

# 杉木地理种源长期选择效果研究

伍汉斌<sup>1</sup>, 段爱国<sup>1,2\*</sup>, 张建国<sup>1,2</sup>, 孙建军<sup>3</sup>

(1. 中国林业科学研究院林业研究所, 国家林业和草原局林木培育重点实验室, 林木遗传育种国家重点实验室, 北京 100091; 2. 南京林业大学南方现代林业协同创新中心, 江苏 南京 210037; 3. 中国林业科学研究院亚热带林业实验中心, 江西 分宜 336600)

**摘要:** [目的] 研究不同林龄的杉木地理种源生长状况的差异, 筛选适宜于试验区发展的杉木优良种源, 促进杉木种源水平的长期遗传改良。 [方法] 利用 1981 年营造的杉木种源试验林在 5、10、31 年生时的测定材料, 分析不同种源主要生长性状在不同林龄的遗传参数变异规律, 利用早晚相关和聚类分析对优良种源长期选择效果进行评价。 [结果] 不同林龄的杉木胸径、树高和单株材积在种源间均存在极显著的差异, 31 年生时最大种源的各性状值较最小种源的各性状分别高 75.86%、48.55%、263.76%; 杉木在种源间的变异存在明显的地理变异模式, 以纬向变异为主, 由南向北, 杉木的生长量先增大后减小, 即我国西南和东南部种源生长较好。参试杉木种源不同林龄时各性状的遗传力为 0.750~0.875, 说明各性状受较高水平的遗传控制; 胸径、树高和单株材积在不同林龄间表型相关和秩相关均呈极显著的正相关, 认为杉木早期选择宜在 10 年生左右; 从 169 个参试种源中筛选出 29 个生长较快速的种源, 大部分种源来自福建省, 还包含贵州、广西和湖南等地的种源, 其中, 生长最好的是福建崇安、顺昌、尤溪等福建北部种源, 其胸径、树高和单株材积的遗传增益分别达到 23.21%~31.45%、15.60%~20.19%、59.94%~89.97%。 [结论] 早期选择的年龄对缩短杉木育种周期影响明显, 在 10 年生选择更有利于提高杉木遗传改良的效率, 从 31 年生杉木成熟林中选择出的 29 个优良种源较当地种源有较大增幅, 适宜在江西省及周边地区推广。

**关键词:** 杉木; 种源试验; 长期选择; 遗传增益

**中图分类号:** S722

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1001-1498(2019)03-0009-09

杉木 (*Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook) 是我国南方重要的造林树种, 其分布区包括 16 个省 (自治区), 南北跨 14° (22°~34° N), 东西跨 22° (100°~122° E)<sup>[1]</sup>, 分布区大, 地理变异丰富; 其木材具有材质软、纹理直、易加工、耐腐蚀等优点<sup>[2]</sup>。

种源试验是林木育种的重要工作内容之一, 种源试验的目的是挑选出优良的林木种源, 国内外的学者对多种树种进行了种源试验, 在针叶树种 (如云杉属 (*Picea*)<sup>[3]</sup>、欧洲赤松 (*Pinus sylvestris*)<sup>[4-5]</sup> 和挪威云杉 (*Picea abies* (L.) Karst.)<sup>[6]</sup>) 和阔叶树种 (如山地木麻黄 (*Casuarina junghuhniana* Miq.)<sup>[7]</sup>、香椿 (*Toona sinensis* Roem.)<sup>[8]</sup> 和苦楝 (*Melia azedarach*)<sup>[9]</sup> 等) 上都取得了显著的效益。杉木的种源试验最早由福建林学院的俞新妥教授在 1957 年开展,

经过 23 a 的培育观测, 结果发现其中四川彭县、湖南会同和江西庐山产地生长量最好, 而安徽休宁产地生长最差<sup>[10]</sup>。杉木种源试验的系统研究在 1976 年开始, 在当时的“全国林木良种选育协作会”上, 成立了全国杉木地理种源协作组, 并由中国林业科学研究院林业研究所主持和承担, 此次研究首次选择出各栽培区的一批优良种源, 并认为我国南岭山地南坡, 四川盆地西侧青衣江流域和滇桂南部山地是杉木高产的优良种源区<sup>[11]</sup>; 但已有研究往往集中于种源试验林中幼龄期, 对于成熟期杉木不同地理种源生长评价及遗传参数估算的研究较少, 缺乏杉木地理种源早期选择与中、长期选择效果差异研究。

鉴于此, 以 1981 年在江西大岗山建立的杉木种源试验林生长调查资料为对象, 对 5 年生、10 年生、31

收稿日期: 2018-01-18 修回日期: 2019-03-18

基金项目: 中国林科院基金“杉木第三代种质评价及第四代育种群体构建(CAFYBB2017ZA001-1)”; 江西省林业厅林业科技创新专项“杉木高世代育种亲本选择和新品系创制(201702)”及国家自然科学基金面上项目(31370629)

\* 通讯作者: 段爱国, 研究员. 主要研究方向: 人工林定向培育. E-mail: duanag@caf.ac.cn

年生杉木不同地理种源的生长与遗传参数展开评价,以筛选适宜于试验区发展的杉木优良种源,促进杉木种源水平的长期遗传改良。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

