

# 落羽杉地理种源变异与选择

黄利斌<sup>1</sup>, 李晓储<sup>1</sup>, 张定瑶<sup>2</sup>, 陆兴安<sup>2</sup>, 汪企明<sup>1</sup>

(1 江苏省林业科学研究院, 江苏南京 211153 2 江苏省东海县李埏林场, 江苏东海 222332)

**摘要:** 从落羽杉原产地美国 6 个州引进 19 个落羽杉 (包括 4 个池杉) 种源, 以国内早期引种的河南鸡公山落羽杉 (CK1) 和池杉 (CK2) 为对照, 于 1993 年 3 月在江苏东海进行种源试验造林。在苗期和幼林期测定基础上, 对 13 a 种源试验林生长测定结果表明: 种源间树高、胸径和材积生长存在显著变异, 其遗传变异系数分别为 12.91%、23.51% 和 48.51%, 广义遗传力分别为 0.51、0.65 和 0.60。在同一区域, 既有生长表现较好的种源, 也有生长表现较差的种源, 种源生长变异未见明显的地理趋势。落羽杉种源苗期 (1 a) 与 13 a 生长没有相关性, 3 a 开始与 13 a 生长相关性显著。落羽杉种源早期选择的合适年龄为 3—5 a 初选, 8 a 决选。按单株材积比 CK1 增加 50% 的选择强度, 选出路易斯安娜 Q. R. (1600 号)、密西西比 R. F. (503 号)、阿肯色 O. M. (304 号) 和佛罗里达 N. L. (701 号) 4 个优良种源。其树高、胸径和材积的平均表型增益为 13.86%、21.78% 和 61.11%, 遗传增益达 7.07%、14.16% 和 36.67%; 与 CK2 相比, 平均表型增益和遗传增益分别达 14.29%、59.89%、148.64% 和 7.29%、38.93%、89.18%, 丰产性十分显著。

**关键词:** 落羽杉; 种源; 生长变异; 早晚期相关; 选择; 遗传增益

中图分类号: S722.3 文献标识码: A

## Study on Provenance Variation and Selection of *Taxodium distichum*

HUANG Li-bin<sup>1</sup>, LI Xiao-chu<sup>1</sup>, ZHANG Ding-yao<sup>2</sup>, LU Xing-an<sup>2</sup>, WANG Qi-ming<sup>1</sup>

(1 Jiangsu Academy of Forestry, Nanjing 211153, Jiangsu, China)

2 Linian Forest Farm of Donghai County, Jiangsu Province, Donghai 222332, Jiangsu, China)

**Abstract** Nineteen *Taxodium distichum* provenances (including 4 *T. distichum* var *inbricatum* provenances) were introduced from 6 states in U. S. A. and planted at Donghai, Jiangsu taking earlier introduced provenances of *T. distichum*, CK1 and *T. distichum* var *inbricatum*, CK2 as controls to carry out the provenance trials. The growth in seedling and juvenile stage were measured. The results of growth measurement of 13-year-old trial stand showed that there were significant variation among provenances in tree height, dbh and volume increment, the genetic variation coefficients were 12.91%, 23.51% and 48.51% and the broad-sense heritability were 0.51, 0.65 and 0.60 respectively. The growth variation presented the stochastic variation among different provenance. Both better and poorer provenances in growth traits existed and no obvious geographical trend of provenance growth variation was observed. There was no correlation between the first year's growth and the 13th year's growth, but from the 3rd year on, there was a significant correlation with the 13th year's growth. The proper early selection period are as follows: 3rd—5th year for primary choice, 8th year for final choice. According to the criterion of selecting the provenance with individual volume 50% higher than the CK1, Louisiana Q. R., Mississippi R. F., Arkansas O. M. and Florida N. L. were selected as super provenances; their average phenotype gains of tree height, dbh and volume were

收稿日期: 2006-09-25

基金项目: 江苏省农业科技成果示范推广项目“落羽杉优良种源、家系及配套栽培技术示范推广”(编号 BC2001349)研究内容之一

作者简介: 黄利斌 (1966—), 男, 江苏常熟人, 副研究员, 主要从事林木育种研究工作。

13.86%, 21.78% and 61.11%, genetic gains were 7.07%, 14.16% and 36.67%, respectively. Compared with CK2, the average phenotype gains and genetic gain were 14.29%, 59.89%, 148.64% and 7.29%, 38.93% and 89.18%, respectively. The volume output of the super provenances was extremely significant.

