94 – 100.
- YAO Dandan, LEI Xiangdong, ZHANG Zelu. Bayesian parameter estimation of dominant height growth model for Changbai larch (*Larix olgensis* Henry) plantations [J]. *J Beijing For Univ*, 2015, **37**(3): 94 – 100.
- [21] TOMEÉ J, TOMÉ M, BARREIRO S, *et al.* Age-independent difference equations for modeling tree and stand growth [J]. *Can J For Res*, 2006, **36**(7): 1621 – 1630.
- [22] ZHU Jiaojun, FAN Zhiping, ZENG Dehui, *et al.* Comparison of stand structure and growth between plantation and natural forests of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* on sandy land [J]. *J For Res*, 2003, **14**(2): 103 – 111.
- [23] 朱教君, 曾德慧, 康宏樟, 等. 沙地樟子松人工林衰退机制[M]. 北京: 中国林业出版社, 2005: 41 – 47.
- [24] 孙毓, 王丽丽, 陈津, 等. 中国落叶松属树木年轮生长特性及其对气候变化的响应[J]. 中国科学: 地球科学, 2010, **40**(5): 645 – 653.
- SUN Yu, WANG Lili, CHEN Jin, *et al.* Growth characteristics and response to climate change of *Larix* Miller tree-ring in China [J]. *Sci Chin Earth Sci*, 2010, **40**(5): 645 – 653.
- [25] 焦树仁. 干旱对章古台沙地樟子松人工林生长的影响[J]. 林业科学, 1986, **22**(4): 419 – 425.
- JIAO Shuren. The influence of aridity on the growth of Mongolian pine plantation in Zhanggutai sand land, Liaoning Province [J]. *Sci Silv Sin*, 1986, **22**(4): 419 – 425.
- [26] 焦树仁. 章古台固沙林生态系统的结构与功能[M]. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 1989: 39 – 43.
- [27] FABBIO G, FRATTEGANI M. Height estimation in stem analysis using second differences [J]. *For Sci*, 1994, **40**(2): 329 – 340.
- [28] 姜凤岐, 曾德慧, 范志平, 等. 沙地樟子松林单木生长的研究[J]. 应用生态学报, 1996, **7**(增刊1): 1 – 5.
- JIANG Fengqi, ZENG Dehui, FAN Zhiping, *et al.* Simulation of individual tree growth of Mongolian pine forest in sandy land [J]. *Chin J Appl Ecol*, 1996, **7**(suppl 1): 1 – 5.