试验地位于江西省分宜县大岗山林场,该地区属

亚热带湿润气候区,立地指数14~16,坡度约为30°,年均气温15.8℃,年均日照时间1 656.9 h,年均降水量1 590.9 mm,其中,4—6月降雨量占全年的45%,年蒸发量为1 503 mm,无霜期252 d。本区属地带性低山丘陵红壤、黄壤类型及其亚类的分布区,黄壤分布最广,分布海拔为300~700 m,红壤多分布于海拔200 m以下的低山丘陵。前茬是天然次生阔叶林。

表1 试验所选169个种源信息

Table 1 The information of 169 provenances in this study

种源号 No.	种源名 provenance	种源号 No.	种源名 provenance	种源号 No.	种源名 provenance	种源号 No.	种源名 provenance
1	四川合江	43	四川洪雅	85	四川屏山	127	广西桂平
2	四川江津	44	福建永安	86	四川什邡	128	广西北流
3	河南商城	45	福建长汀	87	湖南通道	129	广西博白
4	河南新县	46	福建南靖	88	湖南武岗	130	广西富沅
5	江苏句容	47	福建沙县	89	湖南新宁	131	广西宾县
6	安徽泾县	48	福建将乐	90	湖南溆城	132	广西平南
7	安徽宁国	49	福建上杭	91	湖南江水	133	广西资沅
8	安徽太平	50	四川筠连	92	湖南江华	134	广西兴安
9	安徽歙县	51	四川永川	93	湖南桂阳	135	广西恭城
10	安徽黟县	52	江西安福	94	湖南攸县	136	广西龙胜
11	安徽祁门	53	江西武宁	95	湖南源陵	137	广西灵川
12	四川南江	54	四川荣经	96	湖南安化	138	广西永福
13	安徽东至	55	江西全南	97	湖南新化	139	广西融水四荣
14	安徽石台	56	江西崇义	98	湖南祁阳	140	广西融水白云
15	四川邻水	57	四川卢山	99	湖南叙浦	141	广西融安
16	四川秀山	58	江西铅山	100	湖南芷江	142	广西隆林
17	四川西阳	59	江西玉山	101	湖南兰山	143	云南镇雄2
18	浙江遂昌	60	江西瑞金	102	安徽休宁	144	广西德保
19	四川叙永	61	江西黎川	103	湖南资兴	145	广西全州
20	浙江龙泉	62	四川彭县	104	湖南辰溪	146	广西灌阳
21	浙江安吉	63	江西乐安	105	湖南凤凰	147	贵州从江
22	浙江云和	64	江西修水	106	广东乐昌	148	贵州榕江
23	浙江丽水	65	江西铜鼓	107	安徽黟县(柳杉)	149	贵州黎平
24	浙江开化	66	湖北崇阳	108	广东河源	150	贵州锦平
25	浙江建德	67	湖北通山	109	广东蕉岭	151	贵州剑河
26	浙江临安	68	湖北竹山	110	广东始兴	152	贵州兴仁
27	福建连城	69	湖北鹤峰	111	广东连山	153	贵州岭巩
28	福建漳平	70	湖北利川	112	广东平远	154	贵州婺川
29	福建永定	71	湖北五峰	113	广东怀集	155	贵州道真
30	福建武平	72	湖北罗田	114	广东广宁	156	贵州习水
31	福建浦城	73	湖北阳新	115	广东郁南	157	贵州黔西
32	福建崇安	74	湖北麻城	116	浙江临安(柳杉)	158	云南镇雄1
33	福建光泽	75	湖北通城	117	广东连南	159	贵州麻江
34	福建建阳	76	云南腾冲(秃杉)	118	广西三江	160	贵州平坝
35	福建建瓯	77	湖北建始	119	广西金秀	161	贵州思南
36	福建顺昌	78	湖北谷城	120	广西罗城	162	云南会泽2
37	福建南平	79	湖北宜昌	121	江西分宜	163	贵州三都
38	福建邵武	80	湖北铜盆水	122	广西贺县	164	贵州余庆
39	福建尤溪	81	湖南永顺	123	广西昭平	165	贵州六枝
40	福建大田	82	湖南新晃	124	广西蒙山	166	贵州江口
41	福建三明	83	四川邛崃	125	广西苍梧	167	云南马关
42	福建德化	84	湖南会同	126	广西容县	168	云南屏边
						169	云南会泽1

### 1.2 试验设计

试验材料选自全国13个省区,按经纬度以“网格法”布点,收集183个产地的种源。各种源均为1年生实生苗,1980年育苗,1981年造林,采用平衡不完全区组设计,183个区组,14个重复,每区组14个小区,每小区4株,2 m × 2 m 株行距。以江西分宜当地种源作为对照。该种源试验林在1994年进行了1次间伐,间伐强度为50%,每个小区能保存1~2株林木。

