



陈兴彬, 黄金金, 孙世武, 等. 杉木 6×6 完全双列杂交种实性状的遗传效应分析[J]. 江西农业大学学报, 2026, 48(2): 466–476.

CHEN Xingbin, HUANG Jinjin, SUN Shiwu, et al. Genetic effects of cone and seed traits of *Cunninghamia lanceolata* in a 6×6 complete diallel cross design[J]. Acta agriculturae universitatis Jiangxiensis, 2026, 48(2): 466–476.

杉木 6×6 完全双列杂交种实性状的遗传效应分析

陈兴彬¹, 黄金金¹, 孙世武², 肖玉花², 冷春晖¹, 万振和², 肖复明^{1*}

(1. 江西省林业科学院 江西乡土树种良种选育与高效利用江西省重点实验室, 江西 南昌 3300322; 2. 吉安市青原区白云山林场, 江西 吉安 343000)

摘要:【目的】对陈山红心杉和普通杉木杂交子代的种实性状进行变异分析和遗传参数估算, 为杉木杂交育种亲本选配及多系种子园的营建提供理论参考。【方法】以江西省吉安市青原区白云山林场杉木国家良种基地陈山红心杉 1.5 代种子园的 4 个优良无性系和杉木种源种子园的 2 个优良无性系为亲本, 采用 6×6 完全双列交配设计进行控制授粉。对 36 个杂交组合的球果长、球果宽、球果体积、球果鲜重、千粒质量及发芽率进行测定和分析。【结果】球果性状主要受母本、父母本交互作用的影响, 千粒质量和发芽率受父本、母本及父母本交互作用的共同影响。36 个杂交组合间的球果长、球果宽、球果体积、球果鲜重、千粒质量及发芽率均存在极显著差异 ($P < 0.001$); 各性状的一般配合力 (GCA)、特殊配合力 (SCA) 和反交效应差异 (REC) 也存在极显著差异 ($P < 0.001$)。球果宽、球果体积和球果鲜重以加性基因效应控制为主, 非加性基因效应控制为辅; 球果长、千粒质量和发芽率则以非加性基因效应控制为主, 加性基因效应控制为辅。普通杉木球果性状的 GCA 大于陈山红心杉球果性状的 GCA, 而陈山红心杉发芽率的 GCA 普遍大于普通杉木发芽率的 GCA。根据发芽率的 GCA, 选出陈山红心杉 H43 和 H16 无性系为优良无性系; 基于种实性状的 GCA、SCA 和 REC 效应值, 确定组合 H43×R4、H43×H21 和 H21×H48 为优良杂交组合。【结论】杉木完全双列不同交配组合的种实性状存在显著差异, 自交对杉木球果性状影响不显著, 但会导致杉木发芽率严重衰退。杉木种实性状不同, 其 GCA 存在较大差异。在杉木育种亲本选配中, 为提高子代的发芽率, 要充分考虑种子发芽率表现突出的杂交组合。

关键词: 杉木; 完全双列杂交; 一般配合力; 特殊配合力

中图分类号: S791.27 文献标志码: A

文章编号: 1000-2286(2026)02-0466-11

CSTR: 32399.14.auj.2026039

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Genetic effects of cone and seed traits of *Cunninghamia lanceolata* in a 6×6 complete diallel cross design

CHEN Xingbin¹, HUANG Jinjin¹, SUN Shiwu², XIAO Yuhua²,
LENG Chunhui¹, WAN Zhenhe², XIAO Fuming^{1*}

收稿日期: 2025-08-26 修回日期: 2026-02-24 接受日期: 2026-03-07

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFD2200201-04)、江西省重点研发计划项目(20223BBF61005)和江西省林业科技创新项目(2021111)

Project supported by the National Key R&D Program of China (2022YFD2200201-04), Key R&D Program of Jiangxi (20223BBF61005) and Forestry Science and Technology Innovation Project of Jiangxi (2021111)

作者简介: 陈兴彬, 副研究员, 博士, orcid.org/0000-0001-6556-9802, xingbinsd@163.com; *通信作者: 肖复明, 研究员, 博士, 主要从事林木遗传育种与森林培育研究, orcid.org/0000-0003-2996-4981, jxxiaofuming@163.com。

©《江西农业大学学报》编辑部, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议

(1.Jiangxi Provincial Key Laboratory of Improved Variety Breeding and Efficient Utilization of Native Tree Species, Jiangxi Academy of Forestry, Nanchang 330013, China; 2.Baiyun Mountain Forest Farm of Qingyuan District, Ji'an, Jiangxi 343000, China)

