

# 短枝木麻黄国际种源试验和早期选择

李茂瑾

(福建省惠安赤湖国有防护林场, 福建 泉州 362131)

**摘要:** 为选择短枝木麻黄(*Casuarina equisetifolia*)的优良家系, 对来自 10 个国家 23 个种源 109 个家系的短枝木麻黄生长性状进行综合选择。结果表明, 造林 42 个月后短枝木麻黄的树高、胸径、单株材积、抗虫性、健康状况和保存率在种源和家系间均存在极显著或显著差异。印度种源(18118)、中国种源(18267、18268 和 18586)、泰国种源(21199、18299 和 18297)在生长速度上表现较好; 肯尼亚种源(18144、18142、18135)、澳大利亚种源(17862)、瓦努阿图种源(18312 和 18565)的抗虫性较好; 瓦努阿图种源(18312)和肯尼亚种源(18142)的健康状况表现较好; 中国种源(18586)、越南种源(18128)和肯尼亚种源(18144)的保存率较高。单株材积的遗传力最高, 保存率和抗虫性的较低, 健康状况的最低。利用单株材积、抗虫性、健康状况和保存率进行指数选择, 按 25% 的入选率, 28 个综合性状优良的家系可作为下一步杂交育种的遗传材料。

**关键词:** 短枝木麻黄; 种源家系; 遗传变异; 选择指数; 早期选择

doi: 10.11926/jtsb.3888

## Provenance Characteristics and Early Selection of *Casuarina equisetifolia*

LI Mao-jin

(Chihu State-owned Protective Forest Farm in Hui'an County, Quanzhou 362131, Fujian, China)

**Abstract:** In order to select excellent families of *Casuarina equisetifolia*, the growth characters of 23 provenances 109 families from 10 countries were comprehensively selected in Chihu State-owned Protective Forest Farm, Fujian Province. The results showed that there were significant differences among provenances and families in Height, diameter at breast height (DBH), individual volume, insect resistance, health status and survival rate afforested for 42 months. The growth rate of 1 India provenance (18118), 3 China provenances (18267, 18268, 18586), and 3 Thailand provenances (18297, 18299, 21199) was higher than that of other provenances. The resistance against *Anoplophora chinensis* of Kenya provenances (18135, 18142, 18144), Australia provenance (17862), Vanuatu provenances (18312, 18565) was strong. The health status of Vanuatu provenance (18312) and Kenya provenance (18142) was better than that of other provenances. Three provenances from China (18586), Vietnam (18128) and Kenya (18144) showed higher survival than other provenances. The heritability of individual volume of *C. equisetifolia* was the highest, followed by survival and insect resistance, and health status was the lowest. The individual volume, insect resistance, health status and survival rate were used to index selection. According to selection rate for 25%, 28 families were considered as superior genetic materials of *C. equisetifolia* for cross-breeding in the further.

**Key words:** *Casuarina equisetifolia*; Provenance and family; Genetic variation; Selection index; Early selection

短枝木麻黄(*Casuarina equisetifolia* ssp. *equisetifolia* L. Johnson)是木麻黄科(Casuarinaceae)高大乔

木树种, 天然分布于澳大利亚、东南亚和太平洋群岛地区, 是重要的生态和用材等多用途树种<sup>[1]</sup>, 在全世

收稿日期: 2018-01-30

接受日期: 2018-04-19

基金项目: 福建省林业科学研究项目; 福建省林木种苗科技攻关五期项目资助

This work was supported by the Project for Forestry Science in Fujian Province, and the Fifth Program for Science and Technology of Forest Seedlings in Fujian Province.

