

DOI:10.12171/j.1000-1522.20210282

黑龙江省东部山区西伯利亚红松种源引种试验初步评价

计家宝 宋淑媛 李开隆 刘桂丰

(东北林业大学林木遗传育种国家重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150040)

摘要:【目的】西伯利亚红松是材果兼优的珍贵树种, 主要分布于俄罗斯境内的寒温带地区, 种内变异丰富。开展不同种源引种试验, 选出优良种源, 为后期的大规模引种造林提供依据。【方法】依据该树种的种源区划, 在主要种源区的7个采样点采集种子, 育苗及造林按照完全随机区组试验设计。调查了7年生和9~18年生的树高, 以及7、15和18年生的胸径, 也调查了18年生时的保存率。针对调查的性状进行了种源间方差分析以及多重比较分析, 估算了各性状的广义遗传力, 开展了性状与造林地的温度、降水因子的相关性分析, 进行了不同种源树高生长曲线模型拟合分析等。【结果】方差分析结果表明: 各种源间生长性状的差异大都达到极显著水平, 变异系数在17%~65%之间, 大多在25%左右, 树高性状变异系数基本呈现随着年龄增加而逐渐减小的趋势。各项性状的广义遗传力较高, 大多数在70%以上。当年高生长量与造林地的温度、降水相关分析表明: 造林地的温度是影响高生长的主要因子, 较高的年均温、3月及7月均温, 不但促进西伯利亚红松当年高生长, 尤其明显促进第2年的生长。树高曲线模型拟合分析和多重比较分析均表明: 在引进的各西伯利亚红松种源中, 托木斯克种源、乌兰乌德种源表现突出, 被确定为优良种源, 其树高和胸径的遗传增益分别为6.73%和3.09%、4.68%和9.50%。【结论】西伯利亚红松种源间的生长性状存在明显变异, 造林地的温度是影响高生长的主要因子, 较高的温度不但对当年高生长有利, 也明显促进第2年的高生长; 基于各种源树高曲线及多重比较, 选择托木斯克种源和乌兰乌德种源为优良种源。

关键词: 西伯利亚红松; 引种; 种源试验; 优良种源选择

中图分类号: S791.247 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1522(2023)01-0070-08

引文格式: 计家宝, 宋淑媛, 李开隆, 等. 黑龙江省东部山区西伯利亚红松种源引种试验初步评价 [J]. 北京林业大学学报, 2023, 45(1): 70-77. Ji Jiabao, Song Shuyuan, Li Kailong, et al. Preliminary evaluation on the introduction test of *Pinus siberia* provenance in the eastern mountainous area of Heilongjiang Province of northeastern China [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2023, 45(1): 70-77.

Preliminary evaluation on the introduction test of *Pinus siberia* provenance in the eastern mountainous area of Heilongjiang Province of northeastern China

Ji Jiabao Song Shuyuan Li Kailong Liu Guifeng

(State Key Laboratory of Tree Genetics and Breeding, Northeast Forestry University, Harbin 150040, Heilongjiang, China)

Abstract: [Objective] *Pinus sibirica* is a precious tree species with excellent wood and fruit. It is mainly distributed in the cold and temperate zone of Russia, with rich intraspecific variation. The introduction experiments of different provenances were carried out to select excellent provenances, so as to provide basis for large-scale introduction and afforestation in China in the later stage. [Method] According to the provenance division of the tree species, seeds were collected at 7 seed collection points in the main provenance area. The seedling raising and afforestation were designed according to the completely randomized block experiment. We investigated the tree height of 7 years old and 9-18 years old, and the DBH of 7, 15 and 18 years old. What's more, the 18-year-old preservation rate was also investigated. For the

收稿日期: 2021-07-29 修回日期: 2021-10-18

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项(2572019DA03)。

第一作者: 计家宝。主要研究方向: 林木遗传育种。Email: jjb0606@163.com 地址: 150040 黑龙江省哈尔滨市香坊区和兴路51号林木遗传育种国家重点实验室。

责任作者: 刘桂丰, 博士, 教授。主要研究方向: 林木遗传育种。Email: liuguifeng@126.com 地址: 同上。

本刊网址: <http://j.bjfu.edu.cn>; <http://journal.bjfu.edu.cn>

investigated characters, the analysis of variance and multiple comparative analysis among provenances were carried out. The generalized heritability of each character was estimated. The correlation analysis between the characters and the temperature and precipitation factors of afforestation site was carried out, and the tree height growth curve model fitting analysis of different provenances was carried out. [Result] The results of variance analysis showed that the differences of growth traits among various provenances mostly reached a very significant level, and the coefficient of variation was between 17% – 65%, mostly about 25%. The coefficient of variation of tree height traits basically showed a trend of gradually decreasing with the increase of age. The broad heritability of all traits was high, most of which were more than 70%. The correlation analysis between the height growth in the current year and the temperature and precipitation of the afforestation site showed that the temperature of afforestation site was the main factor affecting the height growth. The higher annual average temperature, March and July average temperature not only promoted the height growth of *Pinus sibirica* in the current year, but also significantly promoted the height growth in the second year. The fitting analysis of tree height curve model and multiple comparative analysis showed that among the introduced *Pinus sibirica* provenances, Tomsk provenance and Ulanude provenance were outstanding and determined as excellent provenances. The genetic gains of tree height and DBH were 6.73% and 3.09%, 4.68% and 9.50% respectively. [Conclusion] The growth characters of *Pinus sibirica* provenances showed obvious variation, the temperature of afforestation site is the main factor affecting height growth. Higher temperature is not only beneficial to height growth in the current year, but also significantly promotes height growth in the second year. Based on the tree height curves and multiple comparisons of various provenances, Tomsk provenance and Ulanude provenance are selected as excellent provenances.