Abstract: [Objective] To analyze the variation patterns and genetic parameters of seed and cone traits in the hybrid progeny of Chenshan red-heart Chinese Cunninghamia and Chinese Cunninghamia, providing a theoretical reference for parental selection in its hybrid breeding and the establishment of multi-clone seed orchards. [Method] With four superior clones from the 1.5-generation seed orchard of Chenshan red-heart Chinese fir and two superior clones from Chinese fir provenance seed orchard at the national base in Baiyunshan Forest Farm, Qingyuan District, Ji'an City, Jiangxi Province as parents, controlled pollination was conducted according to a 6×6 complete diallel cross design. Measurements and analyses were conducted on four cone traits (cone length, cone width, cone volume, fresh cone weight) and two seed quality traits (thousand-seed weight, germination rate) for the 36 hybrid combinations. [Result] Cone traits of Chinese fir are primarily influenced by the maternal parent and the interaction between the paternal and maternal parents, while thousand-seed weight and germination rate are jointly affected by the paternal parent, maternal parent, and their interaction. The results showed that extremely significant differences ($P<0.001$) existed among the 36 hybrid combinations for cone length, cone width, cone volume, fresh cone weight, thousand-seed weight, and germination rate. Extremely significant differences ($P<0.001$) were also observed in the general combining ability (GCA), specific combining ability (SCA), and reciprocal effect (REC) for each trait. Cone traits in the hybrid combinations were predominantly controlled by additive gene effects, supplemented by non-additive gene effects. In contrast, two seed quality traits were primarily governed by non-additive gene effects, with additive gene effects playing a supplementary role. The GCA for cone traits was higher in Chinese Cunninghamia than in Chenshan Red-heart Chinese Cunninghamia, while the GCA for germination rate was generally greater in Chenshan Red-heart Chinese Cunninghamia compared to Chinese Cunninghamia. Based on the general combining ability for germination rate, clones H43 and H16 of Chenshan Red-hearted Chinese Cunninghamia were selected as superior clones. Based on the GCA, SCA, and REC effect values for seed and cone traits in the hybrid progeny, combinations H43×R4, H43×H21, and H21×H48 were identified as superior hybrid combinations. [Conclusion] Significant differences were observed in the seed and cone traits among different cross combinations of Chinese Cunninghamia in the complete diallel mating design. While self-pollination does not significantly affect the cone traits of Chinese Cunninghamia, it leads to a severe decline in germination rate. There are considerable differences in the GCA of different seed and cone traits in Chinese Cunninghamia. In the selection of breeding parents for Chinese Cunninghamia, it is essential to prioritize hybrid combinations that demonstrate outstanding seed germination rates to improve the germination rate of the offspring.

Keywords: *Cunninghamia lanceolata*; complete diallel cross; GCA; SCA

【研究意义】杉木 (*Cunninghamia lanceolata*) 主产于我国长江以南地区, 其生长快、材性好, 是我国主要的建筑用材造林树种^[1]。杉木种源间存在显著遗传差异, “陈山红心杉”主产于江西省安福县陈山林区, 是江西省特有的优良杉木种源, 其树干圆直、材质优良、生长迅速, 是建筑、家具、装潢的上乘环保用材^[2]。广西融水杉木种源是公选的全中国优良种源, 其速生性强、种植面积大^[3]。种实性状是果实和种子的表型特征, 种子千粒质量能反映繁育能力, 发芽率则是种子活力的重要指标, 种实性状对种子产量、种子品质和苗木生长均有重要影响^[4]。【前人研究进展】林木传统选择育种多采用轮回选择方法, 精确估算育种值、遗传力等遗传参数是制订遗传改良方案和提高遗传增益的基础^[5]。估算亲本的一般配合力 (GCA) 和特殊配合力 (SCA) 是亲本评价和杂交组合选配的重要依据^[6]。在杉木生长性状配合力研究方面, 有学者认为杉木生长性状由基因加性效应和非加性效应共同控制^[7-10], 也有学者认为杉木生

长性状以加性效应控制为主^[11-14],这种差异是因为研究材料、交配设计和数据处理方法等均会影响性状基因作用方式^[6]。在杉木种实性状配合力研究方面,杨萍等^[15]研究发现,全双列、不连续半双列和测交系种子品质性状的GCA、SCA、反交效应(REC)均差异显著;张锡等^[16]研究表明,不完全双列交配种实性状的遗传效应主要以基因加性效应为主,母本主要影响球果性状、出种指标和千粒质量,而父本对发芽率的影响更大。

【本研究切入点】双列交配设计是一种有效的遗传参数估算方法,可以同时估算GCA、SCA和REC等,这些参数可用于选择杂种优势强的交配组合,还可以确定亲本正反交效应是否均等,因而在作物和林木遗传育种中得到广泛应用^[17-19]。通常杂种优势与亲本间的遗传距离密切相关,与组合的杂合性程度成正比^[20]。前人主要对杉木生长性状开展了配合力研究,但对杉木球果和种子性状的配合力研究仍较少。【拟解决的关键问题】本研究以江西省吉安市青原区白云山林场杉木国家良种基地陈山红心杉1.5代种子园的4个优良无性系和杉木种源种子园的2个优良无性系为亲本,按6×6完全双列交配设计进行控制授粉,分析36个杂交组合的球果性状和种子质量性状的变异及遗传参数,为杉木杂交育种亲本选配及多系种子园的营建提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

2023年春在江西省吉安市青原区白云山林场进行人工杂交授粉,2024年春在江西省林业科学院实验室进行播种萌发试验。杂交亲本材料共6份,4份选自陈山红心杉1.5代种子园无性系(H16、H21、H43、H48),2份选自杉木种源种子园无性系(R4、R19),该杉木种源种子园由广西融水种源的优良无性系选育而成。按6×6完全双列交配设计进行控制授粉,包含15个正交组合、15个反交组合和6个自交组合,共计36个杂交组合。每个授粉组合不少于50个球果,在3d内连续授粉2次以保证球果授粉充分。

