

短枝木麻黄半同胞家系苗期遗传变异及选择

徐惠昌^{1,2}, 聂森¹, 余锦林^{1,2}, 尤龙辉^{3*}, 叶功富¹, 张航晓², 程分生^{1,2},
苏亲桂⁴

1. 福建省林业科学研究院, 福建福州 350012; 2. 福建农林大学林学院, 福建福州 350002; 3. 福州市林业局, 福建福州 350007; 4. 福建省惠安赤湖国有防护林场, 福建泉州 362131

摘要: 为探究短枝木麻黄半同胞家系苗期生长与分枝性状遗传变异规律, 初步筛选优良种质, 以 40 个短枝木麻黄半同胞家系 1 年生幼苗为材料, 对其苗高、地径、干重、根冠比、侧枝数、侧枝角和侧枝长等 7 个性状进行遗传分析; 通过聚类分析和布雷金多性状综合评价法, 进行优良家系选择。结果表明, 短枝木麻黄半同胞家系苗期生长与分枝性状变异丰富, 7 个性状在家系间差异均达到极显著水平; 各性状家系遗传力变化范围为 0.36~0.83, 受中度或强度遗传控制。以 10% 入选率, 选出 4 个优良家系, 分别为 3-265、5-373、1-266 和 2-343 家系, 入选家系苗高、地径、干重、侧枝数和侧枝长的现实增益分别为 21.14%、19.10%、41.83%、19.97% 和 18.88%, 遗传增益分别是 17.55%、15.66%、29.70%、15.57% 和 15.10%, 选择效果较为显著。短枝木麻黄幼苗在家系间具有很大的选育潜能, 本研究选择出的优良家系既丰富了短枝木麻黄优良种质资源, 也为后续短枝木麻黄遗传改良和林分营建提供了较好的种质材料。

关键词: 短枝木麻黄; 半同胞家系; 遗传变异; 苗期选择

中图分类号: S722.5 文献标识码: A

Genetic Variation and Selection of *Casuarina equisetifolia* Half-sib Families at Seedling Stage

XU Huichang^{1,2}, NIE Sen¹, YU Jinlin^{1,2}, YOU Longhui^{3*}, YE Gongfu¹, ZHANG Hangxiao²,
CHENG Fensheng^{1,2}, SU Qingui⁴

1. Fujian Academy of Forestry Sciences, Fuzhou, Fujian 350012, China; 2. Forestry College, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou, Fujian 350002, China; 3. Fuzhou Forestry Administration, Fuzhou, Fujian 350007, China; 4. Chihu State-owned Protective Forestry Farm in Hui'an County, Quanzhou, Fujian 362131, China

Abstract: In order to explore the growth and branching genetic variation of *Casuarina equisetifolia* half-sib families at seedling stage, the annual seedlings of 40 half-sib *C. equisetifolia* families were used as the materials. Genetic analysis was carried out on seven traits: seedling height, ground diameter, dry weight, root shoot ratio, number of lateral branches, angle of lateral branch, and length of lateral branch. At the same time, cluster analysis and multi-trait comprehensive evaluation method were used to select excellent families. The results showed that the growth and branching traits of *C. equisetifolia* half-sib families at seedling stage varied widely, and the differences of the seven traits among families reached extremely significant level. The family heritability of the growth and branching traits ranged from 0.36 to 0.83, which were controlled by moderate or strong inheritance. Four excellent families, 3-265, 5-373, 1-266 and 2-343, were selected at a 10% selection rate. The real gains of seedling height, ground diameter, dry weight, number of lateral branches and length of lateral branches of the selected families was 21.14%, 19.10%, 41.83%, 19.97% and 18.88%, respectively. The genetic gains were 17.55%, 15.66%, 29.70%, 15.57% and 15.10%, respectively. The effect of

收稿日期 2022-06-21; 修回日期 2022-09-06

基金项目 福建省属公益类科研院所基本科研专项 (No. 2021R1010007); 中央引导地方科技发展专项 (No. 2021L3017); 福建省林业种苗科技攻关七期项目 (No. ZMGG-0704)。

作者简介 徐惠昌 (1998—), 男, 硕士研究生, 研究方向: 沿海防护林与森林培育。*通信作者 (Corresponding author): 尤龙辉 (YOU Longhui), E-mail: m378384996@126.com。

selection work was remarkable. *C. equisetifolia* seedlings have great breeding potential among families. The excellent families selected in this study not only enrich the excellent germplasm resources of *C. equisetifolia*, but provide better germplasm materials for the subsequent genetic improvement and forest construction of *C. equisetifolia*.

Keywords: *Casuarina equisetifolia*; half-sib family; genetic variation; seedling selection

DOI: 10.3969/j.issn.1000-2561.2023.08.009

短枝木麻黄生长迅速，具有良好的抗风沙、耐旱及耐盐碱等特性，是我国东南沿海沙地最重要的生态防护树种之一^[1-2]。20 世纪 80 年代营造的木麻黄防护林，因林分逐渐衰退更新，而被短枝木麻黄优良无性系惠 1、闽平 2 号、木麻黄粤 501 等无性系所替代，但是由于无性系品种来源单一、种质资源贫乏、遗传基础狭窄，导致林分抗性下降、易感病虫害等问题逐渐凸显，木麻黄防护林生态防护功能不断下降^[3-4]。因此，木麻黄实生种子苗所具有的生长期长、根系发达、抗性强等优点得到相关研究者、林业生产和管理单位重新审视和重视。

