

南洋楹半同胞家系苗期变异及选择

晏 姝, 韦如萍, 王润辉, 黄 荣, 郑会全

(广东省林业科学研究院 广东省森林培育与保护利用重点实验室, 广东广州 510520)

摘要: 【目的】探究南洋楹 *Falcataria falcata* 苗期生长及固氮等性状遗传变异规律, 选择速生且固氮能力强的优良家系。【方法】以南洋楹 1 代无性系种子园中 37 个半同胞家系 1~6 月生幼苗为材料, 调查测定苗高、地径、叶绿素相对含量、生物量、根瘤数量等指标, 通过遗传变异分析、性状间相关分析、聚类分析等方法, 进行苗期生长比较及选择。【结果】南洋楹 37 个半同胞家系 1~2 月生时生长性状未表现出明显差异。4 月生时超过 16 个家系的苗高或地径显著优于饶平县南洋楹母树林混合种 (ck, $P < 0.05$), 苗高和地径的家系遗传力分别为 0.89~0.90 和 0.84~0.86, 在入选率为 30% 时, 遗传进展分别为 0.118 9~0.221 4 和 0.096 2~0.154 3。不同性状间均存在极显著或显著正相关关系 ($P < 0.01$ 或 $P < 0.05$)。选择出 13 个家系, 占群体的 34%, 与群体平均值比较, 苗高和地径的现实增益分别为 27.99% 和 12.73%、遗传增益分别为 24.91% 和 10.69%; 与 ck 比较, 现实增益分别为 62.47% 和 41.65%, 遗传增益分别为 55.59% 和 34.98%。【结论】南洋楹半同胞家系从苗龄 4 月生起, 苗高和地径等生长性状发生显著遗传变异, 且具有较高水平的家系遗传力和较好的选择潜力。在生长和固氮等性状协同分析基础上, 选择了 13 个同时具有苗期生长优势和高效固氮能力的优良家系。图 3 表 4 参 23

关键词: 南洋楹; 半同胞家系; 遗传变异; 苗期选择

中图分类号: S722.7 文献标志码: A 文章编号: 2095-0756(2024)02-0306-08

Variation and selection of half-sib families of *Falcataria falcata* during seedling stage

YAN Shu, WEI Ruping, WANG Runhui, HUANG Rong, ZHENG Huiquan

(Guangdong Provincial Key Laboratory of Silviculture, Protection and Utilization, Guangdong Academy of Forestry, Guangzhou 510520, Guangdong, China)

Abstract: [Objective] The study aims to explore the genetic variation in seedling growth and nitrogen fixation traits of *Falcataria falcata* and select fast growing families with strong nitrogen fixation ability. [Method] Seedlings of 1 to 6 months in 37 half-sib families from the 1st generation clonal seed orchard of *F. falcata* were used as materials. Indicators such as seedling height, ground diameter, relative chlorophyll content, biomass, and number of root nodules were investigated and measured. The methods of genetic variation analysis, correlation analysis and cluster analysis were used to compare growth and select seedlings. [Result] There was no significant difference in growth traits among 1 – 2 month seedlings in 37 half-sib families, but the height or ground diameter of 4-month seedlings in more than 16 families was significantly better than that of the mixed seeds of mother forests (ck) in Raoping County. The family heritability of seedling height and ground diameter was 0.89 – 0.90 and 0.84 – 0.86, respectively, and the genetic progression was 0.118 9 – 0.221 4 and 0.096 2 –

收稿日期: 2023-06-20; 修回日期: 2023-09-12

基金项目: 广东省林业科技创新项目 (2022KJXC007); 广东省林业局自然资源事务专项资金生态林业建设项目 (粤林财 2022-8)

作者简介: 晏姝 (ORCID: 0009-0000-3459-0852), 教授级高级工程师, 从事森林培育学研究。E-mail: yanshulky@163.com。通信作者: 郑会全 (ORCID: 0000-0003-0365-6307), 教授级高级工程师, 博士, 从事林木遗传育种学与森林培育学研究。E-mail: zhenghq@sinogaf.cn

0.154 3, respectively, at a selection rate of 30%. There was a highly significant or significant positive correlation between different traits ($P < 0.01$ or $P < 0.05$). 13 families were selected, accounting for 34% of the population. Compared with the population mean, the realistic gains in seedling height and ground diameter were 27.99% and 12.73%, respectively, and the genetic gains were 24.91% and 10.69%, respectively. Compared with ck, the realistic gains were 62.47% and 41.65%, and the genetic gains were 55.59% and 34.98%, respectively. [Conclusion] The half-sib families of *F. falcata* have significant genetic variation in growth traits such as seedling height and ground diameter from 4 months of seedling age, and have a high level of family heritability and good selection potential. Based on the synergistic analysis of growth and nitrogen fixation traits, 13 excellent families with both seedling growth advantage and efficient nitrogen fixation capacity are selected. [Ch, 3 fig. 4 tab. 23 ref.]