对试验林长期的调查观测,部分种源缺失严重,最后收集了169个产地的种源,信息见表1。

### 1.3 数据收集

造林后在1984年(5年生)、1989年(10年生)和2010年(31年生)分别对试验林每木胸径及树高进行调查。

### 1.4 数据分析

取每重复每个种源各单株测定指标的平均值进行统计。对另14个重复中的少量缺失数据按 $(\bar{x}_i + \bar{x}_j)/2$ 计算出近似值并进行逐个校正<sup>[12]</sup>。 $\bar{x}_i$ 及 $\bar{x}_j$ 分别表示同一种源14个重复测量指标的平均值和同一重复内所有种源测量指标的平均值。方差分析线性模型为:

$$X_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + e_{ij}$$

式中: $\mu$ 为平均值; $\alpha_i$ 为种源效应; $\beta_j$ 为重复效应; $e_{ij}$ 为随机误差。

趋势面分析是采用多元回归的方法建立某一性状与地理因子的曲面方差。若试验有 $n$ 个种源,测定各种源均值记为 $Z_i$ ,当 $x$ 与 $y$ 的最高系数为2时,公式如下:

$$Z_i = a_1 + a_2x + a_3y + a_4x^2 + a_5y^2 + a_6xy + \varepsilon_i$$

式中: $a_1 \sim a_6$ 为回归系数, $x$ 为经度, $y$ 表示纬度, $\varepsilon_i$ 为随机误差。

单株材积:

$$V = 0.000\ 096\ 683\ 656\ 8 \times D_{1.3}^{1.677\ 315\ 187} \times H^{0.978\ 488\ 79}$$

$$\text{遗传力: } H^2 = MG \cdot (MG + ME)^{-1}$$

式中: $MG$ 为遗传方差, $ME$ 为环境方差。

$$\text{变异系数: } CV = S \cdot X^{-1}$$

式中: $S$ 为标准差, $X$ 为平均值。

$$\text{标准差: } S = \left[ \sum (x - \bar{x})^2 \cdot (n - 1)^{-1} \right]^{-1/2}$$

$$\text{pearson 相关系数: } R = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}}$$

$$\text{spearman 秩相关系数: } \rho_s = 1 - 6 \sum d_i^2 / n(n^2 - 1), d_i \text{ 为 } X_i \text{ 与 } Y_i \text{ 的秩次之差;}$$

遗传增益: $\Delta G = S/\overline{X_{ck}} \times H^2$ , $S$ 为选择差, $\overline{X_{ck}}$ 为江西种源的平均数。

数据统计分析利用EXCEL2011和SPSS22.0软件,采用Surfer 11.0软件进行趋势面作图。

## 2 结果与分析

### 2.1 杉木种源生长性状差异分析

来自全国169个杉木种源方差分析结果(表2)表明,169个杉木种源在5、10、31年生时各生长性状均具有极显著水平的差异,说明在不同生长阶段,169个杉木种源生长差异较大,这为杉木种源的选择和早期评价提供了可能。

表2 杉木种源不同林龄生长性状的方差分析

Table 2 Variance analysis of growth of Chinese fir provenance

林龄/a Stand age/a	变异来源 Source of variation	自由度 DF	树高 Height/m		胸径 DBH/cm		材积 Volume/m <sup>3</sup>	
			均方 Mean square	F	均方 Mean square	F	均方 Mean square	F
5	种源 provenance	168	1.49	2.79**	7.30	4.63**	5.78 × 10 <sup>-5</sup>	3.64**
	重复 Repeat	13	8.28	15.54**	28.51	18.06**	2.43 × 10 <sup>-4</sup>	15.27**
	误差 Error	2 184	0.53		1.58		1.59 × 10 <sup>-5</sup>	
10	种源 provenance	168	5.74	3.83**	18.84	6.13**	2.35 × 10 <sup>-3</sup>	7.99**
	重复 Repeat	13	26.61	17.75**	45.35	14.75**	6.16 × 10 <sup>-3</sup>	20.95**
	误差 Error	2 184	1.50		3.07		2.94 × 10 <sup>-4</sup>	
31	种源 provenance	168	20.77	5.90**	98.12	6.27**	7.96 × 10 <sup>-2</sup>	6.81**
	重复 Repeat	13	18.71	5.32**	79.97	5.11**	5.11 × 10 <sup>-2</sup>	4.37**
	误差 Error	2 184	3.52		15.65		1.17 × 10 <sup>-2</sup>	

注: \* 表示  $P < 0.05$  水平上差异显著, \*\* 表示  $P < 0.01$  水平上差异显著。下同。

Note: \* represents significances differences at  $P < 0.05$ , \*\* represents extremely significances differences at  $P < 0.01$ . Same as below.

## 2.2 杉木种源生长性状与地理因子趋势面分析

树高、胸径为杉木生长的主要调查性状,为能更清晰的描述其地理变异趋势,对杉木的胸径、树高与种源的地理位置作二元二次趋势面分析,其回归方程见表3,方程的显著性达到了极显著水平。由趋势面图可知:胸径(图1)、树高(图2)的变异模式均为双向渐变。就胸径而言,随着纬度的增加,种源胸径先增加后减小,变幅较大,即中部种源生长优于南

北部种源;在经度方向上,胸径先减小后增大,变幅较小,东西部种源生长变化不明显。总体而言,胸径随经纬度的变化呈现“骆驼峰”趋势,即在分布区内,西南和东南部种源生长较好。树高与胸径有着同样的变化规律。由表4可知:树高、胸径与纬度具有极显著的负相关,与经度的相关不显著,与趋势面分析一致。

表3 树高与胸径的趋势面分析回归方程

Table 3 Regression equation of binary quadratic trend surface analysis for Height and DBH