“有性选育，无性利用”是木麻黄遗传改良的指导方针^[5-6]。我国自 20 世纪 80 年代中期，以中澳、中法等国际合作项目为契机，先后引进短枝木麻黄不同地区国际种源 73 个^[7]，并于福建、广东和海南等地建立了多个种源试验点，从而揭开了国内短枝木麻黄种源试验的序幕，并对其遗传变异规律进行了较为全面、系统的研究，选育出了多用途的优良种源^[2]。但是，关于短枝木麻黄优良家系遗传选育的研究却较为滞后。傅玉狮^[8]于 1996 年，通过对 34 个短枝木麻黄半同胞家系的 11 年生子代测定林进行分析，结果表明其生长和抗性性状遗传变异丰富，并筛选出 8 个速生丰产的优良家系，其在一定程度上丰富了短枝木麻黄优良种质资源。然而，此后关于短枝木麻黄家系遗传改良育种工作的研究鲜有报道。

亚群体层次（如家系层次）遗传改良相较于群体层次，可以消除后者对有益配子不平衡的负面效应，并避免加性基因方差的下降，提高子代育种值，林业发达国家在采用现代苗木生产技术的同时，也正从种源层次的苗木培育逐步转为家系层次育种，以充分发挥亚群体层次遗传改良的潜在效益^[9]。鉴于良种选育和苗木培育对发掘变异、研究变异、利用变异的要求，我国林木育种工作者对红皮云杉^[10]、云南松^[11]等树种进行了大量研究，并证实在苗期进行遗传改良选择，在提高林木良种选育效率、加速育种进程的同时，还

可获得较高的增益。故本研究以 40 个短枝木麻黄半同胞家系 1 年生幼苗为研究对象，结合前人对短枝木麻黄的相关研究^[2, 12]，观测分析其苗期苗高、地径、干重、根冠比、侧枝数、侧枝角及侧枝长等生长与分枝性状的遗传变异，探寻短枝木麻黄家系层次的苗期遗传变异规律，以期为后续木麻黄科树种更好地开展家系层次遗传改良工作提供参考依据。

1 材料与方 法

1.1 材 料

1.1.1 试验地点 试验地位于福建省惠安赤湖国有防护林场后山工业区（118°54'29"E，24°54'45"N），平均海拔约 12 m。属南亚热带海洋性季风气候，干湿季明显，夏季多台风，秋冬盛行东北风，该区域年均气温为 20.7℃，年均降雨量 1029.0 mm，年均蒸发量达 2056.7 mm。试验地设在林场场部苗圃，基质土壤类型为沙壤土，肥力较低，日照充足。

1.1.2 试验材料 2019 年 8 月，对短枝木麻黄国际种源试验林（5 年生）的表型性状进行观测分析，筛选出树高、胸径生长势及健康状况良好的优良母株进行采种、保存。2021 年 3 月取出种子，于林场苗圃进行播种育苗，共计培育 40 个短枝木麻黄半同胞家系（表 1）。2021 年 5 月，当幼苗长至 10 cm 左右时，按照完全随机区组设计，采用双列 10 株小区排列方式，将幼苗移栽至塑料营养钵（规格为 8 cm×15 cm），一株一钵，基质为沙壤土，共 4 个区组（重复）。适时进行浇水、除草等常规育苗管理。

1.2 试验指标观测

2022 年 3 月对短枝木麻黄 40 个半同胞家系幼苗的生长和分枝性状进行测定。测定指标包括苗高（SH）、地径（GD）、干重（WD）、根冠比（R/S）、侧枝数（LB_N）、侧枝角（LB_A）、侧枝长（LB_L）等 7 个指标。其中苗高、地径分别采用卷尺和电子游标卡尺进行测量；侧枝角和侧枝长则采用量角器和直尺进行测量。根据测量结果，