Key words: *Falcataria falcata*; half-sib family; genetic variation; seedling selection

林木的遗传变异是遗传改良的前提，有效的遗传变异决定了育种过程中的改良潜力^[1]。生长性状作为林木最直观的表型性状，在多数树种中存在较为丰富的变异。林木苗期生长性状是良种选育繁育和新种质创制的重要指标，苗期的生长发育状况会影响到林木后期乃至一生的生长。多数早晚性状相关回溯性实验证明^[2-4]：以家系苗高或地径等生长性状为指标进行早期选择是有效的，可在提高林木良种选育效率、加速育种进程的同时，获得更高的现实和遗传增益。

南洋楹 *Falcataria falcata* 是豆科 Leguminosae 含羞草亚科 Mimosaceae 常绿高大乔木，原产马来西亚和印度尼西亚，是世界著名的热带速生固氮树种^[5]，其木材质轻、韧性强，纤维质量分数高达 61.8%，是人造板和造纸的优良原料；其根系发达，可结瘤固氮、改良土壤，亦可运用于热带、亚热带地区生态林建设及四旁绿化^[6]。在中国广东、海南等地建立的多个南洋楹引进种源及家系试验点中研究发现^[7-9]：南洋楹从种源、家系、单株等不同层次表现出了丰富的遗传变异，特别表现于幼龄林和成熟林中的生长和形质性状，但其苗期生长变异以及固氮能力相关性状的遗传变异研究未见报道。本研究以南洋楹 1 代无性系种子园中 37 个半同胞家系为研究对象，对其 1~6 月生苗期生长性状（苗高、地径）、叶片叶绿素相对含量、生物量及根瘤数量等指标的测定分析，揭示南洋楹苗期苗高和地径的生长进程及家系层次的遗传变异规律，并选择出速生且固氮能力强的优良家系，为南洋楹良种选育提供依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于广东省林业科学研究院，23°11'39"N，113°22'25"E，海拔为 25 m。该地区属于典型的亚热带季风气候，年平均气温为 23.0 ℃，年日照时数为 1 800.0~1 960.0 h，年降水量为 1 677.0 mm，年平均相对湿度为 69%。土壤类型为赤红壤，肥力中等。

1.2 材料

参试种子来源于广东省茂名市电白区林业科学研究所“南洋楹 1 代无性系种子园”10~11 年生 37 个亲本（37 个半同胞家系），建园亲本均由广东省林业科学研究院选育提供。半同胞家系来源及其亲本基本情况见表 1。试验研究以广东省潮州市饶平县 15 年生以上南洋楹母树林混合种为对照（ck）。

1.3 芽苗培育

2021 年 11 月下旬，将当年采集的南洋楹 37 个半同胞家系及 ck 共计 38 份参试种子放入质量分数为 5% 高锰酸钾溶液浸泡 30 min，用清水冲洗干净后倒入 85 ℃ 的热水浸种，待水自然冷却至常温后再继续浸种 24 h，除去浮在上面的废种，再用清水漂洗 1~2 次。在干净培养皿中垫上湿润的滤纸，将种子均匀置于其中，并封盖放入 28 ℃ 培养箱中暗培养，2~4 d 后种子发育成芽苗^[10]。

1.4 育苗试验

使用规格为 6 cm×9 cm 塑料容器袋，以体积比 $V(\text{黄心土}):V(\text{泥炭土})=3:1$ 为基质，将 38 份参试种子芽苗分别点播于基质中央，1 袋 1 株。按随机区组试验设计排列，每个家系及 ck 按每行 10 株移栽，

表1 半同胞家系来源及其亲本基本情况

Table 1 Origin of half-sibling families and basic situation about their parent plants

家系编号	亲本基因号	来源	树高/m	嫁接口径/mm	家系编号	亲本基因号	来源	树高/m	嫁接口径/mm
F001	BLS952	广东博罗县	7.0	78	F036	LK01	广东江门市	7.5	94
F005	增5	广东广州市	8.5	70	F037	LK03	广东江门市	8.0	75
F007	BLS05	广东博罗县	7.5	75	F038	LY04	广东博罗县	7.5	75
F008	BLS09	广东博罗县	9.5	80	F040	LY06	广东博罗县	8.5	90
F009	BLS02	广东博罗县	10.0	78	F042	LY08	广东博罗县	9.0	90
F014	ZCS09	广东广州市	7.0	70	F043	LY10	广东博罗县	8.0	85
F015	BLS12	广东博罗县	7.0	78	F051	LY19	广东博罗县	9.0	100
F016	ZCS02	广东广州市	8.5	88	F057	LY16	广东博罗县	7.0	75
F017	ZL11	广东广州市	7.6	95	F062	ZCS28	广东广州市	8.0	90
F018	增7	广东广州市	6.5	70	F063	ZCS20	广东广州市	8.5	95
F021	BLS22	广东博罗县	8.0	90	F065	BLS31	广东博罗县	8.5	90
F023	BLS27	广东博罗县	8.5	76	F072	SB02	广东阳春市	9.8	87
F025	BLS11	广东博罗县	8.0	80	F074	SB04	广东阳春市	7.0	86
F027	BLS26	广东博罗县	7.5	75	F078	XX01	广东新兴县	8.0	85
F028	DLS06	广东东莞市	7.5	70	F081	XX05	广东新兴县	9.5	90
F029	FT01	广东博罗县	9.5	90	F083	XX07	广东新兴县	8.5	100
F030	FT02	广东博罗县	8.5	87	F086	XX10	广东新兴县	9.0	100
F031	FT04	广东博罗县	8.0	80	F087	XX12	广东新兴县	8.0	80
F033	HSS02	广东鹤山市	7.0	110					