性状 Trait	趋势面回归方程 Regression equation of trend surface analysis	拟合系数 Fitting coefficient	P 值 P value
胸径 DBH	$D = 66.335 - 1.894x + 6.645y + 0.012x^2 - 0.081y^2 - 0.022xy$	0.169	0.00
树高 Height	$H = 27.775 - 0.748x + 3.076y + 0.005x^2 - 0.036y^2 - 0.011xy$	0.168	0.00

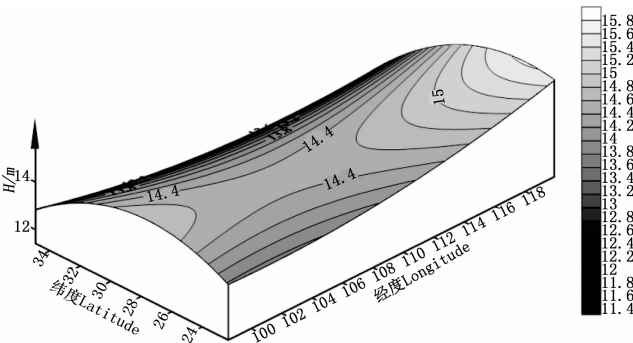


图1 胸径与经纬度趋势面图

Fig. 1 Diagram of two powers contour-trend surface of DBH

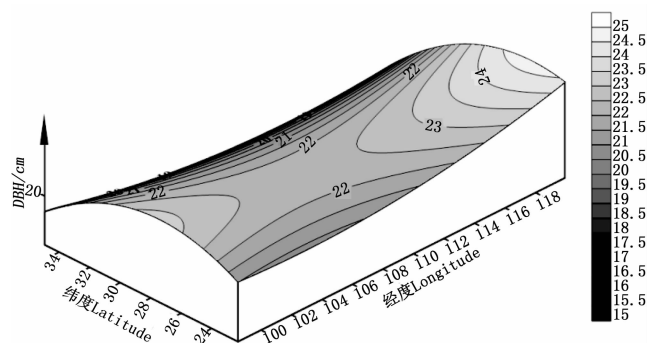


图2 树高与经纬度趋势面图

Fig. 2 Diagram of two powers contour-trend surface of Height

表4 生长性状与地理因子的 Pearson 相关分析

Table 4 Pearson correlation analysis between growth traits and geographic factors

性状 Trait	树高 Height	胸径 DBH
经度 Longitude	0.124	0.135
纬度 Latitude	-0.249 1**	-0.238**

## 2.3 杉木种源生长性状遗传变异分析

由表5可知:在不同生长阶段,杉木种源各性状的遗传变异不尽相同,其中,单株材积的变异系

数最大,远远大于树高和胸径的变异程度,各变异系数为材积 > 胸径 > 树高。在遗传力方面,各生长性状的遗传力很高,树高为 0.750 ~ 0.831,胸径为 0.814 ~ 0.850,材积为 0.808 ~ 0.875,说明杉木种源各性状受到较高水平的遗传控制。在不同林龄,树高的遗传力呈上升趋势,而胸径和材积的遗传力较稳定,表明树高较胸径和材积更容易受外界环境影响。

表5 杉木种源不同林龄生长性状遗传变异参数

Table 5 Parameters of genetic variation of growth traits of Chinese fir provenance test at different ages

林龄 Stand age/a	性状 Trait	平均值 Mean	最大值 Max	最小值 Min	变异系数 CV/%	遗传力 Heritability	标准差 S
5	树高 Height/m	4.028	6.375	0.933	17.2	0.750	0.692
	胸径 DBH/cm	5.726	9.600	1.100	24.1	0.814	1.377
	材积 Volume//m <sup>3</sup>	0.008	0.022	1.76 × 10 <sup>-4</sup>	50.5	0.808	0.004
10	树高 Height/m	9.412	13.300	3.000	13.7	0.798	1.292
	胸径 DBH/cm	12.408	19.250	4.233	16.1	0.850	2.001
	材积 Volume//m <sup>3</sup>	0.061	0.159	0.008	33.0	0.875	0.020
31	树高 Height/m	14.450	21.270	7.290	15.2	0.831	2.197
	胸径 DBH/cm	22.220	40.300	9.800	21.0	0.841	4.675
	材积 Volume//m <sup>3</sup>	0.258	0.949	0.027	50.2	0.853	0.129

### 2.4 杉木各生长性状的早晚相关及早期选择效果

早期选择的可行性与性状年-年相关系数关系密切<sup>[13]</sup>。对169个种源的胸径、树高和材积在不同林龄的生长状况和秩次分别进行了相关分析,结果(表6)表明:胸径、树高和材积在各林龄间的秩次表型相关系数分别为0.442~0.884、0.426~0.859、0.451~0.897,表型相关系数分别为0.476~0.880、0.458~0.880、0.503~0.889,各性状在5、10、31年生各林龄间的表型相关和秩次相关均达到极显著的正相关,说明杉木地理种源进行早期选择具有较高的可靠性。

### 2.5 杉木种源聚类结果分析

对参试169个种源5、10、31年生的胸径、树高和材积分5类进行聚类分析,选出其中快速生长型,较快速生长型和中速生长型的种源,结果见表7。从表7可以看出:在各个林龄阶段,试验林生长很好的种源仅占一小部分,5年生11个,10年生18个,31年生7个,而且各林龄入选种源都不一样,进一步说明了开展种源试验和早期选择的必要性;同时5年生快速生长型的大部分种源在10年生

表6 主要生长性状的早晚相关系数

Table 6 Juvenile-mature correlation coefficients of the main growth traits

性状 Trait	林龄 Stand age	5	10	31
胸径 DBH	5	1	0.884 **	0.442 **
	10	0.880 **	1	0.630 **
	31	0.476 **	0.675 **	1
树高 Height	5	1	0.859 **	0.426 **
	10	0.880 **	1	0.576 **
	31	0.458 **	0.603 **	1
材积 Volume	5	1	0.897 **	0.451 **
	10	0.889 **	1	0.606 **
	31	0.503 **	0.679 **	1

注:上三角数据为性状秩次相关系数,下三角数据为性状表型相关系数。

Note: Data in upper triangular are rank correlation coefficient for traits, and the lower triangular are phenotypic correlation coefficients of traits.