表 1 母株基本情况及种子来源
Tab. 1 Basic situation of mother plant and seed source

编号 No.	家系 Family	树高 Tree height/m	胸径 DBH/cm	母株种子来源 Seed source of mother plant		
				地区 Region	经度 Longitude	纬度 Latitude
1	1-129	10.6	9.4	越南 Vietnam	106°20'E	16°06'N
2	1-130	9.7	8.7	越南 Vietnam	106°20'E	16°06'N
3	1-195	11.8	8.9	中国 China	111°02'E	21°25'N
4	1-205	10.3	8.9	中国 China	110°59'E	19°58'N
5	1-211	11.8	11.0	中国 China	110°59'E	19°58'N
6	1-266	10.7	9.5	泰国 Thailand	98°27'E	9°21'N
7	1-301	11.3	10.1	泰国 Thailand	100°37'E	7°33'N
8	1-32	9.2	9.5	印度 India	79°20'E	9°15'N
9	1-30	9.8	8.5	印度 India	79°20'E	9°15'N
10	2-194	9.2	9.1	中国 China	111°02'E	21°25'N
11	2-208	10.0	8.5	中国 China	110°59'E	19°58'N
12	2-32	11.2	8.5	印度 India	79°20'E	9°15'N
13	2-343	11.8	9.8	贝宁 Benin	2°13'E	6°24'N
14	2-402	9.7	7.5	中国 China	109°00'E	21°35'N
15	3-210	11.0	9.2	中国 China	110°59'E	19°58'N
16	3-224	9.9	8.3	中国 China	118°06'E	24°24'N
17	3-24	10.5	8.3	印度 India	86°06'E	20°20'N
18	3-265	11.9	10.7	泰国 Thailand	98°27'E	9°21'N
19	3-52	10.3	9.5	印度 India	79°20'E	9°15'N
20	3-80	11.7	10.7	印度 India	79°20'E	9°15'N
21	3-78	9.7	8.5	印度 India	79°20'E	9°15'N
22	4-128	9.6	8.5	越南 Vietnam	106°20'E	16°06'N
23	4-213	10.9	10.0	中国 China	110°59'E	19°58'N
24	4-383	8.9	10.1	所罗门 Solomon	157°08'E	8°07'S
25	4-389	10.9	8.5	所罗门 Solomon	156°54'E	8°07'S
26	4-440	11.1	8.5	泰国 Thailand	100°37'E	7°33'N
27	4-66	10.0	10.4	印度 India	79°20'E	9°15'N
28	5-373	8.5	9.5	所罗门 Solomon	157°08'E	8°07'S
29	5-218	9.9	8.3	中国 China	110°59'E	19°58'N
30	5-398	8.5	8.7	中国 China	109°00'E	21°35'N
31	5-335	9.3	8.6	贝宁 Benin	2°13'E	6°24'N
32	5-80	8.1	8.5	印度 India	79°20'E	9°15'N
33	6-203	9.7	11.0	中国 China	111°02'E	21°25'N
34	6-205	9.8	8.9	中国 China	110°59'E	19°58'N
35	6-207	9.7	10.5	中国 China	111°02'E	21°25'N
36	6-216	9.5	9.5	中国 China	110°59'E	19°58'N
37	6-339	10.6	11.2	贝宁 Benin	2°13'E	6°24'N
38	6-341	10.4	9.5	贝宁 Benin	2°13'E	6°24'N
39	6-394	9.9	8.8	中国 China	109°00'E	21°35'N
40	6-445	11.6	11.0	泰国 Thailand	100°37'E	7°33'N

计算各区组每个家系平均苗高和平均地径；各区组每个家系再随机选取 4 株幼苗，清理根部泥土后，分根、茎、小枝带回实验室，置于鼓风干燥箱中，105 °C 烘至恒重并称重，计算根冠比=地下部分干重/地上部分干重。

1.3 数据处理

采用 Excel 2020 和 SPSS 25.0 软件进行数据整理和统计分析；使用 R 语言程序包“HalfSib MS”计算遗传参数^[13]；利用 Origin 2021 进行聚类分析和增益柱状图的绘制。

1.3.1 生长与分枝性状遗传力、遗传变异系数、相关系数和增益的数学模型^[14-15]

$$h_f^2 = \sigma_f^2 / [\sigma_f^2 + \sigma_{fb}^2 / b + \sigma_e^2 / (bn)]$$

式中， b 为区组数， n 为每家系定植株数， σ_f^2 为家系方差分量， σ_{fb}^2 为家系与区组互作方差分量， σ_e^2 为误差方差分量。

$$C_{CVG} = \sigma_f / \bar{X} \times 100\%$$

式中， σ_f 为性状家系方差分量的平方根， \bar{X} 表示性状的平均值。

$$\gamma_{P(xy)} = \frac{Cov_P(x,y)}{\sqrt{\sigma_{Px}^2} \cdot \sqrt{\sigma_{Py}^2}}$$

$$\gamma_{G(xy)} = \frac{Cov_G(x,y)}{\sqrt{\sigma_{Gx}^2} \cdot \sqrt{\sigma_{Gy}^2}}$$

式中， $Cov_P(x,y)$ 为性状 x 与性状 y 间的表型协方差， σ_{Px}^2 为性状 x 的表型方差分量， σ_{Py}^2 为性状 y 的表型方差分量； $Cov_G(x,y)$ 为性状 x 与性状 y 间的遗传协方差， σ_{Gx}^2 为性状 x 的遗传方差分量， σ_{Gy}^2 为性状 y 的遗传方差分量。

$$\text{现实增益 } \Delta G_r = S / \bar{x} \times 100\%$$

$$\text{遗传增益 } \Delta G_g = Sh^2 / \bar{x} \times 100\%$$

式中， S 代表选择差， h^2 为遗传力， \bar{x} 指代某一性状的均值。

1.3.2 短枝木麻黄优良家系的选择 通过聚类分析和布雷金多性状综合评价法开展优良家系的综合选择。布雷金多性状综合评价法数学模型为^[16]：

$$q_i = \sqrt{\sum_{j=1}^n a_i}$$

式中， $a_i = X_{ij} / X_{jmax}$ ， X_{ij} 为第 i 家系第 j 性状的平均值， X_{jmax} 为所有家系第 j 性状的最优值。

2 结果与分析

2.1 生长与分枝性状变异

由表 2 可知，7 个苗期性状变异系数为 18.40%~86.06%，表明参试群体生长与分枝性状分化较明显。方差分析结果则显示，40 个短枝木麻黄半同胞家系间苗期各生长和分枝性状差异均极显著 ($P < 0.01$ ，下同)，且方差来源以家系为主。

表 2 苗期生长与分枝性状方差分析
Tab. 2 Variance analysis of seedling growth and branching traits

