

杉木双系和三系杂交种子园近交衰退的比较研究

叶金俊¹, 齐明^{2,3}, 张振^{2,3}, 翁春媚¹, 王海蓉¹, 陈益泰^{2,3}

(1. 浙江省遂昌县生态林业发展中心, 浙江 遂昌, 323300; 2. 中国林业科学研究院 亚热带林业研究所, 浙江 杭州, 311400;
3. 浙江省林木育种技术研究重点实验室, 浙江 杭州, 311400)

摘要: 通过研究杉木 *Cunninghamia lanceolata* 双系和三系杂交种子园后代的表现, 评价双系和三系杉木杂交种子园中亲本的自交衰退大小, 根据自交衰退效应最小原则, 选配建园材料, 以期利用杉木杂交育种成果提供最佳途径。以杉木双系和三系杂交种子园中的亲本后代表现为目标, 以多系种子园中亲本后代表现、亲本异交后代表现为参比对象, 评价其自交衰退的大小。对杉木双系种子园的研究结果表明: 杉木双系种子园亲本后代的自交衰退程度随组配亲本材料、研究性状变化而变化, 并与异系雌雄花期匹配程度有很大的关系; 而对杉木三系种子园的研究结果表明: 在确保花期匹配的前提下, 杉木三系种子园的亲本后代, 通常没有自交衰退, 与多系种子园中的后代相比, 表现出一定的杂交优势。以上结论表明, 对于利用杉木杂交育种成果而言, 今后要对杉木高世代育种园中的亲本进行花期匹配研究, 在此基础上挑选组配后代表现好的组合, 采用建立寡系(3~5系)的杂交种子园途径, 来利用杉木杂交育种成果为佳。

关键词: 杉木; 寡系; 杂交种子园; 近交衰退

中图分类号: S718.46 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3776(2022)04-0001-08

Comparative Study on Inbreeding Depression of Biclinal and Three-line Seed Orchards of *Cunninghamia lanceolata*

YE Jin-jun¹, QI Ming^{2,3}, ZHANG Zhen^{2,3}, WENG Chun-mei¹, WANG Hai-rong¹, CHEN Yi-tai^{2,3}

(1. Suichang Eco-Forestry Development Center of Zhejiang, Suichang 323300, China; 2. Research Institute of Subtropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Hangzhou 311400, China; 3. Key Laboratory of Tree Breeding of Zhejiang Province, Hangzhou 311400, China)

Abstract: In Suichang of Zhejiang province, 3 blocks of biclinal (2000-2002) and 2 blocks of three-line (2019-2021) seed orchard of *Cunninghamia lanceolata* were selected for inbreeding depression. The experiment revealed that inbreeding changed with the parents' progenies and parental materials in the biclinal seed orchard. It also related with the flowering phase of male and female of different lines. It showed that the progenies of the parents in the three-line seed orchards had no inbreeding depression and showed a certain hybridization advantage compared with the progenies in the multi-line seed orchards under the condition of matched flowering phase. Propositions were put forwarded of further research on the flowering phase of the parents in the higher generation breeding orchard.

Key words: *Cunninghamia lanceolata*; few lines; hybrid seed orchard; inbreeding depression

根据杉木 *Cunninghamia lanceolata* 数量遗传学的研究结果^[1-3], 我们制定了杉木高世代杂交育种新方案。目

收稿日期: 2021-12-22; 修回日期: 2022-05-26

基金项目: 浙江省“十四五”林木新品种专项(2021C010010808); 中国林科院亚林所基金项目(195005)

作者简介: 叶金俊, 工程师, 从事森林培育工作; E-mail: kfgsyjj@126.com。通信作者: 齐明, 副研究员, 从事杉木多性状遗传改良研究; E-mail: youqingyi1962@163.com。

前, 全国的杉木高世代遗传改良中仍普遍采用多系种子园途径来利用杉木遗传育种成果, 只有湖南和浙江两省推崇建立杉木双系杂交种子园来利用杉木育种成果^[4-6]。陈益泰于 1988 年从近百个杂交组合中, 评选出若干对表现突出的杂交组合, 选择了其中的 6 对在浙江省遂昌县建立了 7 个小区的双系种子园, 但多点区试的结果表明, 杉木双系种子园中亲本的自由授粉后代表现比人工控制杂交后代的表现要差, 即存在一定程度的自交衰退 (来自陈益泰等没有发表的资料); 等位酶的分析结果揭示出杉木双系种子园中存在一定的自交比率, 并且这种自交比率大小与双系亲本雌雄花期匹配密切相关^[7-8]。显然双系种子园中自由授粉后代表型的衰退是由于建园亲本存在一定的自交所致。为此, 我们对遂昌县杉木双系种子园中的亲本进行了花期 (花量和花程) 观察, 在雌雄花期匹配的基础上, 于 2000 年又重建了 2 hm² 的三系杂交种子园, 目前该杉木三系杂交种子园已经投产。与双系种子园相比, 杉木三系杂交种子园是否仍存在自交衰退? 在杂交组合测定评选的基础上, 建三 (寡) 系杂交种子园解决双系种子园自交衰退的办法是否有效? 这些问题都值得研究。