Key words: *Pinus sibirica*; introduction; provenance trial; selection of excellent provenance

西伯利亚红松(*Pinus sibirica*)是亚欧大陆寒温带针叶林的主要建群树种, 主要分布于俄罗斯西伯利亚地区^[1-3], 集中在 49°40' ~ 127°20'E、46°30' ~ 68°30'N 范围内, 已进入北极圈内, 到达了森林北界, 具有较强的耐寒性^[4]。其由于分布区内环境复杂多样, 形成了 150 余个生态型^[5]。西伯利亚红松在我国新疆北部阿尔泰山西北部有少量分布, 在内蒙古和黑龙江大兴安岭的西北偶有零星分布^[6-9]。西伯利亚红松与我国东北红松(*Pinus koraiensis*)亲缘关系较近, 也是材、果兼优的珍贵树种^[5-6]。其木材质地轻软匀细, 易加工, 常用于建筑业和铅笔生产, 以及乐器和家具制造等行业^[5-6]。其松籽含有丰富的营养物质, 易消化, 食用益处很高, 是一种珍贵的绿色保健食品^[10-13]。综合可见, 西伯利亚红松的发展潜力极大。

我国的寒温性森林是天然林分布最广、面积最大的类型, 由于寒冷气候等自然条件所限制, 导致树种比较单纯, 林分结构也比较单一, 产品质量都远不能与西伯利亚红松相比^[5-9]。因而, 如何解决树种单一问题, 引进既能适应高寒林区恶劣的自然环境, 又能带来较高的生态效益和经济效益的树种, 成为林业工作者需要解决的重要课题。本研究团队自 20 世纪 90 年代开始, 在大、小兴安岭以及长白山等东北地区开展了西伯利亚红松的引种试验, 先后设置了

30 余个试验点。基于西伯利亚红松分布范围极广, 分布区内土壤类型和气候条件差异极大, 种内变异极其丰富的现状, 在部分引种试验点开展了种源试验研究。本团队于 2009 年, 曾对东北林业大学帽儿山实验林场老山营林区试验点的 7 年生西伯利亚红松种源引种试验林进行了初步分析^[1]。但此时, 试验林尚未郁闭, 林木个体间没有形成竞争, 而郁闭成林后种源及个体间产生了竞争关系, 其生长与之前比较发生了怎样变化尚不得知, 需要研究。由于该林分尚未进入结实期, 本论文重点针对种源间生长性状的变异进行了分析。

1 材料与方法

1.1 材料来源

依据西伯利亚红松天然林的分布范围和前苏联对西伯利亚红松优良种源区的区划以及我国引种地的气候特点等自然生长条件, 在主要种源区内选择 7 个西伯利亚红松采种点, 分别是俄罗斯的伊尔库斯克、新西伯利亚、乌兰乌德、黑洛克、托木斯克、赤塔以及蒙古国的后杭爱, 采用大海林林业局的红松作为对照^[1]。各种源采种点地理因子及当地近 20 年气候因子平均值见表 1。气候数据均由网站 <http://climateap.net> 查阅整理所得。

表 1 各种源地地理气候因子

Tab. 1 Geographical and climatic factors of various provenances

种源地 Provenance	相对湿度 Relative humidity/ %	年均降水 Annual mean precipitation/ mm	年均温 Annual mean temperature/℃	6月均温 Average temperature in June/℃	7月均温 Average temperature in July/℃	8月均温 Average temperature in August/℃	9月均温 Average temperature in September/℃	海拔 Altitude/m	纬度 Latitude	经度 Longitude
伊尔库斯克 Irkutsk	23.89	475.75	1.21	16.93	19.50	16.88	9.88	467	52°17'N	104°18'E
新西伯利亚 Novosibirsk	27.54	484.75	3.16	19.29	19.78	18.01	11.89	200	55°02'N	82°55'E
乌兰乌德 Ulanude	40.00	253.22	-0.02	17.96	27.01	17.70	9.98	515	51°50'N	107°37'E
黑洛克 Herlock	27.21	352.00	-0.70	16.70	19.30	16.90	9.45	671	51°21'N	110°27'E
托木斯克 Tomsrk	25.88	519.25	3.30	19.36	20.03	17.69	11.49	139	56°29'N	84°57'E
赤塔 Chita	29.10	333.38	-0.66	17.55	19.88	17.41	9.84	671	52°02'N	113°30'E
后杭爱 Arhangay	27.76	296.22	-2.09	11.62	13.99	12.27	6.23	2 414	47°29'N	100°55'E