作者简介: 李茂瑾(1971~), 男, 高级工程师, 主要从事沿海防护林研究。E-mail: lmj823@163.com

界的热带和亚热带地区用于沿海防风固沙、农田防护、薪炭材、困难立地植被恢复等方面,也是我国华南和东南沿海防护林的主栽树种<sup>[2]</sup>。

华南和东南沿海现有 90% 以上的木麻黄防护林都使用无性系造林,甚至长期使用单一的无性系。福建省绝大部分的沿海防护林都使用‘惠 1’或‘平潭 2 号’造林<sup>[3]</sup>,导致木麻黄防护林的生长势、保存率和抗性(包括抗虫、抗病和抗风性)等显著下降,平潭县、惠安县等地木麻黄防护林的星天牛(*Anoplophora chinensis*)虫害率达 50% 以上<sup>[4]</sup>,严重影响了沿海防护林的生态和经济效益。因此,有针对性地选育新的木麻黄品种用于防护林建设尤显迫切。福建省上世纪 80 年代营造的木麻黄实生林由于衰退老化、自然灾害或人为破坏等原因,绝大部分已被无性系所代替,造成木麻黄的遗传基础狭窄,种质资源贫乏、近交衰退较严重等现象<sup>[5-6]</sup>,从现有的遗传资源中选育新的木麻黄品种潜力不大,严重制约了沿海地区木麻黄遗传育种工作的开展。因此,从国外引进木麻黄种质资源,拓宽木麻黄的遗传基础,丰富种质资源,并对这些遗传资源进行测定、评价、保存和利用,是开展木麻黄遗传改良工作,解决沿海防护林所面临困难的前提和基础。

由中国林业科学研究院热带林业研究所从澳

大利亚林木种子中心(Australia Tree Seed Center, ATSC)引进了来自 10 个国家的 23 个种源 109 个家系的短枝木麻黄种子,在福建省惠安县赤湖国有防护林场建立试验林,本研究开展了种源家系的测定,并对种源家系进行综合评价和选择,以期为将来的木麻黄遗传改良、杂交育种、新品种创制等提供遗传材料和基础数据。

## 1 材料和方法

### 1.1 试验地概况

种源家系试验林位于惠安县崇武镇赤湖国有防护林场的滨海森林公园内。试验地为短枝木麻黄林砍伐迹地,地理位置为 118°55' E, 24°35' N, 海拔 8 m, 距离海岸约 1 km, 年均降雨量 1 029 mm, 土壤为潮积沙壤土,有机质含量为 5.56 g kg<sup>-1</sup>,速效 N、P 和 K 含量分别为 14.76、0.87 和 42.11 mg kg<sup>-1</sup>, pH 为 7.66。周边木麻黄的星天牛虫害发生率高达 50% 以上<sup>[4]</sup>,是木麻黄防护林的主要危害。

### 1.2 试验设计

从澳大利亚林木种子中心引进的来自 10 个国家共 23 个种源 109 个家系的短枝木麻黄情况见表 1。利

表 1 引进的 23 个短枝木麻黄种源信息

Table 1 Information on 25 introduced provenances of *Casuarina equisetifolia*

序号 No.	种源号 Provenance No.	来源国家 Country	家系数 Family	纬度 Latitude	经度 Longitude	海拔 Altitude (m)
1	17862	澳大利亚 Australia	2	12°25' S	130°44' E	3
2	18013	印度 India	4	20°20' N	86°06' E	10
3	18015	印度 India	3	21°30' N	86°54' E	10
4	18118	印度 India	4	9°15' N	79°20' E	5
5	18119	印度 India	2	20°20' N	86°06' E	10
6	18128	越南 Vietnam	4	16°06' N	106°20' E	2
7	18135	肯尼亚 Kenya	3	3°15' S	40°09' E	25
8	18142	肯尼亚 Kenya	4	4°00' S	39°06' E	25
9	18144	肯尼亚 Kenya	2	4°20' S	37°10' E	5
10	18244	马来西亚 Malaysia	2	1°44' N	110°30' E	30
11	18267	中国 China	6	19°58' N	110°59' E	10
12	18268	中国 China	10	24°24' N	118°06' E	50
13	18269	中国 China	10	16°38' N	178°49' E	30
14	18586	中国 China	5	30°38' N	153°04' E	5
15	18297	泰国 Thailand	5	9°21' N	98°27' E	10
16	18298	泰国 Thailand	3	9°33' N	106°32' E	2
17	18299	泰国 Thailand	3	12°39' N	143°25' E	1
18	21199	泰国 Thailand	12	7°33' N	100°37' E	2
19	18355	贝宁 Benin	7	10°45' S	142°08' E	1
20	18312	瓦努阿图 Vanuatu	2	17°45' S	168°18' E	30
21	18565	瓦努阿图 Vanuatu	3	20°07' S	57°44' E	1
22	18402	所罗门 Solomon	7	8°07' S	157°08' E	2
23	18403	所罗门 Solomon	6	8°07' S	156°54' E	2