近亲繁殖是指亲缘关系相近 (或相同) 的两个个体间的交配。一般来讲, 在自然界中异花授粉的植物其近交 (包括自交) 是有害的, 据已有的研究, 近交后代群体平均值出现以下变化^[9-22]: (1) 生活力下降, 生长量减少或发育不良; (2) 结实量降低, 繁殖力下降, 种子产量减少, 空粒多; (3) 出现畸形, 即近交会导近交衰退。因此, 在建立的林木种子园中, 要尽量地避免有亲缘关系的树木彼此相互授粉。陈益泰等^[23]的研究表明, 杉木的自交会引起座果率、种子质量、健全种子的比率和苗木生长量的显著降低, 并且种子性状的衰退比苗木生长量的衰退更甚。

杉木双系种子园是在杉木全同胞子代测定的基础上, 采用评选出的优良杂交组合建立由父母本两个无性系组成的种子园。由于群体大小急剧降低以及花期匹配等方面的原因, 浙江省遂昌县建立的杉木双系种子园中存在一定比率的自交^[8], 并表现出一定的近交衰退, 而杉木多系种子园的近交比率很小^[7]。有鉴于此, 在杉木双系种子园自交衰退效应研究的基础上, 于 2019 年又对遂昌三系 (龙 15+1 339+1 366) 杂交种子园进行了三个组合的人工控制杂交, 并以三系杂交组合和多系种子园中这三系的自由授粉后代平均效应为参照物, 评价杉木三系杂交种子园中自交衰退的变化情况, 为解决双系杂交种子园中存在一定自交衰退提供一条途径。

本研究分别于 2000—2002 年和 2019—2021 年进行人工杂交制种, 以杂交组合和多系种子园中同系自由授粉后代平均表现为参比对照, 对双系和三系种子园的亲本后代表现进行了衰退效应评价, 以期采用合适的途径利用杉木高世代杂交育种成果提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 遂昌县杉木种子园研究区概况

本研究的试验区设置在浙江省遂昌县妙高镇郊区的杉木种子园 (包括双系、三系和多系种子园), 其地理坐标为 119°09'37" ~ 119°11'24" E, 28°28'25" ~ 28°30'47" N; 属中亚热带季风气候, 冬冷夏热, 四季分明, 雨量充沛, 空气湿润, 全年平均气温为 16.8℃, 年降水量为 1 510 mm, 年太阳总辐射量为 422.584 kJ·cm⁻²。杉木种子园的海拔约为 385 m, 平均土壤厚度在 65 cm, 杉木种子园的总面积为 15 hm², 其中三系种子园为 2 hm², 种子园周边 100 m 范围内无杉木林, 不存在花粉污染的情况。

杉木双系和杉木多系种子园于 1988 年定砧, 1989 年成园; 杉木三系种子园是 1998 年基于双系后代区试验的结果, 对双系种子园的八、九和十区加以改造重建的。

1.2 遂昌县杉木双系种子园建园来源

浙江省遂昌县杉木双系种子园的建园材料, 是以杭州市余杭区长乐杉木初级种子园 (1980 年嫁接成园) 的待测亲本无性系为对象, 展开以测交设计为主, 结合单交设计, 产生的近百个人工控制杂交组合, 近 30 个杂交亲本选配的根据是基于杉木的叶色, 按青枝杉、灰枝杉和黄枝杉的亲本互补组配而来。杉木双亲子代试验林建立在杭州市富阳区东叙村, 根据 6 年生试验林的测定结果, 采用综合指数 (包括对一般配合力和特殊配合力效应的利用) 评选出生长形质均优的若干个杂交组合 (来自陈益泰等没有发表的资料)。

1.3 杉木双系种子园建园材料的花期特性和自交率

我们在余杭长乐杉木初级种子园进行杂交试验时, 没有考虑进行反交试验, 由于是多系种子园, 也没有进行花期观察和异系雌雄花期匹配研究, 仅仅考虑杂交后代的综合表现, 所以没有预料到异系雌雄花期差异会导致遂昌杉木双系种子园在利用杂种优势时出现“异化”现象。但后续的研究却发现, 双系种子园因同一亲本无性系雌雄花期重叠而产生自交, 对这方面的后续研究结果见表 1。