1.2 试验设计与数据调查

2002 年 5 月中旬,在黑龙江省大海林林业局太平沟林场苗圃培育西伯利亚红松各种源苗木。试验按照完全随机区组排列设计,3 次重复,株行距为 5.8 cm × 9 cm,密度为 198 株/m²,小区株数 1 100 ~ 3 600 株^[1,14]。

2006 年 5 月,在东北林业大学帽儿山实验林场老山营林区营造种源试验林。该试验点土壤类型为非地带性土壤白浆土。试验采用完全随机区组设计,4 次重复,24 株小区,3 行排列,株行距 2 m × 2 m^[1]。

造林后分别调查了 7 年生和 9 ~ 18 年生的树高,调查了 7、15、18 年生胸径以及 18 年生保存率。

1.3 数据处理与统计分析

将调查的各西伯利亚红松种源性状数值输入计算机,对其进行初步的整理分析,剔除不合理数值。利用 IBM SPSS Statistics19.0 软件对调查的性状进行种源间单因素方差分析、相关性分析、树高曲线模型拟合分析等。

方差分析线性模型为:

$$X_{ij} = \mu + \alpha_i + \beta_j + (\alpha\beta)_{ij} + \varepsilon_{ij} \quad (1)$$

式中: X_{ij} 为因变量, μ 为平均值, α_i 为种源效应, β_j 为区组效应, $(\alpha\beta)_{ij}$ 为种源和区组的交互作用, ε_{ij} 为随机误差。

广义遗传力为:

$$H^2 = (1 - 1/F) \times 100\% \quad (2)$$

式中: F 值根据方差分析所得。

遗传增益为:

$$\Delta G = sH^2/\bar{x} \times 100\% \quad (3)$$

式中: s 为选择差, H^2 为遗传力, $\bar{x}$ 为种源均值。

相关性分析包括树高生长量与造林试验地区的

各气候因子间的相关性分析。相关分析线性模型为:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x - \bar{x})(y - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x - \bar{x})^2 \cdot \sum_{i=1}^n (y - \bar{y})^2}} \quad (4)$$

树高曲线模型拟合分析完成后,利用 Microsoft Office Excel 办公软件绘制出各种源西伯利亚红松的树高曲线图像。

2 结果与分析

2.1 各性状的方差分析

对各种源西伯利亚红松不同年龄的树高、胸径进行种源间单因素方差分析及遗传力估算,所得结果见表 2。

由表 2 可知:西伯利亚红松各年龄树高、胸径种源间的差异达到了显著 ($P < 0.05$) 或极显著 ($P < 0.01$) 水平,变异系数在 17% ~ 65% 之间,大多在 25% 左右,呈现随着年龄增加逐渐减小的趋势。各年份的广义遗传力大多在 70% 以上,更有几个年份超过 85%。由此可见:西伯利亚红松种源间存在显著差异,性状的遗传力较高,在西伯利亚红松的引种过程中进行种源选择是十分必要的。

2.2 影响该树种生长的温湿度因子分析

利用造林地近 3 年的温度与降水因子与西伯利亚红松各种源当年高生长量进行相关分析(表 3),气候数据均由网站 <http://climateap.net> 查阅整理所得。结果发现:引种造林地的温度是影响西伯利亚红松生长的重要因子,高生长与年均温、3 月、6 月以及 7 月均温的相关性最为明显。3 月份均温与当年

表 2 西伯利亚红松种源间胸径、树高的方差分析及遗传力测定

Tab. 2 Analysis of variance and heritability of DBH and tree height among the species sources of <i>Pinus sibirica</i>						
性状 Trait	年龄/a Age/year	<i>F</i>	均值 Mean/cm	变幅 Amplitude of variation/cm	变异系数 Variation coefficient/%	广义遗传力 Broad heritability/%
树高 Tree height	18	4.126**	344.97	308.69 ~ 372.11	17.93	75.76
	17	3.409**	312.49	285.10 ~ 340.11	18.35	70.67
	16	2.534*	274.55	252.62 ~ 296.37	19.37	60.54
	15	7.198**	222.63	185.20 ~ 237.98	24.46	86.11
	14	5.979**	187.65	158.80 ~ 199.27	24.47	83.27
	13	4.588**	157.18	134.98 ~ 167.18	25.09	78.20
	12	3.736**	130.74	114.35 ~ 140.42	26.05	73.23
	11	3.373**	104.22	91.59 ~ 109.75	27.94	70.35
	10	3.514**	79.21	68.93 ~ 86.67	30.22	71.54
	9	2.548*	59.47	52.22 ~ 64.47	32.56	60.75
	7	4.299**	25.99	20.49 ~ 29.70	63.12	76.74
胸径 DBH	18	3.304**	5.12	4.27 ~ 5.87	29.66	69.73
	15	7.459**	2.89	1.93 ~ 3.33	45.59	86.59
	7	5.154**	1.37	1.27 ~ 1.47	22.76	80.60

注：0.01显著水平以**表示，0.05显著水平以*表示。下同。Notes: the 0.01-significance level is indicated by **, and the 0.05-significance level is indicated by *. The same below.