用澳大利亚联邦科工组织(CSIRO)提供的试验设计软件 CycDesigN2, 采用行列试验设计方法, 每重复有 7 行和 16 列共 112 个试验小区, 其中多出的 3 个小区空缺。试验采用每小区 4 株, 6 次重复, 株行距 2 m×2 m, 每家系共 24 株。造林 1 个月后补植 1 次, 3 个月后抚育施肥 1 次, 每株施用复合肥 (N:P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>:K<sub>2</sub>O=15%:15%:15%) 150 g。

### 1.3 数据观测和统计分析

造林 42 个月后, 对短枝木麻黄种源家系进行观测, 包括树高(H, m)、胸径(DBH, cm)、抗虫性(星天牛幼虫)、保存率、健康状况等。树高和胸径采用每木调查; 保存率(SR, %)为存活的总株数除以每家系总株数; 抗虫性是指植株是否受到星天牛幼虫危害, 虫害的调查方法是以植株 1 m 以下基部是否有星天牛幼虫蛀道为受虫害判别标准, 采用二级记分法, 受到虫害记为 1, 没有受虫害记为 2<sup>[3]</sup>; 植株健康状况采用三级记分法, 小枝(木麻黄叶子已退化, 光合作用器官为绿色小枝)大量枯黄或凋落记为 1, 小枝少量枯黄记为 2, 植物生长健康记为 3。种源家系的单株材积(m<sup>3</sup>)为<sup>[7]</sup>:  $V=3.1415 \times DBH^2 H / 120000$ 。

利用 SAS 统计分析软件对数据进行方差分析, 抗虫性得分和健康得分数据在方差分析时进行平方根变换, 保存率数据在方差分析时进行反正弦变换, 使其符合正态分布特点。采用 Duncan 多重比较法, 对调查性状在种源水平上进行多重比较。利用 SAS 统计分析软件对单株材积、抗虫性、保存率和健康状况 4 个性状进行狭义遗传力计算, 并进行表型和遗传相关分析<sup>[8]</sup>。方差分析采用混合线性模型

$y=u+r_i+P_j+f_k+e_{ijk}$ , 其中,  $y$  是表型观测值,  $u$  是总平均值,  $r_i$  是试验重复的固定效应,  $p_j$  是种源的固定效应,  $f_k$  是家系的随机效应,  $e_{ijk}$  是环境随机效应。

表型相关系数:  $r_{pij} = \text{cov}_{pij} / \sqrt{\sigma_{pi}^2 \cdot \sigma_{pj}^2}$ ; 遗传相关系数:  $r_{gij} = \text{cov}_{gij} / \sqrt{\sigma_{gi}^2 \cdot \sigma_{gj}^2}$ , 式中  $\text{cov}_{pij}$  和  $\text{cov}_{gij}$  分别为表型和遗传协方差。

木麻黄家系的多性状选择采用 Smith-Hazel 指数选择法, 指数选择函数为:  $I = \sum_{i=1}^n b_i x_i = B'x$ , 其中  $I$  为选择指数值,  $b_i$  为  $i$  性状的指数系数,  $x_i$  为  $i$  性状的表型值;  $B' = P_2^{-1} G_{21} A$ , 式中,  $P_2$  为选择性状的表型协方差矩阵,  $G_{21}$  为选择性状的遗传协方差矩阵,  $A$  为选择性状的相对经济权重<sup>[9-10]</sup>。

## 2 结果和分析

### 2.1 种源和家系性状的方差分析

短枝木麻黄的树高、胸径和单株材积在种源和家系两个水平上都有极显著差异( $P < 0.01$ ) (表 2); 虫害和健康状况在种源水平上也有极显著差异( $P < 0.01$ ), 在家系水平上存在显著差异( $P < 0.05$ ); 保存率在种源间存在极显著差异( $P < 0.01$ ), 因为家系内每重复只有 4 株植株, 因此未开展家系水平上保存率的方差分析。

### 2.2 性状的遗传变异

Duncan 多重比较结果表明(表 3), 在生长速度方面, 印度种源(18118)、中国种源(18267、18268、18586)、泰国种源(18297、18299、21199) 在树高、