**Key words** *Taxodium distichum*; provenance; growth variation; juvenile-mature correlation; selection; genetic gain

落羽杉属 (*Taxodium* Rich.) 传统分类包括落羽杉 (*T. distichum* (L.) Rich.)、池杉 (*T. ascendens* Biongn.) 和墨西哥落羽杉 (*T. mucronatum* Tenore) 3 个种<sup>[1]</sup>, 原产美国东南部, 墨西哥落羽杉可向南分布至危地马拉和墨西哥, 是古老孑遗植物。落羽杉树种适应性强、生长快、材质好、病虫害少, 能适应低湿滩地、干旱瘠薄丘陵山地、碱性土地等多种立地造林。我国自 20 世纪初开始引种, 现已成为南方平原地区江湖滩地造林、农田林网建设的重要树种。落羽杉树体挺拔高大, 树冠浓密, 树形优美, 秋季落叶较迟, 秋色如火如荼, 景观价值较高, 随着我国生态环境建设的加强和城市化的发展, 落羽杉在城乡绿化建设中的应用更加广泛。目前, 有关落羽杉属种源、家系选育的研究较少<sup>[2~4]</sup>。我国在“八五”期间开展了较系统的落羽杉属种源、家系引种选育攻关研究, 汪企明等<sup>[5~7]</sup>和黄利斌等<sup>[8]</sup>对苗期和幼林期生长、繁殖研究结果进行了报道。本文报道 13 a 时种源生长测定与选择研究结果。

## 1 试验地自然概况

引种试验地位于东海县李埝林场, 地理位置为 34°31' N, 118°44' E, 属暖温带南部气候, 平均气温 13.7℃, 极端最高气温 39℃, 极端最低气温 -18.3℃, 年降水量 890 mm, 6—9 月降水 628.8 mm, 占全年 73.3%, 年均相对湿度 71%, 无霜期 206 d。该区属苏北低山丘陵区, 土壤类型为苏北山地棕壤中由片麻岩等发育的包浆岭沙土, 土层较浅薄, 有效土层仅 20~30 cm, 有机质含量 7.0 g·kg<sup>-1</sup>, 土壤 pH 值为 6.5~7.0。

## 2 材料与方法

### 2.1 试验材料与造林设计

造林试验种源种子由中国林业科学研究院提供, 包括来自美国 6 个州的 19 个落羽杉 (其中 4 个池杉) 种源, 种源产地参见文献 [5, 6], 对照为我国早年引种的落羽杉 (CK1, 种子采自河南鸡公山) 和池杉 (CK2, 种子采自南京江宁)。同时, 增加落羽杉属杂种无性系中山杉 302 (*Taxodium* 'Zhongshansa 302' Cheng (*Taxodium distichum* × *T. mucronatum*))<sup>[9]</sup>、水杉 (*Metasequoia glypt-*

*ostrobooides* Hu et Cheng) 和火炬松 (*Pinus taeda* Linn.) 3 个参照树种参与试验。共 24 个处理, 随机区组设计, 重复 4 次, 24 株小区。1993 年 3 月用 1 年生容器苗造林, 株行距 3.3 m × 2 m。幼林期 6 年内行间间作花生 (*Arachis hypogaea* Linn.)、甘薯 (*Dioscorea esculenta* (Lour.) Burkill) 等农作物。