1.2 球果和种子性状的测定

2023年11月,每个杂交组合随机选取30个球果,称量每个球果的鲜重(fresh weight of cones,FWC),用游标卡尺测量球果长(length of cones,LOC)和球果宽(width of cones,WOC),并计算球果体积(volume of cones,VOC)。将各组合球果单独装网袋进行阴干出种,从每个杂交组合中随机抽取900粒种子,分成3份,每份300粒,分别称重后推算千粒质量(1000 grain weight,GW)。同时,从每个组合中随机选取300粒种子,分成3份,每份100粒种子,进行发芽试验。将种子均匀平放在铺有双层滤纸的培养皿中,放在光照培养箱中26℃培养,每日添加纯净水保持培养皿湿润,统计发芽数并计算发芽率(germination rate,GR),当连续5d均无发芽时,停止计数^[21]。球果体积计算公式如下^[15]:

$$V = 1/3\pi(b/2)^2a/1\,000 \quad (1)$$

式(1)中:V为球果体积,cm³;a为球果长,mm;b为球果宽,mm。

1.3 数据分析

使用Excel 2010软件对数据进行整理,使用SPSS 16.0软件进行方差分析。配合力、反交效应、遗传力等采用DPS数据处理系统进行分析^[22]。

2 结果与分析

2.1 种实性状差异显著性分析

对各种实性状进行母本和父本双因素方差分析(表1)可知,母本对球果长、球果宽、球果体积、球果鲜重、发芽率和千粒质量均有极显著影响($P<0.01$)。父本对发芽率和千粒质量有极显著影响($P<0.01$),对球果宽有显著影响($P<0.05$)。父母本交互作用对球果长、球果宽、球果体积、球果鲜重、发芽率和千粒质量均有极显著影响($P<0.01$)。这表明,球果性状主要受母本和父母本交互作用的影响,千粒质量和发芽率受父本、母本及父母本交互作用的共同影响。

表 1 各性状父本与母本交互作用方差分析
Tab.1 Analysis of variance of paternal and maternal interaction about different cone and seed traits

性状 Traits	母本 Female		父本 Male		母×父 Female×Male	
	均方 MS	F 值	均方 MS	F 值	均方 MS	F 值
	Mean square	F value	Mean square	F value	Mean square	F value
球果长/mm LOC	288.35	15.43**	24.31	1.30	72.39	3.87**
球果宽/mm WOC	403.683	61.75**	19.84	3.03*	36.11	5.52**
球果体积/cm ³ VOC	241.014	51.55**	6.70	1.43	22.09	4.72**
球果鲜重/g FWC	449.989	65.34**	18.73	2.72	27.59*	4.00**
千粒质量/g GW	14.58	10.71**	8.14	5.98**	4.16	3.06**
发芽率/% GR	896.08	8.23**	1 213.83	11.16**	927.56	8.52**

*代表差异显著($P<0.05$);**代表差异极显著($P<0.01$)。
* indicates significant difference at $P<0.05$ level; ** indicates high significant difference at $P<0.01$ level.

对不同杂交组合间种实性状的方差分析(表 2)可知,球果长、球果宽、球果体积、球果鲜重、千粒质量和发芽率在不同组合间的差异均达到极显著水平($P<0.01$)。因此,可以对杂交组合进行有效选择。

表 2 种实性状方差分析
Tab.2 Variance analysis of the different cone and seed traits

性状 Traits	自由度 df	F 值 F value	P
球果长 LOC	35	7.355 8**	<0.001
球果宽 WOC	35	18.634 6**	<0.001
球果体积 VOC	35	15.541 7**	<0.001
球果鲜重 FWC	35	21.545 9**	<0.001
千粒质量 GW	35	4.661 6**	<0.001
发芽率 GR	35	8.728 7**	<0.001

**代表差异极显著($P<0.001$)。
** indicates high significant difference at $P<0.001$ level.

分别对杂交组合的球果体积、球果鲜重、千粒质量和发芽率进行多重比较(表 3),结果表明,球果体积表现最优的组合为 R19×R19 和 R19×R4,其平均值分别为 14.11 cm³和 13.63 cm³,分别是最差组合 H43×R19 的 2.95 和 2.85 倍。球果鲜重表现最优的组合为 R19×R19 和 R19×R4,平均值分别为 19.63 g 和 16.00 g,分别是最差组合 H16×H16 的 4.62 和 3.76 倍。自交组合 R19×R19 的球果体积和球果鲜重均最大。千粒质量表现最优的组合是 R4×H21 和 R4×H16,平均值分别为 11.74 g 和 11.22 g,分别是最差组合 H16×R4 的 1.96 和 1.88 倍。发芽率最优组合是 R4×H16 和 H43×R4,平均值分别为 62.33% 和 60.0%。6 个自交组合的发芽率处于中低水平,其中 R19×R19 发芽率为 0,R4×R4 和 H48×H48 的发芽率排名较低。

2.2 种实性状的一般配合力、特殊配合力和反交效应分析

各种实性状的配合力方差分析结果(表 4)显示,球果长、球果宽、球果体积、球果鲜重、千粒质量和发芽率的一般配合力(GCA)、特殊配合力(SCA)和反交效应(REC)的差异均达到极显著水平($P<0.01$)。

亲本各性状的 GCA 效应值的多重比较(表 5)表明,不同亲本各性状的 GCA 表现存在差异。R19 和 R4 的球果长、球果宽、球果体积的 GCA 均为正值,其他 4 个亲本这 3 个性状的 GCA 为负值。R19 的球果鲜重 GCA 为正值,与其余 5 个亲本的差异达到显著水平($P<0.05$)。R4、H21、H16 的千粒质量 GCA 为正值,且 H21、H16 与 H43、H48 千粒质量的 GCA 差异不显著。H43、H16、R4 和 H21 的发芽率 GCA 为正值,R19 和 H48 的发芽率 GCA 最低。由于千粒质量和发芽率是种子质量的重要性状,因此确定 H43 和 H16 为优良亲本。

表3 球果体积、球果鲜重、千粒质量和发芽率的多重比较分析
Tab.3 The multiple comparison analysis of volume of cones, fresh weight of fruit, thousand kernel weight of seed and germination rate