表 2 短枝木麻黄性状的方差分析

Table 2 ANOVA analysis of traits of *Casuarina equisetifolia*

	变异来源 Source	自由度 Degree of freedom	平方和 Sum of square	均方 Mean square	F	Pr>F
树高 Height	种源 Provenance	22	714.34	32.47	18.68	<0.000 1
	家系 Family	108	412.56	3.82	2.20	<0.000 1
胸径 Diameter at breast height	种源 Provenance	22	695.64	31.62	13.20	<0.000 1
	家系 Family	108	488.16	4.52	1.89	<0.000 1
单株材积 Individual volume	种源 Provenance	22	2 087.14	94.87	29.65	<0.000 1
	家系 Family	108	1 448.28	13.41	4.19	<0.000 1
抗虫性 Insect resistance	种源 Provenance	22	21.56	0.98	4.19	<0.000 1
	家系 Family	108	34.56	0.32	1.34	0.023 0
健康状况 Health status	种源 Provenance	22	20.68	0.94	2.03	0.002 0
	家系 Family	108	139.32	1.29	1.29	0.041 0
保存率 Survival	种源 Provenance	22	26 466.00	1 203.00	4.79	<0.000 1

胸径和单株材积生长方面都表现较好, 显著好于澳大利亚种源(17862)、肯尼亚种源(17144、18142)、中国种源(18269)、瓦努阿图种源(18312、18565)和所罗门种源(18402)。

在抗虫性方面, 肯尼亚种源(18144、18142、18135)、澳大利亚种源(17862)、瓦努阿图种源(18312、18565)、中国种源(18269)、泰国种源(18297)等表现较好, 但其中大多数种源生长速度较慢。抗虫性较差的有中国种源(18267)、泰国种源(18299、21199)、越南种源(18128)和马来西亚种源(18244)等, 既有速生的种源(如 18267、18299、21199), 也有慢生种源(如 18244)。

在健康状况方面, 除瓦努阿图种源(18312)和肯尼亚种源(18142)显著高于泰国种源(18299)外, 其余的种源间没有显著差异。

保存率反映了该种源对于引种地区的适应性。中国种源(18586)保存率最高(86.5%), 越南种源(18128, 72.9%)和肯尼亚种源(18144, 66.7%)的保存率也较高。而所罗门种源(18403)最低(36.8%), 马

来西亚种源(18244)和瓦努阿图种源(18312)保存率亦较低, 说明对被引种地区的适应性较差, 不适用于引种地区的种植。

### 2.3 相关性分析

短枝木麻黄 4 个性状的遗传力为 0.16~0.68 (表 4), 其中单株材积的最高(0.68), 健康状况的最低(0.16)。单株材积和健康状况的表型相关系数达 0.97 ( $P<0.01$ ), 但遗传相关系数只有 0.26 ( $P<0.05$ ), 说明短枝木麻黄种源抗虫性的遗传力低, 其表型相关性并不能真实反映其遗传相关水平。同样, 抗虫性和健康状况、健康状况和保存率的表型相关系数分别为 0.16 和 -0.73, 但其遗传相关系数分别高达 0.89 和 0.98。