表 1 杉木双系种子园成对无性系的花程和自交率^[8]
Table 1 Flowering processes and selfing rates of paired clones from biclonal seed orchard of *C. lanceolata*

双系小区号	无性系号	雌花花程/(月.日)	雄花花程/(月.日)	自交率/%
二小区	1 419	3.04—3.20	3.08—3.16	13.4
	1 269	3.08—3.15	3.10—3.15	42.6
四小区	龙 15	3.10—3.20	3.09—3.10	12.9
	闽 33	3.09—3.16	3.09—3.16	20.0
七小区	1 366	3.05—3.20	3.13—3.20	14.8
	1 339	3.04—3.20	3.09—3.20	26.9

1.4 杉木双系和三系种子园的结构组成和研究对象介绍

遂昌县杉木双系种子园结实投产以后, 已对其后代进行了区域化试验, 其结果揭示双一区(1 244+1 236)、双三区(1 419+1 391)和双六区(阳 11+阳 15)的自由授粉后代与人工控制授粉杂交后代相比, 表现太差; 而双五区人畜破坏太严重, 因此这 4 个区的材料不在本研究之列。本研究仅以杉木双二区(1 419+1 269)、双四区(龙 15+闽 33)和双七区(1 366+1 339)共 6 个亲本无性系为重要的研究对象; 而三系杂交种子园有三个小区, 其中八小区的建园材料为龙 15+1 419+1 339, 而九小区和十小区的建园材料均为龙 15+1 339+1 366, 抽取九小区和十小区的三个亲本无性系为研究对象。

1.5 杉木双系和三系种子园自交衰退的研究方法

1.5.1 杉木双系种子园材料测试 2000—2002 年, 抽取遂昌县杉木双系种子园中的 3 个小区材料进行了测试, 研究材料是双二区的 1 419 (建园材料选自正交组合 1 419×1 269); 双四区的龙 15 (建园材料选自正交组合龙 15×闽 33); 双七区的 1 366 和 1 339 (建园材料选自正交组合 1 366×1 339)。研究方法是对建园亲本进行人工控制杂交制种(以正交组合为主)、自交制种, 并对测试亲本采集双系和多系种子园中自由授粉的分系种子, 外加多个对照共 28 份种质, 在遂昌进行育苗试验(条状小区, 条播 230 粒), 年终和 18 个月时调查苗高、地径等性状, 在固定模型的方差分析^[24]基础上, 利用建园材料的正交组合、自交组合和其在多系种子园的自由授粉后代平均表现为参比对象, 评估双系种子园中的龙 15、1 339、1 366 和 1 419 的自由授粉后代的表型衰退效应的相对大小, 并提出解决办法。

1.5.2 杉木三系种子园材料测试 在 2019—2021 年进行, 抽取三系种子园的建园材料一致的九、十两个小区, 展开了三系杂交种子园(龙 15+1 339+1 366)自由授粉后代的衰退效应评价, 其研究方案和技术路线与第一个小试基本相同。

两个自交衰退的试验均在遂昌进行育苗试验, 由于苗圃地的地力环境条件比较一致, 因而除成苗数外, 育苗试验资料一律按单因素组内观察株数不等的模式^[24]进行方差分析, 然后以各品种的平均值为基础, 分析双系种子园中小量近交引起的衰退效应。

2 结果与分析

2.1 杉木双系种子园研究结果

2.1.1 不同种质间的差异性 6 个亲本无性系共 28 份种质材料在成苗数、1 年生苗的苗高、18 个月生苗的苗高和地径这 4 个性状的方差分析结果列于表 2。

表 2 杉木双系种子园不同种质不同性状的方差分析结果
Table 2 ANOVA on different growth traits of different germplasm

性状	成苗数			1 年生苗的苗高 H ₁		
	自由度	均方	F 值	自由度	均方	F 值
区组间	2	71.580 9	0.513 0	—	—	—
不同的种质间	27	658.659 5	4.720 4**	27	640.002 0	14.270 0***
机误	54	139.534 0		693	44.849 4	
总变异	83			720		

性状	18 个月生苗的苗高 H ₂			18 个月生苗的地径 D ₂		
	自由度	均方	F 值	自由度	均方	F 值
不同的种质间	27	1 698.819 8	9.982 7**	27	10.168 4	2.964 1**
机误	660	170.176 3		647	3.429 3	
总变异	687			674		