及后 1 年高生长大多都达到了显著或极显著的正相关关系；而 6 月的高温对其生长不利，呈现负相关关系，甚至有时与当年高生长达到显著负相关。7 月份的均温与前 1 年及当年高生长大都达到了显著或极显著的正相关。基于温度因子与高生长相关系数的比较表明：年均温、3 月、7 月均温高，不但促进西伯利亚红松当年高生长，更加促进第 2 年的生长。

2.3 优良种源的初步选择

应用 Duncan 多重比较法对不同年度的各西伯利亚红松种源与对照红松进行树高和胸径的多重比较，结果见表 4。

由表 4 可知：对照红松的生长表现最好，自 7 年生至目前，其高生长一直显著高于西伯利亚红松各种源。西伯利亚红松种源间存在显著差异，目前托木斯克种源是生长量最大的种源，15 年生时及 18 年生时，树高均排在第 1 位，胸径也都排在前 2 位，其保存率为 77.08%，位列第 3，相对较高，认为托木斯克是参与试验的所有西伯利亚红松种源中最优的，其树高和胸径的遗传增益分别为 6.73% 和 3.09%。其次是乌兰乌德种源，18 年生时，胸径生长排在第 1 位，树高与第 1、2 位的差异也不显著，其树高和胸径的遗传增益分别为 4.68% 和 9.50%。伊尔库斯克种源、赤塔种源和黑洛克种源的排位一直以来都相对中等，最后的便是剩下的新西伯利亚种源和后杭爱种源，尤其是后杭爱种源，一直以来不仅排

在最末，而且基本上除了排在倒数第 2 位的新西伯利亚，该种源与其他种源都存在显著性差异，而且保存率也是最低的，仅为 55.21%。所以后杭爱应该是所有种源中最不适合在种源试验地区生长的种源。

2.4 各种源树高生长曲线拟合及发展趋势

利用所调查的 3 年生、4 年生、7 年生以及 9 ~ 18 年生的各种源西伯利亚红松以及对照红松的树高观测值，分别拟合出拟合优度最好的树高曲线方程模型，结果见表 5。

由表 5 可知：各种源西伯利亚红松及对照红松拟合的树高曲线方程模型皆为幂函数，且决定系数 R^2 均大于 0.9，说明各曲线方程模型的拟合度均较高，其高生长处于旺盛生长期。依据各种源树高曲线方程绘制出各种源的树高曲线，结果见图 1。

由图 1 可知：排在各曲线之上的是对照红松，托木斯克种源排在第 2 位，并逐渐紧追排在第 1 位的对照红松；乌兰乌德种源排在第 3 位，其次为伊尔库斯克、赤塔和黑洛克，排在最末的为新西伯利亚和后杭爱。从生长趋势看，排在第 2 位的托木斯克将领先第 3 位的乌兰乌德更多甚至可能会超过本地红松，说明托木斯克种源比较适应试验地区的生长环境。而排在最末的新西伯利亚种源和后杭爱种源生长情况就一直不好，生长趋势明显弱于其他种源，说明两者在种源试验地区生长不良，不太适应本地的自然环境。

表 3 造林地温度和降水与西伯利亚红松年生长量相关分析

Tab. 3 Correlation analysis between temperature, precipitation and annual growth of *P. sibirica*