### 2.4 多性状指数选择

利用单株材积、抗虫性、健康状况和保存率 4 个性状进行指数选择, 按等权重计算, 得到这 4 个性状的经济权重向量分别为 0.98、10.57、4.67 和

表 3 短枝木麻黄种源的性状比较

Table 3 Character comparison of *Casuarina equisetifolia* provenances

种源号 Provenance No.	树高 Height (m)	胸径 DBH (cm)	单株材积 ( $\times 10^3 \text{ m}^3$ ) Individual volume	抗虫性 Insect resistance	健康状况 Health status	保存率 Survival /%
18118	5.13a	4.38a	2.58a	1.46abcd	1.67ab	65.3bcd
18267	5.05ab	3.99abc	2.10abc	1.26cdef	1.49ab	55.6bcdefg
21199	4.84abc	4.38a	2.43a	1.06f	1.38ab	66.0bcd
18268	4.77abc	3.97abc	1.97abc	1.43abcde	1.61ab	57.9bcdefg
18586	4.70abc	3.81abcd	1.79abcd	1.46abcd	1.70ab	86.5a
18299	4.66abc	4.11ab	2.06ab	1.13ef	1.28b	65.3bcd
18297	4.65abc	3.90abc	1.85abc	1.53abc	1.52ab	61.7bcde
18128	4.59abc	3.74abcd	1.68abcd	1.34abcdef	1.49ab	72.9ab
18355	4.57abc	3.71abcd	1.65abcd	1.40abcde	1.63ab	62.5bcde
18298	4.49abcd	3.95abc	1.83abc	1.40abcde	1.59ab	56.9bcdefg
18119	4.38abcde	4.05ab	1.88ab	1.29abc	1.58ab	50.0efg
18015	4.31abcdef	3.79abcd	1.62abcd	1.46bcdef	1.54ab	54.2bcdefg
18013	4.21bcdef	3.53abcde	1.37abcde	1.51abc	1.67ab	59.4bcdef
18403	4.09cdefg	3.04cdefg	0.99cdefg	1.53abc	1.63ab	36.8gh
18244	3.94cdefgh	3.22bcdef	1.07bcdef	1.20def	1.45ab	37.5gh
18135	3.53efghi	2.96defgh	0.81defgh	1.56abc	1.45ab	44.4defg
18402	3.47fghij	2.73efghi	0.68efghi	1.43abcde	1.46ab	42.3efg
18312	3.27ghijk	2.07hij	0.37hij	1.57ab	1.78a	62.5bcde
18565	3.13hijk	2.20ghij	0.40ghij	1.47abcd	1.51ab	41.7efg
18269	3.02ijk	2.30ghij	0.42ghij	1.54abc	1.66ab	48.3cdefg
18144	2.94ijk	2.17ghij	0.36ghij	1.63a	1.71ab	66.7bc
18142	2.65jk	2.03ij	0.29ij	1.56abc	1.72a	47.9cdefg
17862	2.58k	1.68j	0.19j	1.53abc	1.38ab	45.8cdefg
平均 Mean	4.22	3.53	1.24	1.45	1.56	55.23

同列数据后不同字母表示差异显著(Duncan's 多重比较)( $P<0.05$ )。

Data followed different letters indicate significant difference at 0.05 level by Duncan's multiple range test.

表 4 短枝木麻黄性状间的相关系数和遗传力

Table 4 Correlation coefficient and heritability among traits of *Casuarina equisetifolia*

	单株材积 Individual volume	抗虫性 Insect resistance	健康状况 Health status	保存率 Survival rate	遗传力 heritability
单株材积 Individual volume		-0.093	0.26*	0.25*	0.68
抗虫性 Insect resistance	-0.092		0.89**	0.45**	0.21
健康状况 Health status	0.97**	0.16*		0.98**	0.16
保存率 Heritability	0.11	0.81**	-0.73**		0.34

左下角为表型相关系数, 右上角为遗传相关系数; \*:  $P < 0.05$ ; \*\*:  $P < 0.01$ 。

Data in left bottom and top right corner are phenotypic correlation coefficient and genetic correlation coefficient, respectively. \*:  $P < 0.05$ ; \*\*:  $P < 0.01$ .

0.18, 选择指数方程为  $I = 49.81IV + 3.42IR + 4.92HS + 134.41SR$ 。结果表明(表 5), 选择指数值排名前 28 的家系归属于 11 个种源, 除 18128 (家系 130) 为越南种源外, 其余 10 个种源分别来自中国、印度和泰国(表 3), 且各性状都表现较好。表现最差的 10 个家系主要来源于非洲国家肯尼亚、贝宁和大洋洲国家, 如所罗门等。

### 3 讨论和结论

#### 3.1 种源生长速度的差异

生长速度历来都是评价林木种源家系优劣的重要指标。在短枝木麻黄的种源/家系测定中, 亚洲地区 3 个国家(中国、印度和泰国)的种源生长表现最好, 除泰国为短枝木麻黄的天然分布区外, 其