5行小区, 3次重复, 即每家系及ck各150株。当年11月下旬至翌年5月下旬为育苗期, 苗期管理方法统一按广东省地方标准《南洋楹育苗技术规程》^[11]执行。

1.5 指标观测

分别在苗龄1、2、4、6月生时, 对南洋楹37个半同胞家系及ck苗木的苗高(h)、地径(d)生长情况进行监测。调查样株为各家系及ck各小区中间15~24株, 每个家系及ck45~60株。6月生时, 除测定苗高和地径指标外, 采用SPAD-502叶绿素仪测定每样株中层的成熟叶片的叶绿素相对含量, 每株测定5片, 取其平均值^[12]。再在每小区调查样株中选取3株长势平均的植株, 每个家系及ck共计9株, 取出待测样株, 将根系基质冲洗干净后统计根瘤数, 计算单株根瘤数的平均值, 然后将地上部分和地下部分分离, 用1/100电子天平称量每样株的地上部分及地下部分鲜质量。

1.6 数据统计分析

采用SAS(v 9.2)软件的GLM、LSR和VARCOMP等进行方差分析、多重比较和方差分量估计, 进而估算遗传参数; 相关性分析采用Pearson法, 聚类分析采用CLUSTER过程平均距离法。计算家系遗传力、表型变异系数、遗传变异系数、遗传进展、现实增益、遗传增益等参数^[13]。

2 结果与分析

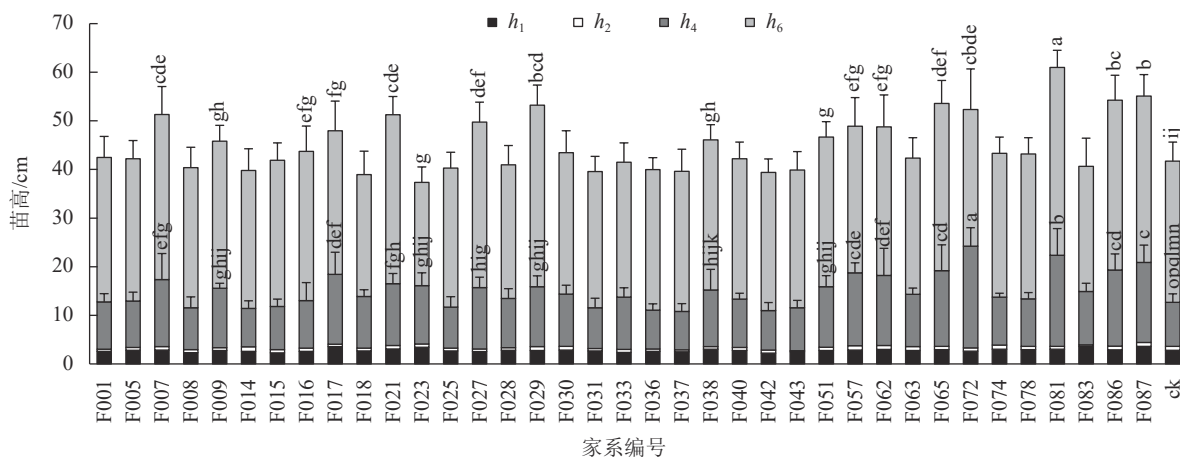
2.1 南洋楹半同胞家系苗高和地径生长进程及变异

1~6月生南洋楹半同胞家系及ck的苗高和地径生长情况见表2、图1和图2。1月生时, 37个半同胞家系及ck平均苗高为2.82 cm, 变幅为2.23~3.63 cm, 苗高生长齐整且稳定; 2月生时, 平均苗高3.45 cm, 平均生长量仅为0.63 cm, 可见, 移栽后第2个月, 即12月下旬至1月下旬为南洋楹蹲苗期, 苗高生长几乎停滞。4月生时, 平均苗高和地

表2 南洋楹半同胞家系及对照生长情况

苗龄/月	Table 2 Growth traits of half-sib families and control					
	苗高/cm			地径/mm		
	均值	变幅	标准差	均值	变幅	标准差
1	2.82	2.23~3.63	0.24			
2	3.45	2.74~4.42	0.31			
4	11.52	7.90~20.94	2.45	1.43	1.01~2.19	0.20
6	41.85	35.71~57.38	4.47	4.49	3.83~5.49	0.41