组合 Groups	球果体积 VOC	球果鲜重 FWC	千粒质量 GW	发芽率 GR	组合 Groups	球果体积 VOC	球果鲜重 FWC	千粒质量 GW	发芽率 GR
H16×H16	6.71efghi	4.25h	7.45cde	14.00efghi	R4×H16	9.77cde	6.11efgh	11.22ab	62.33a
H16×R19	5.81fghi	7.55cdefgh	7.45cde	29.33cdefghi	R4×R19	9.06cdef	6.21defgh	9.59abcde	37.00abcdef
H16×H21	5.81fghi	7.74cdefgh	8.77abcde	46.66abcd	R4×H21	11.25bc	7.64cdefgh	11.74a	24.00defghi
H16×R4	7.42defghi	7.38cdefgh	5.98e	11.66efghi	R4×R4	8.25defgh	7.01defgh	8.81abcde	1.66hi
H16×H43	7.69defghi	9.76cdf	8.40abcde	37.00abcdef	R4×H43	9.08cdef	8.10cdefgh	8.92abcde	57.33abc
H16×H48	7.59defghi	8.11cdefgh	7.13cde	5.33ghi	R4×H48	9.56cde	8.10cdefgh	8.52abcde	19.33defghi
R19×H16	12.76ab	14.98b	7.68cde	31.66bcdefgh	H43×H16	6.00fghi	6.72defgh	9.28abcde	25.33defghi
R19×R19	14.11a	19.63a	8.00bcde	0i	H43×R19	4.78i	5.20gh	8.25bcde	26.66defghi
R19×H21	10.31cd	13.95b	8.41abcde	14.33efghi	H43×H21	6.54efghi	6.11efgh	8.70abcde	45.33abcd
R19×R4	13.63a	16.00b	6.49e	28.33cdefghi	H43×R4	5.02hi	6.59defgh	10.27abcd	60.00ab
R19×H43	9.71cde	11.07c	6.17e	18.33defghi	H43×H43	5.69ghi	5.95efgh	7.45cde	14.00efghi
R19×H48	8.91cdefg	10.11cd	6.58e	11.00efghi	H43×H48	7.39defghi	4.69h	6.16e	33.33bcdefg
H21×H16	6.85efghi	7.65cdefgh	10.69abc	30.66cdefghi	H48×H16	6.58efghi	7.62cdefgh	8.23bcde	48.33abcd
H21×R19	5.88fghi	5.74fgh	7.36cde	33.66bcdefg	H48×R19	6.51efghi	8.74cdefg	9.56abcde	40.33abcde
H21×H21	8.13defgh	6.31defgh	7.07cde	7.33fghi	H48×H21	8.69cdefg	9.59cdef	7.86bcde	11.33efghi
H21×R4	6.05fghi	7.66cdefgh	7.00de	18.00defghi	H48×R4	7.98defghi	6.81defgh	6.93de	12.66efghi
H21×H43	9.6cde	7.71cdefgh	6.08e	44.33abcd	H48×H43	5.27hi	8.22cdefgh	8.70abcde	9.66efghi
H21×H48	6.60efghi	5.31gh	9.46abcde	47.66abcd	H48×H48	8.59cdefg	7.59cdefgh	7.49cde	3.33ghi

a~i 代表差异显著 ($P<0.05$)。
a~i was significant difference at $P<0.05$ level.

表4 配合力及反交效应方差分析
Tab.4 Variance analysis of combining ability and reciprocal effect

性状 Traits	一般配合力 GCA	特殊配合力 SCA	反交效应 REC
球果长 LOC	17.421 2**	7.906 7**	6.948 9**
球果宽 WOC	18.921 1**	2.835**	24.434 2**
球果体积 VOC	10.560 2**	2.124 9**	19.693 1**
球果鲜重 FWC	33.504 3**	3.991**	19.497 9**
千粒质量 GW	1.451 1**	1.030 8**	7.474 8**
发芽率 GR	0.053 5**	0.037 6**	7.298**

**代表差异极显著 ($P<0.01$)。
** was high significant difference at $P<0.01$ level.

特殊配合力 (SCA) 可以用于评估杂交组合优于双亲所有组合的表现。根据球果体积的 SCA 值大小 (表 6), 优良杂交组合为 H21×H43 (H43×H21)、R19×R4 (R4×R19)、H16×H43 (H43×H16)、R4×H48 (H48×R4)。根据球果鲜重的 SCA 值大小, 优良杂交组合为 H16×H43 (H43×H16)、H16×H48 (H48×H16)、H16×H21 (H21×H16) 和 H21×H43 (H43×H21)。基于千粒质量的 SCA 值大小, 优良杂交组合为 H16×H21 (H21×H16)、R4×H43 (H43×R4)、H16×H43 (H43×H16) 和 H21×H48 (H48×H21)。基于发芽率的 SCA 值大小, 优良杂交组合为 R4×H43 (H43×R4)、H21×H43 (H43×H21)、R19×H48 (H48×R19)、H21×H48 (H48×H21)。

表 5 亲本的一般配合力差异显著性分析
Tab.5 Comparison of the differences in general combining ability of parents

性状 Traits	亲本 Parents	一般配合力 GCA	0.05 显著水平 0.05 level
球果长 LOC	R19	1.756 4	a
	R4	1.168 6	a
	H48	-0.315 2	b
	H21	-0.522 5	bc
	H16	-0.684 8	bc
	H43	-1.402 5	c
球果宽 WOC	R19	2.004 4	a
	R4	1.047 7	b
	H21	-0.367 3	c
	H4	-0.539 8	cd
	H48	-0.928 1	de
	H43	-1.216 9	e
球果体积 VOC	R19	1.516 1	a
	R4	0.668 7	b
	H21	-0.162 5	c
	H48	-0.424 1	c
	H16	-0.506 9	c
	H43	-1.091 4	d
球果鲜重 FWC	R19	3.359 0	a
	R4	-0.390 5	b
	H21	-0.567 3	b
	H16	-0.581 5	b
	H48	-0.586 6	b
	H43	-1.233 2	c
千粒质量 GW	R4	0.527 8	a
	H21	0.188 2	ab
	H16	0.148 2	abc
	H43	-0.176 7	bc
	H48	-0.320 6	bc
	R19	-0.366 9	c
发芽率 GR	H43	0.057 6	a
	H16	0.031 7	a
	R4	0.014 4	a
	H21	0.008 4	a
	R19	-0.046 5	b
	H48	-0.065 6	b

a~e 代表差异显著 ($P<0.05$)。
a~e was significant difference at $P<0.05$ level.