性状 Trait	变异来源 Source of variation	自由度 df	均方 MS	F 值 F value	P 值 P value	最小值 Min	最大值 Max	均值 Mean	标准差 SD	变异系数 CV/%
SH	区组间	3	299.032	1.814	0.143	14.70	88.50	45.37	14.66	32.32
	家系间	39	1465.105	8.885	0.000					
	区组×家系	117	231.584	1.404	0.005					
GD	区组间	3	0.470	0.575	0.632	0.93	6.15	3.04	1.03	33.90
	家系间	39	7.245	8.856	0.000					
	区组×家系	117	1.204	1.472	0.001					
WD	区组间	3	21.690	4.697	0.439	0.10	13.60	3.90	3.35	86.06
	家系间	39	48.220	10.442	0.000					
	区组×家系	117	13.375	2.896	0.797					
R/S	区组间	3	0.299	61.500	0.000	0.05	0.77	0.37	0.12	33.01
	家系间	39	0.063	13.046	0.000					
	区组×家系	117	0.041	8.469	0.000					
LB _N	区组间	3	3942.865	22.700	0.000	5.00	77.00	32.67	14.99	45.89
	家系间	39	1223.231	7.043	0.000					
	区组×家系	117	244.184	1.406	0.004					
LB _A	区组间	3	1562.224	18.764	0.000	31.30	91.00	59.78	11.00	18.40
	家系间	39	805.014	9.669	0.000					
	区组×家系	117	147.515	1.772	0.000					
LB _L	区组间	3	49.864	4.759	0.003					
	家系间	39	78.835	7.524	0.000	4.80	23.60	12.72	3.64	28.62
	区组×家系	117	14.059	1.342	0.012					

2.2 生长与分枝性状的遗传参数估算

如表 3 所示, 参试群体生长与分枝性状的遗传变异系数为 7.64%~28.13%, 其中根冠比和侧枝角的遗传变异系数均低于 10%。在遗传力方面, 各表型性状的家系遗传力变化幅度为 0.36~0.83。

2.3 生长与分枝性状的表型和遗传相关分析

对短枝木麻黄半同胞家系苗期生长与分枝性状, 进行表型和遗传相关分析, 结果(表 4)表明, 根冠比、侧枝角与其他表型性状指标相关性

不明显或呈弱相关关系。苗高、地径、干重、侧枝数及侧枝长相互间表型和遗传相关性较高, 且均达到极显著水平。

2.4 优良家系选择

由于根冠比、侧枝角的遗传变异系数较低, 因此, 仅以苗高、地径、干重、侧枝数和侧枝长这 5 个性状作为评价指标, 对参试家系进行聚类分析, 划分类群(图 1), 再计算各类群的遗传增益和现实增益。

表 3 苗期生长与分枝性状遗传参数估算

Tab. 3 Estimation of genetic parameters of seedling growth and branching traits

性状 Trait	家系方差分量 σ_f^2	误差方差分量 σ_e^2	遗传变异系数 $C_{CVG}/\%$	家系遗传力 h_f^2
SH	42.68±11.83	164.60±7.24	14.40	0.83±0.04
GD	0.20±0.05	0.82±0.04	14.88	0.82±0.05
WD	1.20±0.39	4.66±0.20	28.13	0.71±0.07
R/S	0.01±0.00	0.01±0.00	7.64	0.36±0.16
LB _N	33.22±9.73	173.35±7.62	17.64	0.78±0.06
LB _A	23.45±6.68	83.09±3.65	8.10	0.81±0.05
LB _L	2.20±0.62	10.46±0.46	11.65	0.80±0.05

表 4 各性状间的表型相关系数(上三角)及遗传相关系数(下三角)

Tab. 4 Phenotypic (upper triangle) and genetic (lower triangle) correlation coefficients between traits families

性状 Trait	SH	GD	WD	R/S	LB _N	LB _A	LB _L
SH	1.000	0.819**	0.642**	-0.110	0.747**	0.335**	0.808**
GD	0.753**	1.000	0.793**	-0.154*	0.710**	0.351**	0.697**
WD	0.742**	0.974**	1.000	-0.141	0.602**	0.228	0.506
R/S	-0.313	-0.487*	-0.345	1.000	-0.037	-0.177**	-0.146**
LB _N	0.800**	0.752**	0.762**	0.039	1.000	0.327**	0.566**
LB _A	0.519**	0.475**	0.556**	-0.489*	0.543**	1.000	0.397**
LB _L	0.903**	0.670**	0.704**	-0.483*	0.565**	0.497**	1.000

注: *表示显著相关 ($P<0.05$); **表示极显著相关 ($P<0.01$)。

Note: * indicates significant correlation ($P<0.05$); ** indicates extremely correlation ($P<0.01$).

图 1 显示, 当欧式距离达到 15 时, 可将参试家系划分为 4 个类群: 其中第 I 类群包含 1-129、2-402、2-32 等 10 个家系; 第 II 类群则包含 1-211、3-80、1-32 和 3-224 等 4 个家系; 第 III 类群包含 1-130、1-30、2-194 等 15 个家系; 第 IV 类群则包含 1-205、4-128、2-343 等 11 个家系。图 2 显示, 第 I、II 类群家系苗期生长和分枝性状的现实增益和遗传增益均为负值, 因此将其进一步归为苗期慢生家系; 第 III 类群家系除干重的现实增益和遗传增益高于 10%, 其余 4 个性状的现实增益为 2.01%~7.86%, 遗传增益为 1.57%~6.44%, 将其

归为苗期较速生家系; 第 IV 类群家系与参试群体相比, 其侧枝长的现实增益和遗传增益分别为 6.28%和 5.02%, 而苗高、地径、干重和侧枝数的现实增益和遗传增益均超过 10%, 可归为苗期速生家系。

以苗高、地径、干重、侧枝数及侧枝长为评价指标, 采用布雷金多性状综合评价法对参试家系进行评价(表 5)。按 10% 的入选率进行筛选, 共有 4 个家系入选, 分别为 3-265、5-373、1-266 和 2-343 家系, 其苗高、地径、干重、侧枝数和侧枝长平均值分别为 54.59 cm、3.61 mm、5.48 g、