依然生长很好,而到31年生仅34号种源和44号种源保持其生长状况,表明在杉木生长的较早期,由遗传控制发育的潜力未充分发挥出来,此时选择存在很大的弊端。

表7 杉木种源各林龄生长聚类分析

Table 7 Clustering analysis of Chinese fir provenance test at different ages

类群 Cluster	种源号 No.																	
	5年生种源 5-year-old provenance						10年生种源 10-year-old provenance						31年生种源 31-year-old provenance					
快速生长型 Rapidest growth type	33	34	41	44	118	119	32	33	34	35	36	40	36	34	39	35	47	44
	139	147	148	149	164		41	44	47	48	84	118	32					
较快生长型 Second rapid growth type	12	31	32	35	36	37	12	28	30	31	37	38	148	100	151	84	40	38
	40	47	48	50	54	56	39	42	43	52	54	55	120	140	30	139	48	82
	66	68	77	78	83	84	56	60	62	68	78	82	31	163	33	37	42	147
	86	87	92	93	94	120	83	86	87	90	91	92	152	118	149	41		
	121	122	125	126	127	128	93	94	100	102	103	105						
	129	131	132	133	140	142	110	114	117	119	120	121						
	144	150	151	163	168		122	124	125	127	128	129						
							131	133	140	142	146	150						
							151	152	164									
	中速生长型 Medium-speed growth type	1	2	3	9	10	11	1	2	3	9	15	16	93	87	119	45	28
13		15	16	18	19	23	18	23	24	27	29	49	95	116	70	123	104	90
28		29	30	38	39	42	50	51	53	57	61	63	153	24	142	103	56	27
43		46	49	51	52	53	64	66	67	71	73	75	166	127	105	94	124	113
55		57	60	61	62	64	77	80	88	95	96	97	111	138	110	162	83	150
67		71	75	79	80	81	98	99	101	104	106	108	108	92	52	12	96	63
82		85	88	89	90	91	109	113	115	123	130	132	23	164	49	136	43	128
95		96	98	99	100	101	135	143	144	153	158	159						
102		103	104	105	106	110	161	165	166	167	168							
113		114	115	117	123	124												
130	135	143	146	152	153													
158	159	161	165	166	167													

## 2.6 杉木种源早晚期选择分析和风险估计

对种源的选择,早期入选而后期未入选的为错选,反之则为漏选。通过聚类分析,选出各林龄生长最好和生长最差的种源,从表8中可以清楚的看出:在各林龄生长较好的种源均来自于南岭山地种源区,其中,生长最好的是福建崇安、顺昌、尤溪等福建北部种源,生长较差的大部分来源于湘鄂赣浙山地丘陵种源区、黄山天目山种源区和贵州山原种源区,说明南岭山地种源区的杉木更适宜在江西引种栽植,而湘鄂赣浙山地丘陵、黄山天目山和贵州山原这3个种源区的杉木种源在江西生长潜力较低。

依林木的生长节律,杉木在31年生时,其性状的生长已经充分发挥出来。以31年生时所选优良种源为标准,对种源各林龄选择的选对率、错选率和漏选率进行统计分析,结果见表9。对比10年生与5年生的选择情况,10年生选对率提高了15.15%,

错选率和漏选率分别降低了15.15%和57.14%,其漏选率仅为14.29%,包含决选86%的种源,说明10年生选择的种源已经包含大部分决选种源,此时选择有一定的可靠性。

## 2.7 杉木优良种源遗传增益评价

对31年生优良种源的生长状况进行分析,从表10中可以看出:29个生长较好杉木种源的平均胸径为26.94 cm,树高为16.58 m,材积为0.40 m<sup>3</sup>,与当地种源(江西分宜)相比,这些种源的平均胸径增加了22.96%,树高增加15.46%,材积增加了64.67%,可见这些种源在试验地生长非常好,其中,福建崇安、顺昌、尤溪等福建北部的7个种源生长最好,其胸径、树高和单株材积的遗传增益分别为23.21%~31.45%、15.60%~20.19%、59.94%~89.97%,说明这些种源具有较高的遗传增益。

表8 不同林龄生长最好和最差种源筛选结果比较

Table 8 Comparison of the best and worst provenances in different age

林龄/a Stand age	不同林龄生长最好种源 The best provenance for different ages	不同林龄生长最差种源 The worst provenance for different ages
5	33,34,41,44,118,119,139,147,148,149,164	65,76,116,155,162,169
10	32,33,34,35,36,40,41,44,47,48,84,118,126,139,147,148,149,163	7,20,21,22,25,26,59,65,76,107,111,116,154,155,157,162
31	36,34,39,35,47,44,32	2,4,5,7,11,13,17,18,19,21,22,25,26,55,66,67,69,75,77,79,81,86,89,101,114,115,125,145,155,156,161