反交效应 (REC) 是选择正交组合和反交组合的重要参考, 其效应值有正有负。若杂交组合的反交效应为正, 说明亲本正交会提高后代表现, 应选择正交组合; 若杂交组合的反交效应为负, 说明亲本正交会降低后代表现, 应选择反交组合^[23]。各组合的特殊配合力及反交效应见表 6, 根据球果体积的

REC,确认优良杂交组合为H21×H43、R19×R4、H16×H43和R4×H48。根据球果鲜重的REC,确认优良杂交组合为H16×H43、H16×H48、H16×H21、H21×H43。根据千粒质量的REC,确认优良杂交组合为H21×H16、H43×R4、H43×H16和H21×H48。根据发芽率的REC,确认优良杂交组合为H43×R4、H43×H21、H48×R19和H21×H48。

表 6 各组合的特殊配合力及反交效应
Tab.6 Values of SCA and REC for different combinations

序号 No.	组合 Groups	球果体积VOC		球果鲜重FWC		千粒质量GW		发芽率GR	
		特殊配合力	反交效应	特殊配合力	反交效应	特殊配合力	反交效应	特殊配合力	反交效应
		SCA	REC	SCA	REC	SCA	REC	SCA	REC
1	H16×R19	0.244 3	-3.521 9	0.055 3	-3.397 3	-0.378 2	-0.116 1	0.049 0	-0.012 0
2	R19×H16								
3	H16×H21	-1.036 7	-0.528 9	0.469 6	0.130 6	1.234 6	-0.960 5	0.083 7	0.086 7
4	H21×H16								
5	R19×H21	-0.910 6	2.604 5	-0.685 2	4.650 4	-0.100 6	0.523 3	0.010 8	-0.104 3
6	H21×R19								
7	H16×R4	0.478 7	-1.087 8	-0.376 6	0.744 1	-0.239 7	-2.619 5	0.073 9	-0.277 6
8	R4×H16								
9	R19×R4	0.810 5	2.277 5	-0.184 7	4.765 1	-0.281 7	-1.551 3	0.083 0	-0.039
10	R4×R19								
11	H21×R4	-0.013 1	-2.625 2	0.411 0	0.025 7	0.493 3	-2.369 9	-0.085 4	-0.028 8
12	R4×H21								
13	H16×H43	0.581 1	0.666 7	1.987 3	1.193 8	0.703 5	-0.439	-0.045 5	0.063 6
14	H43×H16								
15	R19×H43	-1.239 4	2.445 1	-1.846 2	2.427 4	-0.408 2	-1.035 2	-0.059 4	-0.042 1
16	H43×R19								
17	H21×H43	1.444 4	1.689 7	0.465 0	0.899 7	-0.784 5	-1.313 6	0.124 0	-0.004 4
18	H43×H21								
19	R4×H43	-0.632 8	2.091 6	0.344 3	1.056 4	1.083 2	-0.674 3	0.280 7	-0.017 5
20	H43×R4								
21	H16×H48	-0.050 3	0.417 1	0.800 6	0.118 3	-0.309 5	-0.554 4	0.038 1	-0.226 9
22	H48×H16								
23	R19×H48	-1.714 2	0.813 6	-1.989 4	0.287 5	0.595 5	-1.488 7	0.099 8	-0.153 3
24	H48×R19								
25	H21×H48	0.025 6	-1.248 0	0.186 5	-1.861 0	0.628 1	0.802 0	0.086 5	0.191 5
26	H48×H21								
27	R4×H48	0.508 0	0.814 4	0.259 9	0.730 7	-0.645 9	0.795 7	-0.063 8	0.033 8
28	H48×R4								
29	H43×H48	-0.003 6	0.935 5	0.259 6	-1.499 0	-0.237 0	-1.271 1	-0.049 1	0.121 0
30	H48×H43								

组合H21×H43和H16×H43在球果体积和球果鲜重上的SCA较高,但前者千粒质量的SCA为负值,后者发芽率的SCA为负值,这2个组合表现不良被淘汰。组合R19×R4和H16×H48千粒质量的SCA为负值,而组合R4×H48千粒质量和发芽率的SCA均为负值,因此这3个组合也被淘汰。综上,最终确定最佳杂交组合为H43×R4、H43×H21和H21×H48。

2.3 种实性状的遗传参数分析

由种实性状的方差组分和遗传力(表 7)可知,球果宽、球果体积和球果鲜重的加性方差分别是非加性方差的 1.97、1.37 和 2.43 倍,说明这 3 个性状以加性基因效应控制为主,非加性基因效应控制为辅。球果长、千粒质量和发芽率则相反,非加性方差分别是加性方差的 2.35、4.65 和 6.93 倍,说明这 3 个性状以非加性基因效应控制为主,加性基因效应控制为辅。6 个性状的广义遗传力均大于狭义遗传力。