注：“**”和“***”分别表示达到 1%和 5%统计水平的差异。

由表 2 可见, 28 份种质材料在成苗数、1 年生苗苗高 H₁、18 个月生苗的苗高 H₂ 和地径 D₂ 这 4 个研究性状上都存在着显著的差异, 这说明选择不同组合的亲本无性系来建立双系种子园大有必要。现根据固定模型的方差分析结果, 来评价现有的双系种子园内无性系的近交衰退效应大小。

2.1.2 双系种子园亲本无性系自由授粉子代近交衰退效应的评价

2.1.2.1 双系中龙 15 自交效应的评价 双四区中龙 15 无性系后代自交衰退的分析结果见表 3。

表 3 双四区龙 15 的近交衰退效应
Table 3 Effect of inbreeding depression of Long 15 in biclonal orchard

性状	成苗数/株	H ₁ /cm	H ₂ /cm	D ₂ /mm
双系种子园龙 15 (OP ₁)	142	35.8	68.9	7.52
多系种子园龙 15 (OP ₂)	146	37.5	70.8	7.06
异交 O 龙 15×1 339	161	38.4	69.0	7.06
龙 15×1 366	63	25.0	53.9	7.06
平均值	112	31.7	61.45	6.99
自交 S 龙 15×龙 15	21	28	65.8	9.59
比值/% (OP ₁ - OP ₂) /OP ₂	- 2.74	- 4.50	- 2.70	6.50
(OP ₁ - O) /O	21.13	11.45	12.12	7.05
(OP ₁ - S) /S	576.19	27.86	4.71	- 21.58

注: 成苗数为条播 230 粒种子的成苗株数; OP₁、OP₂ 分别指的是双系种子园、多系种子园中亲本后代的平均表现; O、S 代表亲本人工控制杂交和人工控制自交后代的平均表现; 下同。

由表 3 可知, 从 (OP₁ - PO₂) /OP₂ 看, 杉木双系种子园龙 15 无性系苗的地径没有衰退, 龙 15 双系苗高等性状均表现出一定程度的衰退; 从 (OP₁ - O) /O 可以看出, 双系种子园龙 15 的后代表现要优于龙 15×1 366, 但不及龙 15×1 339; 而 (OP₁ - S) /S 表明, 双系种子园龙 15 苗的地径不及自交组合苗的地径, 这说明龙 15 可能是个杂合子, 自交衰退不明显。综合以上结果可以发现, 双系龙 15 存在一定的自交衰退, 并且这种衰退效应随着研究性状的变化而变化。采用龙 15 与 1 339 进行组配成双系种子园, 比龙 15 与闽 33 组配要优越。

2.1.2.2 双七区 1 339 近交衰退效应的评价 双七区 1 339 近交衰退效应的评价见表 4。

表 4 双七区 1 339 近交衰退效应的评价
Table 4 Effect of inbreeding depression of 1 339 in biclonal orchard

性状	成苗数/株	H ₁ /cm	H ₂ /cm	D ₂ /mm
双系种子园 1 339 (OP ₁)	118	31.6	57.8	6.54
多系种子园 1 339 (OP ₂)	68	30.0	56.9	7.14
异交 O 1 339×1 366	148	28.4	52.6	6.23
比值/% (OP ₁ - OP ₂) /OP ₂	73.53	5.33	1.58	- 8.40
(OP ₁ - O) /O	- 20.27	11.27	9.89	4.98

从表 4 可见, 双系种子园中 1 339 自由授粉的子代表现, 在成苗数上要优于多系种子园的后代表现, 在苗

高性状上超过多系种子园后代表现，但在地径性状上则表现出一定的自交衰退；杉木双系种子园亲本后代除成苗数外，其它性状表现都优于控制杂交（1 339×1 366）后代的表现，1 366 不是 1 339 的最佳父本，双系种子园 1 339 自由授粉后代的自交衰退随着研究性状变化而变化。

2.1.2.3 双七区 1 366 近交衰退效应的评价 双七区 1 366 近交衰退效应的评价结果见 5。

表 5 双七区 1366 近交衰退效应的评价
Table 5 Effect of inbreeding depression of 1 366 in biclonal orchard