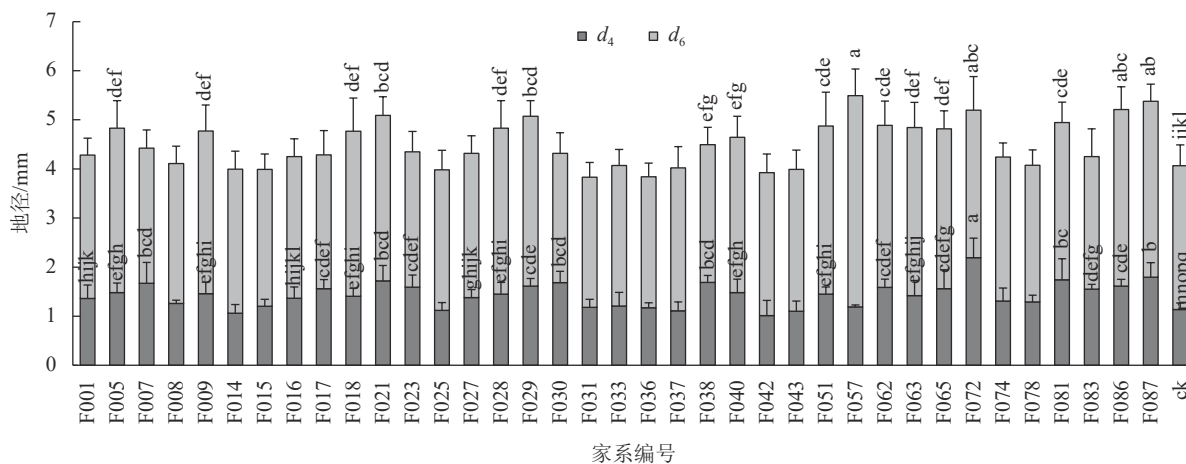
径分别为 11.52 cm 和 1.43 mm，变幅分别为 7.90~20.94 cm 和 1.01~2.19 mm。移栽后第 3~4 个月，即 1 月下旬至 3 月下旬，随着气温回升，南洋楹幼苗进入恢复生长期。同时，不同家系苗高、地径均出现显著差异，与 ck 进行 Duncan 多重比较结果显示：苗高大于 ck 的家系有 28 个，占比超过 75%，其中有 16 个家系的苗高显著优于 ck ($P < 0.05$)；地径大于 ck 的家系有 32 个，占比超过 86%，其中有 24 个家系的地径显著优于 ck ($P < 0.05$)。6 月生时，平均苗高和地径分别达 41.85 cm 和 4.49 mm，长幅分别超过 4 月生时的 260% 和 200%，南洋楹早期速生优势开始凸现，幼苗进入快速生长期，不同家系的生长差异性持续存在。4 月生时苗高生长占优势的 16 个家系的依然显著优于 ck ($P < 0.05$)，但地径显著优于 ck 的家系数量减少至 17 个。



图柱上不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)； h_1 、 h_2 、 h_4 、 h_6 分别表示 1、2、4、6 月生苗高；家系编号所代表家系见表 1。

图 1 不同苗龄苗高生长及与对照多重比较

Figure 1 Multiple comparisons with control of seedling height growth at different seedling ages



图柱上不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)； d_4 、 d_6 分别表示 4、6 月生地径；家系编号所代表家系见表 1。

图 2 不同苗龄地径生长及与对照多重比较

Figure 2 Multiple comparisons with control of ground diameter growth at different seedling ages

2.2 南洋楹半同胞家系苗高和地径生长遗传变异分析

以南洋楹半同胞家系在 4 和 6 月生时的苗高、地径方差分析为基础，对引起家系间变异的主要因素（家系遗传效应）的方差分量 and 遗传参数进行估算，结果显示（表 3）：家系遗传力方面，不同苗龄的参试家系苗高和地径遗传力分别保持在 0.89~0.90 和 0.84~0.86，2 个生长性状均受较强且稳定的遗传控制，可为南洋楹生长性状的遗传改良提供可靠的保障。4 月生时，苗高、地径的表型变异系数和遗传变异系数分别为 0.212 9、0.271 7 和 0.140 2、0.174 8，2 个性状的遗传变异系数均略高于表型变异系数，在呈现出丰富的表型多样性的同时，具有获取优良遗传型的较大潜力，印证了这 2 个性状的表现主要受遗传因素控制，因此，4 月生时对南洋楹苗期生长性状进行选择以达到更高的遗传增益是可靠的。但随着苗

表3 南洋楹半同胞家系生长性状遗传参数估算

Table 3 Estimation of genetic parameters for growth traits in half-sib families

性状	F	遗传方差分量	家系遗传力	表型变异系数	遗传变异系数	遗传进展		
						$\rho=0.20$ $i=1.40$	$\rho=0.30$ $i=1.16$	$\rho=0.40$ $i=0.97$
h_4	9.85	9.796 9	0.89	0.212 9	0.271 7	0.248 0	0.221 4	0.196 0
h_6	10.37	27.722 1	0.90	0.112 4	0.126 6	0.139 2	0.118 9	0.102 2
d_4	6.65	0.062 1	0.84	0.140 2	0.174 8	0.179 2	0.154 3	0.132 7
d_6	7.20	0.205 8	0.86	0.090 7	0.101 0	0.113 3	0.096 2	0.081 6

说明： ρ 表示入选率； i 表示选择强度。 h_4 、 h_6 、 d_4 、 d_6 分别为4、6月生时的苗高和地径。

龄的增长，在6月生时，苗高和地径的变异系数均呈下降趋势。遗传进展主要由性状遗传变异系数、入选率(ρ)和选择强度(i)决定。南洋楹半同胞家系苗高、地径的遗传进展表现为随苗龄增长而有所下降，在入选率30%时，苗高、地径的遗传进展分别为0.118 9~0.221 4和0.096 2~0.154 3，即入选群体平均苗高和地径预期高出群体均值11.89%~22.14%和9.62%~15.43%。