种源 Provenance	年份 Year	年均温 Annual mean temperature	年均降水 Annual mean precipitation	1月均温 Average temperature in January	2月均温 Average temperature in February	3月均温 Average temperature in March	4月均温 Average temperature in April	5月均温 Average temperature in May	6月均温 Average temperature in June	7月均温 Average temperature in July	8月均温 Average temperature in August	9月均温 Average temperature in September	10月均温 Average temperature in October	11月均温 Average temperature in November	12月均温 Average temperature in December
伊尔库斯克 Irkutsk	当年 That year	0.613	0.420	0.405	0.341	0.723*	0.616	0.409	-0.678*	0.567	-0.310	0.156	-0.274	-0.435	0.515
	前1年 Previous year	0.760*	0.095	0.301	0.431	0.830**	0.444	-0.299	-0.109	0.667*	-0.092	0.192	-0.414	-0.137	0.520
	前2年 Previous 2 years	0.060	-0.002	0.143	0.011	0.136	-0.054	-0.096	-0.061	0.331	0.046	0.117	-0.625	-0.009	0.262
新西伯利亚 Novosibirsk	当年 That year	0.541	0.496	0.294	0.204	0.618	0.615	0.534	-0.575	0.660*	-0.421	0.012	-0.184	-0.233	0.370
	前1年 Previous year	0.612	0.157	0.117	0.433	0.783**	0.341	-0.262	-0.160	0.759*	-0.030	0.213	-0.461	-0.204	0.419
	前2年 Previous 2 years	-0.024	-0.017	0.128	0.056	0.076	-0.174	-0.158	-0.083	0.308	0.194	0.237	-0.654*	-0.142	0.274
乌兰乌德 Ulan-Ude	当年 That year	0.616	0.445	0.410	0.404	0.732*	0.609	0.446	-0.723*	0.651*	-0.362	0.147	-0.223	-0.468	0.426
	前1年 Previous year	0.721*	0.105	0.296	0.434	0.820*	0.410	-0.300	-0.127	0.703*	-0.017	0.237	-0.458	-0.231	0.545
	前2年 Previous 2 years	0.129	-0.081	0.319	0.118	0.183	0.010	-0.068	-0.122	0.277	0.030	0.133	-0.642*	-0.117	0.297
黑洛克 Herlock	当年 That year	0.598	0.404	0.388	0.353	0.721*	0.638*	0.459	-0.663*	0.672*	-0.358	0.096	-0.270	-0.422	0.400
	前1年 Previous year	0.673*	0.152	0.242	0.418	0.789**	0.350	-0.258	-0.161	0.686*	0.011	0.279	-0.491	-0.243	0.568
	前2年 Previous 2 years	0.113	-0.065	0.278	0.123	0.191	0.010	-0.124	-0.113	0.267	0.035	0.166	-0.626	-0.110	0.264
后杭爱 Arhangay	当年 That year	0.458	0.426	0.235	0.225	0.545	0.557	0.536	-0.539	0.785**	-0.368	-0.061	-0.209	-0.274	0.275
	前1年 Previous year	0.527	0.056	0.155	0.500	0.789**	0.321	-0.271	-0.224	0.679*	0.098	0.308	-0.591	-0.390	0.371
	前2年 Previous 2 years	0.053	-0.102	0.244	0.114	0.094	-0.148	-0.192	-0.097	0.176	0.278	0.263	-0.577	-0.183	0.412
托木斯克 Tomsk	当年 That year	0.597	0.316	0.296	0.246	0.663*	0.686*	0.340	-0.547	0.668*	-0.262	-0.105	-0.176	-0.245	0.488
	前1年 Previous year	0.629	0.107	0.222	0.382	0.741*	0.306	-0.234	-0.050	0.699*	-0.100	0.280	-0.542	-0.136	0.425
	前2年 Previous 2 years	-0.085	0.109	0.030	-0.029	0.057	-0.152	-0.057	-0.185	0.206	0.170	0.209	-0.650*	-0.132	0.261
赤塔 Chita	当年 That year	0.647*	0.479	0.443	0.383	0.748*	0.616	0.448	-0.723*	0.543	-0.394	0.202	-0.218	-0.429	0.475
	前1年 Previous year	0.751*	0.145	0.244	0.389	0.819**	0.439	-0.313	-0.094	0.725*	-0.083	0.159	-0.370	-0.112	0.533
	前2年 Previous 2 years	0.068	-0.025	0.208	0.054	0.132	-0.058	-0.065	-0.720	0.364	0.008	0.109	-0.647*	-0.043	0.237
种源均值 Provenance mean	当年 That year	0.608	0.448	0.385	0.335	0.708*	0.628	0.462	-0.670*	0.641*	-0.371	0.103	-0.226	-0.389	0.440
	前1年 Previous year	0.703*	0.126	0.244	0.429	0.818**	0.399	-0.285	-0.132	0.718*	-0.043	0.225	-0.460	-0.198	0.510
	前2年 Previous 2 years	0.065	-0.032	0.214	0.074	0.142	-0.062	-1.010	-1.020	0.032	0.082	0.164	-0.648*	-0.099	0.285

表 4 各西伯利亚红松种源不同年份树高、胸径的多重比较

种源 Provenance	树高 Tree height			胸径 DBH			18年生保存率 18-year-old preservation rate/%
	18年生	15年生	7年生	18年生	15年生	7年生	
	18 years old	15 years old	7 years old	18 years old	15 years old	7 years old	
对照 Contrast	4.32 ± 0.85a	2.93 ± 0.66a	0.31 ± 0.10a	7.19 ± 2.45a	4.12 ± 1.56a	1.30 ± 0.34de	66.67
托木斯克 Tomsrk	3.72 ± 0.65b	2.42 ± 0.55b	0.27 ± 0.10bc	5.34 ± 1.56b	3.33 ± 1.27b	1.47 ± 0.34a	77.08
黑洛克 Herlock	3.63 ± 0.65bc	2.30 ± 0.59b	0.28 ± 0.09abc	5.11 ± 1.26bc	3.07 ± 1.38b	1.36 ± 0.30bcde	59.38
乌兰乌德 Ulanude	3.62 ± 0.58bc	2.38 ± 0.56b	0.30 ± 0.08ab	5.87 ± 1.51b	3.26 ± 1.35b	1.43 ± 0.25abc	78.13
赤塔 Chita	3.47 ± 0.62bc	2.28 ± 0.56b	0.26 ± 0.09cd	5.12 ± 1.43bc	3.04 ± 1.34b	1.40 ± 0.31abcd	59.90
伊尔库斯克 Irkutsk	3.40 ± 0.60cd	2.28 ± 0.52b	0.24 ± 0.10de	5.25 ± 1.52bc	3.03 ± 1.36b	1.44 ± 0.31ab	83.33
新西伯利亚 Novosibirsk	3.16 ± 0.45de	2.02 ± 0.40c	0.22 ± 0.09ef	4.51 ± 1.45cd	2.41 ± 0.95c	1.33 ± 0.33cde	57.29
后杭爱 Arhangay	3.09 ± 0.57e	1.85 ± 0.38c	0.20 ± 0.09f	4.27 ± 1.58d	1.92 ± 0.84c	1.27 ± 0.30e	55.21

注：差异不显著的为字母重合或者有相同字母的组合；差异显著的为不同字母的组合。Notes: the difference is not significant for the overlapping of letters or the combination of the same letter; the significant difference is the combination with different letters.