性状	成苗数/株	H ₁ /cm	H ₂ /cm	D ₂ /mm
双系种子园 1 366 (OP ₁)	68	29.3	52.5	6.20
多系种子园 1 366 (OP ₂)	91	32	59.3	7.29
异交 O 1 366×1 339	48	28.2	51.0	6.80
1 366×龙 15	51	21.2	39.8	6.95
平均值	49.50	24.7	45.4	6.88
自交 S 1 366×1 366	40	23.3	46.9	6.72
比值/% (OP ₁ - OP ₂) /OP ₂	-25.27	-8.44	-10.96	-14.95
(OP ₁ - O) /O	37.37	18.62	15.64	-9.88
(OP ₁ - S) /S	70.00	25.75	11.94	-7.74

由表 5 可见，双七区的 1 366 后代表现都不及多系种子园的后代表现，双七区的 1 366 后代均存在自交衰退；与异交组合相比，双七区的 1 366 后代高生长占优势，但地径生长有衰退的迹象；除地径外，自交对 1 366 绝对有害。综合这两方面的研究结果可发现：双七区的 1 336 后代的自交衰退与研究性状有关；其次是 1 366 存在比 1 339 更合适的父本。这一结果与花期观察结果相符^[8]，1 366+1 339 进行组配不是很合适。从多系 1 366 的后代表现看，1 366 存在更合适的父本。

2.1.2.4 双二区 1 419 近交衰退效应评价 双二区中 1 419 的近交衰退效应评价结果见表 6。

表 6 1419 的近交衰退效应评价结果
Table 6 Effect of inbreeding depression of 1 419 in biclonal orchard

性状	成苗数/株	H ₁ /cm	H ₂ /cm	D ₂ /mm
双系种子园 1 419 (OP ₁)	51	21.0	45.6	7.24
多系种子园 1 419 (OP ₂)	44	24.3	46.0	6.72
异交 O 1 419×1 339	88	32.6	57.7	7.29
自交 S 1 419×1 419	38	20	42.0	6.75
比值/% (OP ₁ - OP ₂) /OP ₂	15.9	-13.6	-0.9	7.7
(OP ₁ - O) /O	-42.0	-35.6	-21.0	-0.7
(OP ₁ - S) /S	34.2	5.0	8.6	7.3

由表 6 中，根据 (OP₁ - OP₂) /OP₂ 的计算结果可以看出，双系种子园中的 1 419 自由授粉后代的成苗数和地径性状要略优于多系种子园中的 1 419 后代的表现，而在苗高性状上与多系后代表现相比，则表明双二区的 1 419 有一定的自交衰退，杉木双系种子园亲本后代的自交衰退随着研究性状变化而变化。

从表 6 中还可以发现，在现有的双二区中，1 419 的自交后代表现出严重的自交衰退。这说明 1 419 无性系自交绝对有害，防止近交的措施十分必要。其次，1 419×1 339 控制杂交后代的表现要优于双二区中 1 419 的自由授粉后代的表现，今后再建有关 1 419 的双系种子园时应该考虑 1 419 与 1 339 进行组配。

2.2 杉木三系杂交种子园中亲本家系近交衰退的评价

杉木三系杂交种子园的研究材料和研究方案：由于在实施杉木三系杂交种子园自交比率的测试时，已经明了在杉木双系种子园试验中，除双四区的龙 15 外，其它的几个参试无性系（1 339、1 366 和 1 419）的杂交优势都不明显，表现出轻度的自交衰退，因此，于 2019—2021 年对三系杂交种子园中龙 15、1 339、1 366 这几个无性系展开自交衰退评估时，但没有进行自交研究，仅展开了三系间的三个反交组合的人工控制杂交制种，以三个杂交组合和多系种子园中这三系的自由授粉后代为参照物，评价三系杂交种子园的近交衰退究竟有多大。

2.2.1 三系杂交种子园研究性状的方差分析结果 来自三系种子园九和十小区中的 9 份种质材料，在成苗数、1

年生苗的苗高和地径、18 个月生苗的苗高和地径这 4 个性状的方差分析结果列于表 7。

表 7 杉木三系杂交种子园中不同种质不同性状的方差分析结果
Table 7 ANOVA on different growth traits of different germplasm in three-line seed orchard

性状	1 年生苗的地径 D/mm			1 年生苗的苗高 H/cm		
	自由度	均方	F 值	自由度	均方	F 值
种质间	8	0.043 0	2.073 4*	8	165.875 3	12.249 6***
机误	123	0.020 7		123	13.541 3	
总变异	131			131		

性状	18 个月生苗的地径 D ₃ /mm			18 个月生苗的苗高 H ₃ /cm		
	自由度	均方	F 值	自由度	均方	F 值
种质间	8	0.228 0	2.835 8**	8	1 180.000 0	6.665 7***
机误	136	0.080 4		136	177.025 2	
总变异	144			144		