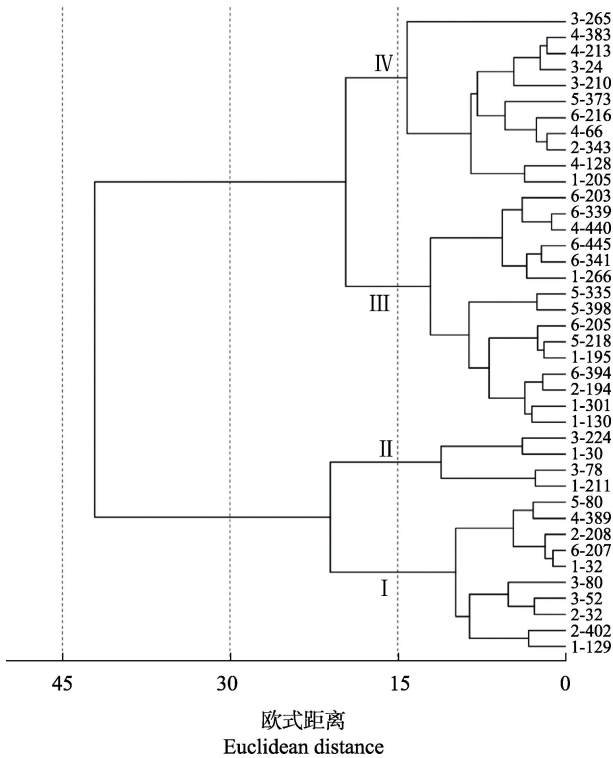


图 1 40 个短枝木麻黄半同胞家系的聚类分析
Fig. 1 Cluster analysis of 40 half-sib families of *C. equisetifolia*

39.04 和 15.10 cm，现实增益分别为 21.14%、19.10%、41.83%、19.97%和 18.88%，遗传增益分别为 17.55%、15.66%、29.70%、15.57%和 15.10%。

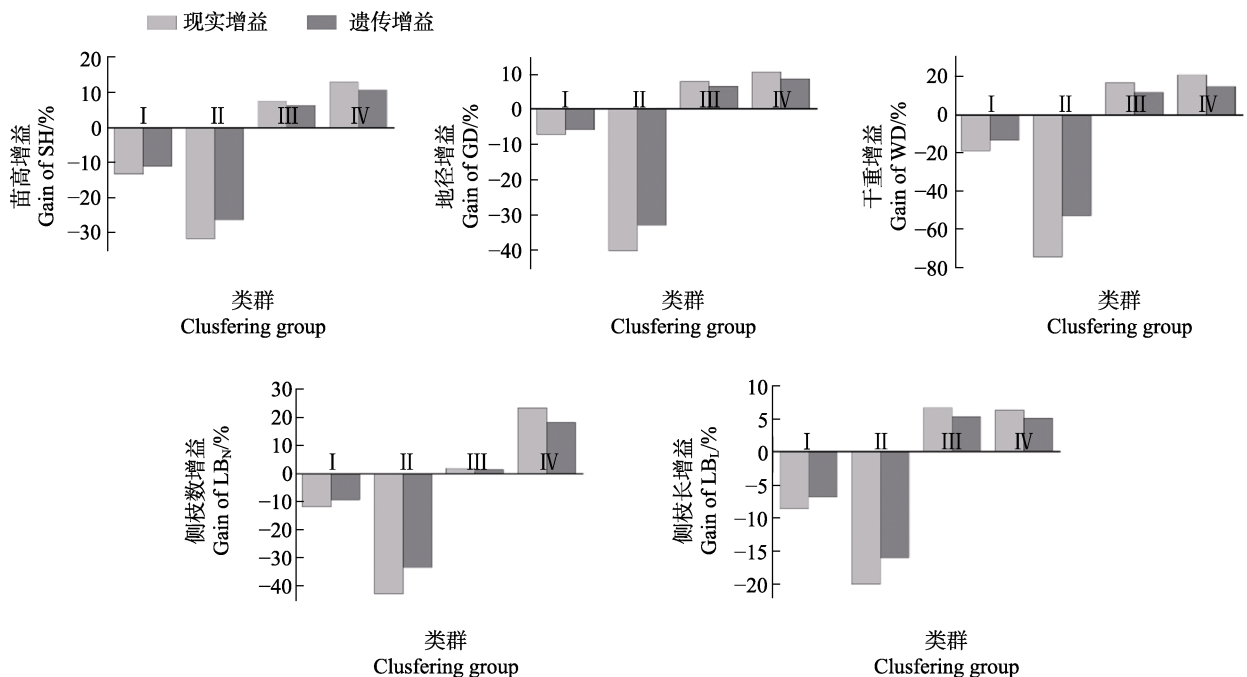


图 2 4 类短枝木麻黄半同胞家系的现实增益和遗传增益
Fig. 2 Realistic gain and genetic gain of four types of *C. equisetifolia* half-sib families