2.3 南洋楹半同胞家系苗期性状间相关分析

对南洋楹半同胞家系的苗高、地径、叶绿素相对含量、地上部分生物量、地下部分生物量、根瘤数量等性状表型相关进行分析，结果显示(表4)：两两性状间均存在极显著或显著正相关关系($P<0.01$ 或 $P<0.05$)，从相关程度来看，地下部分生物量与地上部分生物量、叶绿素相对含量、苗高、根瘤数量等性状的相关系数较高($r>0.766 7$)，地径与根瘤数量相关系数最低($r>0.475 9$)。

表4 南洋楹半同胞家系苗期性状间相关性分析

Table 4 Correlation analyses of seedling traits in half-sib families

性状	苗高	地径	叶绿素相对含量	地上部分生物量	地下部分生物量
苗高	1				
地径	0.687 2**	1			
叶绿素相对含量	0.570 4*	0.694 9**	1		
地上部分生物量	0.696 0**	0.664 9**	0.733 9**	1	
地下部分生物量	0.772 6**	0.642 7**	0.779 6**	0.914 6**	1
根瘤数量	0.655 1**	0.475 9*	0.574 3*	0.652 6**	0.766 7**

说明：**表示在 $P<0.01$ 水平上极显著相关，*表示在 $P<0.05$ 水平上显著相关。

2.4 优良家系选择

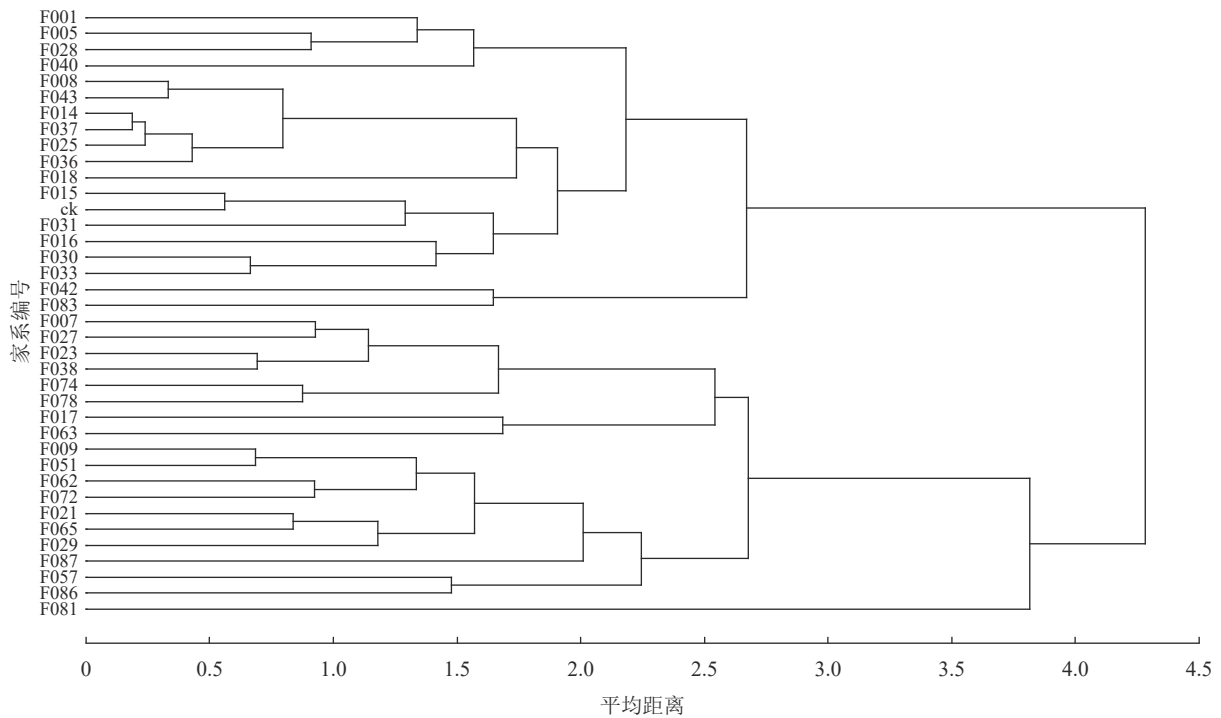
以苗高、地径、叶绿素相对含量、地上部分生物量、地下部分生物量、根瘤数量等5个性状作为评价指标，对参试家系及ck进行聚类分析，划分类群，再分别与群体均值和ck比较计算入选家系的现实增益和遗传增益。图3显示：当平均距离为3.7时，可将参试材料划分为2大类群，第1类群包括13个家系：F009、F017、F021、F029、F051、F057、F062、F063、F065、F072、F081、F086、F087，占群体的34%，其综合表现为苗高和地径等生长指标显著优于ck，地上部分生物量、地下部分生物量和叶绿素相对含量高，自然结瘤能力强，是苗期速生固氮型优良家系。