表 7 种实性状的主要遗传参数分析

Tab.7 Analysis of genetic parameters of six cone and seed traits

性状 Trait	加性方差 Additive variance	非加性方差 Non-additive variance	表型方差 Phenotypic variance	广义遗传力/% Broad-sense heritability	狭义遗传力/% Narrow-sense heritability
球果长 LOC	1.621 0	3.811 4	25.571 1	21.24	6.34
球果宽 WOC	2.693 7	1.367 4	11.260 8	36.06	23.92
球果体积 VOC	1.415 5	1.036 0	7.561 3	32.42	18.72
球果鲜重 FWC	4.937 7	2.031 3	14.357 5	48.54	34.39
千粒质量 GW	0.073 2	0.340 1	1.748 7	23.63	4.19
发芽率 GR	0.002 8	0.019 4	0.034 9	63.63	8.09

3 讨 论

3.1 自交和亲本对杉木种实性状的影响

本研究中,杉木不同交配组合的种实性状存在显著差异,表明通过合理的亲本选择可以获得较大的遗传增益。杉木自交授粉的球果性状与异交授粉无明显差异,甚至优于部分异交授粉组合,这与桤木(*Alnus cremastogyne*)自交授粉种实性状的研究^[24]一致。由于本研究未区分健全种子和涩粒种子,自交对种子千粒质量的影响不明显,但大部分自交组合的发芽率处于较低水平,这与陈益泰等^[25]得出的“自交会引起杉木发芽率衰退”结论一致。因此,单从球果大小和球果重量不能判断亲本无性系种子的优劣,需要结合发芽率指标进行综合判断。此外,杉木主要球果性状受母本、父母本交互作用的影响,球果体积和球果鲜重的父本效应不显著,千粒质量和发芽率则受父本、母本及母父本交互作用的共同影响。文冠果(*Xanthoceras sorbifolium*)种实性状研究^[26]也发现,文冠果果型受母本影响较明显,这说明父本、母本对球果(或果实)性状和种子性状的遗传作用方式不同,有待进一步深入研究。

3.2 杉木杂交种实性状的配合力和反交效应

一般配合力由基因的加性效应决定,可以稳定遗传;特殊配合力由基因的非加性效应决定,仅在特定的杂交组合中表型出来,不能遗传^[27]。本研究中,各种实性状均具有显著的 GCA、SCA 和 REC 效应,四川桤木^[24]的种实性状和白桦(*Betula platyphylla*)^[23]的种子性状研究也发现显著的 GCA、SCA 和 REC 效应,说明这些性状的遗传由加性和非加性基因共同控制。不同性状的一般配合力存在较大的差异,6 个亲本在 6 个种实性状上的 GCA 大小排序存在明显不同,如果实鲜重 GCA 最高的为 R19,但该亲本的千粒质量和发芽率 GCA 均较低且为负值,这与马尾松(*Pinus massoniana*)^[28]、蓝桉(*Eucalyptus globulus*)^[29]等的研究结果一致。本研究中,H16 亲本的发芽率 GCA 较高,千粒质量的 GCA 也为正值,表明其与其他亲本生产的种子品质均优良,因此可确定为优良亲本。普通杉木球果性状的 GCA 大于陈山红心杉球果性状的 GCA,而陈山红心杉发芽率的 GCA 普遍大于普通杉木的 GCA,这可能与无性系来自不同种源有关,不同种源在进化过程中形成了存在差异但稳定的球果性状特征。杉木发芽率的 GCA 和 SCA 之间无明显的对应关系,如 H43、H16 发芽率 GCA 最高,但杂交组合的发芽率排名中等。因此,在杉木育种亲本选配中,为提高子代的发芽率,要充分考虑种实性状的特殊配合力。本试验中种实性状反交效应显著,杉木双系种子园也发现种子品质性状存在不同程度的反交效应^[7],说明在杉木育种实践中,不能忽略种实性状的反交效应。基于杂交子代种实性状的 GCA、SCA 和 REC 效应值,最终确定 H43×R4、H43×H21 和 H21×H48 为优良杂交组合。

3.3 杉木杂交种实性状的加性和非加性基因效应

遗传力是亲本性状的遗传给子代的能力,可用于预测选择的作用^[30]。本研究中,6个性状的广义遗传力均大于狭义遗传力,除发芽率的广义遗传力大于50%外,其余性状的遗传力均小于50%,说明这些性状受到较强的环境效应影响。GCA和SCA的相对重要性受测试材料、待测性状等因素的影响^[31],球果性状(球果宽、球果体积和球果鲜重)的加性方差明显大于非加性方差,说明这些性状以加性效应起主要作用,非加性效应作用相对较小。球果长、种子千粒质量和种子发芽率的非加性方差大于加性方差,说明种子千粒质量和种子发芽率的显性效应和上位效应较大。因此,在杉木育种中,要重视利用千粒质量和种子发芽率表现突出的杂交组合。

4 结 论

本研究基于完全双列交配设计,对杉木种实性状的遗传效应进行了分析,发现不同交配组合的种实性状存在显著差异。自交授粉的球果性状优于部分异交授粉组合,但大部分自交组合的发芽率处于较低水平,说明自交对杉木球果性状影响不显著,却会引起杉木发芽率的严重衰退。杉木球果性状主要受母本、父母本交互作用的影响,千粒质量和发芽率则受父本、母本及母父本交互作用的共同影响。各种实性状均具有显著的GCA、SCA和REC效应,一般配合力和特殊配合力之间无明显的对应关系。因此,在杉木育种亲本选配中,为提高子代的发芽率,需充分考虑种子发芽率表现突出的杂交组合。

致谢:江西省林业科学院青年科技人才培养项目(2023521101,2024521103)同时对本研究给予了资助,谨到处谢意!