注：*、**、***分别表示达到 5%、1%、5%统计水平上的差异。

由表 7 可见，参试的 3 个亲本无性系 9 份种质的苗期性状，在三系种子园和多系种子园中的自由授粉后代及其杂交种间均存在显著的差异，18 个月生苗的地径差异比 1 年生苗的地径差异更大，而 18 个月生苗的苗高差异不及 1 年生苗的苗高差异大，但均达到 5%的统计水平。三系种子园的建园材料值得选择，这一结果与杉木三系杂交种子园的试验结果相同。

2.2.2 三系种子园中龙 15 自交衰退效应的评价 杉木三系种子园中龙 15 自交衰退效应的评价结果见表 8。

表 8 杉木三系种子园中龙 15 自交衰退效应的评价
Table 8 Effect of inbreeding depression of Long15 in three-line seed orchard

性状	成苗数/株	D/mm	H/cm	D ₃ /mm	H ₃ /cm
三系种子园龙 15 (OP ₃)	65	0.653	19.10	10.890	58.965
多系种子园龙 15 (OP ₂)	33	0.649	16.65	10.633	47.608 3
异交 O	1 366 × 1 399	45	0.604	14.41	58.55
	1 399 × 龙 15	60	0.663	16.68	41.512 5
	1 366 × 龙 15	82	0.695	22.00	59.80
平均值	62.3	0.654	17.70	10.81	53.287 5
比值/%	(OP ₃ - OP ₂)/OP ₂	96.97	0.62	14.71	23.85
	(OP ₃ - O)/O	4.33	0	7.91	10.65

注：OP₃表示杉木三系种子园中亲本家系自由授粉子代的平均表现。

由表 8 可见,三系种子园中龙 15 自由授粉后代的生长性状要优于多系种子园中龙 15 自由授粉后代的表现,也优于三个杂交组合的平均结果,但不及 1 366 × 龙 15 后代的表现。与双系种子园相比,三系种子园由于增加了建园亲本数,扩大了同一无性系不同分株间的对视距离,降低了自交比率,提高了后代的杂种优势。

2.2.3 三系种子园中 1 339 自交衰退效应的评价 三系种子园中 1 339 自交衰退效应的评价结果见表 9。

表 9 杉木三系种子园中 1 339 自交衰退效应的评价
Table 9 Effect of inbreeding depression of 1 339 in three-line seed orchard

性状	成苗数/株	D/mm	H/cm	D ₃ /mm	H ₃ /cm
三系种子园中 1 339 (OP ₃)	82	0.713	23.76	12.355	68.45
多系种子园中 1 339 (OP ₂)	38	0.683	20.29	12.16	57.20
异交 O	1 366 × 1 399	45	0.604	14.41	58.55
	1 399 × 龙 15	60	0.663	16.68	41.512 5
	1 366 × 龙 15	82	0.695	22.00	59.80
平均值	62.3	0.654	17.70	10.81	53.287 5
比值/%	(OP ₃ - OP ₂)/OP ₂	115.79	4.39	17.10	19.67
	(OP ₃ - O)/O	31.62	9.02	34.24	28.45

由表 9 可见,三系种子园中的 1 339 自由授粉后代的生长性状要优于多系种子园中 1 339 自由授粉后代的表现,也优于三个杂交组合的平均结果,但不及 1 366 × 龙 15 后代的表现。与双系种子园相比,三系种子园由于

增加了建园亲本数, 促进了花期匹配, 扩大了同一无性系间的对视距离, 降低了自交比率, 从而提高了杂种优势。这一结果与第一个小试中双四区中龙 15 的结果一致。

2.2.4 三系种子园中 1 366 自交衰退效应的评价 三系种子园中 1 366 自交衰退效应的评价结果见表 10。

表 10 杉木三系种子园中 1 366 自交衰退效应的评价
Table 10 Effect of inbreeding depression of 1 366 in three-line seed orchard

性状	成苗数/株	D/mm	H/cm	D ₃ /mm	H ₃ /cm
三系种子园中 1 366 (OP ₃)	72	0.803	24.00	12.450	67.331 2
多系种子园 1 366 (OP ₂)	50	0.719	19.10	11.774	61.115 8
异交 O					
1 366 × 1 399	45	0.604	14.41	11.55	58.55
1 399 × 龙 15	60	0.663	16.68	8.725	41.512 5
1 366 × 龙 15	82	0.695	22.00	12.15	59.80
平均值	62.3	0.654	17.70	10.81	53.287 5
比值/%					
(OP ₃ - OP ₂)/OP ₂	44.00	11.68	25.65	5.874	10.17
(OP ₃ - O)/O	15.57	22.78	35.59	15.17	26.35