3 讨论

遗传和变异是林木遗传改良的重要基础^[17]。遗传力表示亲本将某性状遗传给子代的能力，遗传力愈大，愈能稳定遗传给子代^[18-19]。本研究中，苗高、地径、根冠比、侧枝数、侧枝角及侧枝长等性状的家系遗传力为 0.36~0.83，在家系水平上，受到中度或强度遗传控制^[20]，显著高于 PRASAD 等^[21]在印度安得拉邦对短枝木麻黄家系苗期生长性状遗传力的估算结果。这可能是因为短枝木麻黄花期以 3—5 月为主，而受西南暖湿气流与冷空气交绥作用的影响，供试样地此时降雨较为频繁，在一定程度上阻碍了花粉传播，同一母株的种子材料中可能包含较大比例的全同胞子代，间接导致参试家系的遗传力有所提高^[22-24]。此外，方差分析结果显示，各性状在家系间差异极显著，变异系数为 18.40%~86.06%，这与胡盼等^[12]对幼苗时期不同种源的短枝木麻黄表型性状差异评价结果及陈珍等^[25]对 25 个短枝木麻黄无性系进行苗期选择研究的结果相似，表明短枝木麻黄生长和分枝性状分化明显，变异较丰富，具有较高的遗传改良潜力。

遗传变异系数反映了性状遗传变异的相对大小，其数值越大，选取获得优良遗传型的潜力越大^[26]。本研究中，参试群体根冠比和侧枝角的遗

表 5 40 个短枝木麻黄半同胞家系的综合评价
Tab. 5 Comprehensive evaluation of 40 half-sib families of *C. equisetifolia*

家系 Family	苗高 SH/cm	地径 GD/mm	干重 WD/g	侧枝数 LB _N	侧枝长 LB _L /cm	ϱ 值 ϱ value	排名 Rank
3-265	59.68	3.74	5.44	41.32	16.35	2.170	1
5-373	53.59	3.95	6.02	42.00	12.91	2.134	2
1-266	53.68	3.47	5.48	35.07	15.94	2.093	3
2-343	51.42	3.28	4.99	37.79	15.18	2.058	4
4-66	51.63	3.52	4.69	38.93	14.09	2.052	5
6-216	52.04	3.60	5.13	37.50	12.73	2.047	6
6-203	52.35	3.51	4.72	31.65	15.52	2.037	7
1-301	42.63	3.27	6.38	34.74	13.67	2.035	8
6-341	54.05	3.64	4.37	33.25	14.41	2.031	9
4-128	49.58	3.20	4.30	45.51	12.76	2.024	10
4-213	48.67	3.43	4.84	37.54	12.92	2.014	11
6-339	49.77	3.39	5.47	32.43	12.85	2.012	12
1-205	50.76	3.15	3.79	42.38	14.11	2.009	13
2-194	44.17	3.59	5.84	34.06	11.76	2.008	14
3-24	48.42	3.08	4.48	39.54	13.75	2.001	15
4-440	49.94	3.28	4.70	31.88	13.60	1.984	16
4-383	47.59	3.02	4.75	38.34	12.06	1.972	17
5-218	48.57	3.25	4.24	35.69	12.85	1.968	18
6-394	44.80	3.16	4.67	35.50	12.10	1.950	19
1-130	42.45	3.54	4.58	32.78	12.34	1.950	20
6-205	47.72	3.21	4.26	33.35	12.74	1.947	21
5-335	47.43	3.20	3.86	28.13	14.51	1.927	22
6-445	54.07	2.73	2.97	34.44	13.79	1.914	23
3-210	46.62	2.89	3.00	40.95	11.59	1.895	24
5-398	48.63	2.95	3.11	30.15	13.97	1.889	25
1-195	47.37	2.87	3.05	34.89	12.95	1.886	26
5-80	38.03	3.15	3.95	32.31	11.99	1.870	27
2-32	40.75	2.92	3.98	27.00	12.77	1.850	28
6-207	40.52	2.89	3.48	30.88	11.77	1.831	29
1-32	41.18	2.95	2.96	30.52	12.41	1.825	30
2-208	40.92	2.87	2.79	32.21	11.89	1.812	31
1-129	34.92	2.95	3.91	24.61	10.84	1.774	32
3-52	42.63	2.79	2.55	27.92	11.65	1.774	33
2-402	35.19	2.94	3.38	27.75	10.15	1.759	34
4-389	37.01	2.31	2.56	30.78	10.51	1.710	35
3-80	40.47	2.35	1.90	23.39	11.96	1.678	36
3-224	36.01	2.14	1.20	18.85	12.68	1.589	37
1-30	33.40	1.97	1.39	19.38	9.94	1.520	38
1-211	28.27	1.67	0.66	18.13	9.36	1.404	39
3-78	25.73	1.45	0.77	18.29	8.55	1.358	40

传变异系数较低, 仅为 7.64% 和 8.10%, 表明这 2 个性状的选择潜力较低。相关系数代表了性状间的关联程度, 可用来确定目的性状之间的相关关

系^[27-28]。本研究发现, 侧枝数、侧枝长与苗高、地径、干重间的表型相关性和遗传相关性均达到了极显著水平, 这与胡盼等^[12]的研究结果相似,

说明侧枝数和侧枝长可作为短枝木麻黄优良半同胞家系筛选的参考因子。

遗传增益是人工选择群体所取得改良效果的重要评价指标, 受到遗传力、变异系数和选择强度的直接影响^[24]。本研究以苗高、地径、干重、侧枝数和侧枝长作为评价指标, 结合聚类分析和多性状综合评价法, 以 10% 入选率, 筛选出 4 个优良家系, 增益明显, 选择效果较为显著。然而, 隶属于较速生类群的 1-266 入选其中, 可能是因为该家系平均侧枝长较大, 因此, 在苗期选择时, 也可适当考虑第 III 类群的较速生家系。入选优良家系为后续短枝木麻黄遗传改良和林分营造提供了较好的种质材料。但受基因与环境的共同作用, 林木在不同生长发育阶段, 其遗传和表型参数是动态变化的^[29], 故今后还需结合造林试验进行多年观测, 进一步探究短枝木麻黄半同胞家系的变异及其稳定性, 以便更加科学地指导木麻黄育种和营林生产实践。