### 2.2 测定分析方法

于 2005 年 3 月对 13 a 试验林进行每木检测, 测定树高、胸径生长。单株材积按“三杉”二元材积经验公式估算<sup>[10]</sup>。

落羽杉和池杉种源各性状差异采用方差分析和多重检验。利用不同年龄生长测定结果, 进行年际间生长相关分析。遗传参数估算数学模型  $X_{ij} = \mu + A_i + R_j + \varepsilon_{ij}$  ( $\mu$  为群体平均数,  $A_i$  为第  $i$  个种源效应,  $R_j$  为第  $j$  个区组效应,  $\varepsilon_{ij}$  为误差); 表型变异系数  $pcv = (\sigma_p^2)^{1/2} / \bar{X}$ , 遗传变异系数  $gcv = r(\sigma_g^2)^{1/2} / \bar{X}$ , 广义遗传力  $h^2 = r\sigma_g^2 / (\sigma_e^2 + r\sigma_g^2)$  ( $\sigma_p^2$  为表型方差,  $\sigma_g^2$  为遗传方差,  $\sigma_e^2$  为误差均方,  $\bar{X}$  为种源平均值,  $r$  为重复数); 种源选择表型增益  $G = (s/CK) \times 100\%$ , 遗传增益  $\Delta G = (s \times h^2 / CK) \times 100\%$  ( $s$  为选择差, 优良种源与对照平均值的离差,  $CK$  为对照均值)。

## 3 结果与分析

### 3.1 种源间生长变异

落羽杉属的落羽杉和池杉在原产地分布区交错, 生态学特性相似, 近年来, 根据群体间 DNA 多态性分析, 更多学者认为池杉是落羽杉的一个变种 (*Taxodium distichum* var *inbricatum* (Nutt.) Cronm.) 或生态型<sup>[11]</sup>。落羽杉和池杉种源生长测定及方差分析结果见表 1, 2。

参试 21 个种源 13 a 时平均树高、胸径和单株材积分别为 6.82 m、12.54 cm 和 0.041 23 m<sup>3</sup>, 种源间生长存在明显变异。经方差分析, 种源间  $F$  值达显著 (树高) 和极显著 (胸径和单株材积) 水平, 而区组间  $F$  值不显著 (见表 2)。在参试种源中, 生长表现较好的 7 个种源为路易斯安娜 Q. R. (1600 号), 密西西比 R. F. (503 号), 阿肯色 Q. M. (304 号), 佛罗里达 N. L. (701 号), 密西西比 5 号树 (505 号), 美国池杉 2 (44002 号) 和阿

肯色 Q. M. 国有林 (302 号) 等; 生长表现较差的 7 个种源为田纳西 W. A. P. (9003 号)、CK2(5000 号)、阿肯色 S T 国有林 (301 号)、美国池杉 1 号 (44001 号)、阿肯色 B. B. (303 号) 美国池杉 6 号 (44006 号) 和路易斯安娜 B. P. (1602 号) 等。生长最优种源与最差种源相比, 单株材积相差达 1.75 倍。

从种源的地理分布看, 来自落羽杉自然分布区南部沿海路易斯安娜州和佛罗里达州的 4 个种源中, 有 2 个种源生长较好 (材积生长量列排序前 7 位为较好, 列 8~14 位为中等, 列后 7 位为较差, 下同), 1 个种源中等, 1 个种源较差; 来自分布区内陆中部密西西比州和阿肯色州的 8 个种源中, 有 4 个种源生长较好, 2 个种源生长中等, 2 个种源生长较差; 而来自分布区内陆偏北的田纳西州和肯塔基州的 3 个种源中, 有 2 个生长中等, 1 个生长较差。由此可见, 落羽杉种源生长的地理趋势不明显。

### 3.2 生长的早晚期相关

林木改良中确定适当的选择年龄, 对缩短育种周期, 提高育种效率具有十分积极的意义。生长早晚期相关分析结果表明 (表 3), 落羽杉种源苗期 1 a 与幼林期 (3—8 a) 及中龄期 (13 a) 的生长均未见相关性。从 3 a 幼林开始, 高、径生长与 13 a 具有显著的正相关关系。3 a 5 a 与 13 a 的高、径相关系数分别在 0.8 和 0.7 以上。8 a 与 13 a 的高、径相关系数分别达 0.92 和 0.93, 其决定系数 ( $R^2$ ) 达 0.85 和 0.86 说明造林 3 a 后, 落羽杉种源生长即存在明显的早晚期相关。从实际选择结果看, 在 3—5 a 时依据综合生长性状初选的 1600 号, 401 号, 304 号, 502

号, CK1 和 701 号等 6 个优良种源中<sup>[8]</sup>, 有 1600 号、304 号和 701 号等 3 个种源在 13 a 时仍位于生长前 4 名; 而 8 a 时生长列前 4 名的种源与 13 a 时完全一致。据此, 认为 3—5 a 时初选, 8 a 时决选, 是落羽杉种源早期选择的合适年龄。这与国内外多数学者研究认为针叶树种早期选择合适的年龄为 5—10 a 的结果相一致<sup>[12]</sup>。