表 5 西伯利亚红松不同种源树高曲线模型拟合

种源 Provenance	模型汇总 Model summary			参数估计值 Parameter estimate		拟合方程 Fitting equation
	R ²	F	Sig.	b0	b1	
伊尔库斯克 Irkutsk	0.928	9 167.26	0.000	0.004	2.350	$Y = 0.004 \times t^{2.350}$
新西伯利亚 Novosibirsk	0.951	8 697.40	0.000	0.003	2.399	$Y = 0.003 \times t^{2.399}$
乌兰乌德 Ulanude	0.925	6 687.35	0.000	0.003	2.489	$Y = 0.003 \times t^{2.489}$
黑洛克 Herlock	0.936	7 877.14	0.000	0.002	2.564	$Y = 0.002 \times t^{2.564}$
后杭爱 Arhangay	0.966	11 533.47	0.000	0.002	2.530	$Y = 0.002 \times t^{2.530}$
托木斯克 Tomsrk	0.952	7 220.23	0.000	0.002	2.683	$Y = 0.002 \times t^{2.683}$
赤塔 Chita	0.936	14 653.28	0.000	0.003	2.449	$Y = 0.003 \times t^{2.449}$
对照 Contrast	0.907	6 923.36	0.000	0.004	2.457	$Y = 0.004 \times t^{2.457}$

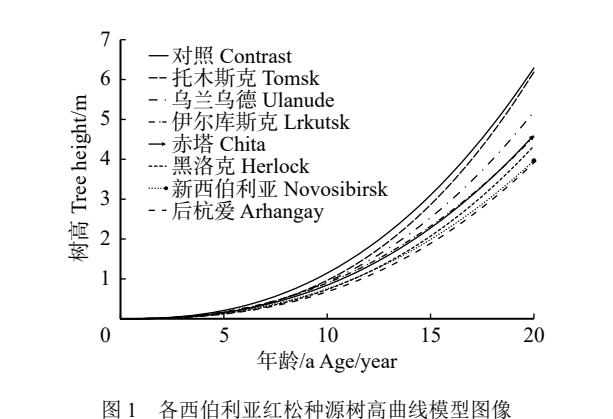


图 1 各西伯利亚红松种源树高曲线模型图像

3 讨 论

林木引种结合种源选择是遗传改良的有效途径之一。国外在引种时十分强调种源选择，如瑞典、新西兰、赞比亚等在进行小干松(Pinus contorta)、辐射松(Pinus radiata)、卡西亚松(Pinus kesiya)等引种

时开展了种源选择试验，发现了不同种源在生长和适应性方面的差异，为各引种地点选择出了最佳的种源，提高了引种效果^[15]。我国在引种桉树(Eucalyptus spp.)、加勒比松(Pinus caribaea)、班克松(Pinus banksiana)等树种时，分别开展了种源选择研究，也获得较好效果^[16-18]。西伯利亚红松分布跨越 9 个纬度(47°48' ~ 56°48'N)、30 个经度(82°92' ~ 113°50'E)，复杂的地理环境及长期自然选择使其形成了十分丰富的地理生态类型。故此，本研究在该树种引种时开展了种源选择试验，结果表明不同种源间的生长适应性差异显著，据此选出了托木斯克和乌兰乌德 2 个优良种源，其树高和胸径的遗传增益分别达到了 6.73% 和 3.09%、4.68% 和 9.50%。

种源试验林的林龄大小决定了各种源稳定性的高低，幼年期树木的生长性状变异系数都比较高，但随着树木年龄的增加，各性状的变异系数会逐渐减小最后趋于稳定，确定林木最佳选择年龄对于生产

上尽快利用优良种源具有重要意义^[19]。油松(*Pinus tabulaeformis*)种源进行稳定性分析的适宜年龄在5~6年^[20],马尾松(*Pinus massoniana*)可在6~7年生时开展种源稳定性评价^[21],火炬松(*Pinus taeda*)和湿地松(*Pinus elliottii*)等在10年左右^[22],天然红松在18~24年开展稳定性评价和早期选择^[23]。早期本研究团队曾对该林分在4年生时的苗期和7年生时的幼龄期进行过初步调查分析,与本次的分析结果相差不大,表现差的种源是一致的,对于最优种源的选择也无很大差别^[1]。在西伯利亚红松7年生时,初步认定乌兰乌德是最优种源;在15年生~18年生,托木斯克种源的高生长表现突出;而乌兰乌德种源的胸径生长量始终排在前列,说明各种源高生长的速生期不同,而径生长在7年生时就已经稳定。

西伯利亚红松与东北地区红松的分布区没有重叠^[24]。西伯利亚红松主要分布在俄罗斯西伯利亚地区,在我国新疆北部的阿尔泰、内蒙古及黑龙江大兴安岭等寒温带地区有少量分布。因此2种树种苗期生长在寒温带及温带地区差异较大,在大兴安岭满归林业局和塔河林业局,红松的苗高和地径的生长量普遍不如西伯利亚红松,而且在造林后西伯利亚红松的生长状况也好于红松^[1,25-26];但在环境适宜的黑龙江省东部地区,红松的各方面生长状况就会好于西伯利亚红松。由本试验所得结论可知:红松生长量要高于西伯利亚红松。