余都是木麻黄的引种区。中国和印度的短枝木麻黄都有 100 多年的引种栽培历史<sup>[11-12]</sup>, 经过人为与自然选择, 生长表现差的种源多被淘汰, 已形成适应当地生态环境、生长表现较好的次生种源(landrace)。而大洋洲的种源都是从未经改良的天然林中采种, 种源间和种源内家系间的变异很大, 因此总体的平均生长表现不如亚洲引种区的种源, 特别是中国和印度木麻黄遗传改良工作开展较早国家的种源。

#### 3.2 种源抗虫性的差异

由于福建省沿海木麻黄防护林普遍受到星天牛害虫的危害, 因此抗虫性是一个重要的选择指标。生长较差的大洋洲种源和非洲肯尼亚种源的虫害率相对较低, 相关性分析也表明材积生长和抗虫性在一定程度上呈负相关关系。已有的研究表明,

表 5 短枝木麻黄家系的选择指数和排名

Table 5 Selection index and rank of *Casuarina equisetifolia* families

家系号 Family No.	种源号 Provenance No.	选择指数 Selection index	排名 Rank	家系号 Family No.	种源号 Provenance No.	选择指数值 Selection index	排名 Rank
195	18267	366.2	1	80	18119	203.6	21
66	18118	297.2	2	208	18268	202.4	22
402	18586	290.1	3	213	18268	198.9	23
71	18118	266.3	4	449	21199	197.2	24
436	21199	256.8	5	32	18013	195.0	25
198	18267	253.0	6	389	18403	189.2	26
207	18268	252.9	7	437	21199	189.1	27
282	18298	252.6	8	216	18268	188.3	28
397	18586	251.6	9	.....	.....	.....	.....
302	18299	245.4	10	381	18403	80.1	100
441	21199	245.4	11	383	18403	79.7	101
442	21199	239.6	12	340	18355	79.4	102
445	21199	239.3	13	337	18355	76.3	103
130	18128	233.4	14	342	18355	71.6	104
206	18268	230.1	15	137	18135	68.1	105
266	18297	227.9	16	219	18269	63.7	106
440	21199	227.7	17	145	18142	62.0	107
396	18586	227.0	18	319	18402	59.5	108
209	18268	221.4	19	386	18403	51.2	109
435	21199	221.0	20				

生长速度快的木麻黄无性系或种源/家系更易受到星天牛的侵袭,而抗风性好但生长较慢的木麻黄无性系都表现了较强的抗虫性<sup>[13]</sup>,可能是因为抗风性好的木麻黄都具有纤维长度长、木材纤维韧性强、抗弯强度大的特点,这导致了星天牛成虫在木麻黄树干蛀道产卵的难度增大,从而选择在生长速度快、木质较软的无性系或种源上产卵,使得这些无性系或种源家系的虫害率更高<sup>[14]</sup>。木麻黄的生长量与抗虫性的负相关关系说明在进行优良种源/家系和单株选育时很难兼顾生长速度和抗虫性,但木麻黄沿海防护林以提供生态效益为主,我们可以有针对性地选育一些抗虫性高但生长迅速较慢的品种或无性系应用于虫害严重的地区。

### 3.3 木麻黄种源的早期选择

短枝木麻黄是天然分布于热带地区的速生树种,在印度用材林的轮伐期通常是 7~10 a<sup>[15]</sup>,在华南沿海地区用材林的轮伐期一般是 7~15 a<sup>[16]</sup>,而在海南地区木麻黄无性系的轮伐期为 6~9 a<sup>[17]</sup>。通常认为林木生长力早期选择年龄可在 1/3 个轮伐期进行<sup>[18]</sup>,更有研究指出一些树种生长力早期选择甚至可在 1/5~1/6 个轮伐期进行<sup>[19]</sup>。本试验中短枝木麻黄种源试验林的生长期虽然只有 42 个月,但达到了生长力早期选择所要求的 1/3 个轮伐期,因此认为此时在生长力性状上进行早期选择是可行的。另外,短枝木麻黄易受星天牛危害的多为 2 年生前后的幼树,保存率和健康状况这 2 个性状通常都是造林后 3 年内进行观测。因此在造林 42 个月后,针对这 4 个性状对短枝木麻黄种源进行早期选择是可行的,但对于干形、抗风性这些性状的选择还需要更长的生长时期。