表 1 21 个落羽杉种源生长 (13 a) 测定结果

编号	种源号及种源	树高 /m	胸径 /cm	单株材积 /m <sup>3</sup>
2	104(肯塔基 4 号)	6.8	12.150	0.037545
3	301(阿肯什 S T. 国有林)	5.9	10.425	0.024296
4	302(阿肯什 Q. M. 国有林)	6.9	13.775	0.047674
5	303(阿肯什 B. B.)	5.8	10.350	0.031474
6	304(阿肯什 O. M.)	7.3	15.675	0.059015
7	401(阿肯什 S. T. E.)	7.3	12.700	0.043086
8	502(密西西比 R. F.)	6.9	13.275	0.043979
9	503(密西西比 R. E.)	7.7	14.750	0.059483
10	505(密西西比 5 号树)	7.3	14.150	0.050871
12	701(佛罗里达 N. L.)	7.5	14.750	0.058785
13	1600(路易斯安娜 Q. R.)	7.9	15.125	0.064319
14	1601(路易斯安娜 N. R.)	6.7	12.925	0.038569
15	1602(路易斯安娜 B. P.)	6.8	11.300	0.034849
16	9003(田纳西 W. A. P.)	5.9	10.300	0.023410
17	41747(田纳西 H. C. O.)	6.8	12.425	0.041770
19	美国池杉 1 号	5.6	10.900	0.025854
20	美国池杉 2 号	7.0	14.175	0.048911
23	美国池杉 5 号	7.1	11.825	0.036951
24	美国池杉 6 号	6.6	10.375	0.033197
30	CK1(鸡公山早期引种落羽杉)	6.7	12.375	0.037489
33	CK2(国内早期引种池杉)	6.7	9.426	0.024292

表 2 落羽杉种源生长 (13 a) 变异方差分析及遗传参数

项目	因子	树高 /m		胸径 /cm		单株材积 /m <sup>3</sup>	
		均方 MS	F 值	均方 MS	F 值	均方 MS	F 值
方差因子	种源间 (df=20)	1.5127	2.049 <sup>a</sup>	13.4780	2.816 <sup>**</sup>	0.0006	2.473 <sup>**</sup>
	区组间 (df=3)	2.0284	2.748 <sup>ns</sup>	10.9576	2.290 <sup>ns</sup>	0.0006	2.464 <sup>ns</sup>
	机误 (df=60)	0.7381		4.7855		0.0002	
遗传参数	平均值 $\bar{X}$		6.819		12.543		0.041229
	pcv /%		18.04		29.27		59.40
	gcv /%		12.91		23.51		48.51
	$h^2$		0.512		0.645		0.595

注: 种源间: \*\* ,  $F > F_{0.01}(2, 20)$ ; \* ,  $F > F_{0.05}(1, 75)$ ; 区组间: ns  $F < F_{0.05}(2, 76)$ 。

表 3 落羽杉种源树高、胸径年间生长相关分析

林龄 /a	1	3	5	8	13
1	1	0.082125 <sup>ns</sup>	-0.00875 <sup>ns</sup>	0.05685 <sup>ns</sup>	0.024999 <sup>ns</sup>
3	0.224865 <sup>ns</sup>	1	0.919772 <sup>*</sup>	0.8312 <sup>**</sup>	0.818225 <sup>*</sup>
5	0.124712 <sup>ns</sup>	0.766737 <sup>*</sup>	1	0.91453 <sup>**</sup>	0.849803 <sup>**</sup>
8	0.199469 <sup>ns</sup>	0.835254 <sup>**</sup>	0.843664 <sup>*</sup>	1	0.919110 <sup>**</sup>
13	0.182449 <sup>ns</sup>	0.768721 <sup>*</sup>	0.708815 <sup>*</sup>	0.933805 <sup>*</sup>	1

注: 上三角为树高相关, 下三角为胸径 (1 a 3 a 为地径) 相关。n=21, \*\* ,  $R > R_{0.01}(0.5487)$ ; ns  $R < R_{0.05}(0.4329)$ 。