林木的生长发育与气候条件密切相关,尤其与降水和温度关系密切。有研究^[27]曾对西伯利亚红松长达202年的年表与气候因子进行了分析,结果发现年轮宽度主要受温度影响,其与当年3月温度呈显著正相关,与前一年6月温度呈显著负相关。本研究也发现了与上述研究相似的现象,即西伯利亚红松当年高生长与当年3月温度呈显著正相关,与前1年6月温度呈显著负相关。同时还发现西伯利亚红松当年高生长与近2年的温度相关密切,与当年以及前1年的年均温、3月以及7月均温均呈现显著正相关关系,而与前1年及当年6月温度呈显著负相关。由此表明:不论是在原产地还是引种地,影响西伯利亚红松生长的主要因子是温度。

4 结 论

西伯利亚红松的生长性状种源间差异明显,呈现干-湿变异趋势和连续的冷-暖变异趋势;引种造林点的温度是影响高生长的主要因子,较高的温度不但对当年高生长有利,也明显促进第2年的高生长;基于各种源树高曲线及多重比较,选择托木斯克种源和乌兰乌德种源为优良种源。

参 考 文 献

- [1] 韦睿,滕文华,赵光仪,等. 引种西伯利亚红松种源试验[J]. 东北林业大学学报, 2011, 39(1): 5-6, 16.
Wei R, Teng W H, Zhao G Y, et al. Provenance trial of introduced *Pinus sibirica*[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2011, 39(1): 5-6, 16.
- [2] 王曼. 科尔沁沙地西伯利亚红松引种探讨[J]. 防护林科技, 2017(7): 113-114.
Wang M. Discussion on the introduction of *Pinus sibirica* in Horqin Sandy Land[J]. Protection Forest Science and Technology, 2017(7): 113-114.
- [3] 王成. 西伯利亚红松引种与种源试验研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2011.
Wang C. Introduction and provenance test of *Pinus sibirica*[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2011.
- [4] 王芳,陆志民,王君,等. 低温胁迫下红松与西伯利亚红松光合与气孔特性[J]. 植物研究, 2021, 41(2): 205-212.
Wang F, Lu Z M, Wang J, et al. Photosynthetic and stomatal characteristics of *Pinus koraiensis* and *Pinus sibirica* under low temperature stress[J]. Bulletin of Botanical Research, 2021, 41(2): 205-212.
- [5] 刘桂丰,杨传平,赵光仪. 珍贵树种西伯利亚红松引进的可行性[J]. 应用生态学报, 2002(11): 1483-1486.
Liu G F, Yang C P, Zhao G Y. Feasibility to introduce rare tree species *Pinus sibirica* into China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2002(11): 1483-1486.
- [6] 赵光仪,杨春田,周长虹. 大兴安岭引种西伯利亚红松的必要和可能[J]. 林业科技, 1991(1): 1-4.
Zhao G Y, Yang C T, Zhou C H. Necessity and possibility of introducing *Pinus sibirica* in Daxing'an Mountain range[J]. Forestry Science & Technology, 1991(1): 1-4.
- [7] 陈桂林,魏殿文,王福德,等. 大兴安岭西伯利亚红松种苗培育技术[J]. 国土与自然资源研究, 2019(2): 92-93.
Chen G L, Wei D W, Wang F D, et al. Seedling cultivation techniques of *Pinus sibirica* Du. Tour. in Daxing'an Mountain range[J]. Territory & Natural Resources Study, 2019(2): 92-93.
- [8] 刘俊国,赵光义. 在大兴安岭引种西伯利亚红松的可行性探讨[J]. 内蒙古林业调查设计, 2009, 32(3): 64-66.
Liu J G, Zhao G Y. Discussion on the feasibility of introducing *Pinus sibirica* in Daxing'an Mountain range[J]. Inner Mongolia Forestry Investigation and Design, 2009, 32(3): 64-66.
- [9] 赵光仪. 大兴安岭西伯利亚红松调查简报[J]. 林业资源管理, 1990(1): 31.
Zhao G Y. A survey of *Pinus sibirica* in Daxing'an Mountain range[J]. Forestry Resource Management, 1990(1): 31.
- [10] 王翠丽. 西伯利亚红松球蚜药剂防治[J]. 东北林业大学学报, 2018, 46(11): 80-81, 86.
Wang C L. Pesticides control of *Pineus cembrae pinikoreanus* on *Pinus sibirica*[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2018, 46(11): 80-81, 86.
- [11] 刘贵森,倪薇,倪柏春,等. 西伯利亚红松异砧嫁接营建坚果林