以第1类群作为入选家系，其苗高、地径平均值及选择增益的选择结果：4月生时，入选家系平均苗高和地径分别为14.74 cm和1.61 mm。与群体平均值比较，现实增益分别为27.99%和12.73%、遗传增益分别为24.91%和10.69%；与ck比较，现实增益分别为62.47%和41.65%、遗传增益分别为55.59%和34.98%。6月生时，入选家系平均苗高和地径分别为46.92 cm和4.99 mm，与群体均值比较增益水平为9.48%~12.11%，与ck比较增益水平为19.52%~23.24%，选择增益有所下降。

3 讨论与结论

3.1 讨论

目前，普遍认为林木遗传变异主要存在于种源间、家系间(无性系间)、个体间和个体内4个层次^[14]。



家系编号所代表家系见表 1。

图 3 南洋楹半同胞家系及对照的聚类分析

Figure 3 Clustering analysis of half-sib families and control

沈凌等^[15]研究发现：无患子 *Sapindus saponaria* 优株自由授粉子代 1 年生的苗高和地径在优株间均存在极显著的差异，具有丰富的变异，开展家系间良种选育的空间很大；苑正赛等^[16]发现：7 月生美洲黑杨 *Populus deltoides* 苗期家系及单株间性状表现差异较大，可进行优良家系及单株的选择；郭飞等^[17]认为：6 月生马尾松 *Pinus massoniana* 1.5 代家系苗期各项生长指标存在极显著差异，家系间遗传变异丰富，选育潜力很大。本研究结果表明：南洋楹半同胞家系从 4 月生幼苗起，苗高和地径等生长性状发生明显遗传变异，6 月生时仍保持相似差异性结果。值得注意的是，依据广东省地方标准《南洋楹育苗技术规程》，苗龄为 6 月生，苗高 20~35 cm，地径 ≥ 0.25 mm 为南洋楹实生苗木出圃合格苗。本研究参试家系群体 6 月生时平均苗高和地径分别达 41.85 cm 和 4.49 mm，表明南洋楹 1 代无性系种子园子代群体已表现出较好的改良效果，不同南洋楹群体层次具有不同生长进程，需适时做好苗木综合管理措施和调整选育策略。南洋楹苗龄为 4 月生时是苗木进入速生生长的关键时期和重要的选择时期。

遗传参数估算对预期增益估计、育种策略制定和选择效果预测等方面具有指导作用^[2]，其中遗传力和变异系数可衡量亲本将某性状遗传给子代的能力和选择潜力，是育种者广泛关注的重要指标。不同苗龄南洋楹半同胞家系苗高和地径的遗传力分别为 0.89~0.90 和 0.84~0.86，遗传力处于极高水平^[1]，表现出苗高的遗传力大于地径的规律；2 个性状的遗传变异系数均略高于表型变异系数，在呈现丰富的表型多样性的同时，具有获取优良遗传型的较大潜力，印证了这 2 个性状主要受遗传因素控制，与苑正赛等^[16]、曹昆彬等^[18]的研究结果一致。本研究进一步对遗传进展进行了估算，该指标在林木遗传育种上常用于预测入选群体某性状预期高出目前群体均值的程度，其变化趋势与遗传变异系数相一致。为了尽可能获得更高遗传选择效益而不丢失优良家系，在入选率 30% 时，南洋楹半同胞家系苗高、地径的遗传进展分别为 0.118 9~0.221 4 和 0.096 2~0.154 3，即入选群体平均苗高和地径预期高出群体均值 11.89%~22.14% 和 9.62%~15.43%。

相关性分析可了解各性状指标间的相关性性质及其相关性大小^[19]，不同性状间的相关性体现其相互有促进或制约关系。南洋楹是豆科植物，根系易被土壤中的根瘤菌感染形成根瘤共生体，根瘤可促进植物的生长，增加土壤有机碳、速效氮和全氮质量分数^[20-21]。根瘤是豆科植物与根瘤菌共生形成的固氮器官，其结瘤率的高低与根瘤的固氮效果有密切的关系^[22]，根瘤的数量可反映南洋楹固氮效益的大小。叶

绿素相对含量能够调控光合作用效率, 较高光合效率有利于植物加强共生固氮作用的碳源和能源的供应^[23], 从而提高根瘤的共生固氮效率。因此, 本研究除了苗高、地径、生物量等传统指标外, 将不同半同胞家系的根瘤数量和叶绿素相对含量指标作为重要考察指标。结果表明: 两两性状间均存在极显著或显著正相关关系, 利用它们之间的相关性可对南洋楹的生长性状和固氮效能进行协同选择, 选育同时具有生长优势和高效固氮的优良家系。

本研究根据平均距离聚类法, 以第1类群的13个(占群体的34%)家系作为入选优良家系, 其综合表现为苗高、地径等生长指标显著优于ck, 生物量和叶绿素相对含量高, 自然结瘤能力强, 是苗期速生固氮型优良家系。与群体平均值比较, 入选优良家系苗高和地径所获得的遗传增益分别为24.91%和10.69%, 与入选率30%情况下遗传进展的预测结果相互印证。该13个家系的亲本主要来源于广东博罗、广东广州、广东新兴等地区, 位于北回归线以南至22°41'N区域内, 属于适宜南洋楹生长的南亚热带气候并同时具备静风环境条件, 也是广东省南洋楹推广种植的主要地区。此外, 入选家系与ck比较获得的现实增益和遗传增益均高于群体平均值, 可见南洋楹37个半同胞家系群体生长水平较ck更高, 南洋楹1代无性系种子园半同胞子代群体也具有较好的群体改良效果。