### 3.3 优良种源选择及增益

据对落羽杉种源生长性状的遗传参数估算, 树高、胸径和单株材积的遗传变异系数分别为 12.91%、23.51% 和 48.51%, 广义遗传力分别为 0.512、0.645 和 0.595 (见表 2), 种源的生长性状受中等以上遗传控制, 有较高的选择改良潜力。按照单株材积比 CK1 增加 50% 的选择强度, 选择出路易斯安娜 Q. R. (1600 号)、密西西比 R. F. (503 号)、阿肯色 O. M. (304 号) 和佛罗里达 N. L. (701 号) 4 个优良种源的树高、胸径和材积的平均表型增益分别为 13.86%、21.78% 和 61.11%, 遗传增益分别为 7.07%、14.16% 和 36.67%; 与 CK2 相比, 平均表型增益和遗传增益分别达 14.29%、59.89%、148.64% 和 7.29%、38.93%、89.18% (见表 4), 种源选择的增产效果十分显著。

同时, 试验结果还表明, 上述 4 个优良种源的生长不仅明显优于对照, 也显著高于同一丘陵立地生长的水杉 (树高 4.3 m, 胸径 5.9 cm, 单株材积 0.008 529 m<sup>3</sup>), 尤其优于丘陵立地适宜栽植树种火炬松 (树高 4.5 m, 胸径 12.6 cm), 其生长潜力已接

近中山杉 302 优良无性系 (树高 8.01 m, 胸径 15.7 cm, 单株材积 0.070 303 m<sup>3</sup>)<sup>[13]</sup>。因此, 落羽杉优良种源具有很好丰产潜力, 可在江苏及周边地区推广造林应用。

## 4 小结与讨论

(1) 落羽杉种源树高、胸径和材积生长存在显著变异, 13 a 时, 其遗传变异系数分别为 12.91%、23.51% 和 48.51%, 广义遗传力分别为 0.51、0.65 和 0.60 性状变异受中等以上遗传控制。落羽杉在美国东南部有密西西比河流域和东部沿海平原两个集中分布区域, 两个分布区在佛罗里达州北部和密西西比州南部、路易斯安娜州东南部相连<sup>[14]</sup>, Faulkner 等<sup>[3]</sup>对密西西比河流域落羽杉种源研究后认为, 变异存在随机性, 没有明显的地理趋势。曹福亮等<sup>[2]</sup>依据苗期试验结果, 认为在路易斯安娜州可能存在落羽杉优良种源的集群分布区。本试验的落羽杉种源主要来自密西西比河流域, 试验结果也揭示落羽杉种源生长变异没有明显的地理趋势。

表 4 落羽杉优良种源 (13 a) 的选择增益

种源号 产地	生长指标	均值	与 CK 1 比增益 %		与 CK 2 比增益 %	
			G	$\Delta G$	G	$\Delta G$
1600/路易斯安娜州 Q. R.	H /m	7.900	18.35	9.36	18.80	5.59
	$D_{1.3}$ /cm	15.125	22.22	14.44	60.48	39.31
	V/m <sup>3</sup>	0.064 319	71.56	42.94	164.77	98.86
503/密西西比州 R. F.	H /m	7.700	15.36	7.83	15.79	8.02
	$D_{1.3}$ /cm	14.750	19.19	12.47	56.50	36.72
	V/m <sup>3</sup>	0.059 483	58.67	35.20	144.87	86.92
304/阿肯色州 O. M.	H /m	7.275	8.99	4.58	9.40	4.79
	$D_{1.3}$ /cm	15.675	26.67	17.33	66.31	43.10
	V/m <sup>3</sup>	0.059 015	57.42	34.45	142.94	85.76
701/佛罗里达州 N. L.	H /m	7.525	12.73	6.49	13.16	6.71
	$D_{1.3}$ /cm	14.740	19.11	12.42	56.39	36.66
	V/m <sup>3</sup>	0.058 785	56.81	34.08	141.99	85.20
优良种源平均	H /m	7.60	13.86	7.07	14.29	7.29
	$D_{1.3}$ /cm	15.07	21.78	14.16	59.89	38.93
	V/m <sup>3</sup>	0.060 4	61.11	36.67	148.64	89.18
CK1 落羽杉 (河南鸡公山)	H /m	6.675	-	-	0.37	0.19
	$D_{1.3}$ /cm	12.375	-	-	23.38	15.49
	V/m <sup>3</sup>	0.037 489	-	-	35.20	21.12
CK2 池杉	H /m	6.650	-0.37	-0.19	-	-
	$D_{1.3}$ /cm	9.425	-23.38	-15.49	-	-
	V/m <sup>3</sup>	0.024 292	-35.20	-21.12	-	-