表9 杉木种源不同林龄选择风险

Table 9 Early selection risk of Chinese fir provenance test at different ages

林龄 Stand age/a	入选数 Number of selection	选对数 Number of correct selection	选对率 Correct selection rate/%	错选数 Number of wrong selection	错选率 Wrong selection rate/%	漏选数 Number of missed selection	漏选率 Missed selection rate/%
5	11	2	18.18	9	81.82	5	71.43
10	18	6	33.33	12	66.67	1	14.29
31	7	7	100.00	0	0.00	0	0.00

表10 杉木优良种源选择效果评价

Table 10 Evaluation of the selection of superior provenance of Chinese fir

种源号 No.	胸径 DBH			树高 Height			材积 Volume		
	均值 Mean/cm	现实增益 Realized gain/%	遗传增益 Genetic gain/%	均值 Mean/m	现实增益 Realized gain/%	遗传增益 Genetic gain/%	均值 Mean/m <sup>3</sup>	现实增益 Realized gain/%	遗传增益 Genetic gain/%
32	30.53	37.40	31.45	17.96	24.30	20.19	0.53	105.47	89.97
39	30.14	35.64	29.97	17.87	23.69	19.69	0.51	96.80	82.57
34	30.02	35.13	29.54	17.84	23.46	19.50	0.50	94.78	80.85
36	29.82	34.20	28.76	17.77	22.98	19.10	0.49	91.27	77.85
44	28.35	27.60	23.21	17.16	18.77	15.60	0.44	71.99	61.41
35	28.54	28.47	23.94	17.30	19.77	16.43	0.44	71.58	61.06
47	28.41	27.89	23.46	17.24	19.34	16.07	0.44	70.27	59.94
149	27.74	24.83	20.88	16.79	16.26	13.51	0.44	69.21	59.04
41	27.74	24.85	20.90	16.87	16.81	13.97	0.43	65.51	55.88

续表 10

种源号 No.	胸径 DBH			树高 Height			材积 Volume		
	均值 Mean/cm	现实增益 Realized gain/%	遗传增益 Genetic gain/%	均值 Mean/m	现实增益 Realized gain/%	遗传增益 Genetic gain/%	均值 Mean/m <sup>3</sup>	现实增益 Realized gain/%	遗传增益 Genetic gain/%
118	27.58	24.14	20.30	16.84	16.59	13.79	0.42	61.80	52.72
48	26.92	21.15	17.79	16.46	13.92	11.57	0.41	58.35	49.77
33	27.21	22.49	18.91	16.72	15.73	13.07	0.40	55.71	47.52
31	27.04	21.68	18.23	16.70	15.61	12.97	0.39	50.57	43.14
139	26.84	20.82	17.51	16.58	14.79	12.29	0.39	49.90	42.56
151	26.36	18.63	15.67	16.30	12.83	10.66	0.38	47.40	40.43
140	26.74	20.35	17.11	16.57	14.71	12.22	0.38	47.01	40.10
40	26.50	19.27	16.21	16.44	13.77	11.44	0.38	45.59	38.89
148	26.29	18.32	15.41	16.31	12.90	10.72	0.37	44.71	38.14
100	25.97	16.89	14.20	16.20	12.11	10.06	0.36	39.66	33.83
38	25.63	15.37	12.93	16.02	10.91	9.07	0.35	36.89	31.47
84	25.81	16.18	13.61	16.16	11.89	9.88	0.35	35.98	30.69
120	25.61	15.26	12.83	16.06	11.14	9.26	0.35	34.42	29.36
30	25.53	14.90	12.53	16.02	10.89	9.05	0.34	33.50	28.58
163	25.23	13.55	11.40	15.87	9.89	8.22	0.34	30.60	26.10
82	25.32	13.97	11.75	15.94	10.33	8.58	0.34	30.59	26.09
37	24.95	12.28	10.33	15.77	9.13	7.59	0.33	26.51	22.61
147	24.77	11.49	9.66	15.68	8.57	7.12	0.32	24.67	21.04
42	24.83	11.76	9.89	15.73	8.89	7.39	0.32	24.35	20.77
152	24.73	11.28	9.49	15.68	8.51	7.07	0.32	23.51	20.05
121(ck)	21.91			14.36			0.24		

### 3 讨论

#### 3.1 杉木种源生长性状遗传变异分析

杉木自然分布范围广泛,地理种源变异很大,优良种源选择效果好、增益大。对来自全国 169 个杉木种源在不同林龄试验林的生长性状研究发现,不同种源间胸径、树高和材积的生长均存在极显著的差异,其中,31 年生时生长最快种源的胸径、树高和材积的年均生长量分别达到 0.98 cm,0.58 m,0.017 1 m<sup>3</sup>,生长最慢种源主要性状的年均生长量分别为 0.56 cm,0.39 m,0.004 7 m<sup>3</sup>,二者分别相差 75.86%、48.55%、263.76%,说明杉木种源存在良好的选择潜力,这与以前有关杉木种源试验的研究结果基本一致<sup>[14-16]</sup>。通过对种源性状与地理因子趋势面分析,发现在分布区内,西南和东南部种源生长较好,且生长性状与纬度有极显著的相关,与经度相关性不明显,陈伯望等<sup>[17]</sup>对杉木种源生长的地理变异的研究也有类似的结果。对杉木种源生长状况遗传参数估算的研究表明,参试杉木种源各性状的遗传力达到较高水平,均在 0.75~0.875 之间,说明杉木各性状受到较高水平的遗传控制;同时在主要性状中,单株材积的变异系数远远大于胸径和树高的变异,这无疑再一次证明了杉木种源选择的