3.2 结论

南洋楹37个半同胞家系幼苗从4月生起, 苗高和地径等生长性状发生显著遗传变异, 超过16个家系的苗高或地径显著优于对照, 苗高和地径的家系遗传力分别保持在0.89~0.90和0.84~0.86, 具有极高水平的遗传力和较好的选择潜力; 在入选率为30%时, 苗高和地径的遗传进展分别为0.118 9~0.221 4和0.096 2~0.154 3。苗高、地径、叶绿素相对含量、生物量、根瘤数量等性状间均呈极显著或显著正相关。据生长和固氮等性状协同分析结果, 选择了13个同时具有苗期生长优势和高效固氮能力的优良家系。

4 参考文献

- [1] 闫彩霞, 苗婷婷, 刘俊龙, 等. 杨树杂交F₁代扦插无性系苗期生长节律及遗传变异分析[J]. *中国农学通报*, 2023, **39**(5): 39-48.
YAN Caixia, MIAO Tingting, LIU Junlong, *et al.* The growth rhythm and genetic variation of the F₁ hybrid cuttings of *Populus deltoids* [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2023, **39**(5): 39-48.
- [2] 贾庆彬, 刘庚, 赵佳丽, 等. 红松半同胞家系生长性状变异分析与优良家系选择[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2022, **46**(4): 109-116.
JIA Qingbin, LIU Geng, ZHAO Jiali, *et al.* Variation analyses of growth traits in half-sib families of Korean pine and superior families selection [J]. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)*, 2022, **46**(4): 109-116.
- [3] 蔡年辉, 王大玮, 黄文学, 等. 云南松苗木生长与生物量的相关性及通径分析[J]. *植物研究*, 2019, **39**(6): 853-862.
CAI Nianhui, WANG Dawei, HUANG Wenxue, *et al.* Correlation and path analysis on growth traits and biomass of *Pinus yunnanensis* seedlings [J]. *Bulletin of Botanical Research*, 2019, **39**(6): 853-862.
- [4] PALLE S R, SEEVE C M, ECKERT A J, *et al.* Natural variation in expression of genes involved in xylem development in loblolly pine (*Pinus taeda* L.) [J]. *Tree Genet Genomes*, 2011, **7**(1): 193-206.
- [5] 晏姝, 胡德活, 韦如萍, 等. 南洋楹造林密度与施肥均匀设计试验[J]. *林业科学*, 2015, **51**(5): 153-158.
YAN Shu, HU Dehuo, WEI Ruping, *et al.* Stand density of *Paraserianthes falcataria* and the fertilization test with a uniform design [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2015, **51**(5): 153-158.
- [6] BINKLEY D, GIARDINA C, BASHKIN M A. Soil phosphorus pools and supply under the influence of *Eucalyptus saligna* and nitrogen-fixing *Albizia facaltaria* [J]. *Forest Ecology and Management*, 2000, **128**(3): 241-247.
- [7] 郑永光, 周小珍, 陈红跃, 等. 南洋楹优良种源/家系选择的研究[J]. *华南农业大学学报*, 2004, **25**(3): 29-33.
ZHENG Yongguang, ZHOU Xiaozhen, CHEN Hongyue, *et al.* Study on the selection of *Paraserianthes falcataria* seedlots/families [J]. *Journal of South China Agricultural University*, 2004, **25**(3): 29-33.
- [8] 韦如萍, 晏姝, 胡德活, 等. 11年生南洋楹引种试验及家系选择[J]. *中南林业科技大学学报*, 2012, **32**(5): 19-24.
WEI Ruping, YAN Shu, HU Dehuo, *et al.* Introduction experiments and family selection of 11-year-old *Paraserianthes falcataria* family [J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2012, **32**(5): 19-24.
- [9] 晏姝, 梅杰娜, 郑永光, 等. 南洋楹引进种源/家系综合选择[J]. *福建林学院学报*, 2012, **32**(1): 54-59.