(2) 落羽杉种源苗期 (1 a) 与 13 a 生长没有相关性, 但从 3 a 开始与 13 a 生长早晚期相关性显著。因此, 落羽杉种源早期选择的年龄可确定为 3—5 a 初选, 8 a 决选。按照单株材积比 CK1 增加 50% 的

选择强度, 选出路易斯安娜 Q. R. (1600 号)、密西西比 R. F. (503 号)、阿肯色 O. M. (304 号) 和佛罗里达 N. L. (701 号) 4 个优良种源。13 a 时, 4 个优良种源的树高、胸径和材积生长的丰产性显著, 与 CK1

相比平均表型增益为 13.86%、21.78% 和 61.11%；遗传增益为 7.07%、14.16% 和 36.67%。与 CK2 相比平均表型增益和遗传增益分别达 14.29%、59.89%、148.64% 和 7.29%、38.93%、89.18%。同时,在试验中还发现优良种源内单株间在形态和生长方面也存在较大的差异,进一步开展落羽杉优良单株、观赏类型等的选择研究,充分利用不同层次的遗传变异,对不断提高落羽杉良种选育的综合效益具有积极意义。

#### 参考文献:

- [1] 郑万钧. 中国树木志(第一卷)[M]. 北京: 中国林业出版社, 1983
- [2] 曹福亮, 方升佐, 唐罗忠, 等. 美国落羽杉种源试验初报: 种子特性与苗期生长测定[J]. 南京林业大学学报, 1995, 19(1): 65~70
- [3] Faulkner Patricia L. Genetic variation among half-sib families of baldcypress seedlings planted on two different sites[R]. M S Thesis Louisiana State University, Baton Rouge, 1985: 101
- [4] Faulkner Stephen P. Genetic variation of cones, seed and nursery grown seedlings of baldcypress [*Taxodium distichum* (L.) Rich.] provenances[R]. M S Thesis Louisiana State University, Baton Rouge, 1982: 71
- [5] 汪企明, 吕祥生, 江泽平, 等. 落羽杉属种源研究: 生长和生物量变异[J]. 江苏林业科技, 1993, 20(1): 1~4, 8
- [6] 汪企明, 江泽平, 吕祥生, 等. 落羽杉属种源研究: 树种生物学特性[J]. 江苏林业科技, 1995, 22(2): 15~20
- [7] 汪企明, 王伟, 张继凡, 等. 落羽杉属种源研究: 生长和生长量变异[J]. 江苏林业科技, 1998, 25(1): 1~6
- [8] 黄利斌, 汪企明, 李晓储, 等. 落羽杉属种源研究: 扦插生根能力变异[J]. 江苏林业科技, 1999, 26(4): 1~8
- [9] 陈永辉. 盐碱地区速生优良新树种—中山杉[J]. 林业科技通讯, 1994(1): 40
- [10] 欧福云, 罗贤坤, 龙新毛. 湖南省平原湖区三杉二元立木材积表的编制[J]. 中南林业调查规划, 1992, 39(1): 39~42
- [11] Tsumura Y, Tamano N, Suyama Y, et al. Genetic diversity and differentiation of *Taxodium* in the south-eastern United States using cleaved amplified polymorphic sequences[J]. Heredity, 1999, 83(3): 229~238
- [12] 全国杉木种源试验协作组. 杉木生长早期选择研究[J]. 林业科学研究, 1994, 7(专刊): 93~100
- [13] 黄利斌, 李晓储, 张定瑶, 等. 丘陵岗地中山杉 302 生长规律的研究[J]. 江苏林业科技, 2006, 33(3): 1~4
- [14] Bumes R M, Hondak B H. Silvics of North America Vol 1, Conifers[M]. U SDA Forest Service, Washington DC, 1990: 605~745