潜力。

#### 3.2 杉木优良种源早期选择的适宜年龄

由于林木育种周期长的特殊性,良种选育困难,为缩短育种周期,提高遗传改良的效率,对林木进行早期选择是十分必要的<sup>[18]</sup>。卢国美等<sup>[19]</sup>认为,油松早期选择的年龄是 15 年;王章荣等<sup>[20]</sup>认为,马尾松早期选择的可靠年龄为 10 年。就杉木而言,本文追踪测定参试材料,开展胸径、树高、材积在 5、10、31 年生生长量的早晚相关分析,结果表明 3 个性状在各林龄生长量和秩次相关系数都达到了极显著的正相关,但随着林龄的增大,相关程度有下降的趋势。另外,不同地理种源其速生期不同,有的种源早期生长慢,后期生长快,而另一些种源早期生长快,后期生长慢,还有一些种源属于持续生长型,致使在不同林龄选择出的优良种源会有一些的差异,因此,过早的进行选择可能会造成一些优良种源的漏选和劣质种源的误选。综合早晚相关和种源的生长类型分析,杉木种源的早期选择应在 10 年左右,本研究在 10 年生选择时,其选择强度为 10.65%,当在 31 年生时选择,选择强度为 4.14%,说明在早期选择时,要降低其选择强度,否则可能导致种源的漏选和误选,可对早期入选的种源进行第 2 次选择,增加优良种源的选对率。对于早期选择的方法有很多衍

生,陈伯望等<sup>[21]</sup>在对油松的早期选择中,引入了未来精制模型(FNW),用来预测在选择前后的未来增益;Bridgwater等<sup>[22]</sup>在火炬松家系选择中利用生长模拟的方法,在温室里满足其生长发育的条件,使其很快就能充分展现成熟期的特征,从而达到早期选择的目的;赵承开<sup>[23]</sup>在杉木无性系的早期选择中,利用“双指标”选择,认为“双指标”选择比用“单指标”选择更可靠。但随着新技术的发展,分子标记辅助育种渐渐成为研究的重点,在今后的研究中,使用常规育种手段和分子辅助育种相结合的方法,开拓出一条精度高,可靠性强的早期选择方法,为杉木遗传改良奠定基础。

### 3.3 杉木优良种源效果评价

从 169 个种源中选择出 29 个生长较快的种源,大部分种源都来自福建省,还包含贵州、广西和湖南等地的种源,贵州省生长较好的种源有黎平、榕江和剑河,广西省有融水和三江,湖南省有会同和芷江。这 29 个种源与江西当地种源相比,其胸径、树高、材积的遗传增益分别为 9.46%~31.45%、7.07%~20.19%、20.05%~89.97%,其中,生长最好的是福建崇安、顺昌、尤溪等福建北部的 7 个种源,胸径、树高和单株材积的遗传增益分别达到 23.21%~31.45%、15.60%~20.19%、59.94%~89.97%,材积生长潜力巨大,这 7 个优良种源均来源于南岭山地种源区,属于优良种源区。另外,研究还发现安徽宁国、浙江安吉和湖北建始等种源生长最差,这些种源大多来源于中亚热带北部,北亚热带东部和中部,与洪菊生等<sup>[11]</sup>研究结果一致。

## 4 结 论

通过对 169 个杉木地理种源的跟踪观测,发现杉木种源间生长差异极显著,胸径和树高生长地理变异模式均为双向渐变,在分布区内,西南和东南部种源生长较好;对杉木种源早期选择的研究表明,在 10 年生左右选择效果最佳,其选对率较高,错选率和漏选率最低,包含决选 86% 的种源;从 31 年生杉木成熟林中选择出的 29 个优良种源较当地种源有较大增幅,适宜在江西省及周边地区推广。

### 参 考 文 献:

[1] 盛炜彤. 中国人工林及其育林体系[M]. 北京:中国林业出版社, 2014.