- YAN Shu, MEI Jiena, ZHENG Yongguang, *et al.* Integrated selection of introduction for *Paraserianthes falcataria* seedlots/families [J]. *Journal of Fujian College of Forestry*, 2012, **32**(1): 54 – 59.
- [10] 黄雄瑶, 晏姝, 胡德活, 等. 南洋楹育苗技术[J]. 广东林业科技, 2011, **27**(6): 96 – 97.
HUANG Xiongyao, YAN Shu, HU Dehuo, *et al.* Breeding technique of *Paraserianthes falcataria* [J]. *Guangdong Forestry Science and Technology*, 2011, **27**(6): 96 – 97.
- [11] 广东省林业厅. 南洋楹育苗技术规程: DB444/T 1112—2013 [S]. 广州: 广东省农垦总局, 2013.
Guangdong Provincial Forestry Department. *Technical Regulations on Seedling Cultivation on Paraserianthes falcataria: DB444/T 1112–2013* [S]. Guangzhou: General Administration of Land Reclamation of Guangdong Province, 2013.
- [12] 杨清云, 晏姝, 徐燕, 等. 3种幼林叶片的叶绿素和养分特征[J]. 华南农业大学学报, 2008, **29**(1): 53 – 56.
YANG Qingyun, YAN Shu, XU Yan, *et al.* Chlorophyll and nutrient characteristics in leaves of three young stands [J]. *Journal of South China Agricultural University*, 2008, **29**(1): 53 – 56.
- [13] 袁志发, 常智杰, 郭满才. 数量性状遗传分析[M]. 北京: 科学出版社, 2015.
YUAN Zhifa, CHANG Zhijie, GUO Mancai. *Genetic Analysis of Quantitative Traits* [M]. Beijing: Science Press, 2015.
- [14] 苏晓华, 李金花, 卢宝明. 林木遗传改良与我国21世纪林业可持续发展[J]. 林业科学研究, 1999, **12**(6): 650 – 655.
SU Xiaohua, LI Jinhua, LU Baoming. Genetic improvement of forest and sustainable development of forestry in China for next century [J]. *Forestry Research*, 1999, **12**(6): 650 – 655.
- [15] 沈凌, 魏志恒, 张珉, 等. 无患子优株子代苗期选择及遗传参数估算[J]. 湖南林业科技, 2022, **49**(5): 91 – 96.
SHEN Lin, WEI Zhiheng, ZHANG Min, *et al.* Seedling stage selection and genetic parameter estimation of the progenies of the superior plant of *Sapindus mukorossi* [J]. *Hunan Forestry Science and Technology*, 2022, **49**(5): 91 – 96.
- [16] 苑正赛, 葛磊, 张晓艳, 等. 美洲黑杨半同胞子代苗期测定与早期选择[J]. 东北林业大学学报, 2022, **50**(12): 15 – 18, 30.
YUAN Zhengsai, GE Lei, ZHANG Xiaoyan, *et al.* Seedling testing and early selection of a half-sib progeny of *Populus deltoids* [J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2022, **50**(12): 15 – 18, 30.
- [17] 郭飞, 安冰, 黄彩枝, 等. 马尾松1.5代家系苗期生长评价[J]. 现代农业科技, 2023(12): 120 – 122, 133.
GUO Fei, AN Bing, HUANG Caizhi, *et al.* Evaluation of seedling growth of a 1.5 generation family line of masson pine [J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2023(12): 120 – 122, 133.
- [18] 曹昆彬, 杨勇智, 郭洪英, 等. 大花序桉半同胞家系苗期测定及家系选择[J]. 四川林业科技, 2022, **43**(5): 66 – 72.
CAO Kunbin, YANG Yongzhi, GUO Hongying, *et al.* Seedling stage determination and family selection of half-sib families of *Eucalyptus cloeziana* [J]. *Journal of Sichuan Forestry Science and Technology*, 2022, **43**(5): 66 – 72.
- [19] 罗芊芊, 楚秀丽, 李峰卿, 等. 5年生南方红豆杉生长和分枝性状家系变异与选择[J]. 林业科学研究, 2020, **33**(1): 136 – 143.
LUO Qianqian, CHU Xiuli, LI Fengqin, *et al.* Family variation and selection of growth and branching traits of 5-year-old *Taxus wallichiana* var. *mairei* [J]. *Forest Research*, 2020, **33**(1): 136 – 143.
- [20] NYOKI D, NDAKIDEMI P A. Rhizobium inoculation reduces P and K fertilization requirement in corn-soybean intercropping [J]. *Rhizosphere*, 2018, **5**: 51 – 56.
- [21] 王作明, 蚁伟民, 余作岳, 等. 豆科树种回接根瘤菌的研究[J]. 植物生态学报, 1996, **20**(4): 363 – 370.
WANG Zuoming, YI Weimin, YU Zuoyue, *et al.* Responses of tree legumes to rhizobial reinoculation [J]. *Acta Phytoecologica Sinica*, 1996, **20**(4): 363 – 370.
- [22] 孙成毅, 吕成群, 方丽英, 等. 根瘤菌对厚荚相思组培苗的效应[J]. 林业科学研究, 2008, **21**(1): 79 – 83.
SUN Chengyi, LÜ Chengqun, FANG Liying, *et al.* Effects of different rhizobia inoculated on *Acacia crassicarpa* tissue cultured plants [J]. *Forestry Research*, 2008, **21**(1): 79 – 83.
- [23] 杨波, 王邵军, 赵爽, 等. 丛枝菌根真菌共生对石漠化生境白枪杆生长及光合特性的影响[J]. 浙江农林大学学报, 2022, **39**(5): 1028 – 1036.
YANG Bo, WANG Shaojun, ZHAO Shuang, *et al.* Effects of arbuscular mycorrhizal fungi symbiosis on growth and photosynthetic characteristics of *Fraxinus malacophylla* in rocky desertification habitats [J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2022, **39**(5): 1028 – 1036.