- 的技术研究[J]. 林业勘查设计, 2012(1): 68–69.
- Liu G S, Ni W, Ni B C, et al. Siberia pine nut forest xenostock grafting construction technology research[J]. Forest Investigation Design, 2012(1): 68–69.
- [12] 胡梦婷, 罗旭. 大兴安岭林区引种西伯利亚红松研究进展[J]. 生态科学, 2022, 41(3): 237–244.
- Hu M T, Luo X. Research progress of introduced *Pinus sibirica* in Great Xing'an Mountains[J]. Ecological Science, 2022, 41(3): 237–244.
- [13] Polyakova O, Goroshkevich S, Zhuk E. Cone structure and seed development in grafted witches' broom and normal crown clones from the same trees of *Pinus sibirica*[J]. New Forests, 2019(50): 805–819.
- [14] 刘翠华, 宋景和. 西伯利亚红松 S_{2-2} 型苗不同种源生长差异研究[J]. 林业科技, 2012, 37(5): 4–5.
- Liu C H, Song J H. *Pinus sibirica* S_{2-2} type seedlings of different provenance growth differences[J]. Forestry Science & Technology, 2012, 37(5): 4–5.
- [15] 陈晓阳. 树木种内的地理变异及其利用[J]. 贵州林业科技, 1989(1): 79–85.
- Chen X Y. Geographical variation within tree species and its utilization[J]. Guizhou Forestry Science and Technology, 1989(1): 79–85.
- [16] 王观明, 叶亲柏, 李昌明, 等. 加勒比松地理种源试验小结[J]. 广东林业科技, 1989(1): 22–27, 4.
- Wang G M, Ye Q B, Li C M, et al. Summary of geographic provenance test of *Pinus caricatum*[J]. Guangdong Forestry Science and Technology, 1989(1): 22–27, 4.
- [17] 李志辉, 杨民胜, 陈少雄, 等. 桉树引种栽培区划研究[J]. 中南林业学院学报, 2000, 20(3): 1–10.
- Li Z H, Yang M S, Chen S X, et al. Study on regionalization for Eucalyptus introduction cultural area in China[J]. Journal of Central South Forestry University, 2000, 20(3): 1–10.
- [18] 王继志, 陈晓波, 刘喜仁, 等. 吉林省班克松种源选择研究[J]. 北华大学学报(自然科学版), 2002, 3(2): 153–161.
- Wang J Z, Chen X B, Liu X R, et al. On the provenance selection of *Pinus banksiana* in Jilin Province[J]. Journal of Beihua University (Natural Science), 2002, 3(2): 153–161.
- [19] 刘宇, 徐焕文, 尚福强, 等. 3个地点白桦种源试验生长稳定性分析[J]. 北京林业大学学报, 2016, 38(5): 50–57.
- Liu Y, Xu H W, Shang F Q, et al. Growth stability of *Betula platyphylla* provenances from three sites[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2016, 38(5): 50–57.
- [20] 徐化成. 油松地理变异和种源选择[M]. 北京: 中国林业出版社, 1992.
- Xu H C. Geographical variation and provenance selection of *Pinus tabulaeformis*[M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 1992.
- [21] 荣文琛, 岳水林, 赵世远, 等. 马尾松造林区优良种源选择[J]. 林业科学研究, 1994, 7(5): 542–549.
- Rong W C, Yue S L, Zhao S Y, et al. Selection of excellent provenances in *Pinus massoniana* afforestation area[J]. Forest Research, 1994, 7(5): 542–549.
- [22] Li B, McKeand S. Stability of loblolly pine families in the southeastern U.S.[J]. Silvae Genetica, 1989, 38: 96–101.
- [23] 尚福强. 红松人工林优良单株早期选择研究[J]. 林业科技通讯, 2017(5): 10–13.
- Shang F Q. Study on early selection of excellent individual plant in *Pinus koraiensis* plantation[J]. Forestry Science and Technology, 2017(5): 10–13.
- [24] 赵光仪. 关于西伯利亚红松在大兴安岭的分布以及我国红松西北限的探讨[J]. 东北林学院学报, 1981(2): 31–40.
- Zhao G Y. Discussion on the distribution of *Pinus sibirica* in Daxing'an Mountain range and the northwest limit of *Pinus koraiensis* in China[J]. Journal of Northeast Forestry University, 1981(2): 31–40.
- [25] 贺恩, 高泽芬, 徐鹤忠. 西伯利亚红松引种试验中的育苗研究[J]. 内蒙古林学院学报, 1999, 21(3): 82–85.
- He E, Gao Z F, Xu H Z. Study on seedling raising in the introduction experiment of *Pinus sibirica*[J]. Journal of Inner Mongolia Forestry College, 1999, 21(3): 82–85.
- [26] 贺恩, 白茹辉, 申健, 等. 西伯利亚红松引种试验中的造林研究[J]. 内蒙古农业大学学报(自然科学版), 2000, 21(2): 69–72.
- He E, Bai R H, Shen J, et al. Studies on the afforestation in introduction experiment of *Pinus sibirica*[J]. Journal of Inner Mongolia Agricultural University (Natural Science Edition), 2000, 21(2): 69–72.
- [27] Sher Shah. 西伯利亚红松生长与气候的关系及在中国东北地区的潜在分布[D]. 北京: 北京林业大学, 2019.
- Shah S. The growth-climate relationships and potential distribution of Siberian pine (*Pinus sibirica*) in Northeast China[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2019.

(责任编辑 范娟 赵田芸
责任编辑 康向阳)