- [2] 吴中伦. 杉木[M]. 北京:中国林业出版社,1984.
- [3] 张双英,王军辉,田开春,等. 云杉属的种和种源选择试验[J]. 湖南林业科技, 2013, 40(4): 29-32.
- [4] Cvjetkoviš B, Mataruga M, Dukiš V, et al. The variability of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) in the provenance test in Bosnia and Herzegovina[C]. Biennial International Symposium Forest and Sustainable Development, 2015.
- [5] Liu G, Chu Y, Shi Y, et al. The Provenance Test of 17-year-old *Pinus sylvestris* var. *mongolica* at Maoershan Area[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2003, 31(4): 1-3.
- [6] Schmidting R C. Use of provenance tests to predict response to climate change: loblolly pine and Norway spruce[J]. Tree Physiology, 1994, 14(7-9): 805-817.
- [7] 韩强,仲崇禄,张勇,等. 山地木麻黄种源在海南临高的遗传变异及选择[J]. 林业科学研究, 2017, 30(4): 595-603.
- [8] 张海燕. 香椿种源生长差异性分析及早期评价[J]. 中南林业科技大学学报, 2017, 37(1): 38-42.
- [9] 何霞,吕子豪,廖柏勇,等. 苦楝不同种源在广东生长适应性表现及早期选择[J]. 中南林业科技大学学报, 2018, 38(3): 44-50.
- [10] 俞新妥,陈承德,何智英,等. 杉木种源试验林(23年)的生长和材性研究[J]. 福建林学院学报, 1984, 4(1): 1-8.
- [11] 洪菊生. 杉木造林优良种源选择[J]. 林业科学研究, 1994, 7(专刊): 1-25.
- [12] 顾万春. 统计遗传学[M]. 北京:科学出版社, 2004.
- [13] 马常耕,周天相,徐金良. 杉木无性系生长的遗传控制和早期选择初探[J]. 林业科学, 2000, 36(s1): 62-69.
- [14] 周诚,曾志光. 杉木种源幼龄期与成熟期生长特性比较研究[J]. 江西林业科技, 2006, 34(3): 10-12.
- [15] 樊琳,江波,沈爱华,等. 杉木速生优质种源多性状选择研究[J]. 浙江林业科技, 2010, 30(5): 24-32.
- [16] 夏根清,吴毅聪. 杉木造林优良种源多性状选择研究[J]. 浙江林业科技, 1999, 19(5): 1-5.
- [17] 陈伯望,洪菊生. 杉木种源胸径生长地理变异的趋势面分析[J]. 林业科学, 1995, 31(2): 110-115.
- [18] 杨秀艳,季孔庶. 林木育种中的早期选择[J]. 世界林业研究, 2004, 17(2): 6-8.
- [19] 卢国美,李国锋,侯振中,等. 油松生长力早期选择的研究[J]. 河南林业科技, 1994, 44(2): 12-14.
- [20] 王章荣,陈天华,周志春,等. 福建建安马尾松生长早晚期相关及早期选择[J]. 南京林业大学学报:自然科学版, 1987, 11(3): 41-47.
- [21] 陈伯望,沈熙环. 油松生长性状早期选择的研究[J]. 林业科学, 1992, 28(5): 450-455.
- [22] Bridgwater F E, Mckeand S E. Early family evaluation for growth of loblolly pine[J]. Forest Genetics, 1997, 4(1): 51-58.
- [23] 赵承开. 杉木优良无性系早期选择年龄和增益[J]. 林业科学, 2002, 38(4): 53-60.



# Effect of Long-term Selection of Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook) Provenances

WU Han-bin<sup>1</sup>, DUAN Ai-guo<sup>1</sup>, ZHANG Jian-guo<sup>1,2</sup>, SUN Jian-jun<sup>3</sup>

(1. Research Institute of Forestry, Chinese Academy of Forestry; Key Laboratory of Tree Breeding and Cultivation, National Forestry and Grassland Administration; State Key Laboratory of Tree Genetics and Breeding, Beijing 100091, China; 2. The Southern Modern Forestry Collaborative Innovation Center, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, Jiangsu, China; 3. Experimental Center of Subtropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Fenyi 336600, Jiangxi, China)

**Abstract:** [ **Objective** ] To study the differences in the geographical provenance of Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook) in different-aged forest and to screen provenances in the experimental area for the purpose of promoting the long-term genetic improvement of Chinese fir provenance. [ **Method** ] A provenance test forest of Chinese fir was established in 1981, and the major growth parameters were measured at the 5th, 10th and 31st years to detect the genetic variation in DBH, tree height and volume index among provenances. The study evaluated the long-term selection effect of good provenance by using juvenile-mature correlation and cluster analysis. [ **Result** ] The result showed that there were great significant genetic variation in tree height, DBH and volume. The variation coefficients at the 31th year were 75.86%, 48.55% and 263.76% for DBH, tree height and volume. The variance of traits followed an obvious geographic variation pattern, and latitude played the major role. From the south to north, the increment of Chinese fir increased at first and then decreased, and the provenances from southwestern and southeastern China grew better. The heritabilities of provenance for DBH, tree height and volume varied between 0.75 and 0.85, indicating the three growth traits had high genetic control level. The trait value and the rank based on major traits were correlated significantly and positively among different selection ages. This study showed that the appropriate selection age for Chinese fir provenance test should be about 10 years. Twenty-nine provenances of Chinese fir were selected from 169 provenances, most of which originated from Fujian Province and the others originated from Guizhou, Guangxi and Hu'nan province. Among them the provenances grew the best came from Chong'an, Shunchang, and Youxi of northern Fujian Province. The genetic gains of DBH, tree height and volume were 23.21% - 31.45%, 15.60% - 20.19%, and 59.94% - 89.97%, respectively. [ **Conclusion** ] The early selection age has a significant effect on shortening the breeding cycle of Chinese fir. Selection at the 10th year is more conducive to improve the efficiency of Chinese fir genetic improvement. The 29 excellent provenances selected from the 31-year-old mature Chinese fir forests have a larger increase than the local provenances, and are suitable for expanding in the Jiangxi Province and the surrounding areas.

**Keywords:** *Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook; provenance test; long-term selection; genetic gain

(责任编辑:张 研)