参考文献

- [1] ELLAKANY M H, MIDGLEY S J, TURNBULL J W, JOHNSTON R. *Casuarina* ecology management and utilization[C]. International *Casuarina* Workshop, 1983.
- [2] 罗美娟. 短枝木麻黄种源群体遗传多样性与遗传变异规律研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2005.
LUO M J. Study on genetic diversity and variation of *Casuarina equisetifolia* provenance population[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture & Forestry University, 2005. (in Chinese)
- [3] 李茂瑾. 短枝木麻黄国际种源试验和早期选择[J]. 热带亚热带植物学报, 2018, 26(6): 597-603.
LI M J. Provenance characteristics and early selection of *Casuarina equisetifolia*[J]. Journal of Tropical and Subtropical Botany, 2018, 26(6): 597-603. (in Chinese)
- [4] 聂森, 张勇, 仲崇禄, 叶功富. 福建沿海木麻黄速生抗性无性系选育[J]. 森林与环境学报, 2012, 32(4): 300-304.
NIE S, ZHANG Y, ZHONG C L, YE G F. Selection of fast-growing and adversity resistance *Casuarina* clones for coastal areas of Fujian[J]. Journal of Forest and Environment, 2012, 32(4): 300-304. (in Chinese)
- [5] 黄桂华, 仲崇禄, 张勇. 我国木麻黄科植物遗传改良研究进展[J]. 林业与环境科学, 2005, 21(4): 65-70.
HUANG G H, ZHONG C L, ZHANG Y. The status and advances of genetic improvement of *Casuarina* in China[J]. Forestry and Environmental Science, 2005(4): 65-70. (in Chinese)
- [6] 叶功富, 俞新妥. 木麻黄营林研究综述[J]. 森林与环境学报, 1998, 18(3): 273-277.
YE G F, YU X T. A brief review on silviculture research of *Casuarina* species[J]. Journal of Forest and Environment, 1998(3): 273-277. (in Chinese)
- [7] 仲崇禄, 施纯淦, 王维辉, 白嘉雨, 苏金权, Khongsak Pinyopusarerk. 华南地区短枝木麻黄种源试验[J]. 林业科学研究, 2001(4): 408-415.
ZHONG C L, SHI C G, WANG W H, BAI J Y, SU J Q, PINYOPUSARERK K. Provenance trials of *Casuarina equisetifolia* in Southern China[J]. Forest Research, 2001(4): 408-415. (in Chinese)
- [8] 傅玉狮. 木麻黄优树自由授粉优良家系选择的研究[J]. 防护林科技, 1996(Z1): 93-96.
FU Y S. Study on the selection of excellent families for free pollination of superior trees of *Casuarina equisetifolia*[J]. Protection Forest Science and Technology, 1996(Z1): 93-96. (in Chinese)
- [9] 魏巍. 云南松家系间苗期生长特性的变异研究[D]. 昆明: 西南林业大学, 2012.
WEI W. Study on the variation of growth characteristics of seedling among families of *Pinus yunnanensis*[D]. Kunming: Southwest Forestry University, 2012. (in Chinese)
- [10] 李凤鸣, 任庆贵, 张利民, 姚景春, 栾瑞廷, 孙景花, 孟宪吉. 红皮云杉生长变异与早期选择的研究[J]. 吉林林业科技, 2008(4): 30-33, 47.
LI F M, REN Q G, ZHANG L M, YAO J C, LUAN R T, SUN J H, MENG X J. Growth variation of *Picea koraiensis* and early selection[J]. Journal of Jilin Forestry Science and Technology, 2008(4): 30-33, 47. (in Chinese)
- [11] 舒筱武, 郑晔, 李思广, 尹晓兵, 马永涛, 张荣, 刘丽, 崔茂光, 张伯良. 云南松壮苗培育与幼林生长相关性的研究[J]. 西部林业科学, 2000(4): 1-9.
SHU X W, ZHENG W, LI S G, YIN X B, MA Y T, ZHANG R, LIU L, CUI M G, ZHANG B L. Study on correlation of strong seedlings cultivation and young growth of *Pinus yunnanensis*[J]. Journal of West China Forestry Science, 2000(4): 1-9. (in Chinese)
- [12] 胡盼, 仲崇禄, 张勇, 姜清彬, 陈羽, 陈珍, Khongsak Pinyopusarerk. 短枝木麻黄种群苗期表型多样性评价[J]. 西北植物学报, 2015, 35(5): 1013-1020.
HU P, ZHONG C L, ZHANG Y, JIANG Q B, CHEN Y, CHEN Z, PINYOPUSARERK K. Variation analysis on morphological traits of *Casuarina equisetifolia* at seedling stage from different regions[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2015, 35(5): 1013-1020. (in Chinese)
- [13] 王德源, 童春发. 林木多地点半同胞子代测定遗传分析 R 语言程序包及其应用[J]. 南京林业大学学报(自然科学版),