参考文献 References:

- [1] 陈代喜,陈琴,蒙跃环,等.杉木大径材高效培育技术探讨[J].南方农业学报,2015,46(2):293-298.
CHEN D X, CHEN Q, MENG Y H, et al. High-efficient management technology of big-diameter timber of *Cunninghamia lanceolata* [J]. Journal of southern agriculture, 2015, 46(2): 293-298.
- [2] 曾志光,杨先锋,肖复明,等.陈山红心杉材性变异及其基因资源利用的研究[J].江西林业科技,2001(3):1-6.
ZENG Z G, YANG X F, XIAO F M, et al. Study on variability of timber characters and gene resources utilization for Chen-shan red-heart Chinese fir [J]. Jiangxi forestry science and technology, 2001(3): 1-6.
- [3] 全国杉木种源试验协作组.杉木造林区种源选择[J].林业科学研究,1988,1(1):1-13.
National Collaborative Research Group on Provenance Trial of Chinese fir. Provenance selection of *Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) hook for planting area in China [J]. Forest research, 1988, 1(1): 1-13.
- [4] 韩净,叶腾云,叶代全,等.不同结实量的杉木种子发芽率与种实性状相关性及通径分析[J].种子,2023,42(7):72-76.
HAN J, YE T Y, YE D Q, et al. Correlation and path analysis between seed germination rate and seed characters of *Cunninghamia lanceolata* with different seed yield [J]. Seed, 2023, 42(7): 72-76.
- [5] WHITE T, DAVIS J, GEZAN S, et al. Breeding for value in a changing world: past achievements and future prospects [J]. New forests, 2014, 45: 301-309.
- [6] 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.
QI M, LUO W J, HE G P. Heterosis genetic control mode of important traits and possibility about heterosis prediction in forest trees [J]. World forestry research, 2010, 23(2): 75-80.
- [7] 郑勇平,孙鸿有,冯建民,等.杉木优良无性系龙15与闽33双系种子园遗传改良效应分析[J].浙江林学院学报,2009,26(2):201-208.
ZHENG Y P, SUN H Y, FENG J M, et al. Genetic improvement on bi-clonal seed orchard of Chinese fir clone Long-15 and Min-33 [J]. Journal of Zhejiang forestry college, 2009, 26(2): 201-208.
- [8] 徐清乾,吴成田,许忠坤.杉木全双列子代遗传变异分析[J].湖南林业科技,2015,42(6):7-12.
XU Q Q, WU C T, XU Z K. Analysis of Chinese fir full diallel progeny genetic variation [J]. Hunan forestry science & technology, 2015, 42(6): 7-12.
- [9] 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.
XU Q Q, XU Z K, CHENG Z H, et al. Selection of material and establishment effects of the hybridization seed orchard of *Cunninghamia lanceolata* [J]. Hunan forestry science & technology, 2004, 31(6): 18-20.

- [10] 李寿茂. 杉木优良无性系双列交配优势及配合力研究[J]. 福建林学院学报, 1999, 19(4): 338-341.
LI S M. A study on heterosis and combining ability in 6 parents diallel mating system of Chinese fir[J]. Journal of Fujian college of forestry, 1999, 19(4): 338-341.
- [11] 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.
YE Z H, SHI J S, WENG Y Z, et al. Genetic analysis for eleven parent incomplete diallel of Chinese fir[J]. Forest research, 1991, 4(4): 380-385.
- [12] 张建章, 游昌顺, 吕锦松. 杉木半双列杂交后代生长性状的配合力分析[J]. 浙江农林大学学报, 1998, 15(2): 138-144.
ZHANG J Z, YOU C S, LYU J S. Combining ability analysis on growth traits of half-diallel cross progeny of Chinese fir[J]. Journal of Zhejiang forestry college, 1998, 15(2): 138-144.
- [13] 何贵平, 陈益泰, 张国武. 杉木主要生长、材质性状遗传分析及家系选择[J]. 林业科学研究, 2002, 15(5): 559-563.
HE G P, CHEN Y T, ZHANG G W. Genetic analysis and family selection for main traits of growth and wood quality of Chinese fir[J]. Forest research, 2002, 15(5): 559-563.
- [14] 牛慧敏, 张振, 邱勇斌, 等. 杉木高世代杂交子代生长与木材性状遗传分析[J]. 森林与环境学报, 2024, 44(2): 120-126.
NIU H M, ZHANG Z, QIU Y B, et al. Genetic analysis of growth and wood character of advanced generation hybrid offspring of Chinese fir[J]. Journal of forest and environment, 2024, 44(2): 120-126.
- [15] 杨萍, 石志玲, 陈晓阳. 杉木3种交配设计试验种子品质的遗传分析[J]. 华南农业大学学报, 2011, 32(4): 67-71.
YANG P, SHI Z L, CHEN X Y. Genetic analysis of seed quality of Chinese-fir in three controlled pollination tests[J]. Journal of south China agricultural university, 2011, 32(4): 67-71.
- [16] 张锡, 张小国, 吴华雪, 等. 德昌杉与杉木杂交的种实性状变异及遗传参数分析[J]. 森林与环境学报, 2025, 45(3): 290-297.
ZHANG X, ZHANG X G, WU H X, et al. Variations and genetic parameters of cone and seed traits of *Cunninghamia lanceolata* × *C. lanceolata*[J]. Journal of forest and environment, 2025, 45(3): 290-297.
- [17] WU H X, MATHESON A C. General and specific combining ability from partial diallels of radiata pine: implications for utility of SCA in breeding and deployment populations[J]. Theoretical and applied genetics, 2004, 108(8): 1503-1512.
- [18] MOTERLE L M, BRACCINI A D L A, SCAPIM C A, et al. Combining ability of popcorn lines for seed quality and agronomic traits[J]. Euphytica, 2012, 185(3): 337-347.
- [19] JANSSON G, LI B. Genetic gains of full-sib families from disconnected diallels in loblolly pine[J]. Silvae genetica, 2004, 53: 60-64.
- [20] ZHAO X Y, BIAN X Y, LIU M R, et al. Analysis of genetic effects on a complete diallel cross test of *Betula platyphylla*[J]. Euphytica, 2014, 200(2): 221-229.
- [21] 程琳, 戴俊, 贺锦锋, 等. 基于球果和种子杉木品质遗传多样性分析及综合评价[J]. 南方农业学报, 2021, 52(10): 2805-2813.
CHENG L, DAI J, HE J F, et al. Genetic diversity analysis and comprehensive evaluation of cone and seed quality of *Cunninghamia lanceolata*[J]. Journal of southern agriculture, 2021, 52(10): 2805-2813.
- [22] 唐启义, 冯明光. 实用统计分析及其DPS数据处理系统[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
TANG Q Y, FENG M G. DPS data processing system for practical statistics[M]. Beijing: Science Press, 2002.
- [23] 李开隆, 姜静, 姜莹, 等. 白桦5×5完全双列杂交种苗性状的遗传效应分析[J]. 北京林业大学学报, 2006, 28(4): 82-87.
LI K L, JIANG J, JIANG Y, et al. Analysis of the genetic effects of seed and seedling traits of *Betula platyphylla* in a 5×5 complete diallel cross design[J]. Journal of Beijing forestry university, 2006, 28(4): 82-87.
- [24] 郭洪英, 杨汉波, 陈炙, 等. 四川桤木7×7完全双列杂交种实、种苗性状的遗传效应分析[J]. 植物研究, 2018, 38(3): 357-366.
GUO H Y, YANG H B, CHEN Z, et al. Genetic effects of fruit, seed and seedling traits of *Alnus cremastogyne* Burk in a 7×7 complete diallel cross design[J]. Bulletin of botanical research, 2018, 38(3): 357-366.
- [25] 陈益泰, 何贵平. 杉木种子发芽率和苗木高生长的近交效应[J]. 林业科学研究, 1989, 2(5): 420-426.
CHEN Y T, HE G P. The effect of inbreeding on seed germination and seedling height growth of Chinese fir[J]. Forest research, 1989, 2(5): 420-426.