由表 10 可见, 三系种子园中的 1 366 自由授粉后代的生长性状要优于多系种子园中 1 366 自由授粉后代生长表现, 也优于三个杂交组合的平均结果。以上结果表明, 建立龙 15+1 366+1 339 三系种子园是可行的。

3 讨论

以上研究表明, 采用双系种子园来利用杉木杂交育种成果的理念应发展, 建立寡系(3~5 系)的杂交种子园来利用杉木杂交育种的成果更为合理。这与徐清乾等的做法稍有不同, 这是由于使用的建园材料和杂交组合的筛选方法不同造成的^[4-5]。许忠坤等提出了杉木育种策略, 应采用 GriffingⅢ 交配设计(包括正反交组合), 大力开展杂交育种, 筛选正反交均优的组合, 建立两个系的种子园来利用杉木杂交育种成果^[4-5], 并于 1983 年起, 从湖南省 457 个杂交组合中评选出 5 组双系种子园建园材料, 该双系种子园混合子代 14 年生时的单株材积大于生产对照 58.4%, 双系种子园增产效益十分明显。1982 年, 陈益泰等也是采用这一技术路线成功建立了双系种子园(龙 15+闽 33), 以此来利用杉木杂交育种成果^[6]。郑勇平等通过对杉木不同世代不同类型种子园遗传改良效果的研究发现, 由龙 15 与闽 33 组成的双系种子园, 其遗传增益最大^[25]。但是我们在筛选遂昌县杉木双系建园材料时, 没有像许忠坤等那样采用 GriffingⅢ 交配设计, 这除了杂交试验会花费大量的财力、地力和很长的时间外, 杂交亲本的雌花量限制也是其中的一个原因。另外, 遂昌县杉木双系种子园的异系雌雄花期匹配存在一定的问题(见表 1), 并导致一定的自交。只要双系种子园系内花期存在同步性, 即使双亲异系花期匹配, 也会因同一无性系同一分株内和不同分株间的雌雄花期重叠, 产生自交。另外, 双系杂交种子园, 同一无性系不同分株间的对视距离(杉木双系种子园建园密度为 4 m × 4 m 时, 同一无性系不同分株的对视距离为 5.7 ~ 8.0 m)太近而产生自交。而建立寡系(3~5 系)的杂交种子园有两个优势: 其一, 增加了建园亲本数, 改变了种子园的结构; 其二, 可将同一无性系不同分株间的对视距离扩大到 12 m 左右, 这对降低杂交种子园中的自交, 促进种子园中的亲本无性系花期匹配有好处。以上这些原因, 很可能使得杉木三系种子园后代保持了人工控制杂交的优点, 降低了三系种子园的自交率, 使三系种子园后代表现出一定的杂交优势。鉴于此, 笔者主张建立寡系(3~5 系)杂交种子园, 来利用杉木杂交育种的成果。

4 结论

4.1 杉木双系种子园研究结论

- (1) 就 28 份杉木种质材料的育苗试验, 比较分析苗期性状间差异, 结果表明, 在所有研究性状上均存在极显著的差异, 建立双系种子园时材料选择十分重要。
- (2) 对于龙 15 而言, 建立双系种子园比建立多系种子园具有更多的优越性。由于龙 15 × 1 339 人工控制

后代表现突出,因此该组配比龙 15 与闽 33 的组配更好。

(3) 对于双七区(1 339 + 1 366), 尽管 1 339 和 1 366 的花期基本是吻合的,但是同一无性系的雌雄花期也是匹配的,因此存在一定比率的自交,应采取一定的措施来降低自交比率。

(4) 1 419 的双系后代优于多系后代,但是 1 419 与 1 339 的组配比 1 419 与 1 269 的组配要科学,效果更好。

(5) 通常双系种子园存在一定的自交衰退,其衰退程度与无性系的基因型、成对无性系雌雄花期匹配的吻合程度有关;对于已建立的双系种子园应有效地防止自交,并进行必要的人工辅助授粉。

4.2 杉木三系杂交种子园研究结论

研究发现,与双系种子园相比,三系杂交种子园中的亲本自由授粉后代自交衰退不明显,且苗期表现要优于多系种子园后代的表现。杉木高世代育种,应以杂交育种为主,并以建立寡系(3~5 系)的杂交种子园来利用杉木杂交育种成果。

参考文献:

- [1] 齐明. 杉木育种中 GCA 与 SCA 的相对重要性[J]. 林业科学研究, 1996, 9(5): 498-503.
- [2] 齐明, 骆文坚, 何贵平. 林木重要性状的杂种优势和遗传方式以及杂优预测的可能性[J]. 世界林业研究, 2010, 23(2): 75-80.
- [3] 叶志宏, 施季森, 翁玉榛, 等. 杉木十一个亲本双列交配遗传分析[J]. 林业科学研究, 1991, 4(4): 380-385.
- [4] 徐清乾, 许忠坤, 程政红, 等. 杉木杂交组配与两系种子园建立技术研究[J]. 湖南林业科技, 2004, 31(6): 18-20.
- [5] 许忠坤, 徐清乾. 湖南杉木育种策略[J]. 湖南林业科技, 2002, 29(4): 45-47.
- [6] 郑勇平, 孙鸿友, 冯建民. 杉木优良无性系龙 15 与闽 33 双系种子园遗传改良效果分析[J]. 浙江林学院学报, 2009, 26(2): 201-208.
- [7] 齐明. 杉木双系种子园异交率的初步研究[J]. 林业科学研究, 2004, 17(专刊): 71-77.
- [8] 齐明. 杉木双系种子园无性系开花习性与异交率及其间的关系研究[J]. 湖北林业科技, 2006(4): 5-9.
- [9] TAJIMA M. Inbreeding depression in height, diameter, volume, and survival of sugi, *Cryptomeria japonica*, to 15 years of age[J]. J Jap For Soc, 1990, 72.
- [10] SORESENSEN F C, MILES R S. Self-pollination effects on Douglas-fir and Ponderosa pine seeds and seedlings[J]. Silv Genet, 1974, 23(5): 135-138.
- [11] KRIEBEL H B. Inbreeding depression in eastern White[C]. Proc of 9th Central States Forest Tree Improvement Conference, 1974, 48-138.
- [12] ELDRIDGE K G, GRIFFIN A R. Selfing effects in *Eucalyptus regnans*[J]. Silv Genet, 1983, 32(5/6): 123-131.
- [13] FOWLER Y S, PARK D P. Inbreeding in black spruce (*Picea mariana*): self-fertility, genetic load, and performance[J]. Can J For Res, 1983, 14: 17-21.
- [14] LUCY I, WRIGHT E, TOM TR, et al. Inbreeding, inbreeding depression and extinction[J]. Conserv Genet, 2008, 9: 833-843.
- [15] JERRY M. B and Carol C. B... Inbreeding depression and the cost of inbreeding on seed germination[J]. Seed Sci Res, 2015: 25, 355-385.
- [16] RYMER P D, SANDIFORD M, HARRIS S A, et al. Remnant *Pachiraquinata* pasture trees have greater opportunities to self and suffer reduced reproductive success due to inbreeding depression[J]. Heredity, 2015: 115, 115-124.
- [17] GINWAL H S. Inbreeding depression in *Eucalyptus tereticornis* Sm. due to cleistogamous flowering[J]. New Forests (2010) 40: 205-212.
- [18] NAKANISHI A, YOSHIMARU H, TOMARU N, et al. Inbreeding depression at the sapling stage and its genetic consequences in a population of the outcrossing dominant tree species, *Castanopsis sieboldii*[J]. Tree Genetics & Genomes, 2015, 11(3):1-10.
- [19] FORD G A, MCKEAND S E, JETT J B, et al. Effects of inbreeding on growth and quality traits in Loblolly Pine[J]. For Sci, 2015, 61(3): 579-585.
- [20] WANG T, AITKEN S N, WOODS J H, et al. Effects of inbreeding on coastal Douglas fir growth and yield in operational plantations: a model-based approach[J]. Tag.theoretical & Applied Genetics.theoretische Und Angewandte Genetik, 2004, 108(6): 1162-71.
- [21] S KUMAR. Effect of selfing on various economic traits in *Pinus radiata* and some implications for breeding strategy[J]. For Scie, 2004, 191(50): 571-578.
- [22] 赵奋成, 郭文冰, 林昌明, 等. 不同近交程度对湿地松结实与生长的影响[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2019, 43(1): 9-17.
- [23] 陈益泰, 何贵平, 李恭学. 杉木种子发芽率和苗高生长的近交效应[J]. 林业科学研究, 1989, 2(5): 420-426.
- [24] 齐明. 林木遗传育种中试验统计法新进展[M]. 北京: 中国林业出版社, 2009: 118-124.
- [25] 郑勇平, 孙鸿友, 董汝湘. 杉木不同世代不同类型种子园遗传改良增益研究[J]. 林业科学, 2007, 43(3): 20-27.