- 2015, 39(5): 45-51.
- WANG D Y, TONG C F. Halfsib MS: an R package for genetic analysis of half-sib progeny test at multiple site in forest trees[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2015, 39(5): 45-51. (in Chinese)
- [14] 韩强, 仲崇禄, 张勇, 姜清彬, 陈羽, 陈珍, PINYOPUSARERK K. 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.
- HAN Q, ZHONG C L, ZHANG Y, JIANG Q B, CHEN Y, CHEN Z, PINYOPUSARERK K. Genetic variation and selection of *Casuarina junghuhniana* provenances at Lingao, Hainan[J]. Forest Research, 2017, 30(4): 595-603. (in Chinese)
- [15] 张志毅. 林木遗传学基础[M]. 北京: 中国林业出版社, 2012.
- ZHANG Z Y. Fundamentals of forest genetics[M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2012. (in Chinese)
- [16] 解孝满, 李景涛, 赵合娥, 刘建军, 段春玲, 朱青, 袁勇, 卞公明. 柳树无性系苗期遗传测定与选择[J]. 江苏林业科技, 2008, 35(3): 6-14.
- XIE X M, LI J T, ZHAO H E, LIU J J, DUAN C L, ZHU Q, YUAN Y, BIAN G M. Willow clonal seedling genetic determination and selection[J]. Journal of Jiangsu Forestry Science and Technology, 2008, 35(3): 6-14. (in Chinese)
- [17] MWASE W F, SAVILL P S, HEMERY G. Genetic parameter estimates for growth and form traits in common ash (*Fraxinus excelsior* L.) in a breeding seedling orchard at Little Wittenham in England[J]. New Forests, 2008, 36(3): 225-238.
- [18] 贾晨, 辜云杰, 夏川, 罗建勋, 王友. 枫香半同胞家系子代测定及优良家系选择[J]. 西部林业科学, 2014, 43(5): 122-128.
- JIA C, GU Y J, XIA C, LUO J X, WANG Y. The half-sib family progeny test and excellent family selection of *Liquidambar formosana*[J]. Journal of West China Forestry Science, 2014, 43(5): 122-128. (in Chinese)
- [19] MANIEE M, KAHRIZI D, MOHAMMADI R. Genetic variability of some morpho-physiological traits in durum wheat (*Triticum turgidum* var. *durum*)[J]. Journal of Applied Sciences, 2009, 9(7): 1383-1387.
- [20] 谢永军, 施汉钰. 遗传力研究及马尾松种源遗传性状分析[J]. 中国园艺文摘, 2010, 26(3): 44-45.
- XIE Y J, SHI H Y. Study on heritability and analysis of genetic characters of *Pinus massoniana* provenance[J]. Chinese Horticulture Abstracts, 2010, 26(3): 44-45. (in Chinese)
- [21] PRASAD N S, Dieters M J. Genetic control of growth and form in early-age tests of *Casuarina equisetifolia* in Andhra Pradesh, India[J]. Forest Ecology & Management, 1998, 110(1-3): 49-58.
- [22] 武冲. 木麻黄生殖生物学研究[D]. 海口: 海南大学, 2010.
- WU C. Reproductive biology of *Casuarina*[D]. Haikou: Hainan University, 2010. (in Chinese)
- [23] 庄瑶, 鲍瑞娟, 张容焱, 何金海, 汪澜. 基于 MCI 指数的福建省干旱气候特征[J]. 气象与环境学报, 2021, 37(5): 93-99.
- ZHUANG Y, BAO R J, ZHANG R Y, HE J H, WANG L. MCI-based climatic characteristics of drought in Fujian province[J]. Journal of Meteorology and Environment, 2021, 37(5): 93-99. (in Chinese)
- [24] 仲崇禄, 白嘉雨. 山地木麻黄家系遗传参数估算与家系选择[J]. 林业科学研究, 1998, 11(4): 361-369.
- ZHONG C L, BAI J Y. Estimation of genetic parameters and screening of families for *Casuarina junghuhniana*[J]. Forest Research, 1998, 11(4): 361-369. (in Chinese)
- [25] 陈珍, 张勇, 仲崇禄, 陈羽. 木麻黄无性系苗期选择研究[J]. 林业环境与科学, 2006(2): 22-26.
- CHEN Z, ZHANG Y, ZHONG C L, CHEN Y. Study on seedling selection of *Casuarina* clones[J]. Forestry and Environmental Science, 2006(2): 22-26. (in Chinese)
- [26] 宋德凤, 吴高岭. 玉米种质资源遗传力和遗传变异系数的研究[J]. 湖北农学院学报, 1999(3): 21-23.
- SONG D F, WU G L. The study on the heritability and coefficient of hereditary variation of maize variety resources[J]. Journal of Hubei Agricultural College, 1999(3): 21-23. (in Chinese)
- [27] FUKATSU E, HIRAOKA Y, MATSUNAGA K, TSUBOMURA M, NAKADA R. Genetic relationship between wood properties and growth traits in *Larix kaempferi* obtained from a diallel mating test[J]. Journal of Wood Science, 2014, 61(1): 10-18.
- [28] KUMAR A, SINGH D N, PRASAD K, PANDEY A. Comparing correlation coefficients and path analysis in different populations of rice (*Oryza sativa* L.)[J]. Current Journal of Applied Science and Technology, 2020: 1-11.
- [29] 申文辉, 谭长强, 劳庆祥, 郝海坤, 曹艳云, 郑威, 黄志玲. 红锥优树二代家系抗逆性苗期选择研究[J]. 西南林业大学学报(自然科学), 2019, 39(2): 11-17.
- SHEN W H, TAN Z Q, LAO Q X, HAO H K, CAO Y Y, ZHENG W, HUANG Z L. Seedling selection of stress resistance in the 2nd superior families of *Castanopsis hystrix*[J]. Journal of Southwest Forestry University (Natural Sciences), 2019, 39(2): 11-17. (in Chinese)