### 3.4 多性状指数选择

林木种源家系的选择通常要利用多个性状进行综合选择,多性状综合选择的方法较多,近年来 Smith-hazel 指数选择法<sup>[9]</sup>成为动植物育种中较为理想的多性状综合选择方法,它结合了各性状的表型和遗传相关关系、性状遗传力和经济价值等因素,用最后获得的综合指数作为选择依据。本试验中采取生长力(单株材积)、抗虫性、健康状况、保存率 4 个常用性状,利用指数选择法进行多性状综合选择。木麻黄单株材积和保存率的遗传力分别为 0.68 和 0.34,受中等强度遗传控制,因此根据其表型进

行选择能达到较好的选择效果,它们对最终获得的选择指数的影响也较大;而抗虫性和健康状况 2 个性状的遗传力(分别为 0.21 和 0.16)都较低,说明这 2 个性状更易受到生长环境的影响,因此它们对最终获得的选择指数的影响较小。

在选择强度的确定上,可根据育种工作的需要,综合考虑待选种源或家系的具体数确定入选率,在保证有较宽的遗传基础的前提下获得更高的遗传增益。本研究中,短枝木麻黄国际种源/家系引进的主要目的是要改变我国木麻黄遗传基础狭窄、种质资源缺乏的现状,因此需要较高的入选率,以便选择更多的种源与家系作为亲本材料用于木麻黄的种内和种间杂交育种,或直接选择家系内的优良单株无性繁殖后用于无性系测定和推广。由于短枝木麻黄国际种源试验只在一个地点开展,没有获得种源与环境交互作用的结果,使得选择时存在漏选或误选部分优良种源/家系的可能,在选择过程中也应加大入选率。所以我们把入选率定为 25%,共有 28 个家系入选,可用于下一步的短枝木麻黄遗传改良工作。

### 参考文献

- [1] ZHANG Y, ZHONG C L, HAN Q, et al. Reproductive biology and breeding system in *Casuarina equisetifolia* (Casuarinaceae): Implication for genetic improvement [J]. *Aust J Bot*, 2016, 64(2): 120–128. doi: 10.1071/BT15184.
- [2] ZHONG C L, BAI J Y, ZHANG Y. Introduction and conservation of *Casuarina* trees in China [J]. *For Res*, 2005, 18(3): 345–350. doi: 10.3321/j.issn:1001-1498.2005.03.023.  
仲崇禄, 白嘉雨, 张勇. 我国木麻黄种质资源引种与保存 [J]. *林业科学研究*, 2005, 18(3): 345–350. doi: 10.3321/j.issn:1001-1498. 2005. 03.023.
- [3] NIE S, ZHANG Y, ZHONG C L, et al. Selection of fast-growing and adversity resistance *Casuarina* clones for coastal areas of Fujian [J]. *J Fujian Coll For*, 2014, 32(4): 300–304. doi: 10.3969/j.issn.1001-389X. 2012.04.003.  
聂森, 张勇, 仲崇禄, 等. 福建沿海木麻黄速生抗性无性系选育 [J]. *福建林学院学报*, 2014, 32(4): 300–304. doi: 10.3969/j.issn.1001-389X.2012.04.003.
- [4] ZENG L Q, HUANG J S, CAI S P, et al. Resistance identification of 48 *Casuarina* clones to *Anoplophora chinensis* [J]. *J Nanjing For Univ (Nat Sci)*, 2014, 38(5): 51–56. doi: 10.3969/j.issn.1000-2006.2014.05.011.  
曾丽琼, 黄金水, 蔡守平, 等. 48 个木麻黄无性系对星天牛的抗性