- [26] 黄炎子,宋美华,郭永恒,等.文冠果不同交配组合种实性状变异及综合评价[J].北京林业大学学报,2019,41(1):42-56.
HUANG Y Z, SONG M H, GUO Y H, et al. Variation and comprehensive evaluation of fruit and seed phenotypic traits of different mating combinations in *Xanthoceras sorbifolium* [J]. Journal of Beijing forestry university, 2019, 41(1): 42-56.
- [27] FUKATSU E, HIRAOKA Y, MATSUNAGA K, et al. 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] 刘青华,金国庆,储德裕,等.基于马尾松测交系子代的生长、干形和木材密度的配合力分析[J].南京林业大学学报(自然科学版),2011,35(2):8-14.
LIU Q H, JIN G Q, CHU D Y, et al. Genetic analysis on combining ability of growth, stem form and wood basic density of *Pinus massoniana* by testcross mating design [J]. Journal of Nanjing forestry university (natural science edition), 2011, 35(2): 8-14.
- [29] 李淡清,刘永平,曾德贤,等.蓝桉6×6全双列交配生长性状的遗传效应分析[J].遗传学报,2002,29(9):835-840.
LI D Q, LIU Y P, ZENG D X, et al. Analysis of genetic effects for growth traits of *Eucalyptus globulus* Labill. in a 6×6 diallel design [J]. Acta genetica Sinica, 2002, 29(9): 835-840.
- [30] 卢超,高明博,焦小钟,等.几个小麦亲本主要农艺性状的配合力评价及遗传力分析[J].麦类作物学报,2010,30(6):1023-1028.
LU C, GAO M B, JIAO X Z, et al. Combining ability and heritability analysis of main agronomic traits in wheat [J]. Journal of triticeae crops, 2010, 30(6): 1023-1028.
- [31] 林萍,姚小华,滕建华,等.油茶5×5全双列杂交子代幼林生长性状的配合力分析[J].中南林业科技大学学报,2016,36(5):26-32.
LIN P, YAO X H, TENG J H, et al. Analysis of genetic effects of growth traits of *Camellia oleifera* F1 descendants in complete diallel cross design III [J]. Journal of central south university of forestry & technology, 2016, 36(5): 26-32.

(责任编辑:熊淑琪)



第一作者简介:陈兴彬,副研究员,博士。主要从事杉木遗传改良和高效培育研究。主持完成科研项目4项。认定林木良种2个,授权发明专利2项。先后获江西省科技进步二等奖2项、江西林业科学技术一等奖1项。发表学术论文10多篇,其中SCI论文4篇。



通信作者简介:肖复明,江西省林业科学院二级研究员,现任江西省林业科学院农林生物技术应用研究所所长、江西乡土树种良种选育与高效利用江西省重点实验室主任,江西省林学会遗传育种专业委员会主任委员、中国林学会杉木专业委员会副主任委员。主要从事林木遗传育种与森林资源培育研究相关的工作,主持或参与完成国家、省(部)级项目40多项,发表论文50多篇,审(认)定林木良种12个,制订林业行业、江西省地方标准10余项。先后获江西省科技进步奖二等奖4项、三等奖2项,梁希林业科技奖一等奖1项、二等奖3项、三等奖2项等,并获江西省主要学术学科带头人、江西省生态文明建设先进个人、中国林业青年科技奖、全国林草系统先进工作者等称号。