- 鉴定 [J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2014, 38(5): 51–56. doi: 10.3969/j.issn.1000-2006.2014.05.011.
- [5] ZHANG Y. Studies on genetic improvement of three *Casuarina* species [D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2013: 10–11.  
张勇. 三种木麻黄的遗传改良研究 [D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2013: 10–11.
- [6] CHEN X Y, LIN P. Mating system and inbreeding retrogression of *Casuarina equisetifolia* plantation, an introduced species in Xiamen [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2002, 13(11): 1377–1380.  
陈小勇, 林鹏. 厦门木麻黄种群交配系统及近交衰退 [J]. 应用生态学报, 2002, 13(11): 1377–1380.
- [7] ZHONG C L. Studies on genetic variation of *Casuarina* trees [D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2000: 34–35.  
仲崇禄. 木麻黄遗传变异规律的研究 [D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2000: 34–35.
- [8] HUANG S W, XIE W H. Practical SAS Programming and Analysis of Forestry Test Data [M]. Guangzhou: South China University of Technology, 2001: 268–278.  
黄少伟, 谢维辉. 实用 SAS 编程与林业试验数据分析 [M]. 广州: 华南理工大学出版社, 2001: 268–278.
- [9] COTTERILL P P, DEAN C A. Successful Tree Breeding with Index Selection [M]. Melbourne: CSIRO Australia, 1990: 182–196.
- [10] GU W C. Statistical Genetics [M]. Beijing: Science Press, 2004: 82–86.  
顾万春. 统计遗传学 [M]. 北京: 科学出版社, 2004: 82–86.
- [11] YANG Z C, ZHANG T R, CHEN C H, et al. Provenance trial of *Casuarina equisetifolia* in Taiwan: I. Seed weight and seedling growth [J]. *Res Rep For Exp*, 1995, 10(2): 2–7.  
杨政川, 张添荣, 陈财辉, 等. 木贼叶木麻黄在台湾之种源试验: I. 种子重与苗木生长 [J]. 林业试验研究报告, 1995, 10(2): 2–7.
- [12] PRASAD N S, DIETERS M J. Genetic control of growth and form in early-age tests of *Casuarina equisetifolia* in Andhra Pradesh, India [J]. *For Ecol Manag*, 1998, 110(1/2/3): 49–58. doi: 10.1016/S0378-1127(98)00270-9
- [13] LI M J. Differences of insect resistance among clones & seedlings of *Casuarinas* spp. [J]. *Protect For Sci Technol*, 2010(5): 56–57. doi: 10.3969/j.issn.1005-5215.2010.05.018.  
李茂瑾. 木麻黄无性系及实生苗间抗虫性差异的研究 [J]. 防护林科技, 2010(5): 56–57. doi: 10.3969/j.issn.1005-5215.2010.05.018.
- [14] HUANG J S, DING B, HUANG H Q, et al. The relation between wood cell structure of *Casuarina* and the resistance for *Anoplophora chinensis* [J]. *Sci Silv Sin*, 1997, 33(6): 534–540.  
黄金水, 丁琰, 黄海清, 等. 木麻黄树干细胞组织结构与对星天牛抗虫性的关系 [J]. 林业科学, 1997, 33(6): 534–540.
- [15] PINYOPUARERK K. A breeding strategy for *Casuarinas equisetifolia* in India: UNDP/FAO regional project report on improving productivity of man-made forests through application technological advances in tree breeding and propagation [R]. Canberra: CSIRO Forestry and Forest Products, 1996.
- [16] XU Y Q, LAO J Q. Cultivation of *Casuarina* [M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 1984: 32–33.  
徐燕千, 劳家骥. 木麻黄栽培 [M]. 北京: 中国林业出版社, 1984: 32–33.
- [17] ZHANG Y, ZHONG C L, CHEN Y, et al. Studies on growth processes of *Casuarina* clones in Hainan Island [J]. *For Res*, 2017, 30(4): 588–594. doi: 10.13275/j.cnki.lykxyj.2017.04.008.  
张勇, 仲崇禄, 陈羽, 等. 海南木麻黄无性系生长过程研究 [J]. 林业科学研究, 2017, 30(4): 588–594. doi: 10.13275/j.cnki.lykxyj.2017.04.008.
- [18] HONG Z, WU J H, YANG L W, et al. Genetic analysis and early selection on tree height for 8 × 8 diallel-cross of Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata* Hook.) hybrids [J]. *China For Sci Technol*, 2009, 23(4): 20–24. doi: 10.3969/j.issn.1000-8101.2009.04.005.  
洪舟, 吴建辉, 杨立伟, 等. 杉木 8 × 8 双列杂交组合子代树高遗传分析及早期选择 [J]. 林业科技开发, 2009, 23(4): 20–24. doi: 10.3969/j.issn.1000-8101.2009.04.005.
- [19] LAMBETH C C. Juvenile-mature correlations in Pinaceae and implications for early selection [J]. *For Sci*, 1980, 26(4): 571–580.