江西农业大学学报 2024,46(2)
Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis
http://xuebao.jxau.edu.cn
https://doi.org/10.3724/aauj.2024034

王安妮,王开良,柴静瑜,等.油茶巢式交配子代油脂相关性状的遗传分析[J].江西农业大学学报,2024,46(2):379-388.
WANG A N,WANG K L,CHAI J Y,et al.Genetic analysis of oil-related traits in offspring of nested mating of *Camellia oleifera*[J].Acta agriculturae universitatis Jiangxiensis,2024,46(2):379-388.

油茶巢式交配子代油脂相关性状的遗传分析

王安妮[1,2,3],王开良[1,2],柴静瑜[1,2],钟慧奇[1,2],滕建华[4],
张 磊[3],俞文仙[5],林 萍[1,2*]

(1.中国林业科学研究院 亚热带林业研究所/林木遗传育种全国重点实验室,浙江 杭州 311400;2.浙江省林木育种技术研究重点实验室,浙江 杭州 311400;3.东北林业大学 林木遗传育种国家重点实验室,黑龙江 哈尔滨 150040;4.浙江省金华市婺城区东方红林场,浙江 金华 321025;5.浙江省杭州市富阳区农业农村局,浙江 杭州 311400)

摘要:【目的】探究油茶种内杂交和种间杂交的亲本选配机制,为油茶高含油率杂交育种选育提供指导。【方法】以油茶巢式交配设计的种内、种间杂交子代为材料,分别测定种仁含油率、木质素、纤维素和半纤维素含量,分析母本的一般配合力(GCA)、杂交组合的特殊配合力(SCA),解析重要性状的遗传效应。【结果】12个家系的种仁含油率为17.83%~53.55%,木质素含量为4.68%~18.12%,纤维素含量为3.66%~13.04%,半纤维素含量0.54%~12.20%。种仁含油率、木质素、纤维素和半纤维素含量的差异在组合间和母本内父本间达到了显著水平。含油率和木质素、半纤维素含量呈显著负相关关系,其相关系数为-0.489和-0.297。长林4号种仁含油率的GCA最高,达到1.57。各组合的SCA分析表明,含油率SCA为-6.38~4.28,其中含油率SCA高且其余3个性状SCA低的种内杂交组合有40×95和4×18。种间杂交组合含油率的SCA普遍较低,仅53×小2较高,为2.77。除木质素外,含油率、纤维素、半纤维素含量主要受显性效应控制,非加性方差大于加性方差,说明以这3个性状为目标的杂交育种中评估亲本的SCA比GCA更重要。4个性状的单株遗传力范围为10.84%~58.35%,家系遗传力为4.23%~.21.35%,均受到较强的环境效应影响。【结论】以配合力为参考指标,结合各组合的表型数据,选出可用于油茶高含油杂交种质创制的优良种内杂交组合40×95和4×18,种间杂交组合53×小2。

关键词:普通油茶;小果油茶;巢式交配设计;油脂性状;配合力;遗传力
中图分类号:S794.4 **文献标志码:**A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):
文章编号:1000-2286(2024)02-0379-10

Genetic analysis of oil-related traits in offspring of nested mating of *Camellia oleifera*

WANG Anni[1,2,3],WANG Kailiang[1,2],CHAI Jingyu[1,2],ZHONG Huiqi[1,2],
TENG Jianhua[4],ZHANG Lei[3],YU Wenxian[5],LIN Ping[1,2*]

收稿日期:2023-12-18 **修回日期:**2024-02-05
基金项目:"十四五"国家重点研发计划项目(2022YFD2200401)和浙江省林木新品种选育重大科技专项课题(2021C02070-2)
Project supported by the National Key Research and Development Program of China(2022YFD2200401)and Zhejiang Science and Technology Major Program on Agricultural New Variety Breeding(2021C02070-2)
作者简介:王安妮,硕士生,orcid.org/0009-0002-3143-9959,962179770@qq.com;*通信作者:林萍,副研究员,主要从事木本油料遗传育种研究,orcid.org/0000-0002-0376-7210,inping80@126.com。
©《江西农业大学学报》编辑部,开放获取CC BY-NC-ND协议

(1.State key Laboratory of Tree Genetics and Breeding, Institite of Subtropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Hangzhou 311400, China; 2.Key Laboratory of Tree Breeding of Zhejiang Province, Hangzhou 311400, China; 3.State key Laboratory of Tree Genetics and Breeding, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China; 4.Dongfanghong Forest Farm of Zhejiang Province, Jinhua, Zhejiang 321025, China; 5.Agricultural and Rural Bureau of Fuyang District in Hangzhou City, Hangzhou 311400, China)

Abstract: [**Objective**] This study aims to explore the mechanism of parental selection in intraspecific and interspecific hybrid crosses, thus providing guidance for hybrid breeding of oil-tea with high oil content. [**Method**] The offspring of intraspecific and interspecific hybrid were made by nested mating between *Camellia oleifera* and *C. meiocarpa*. The oil, lignin, cellulose and hemicellulose contents of seed kernel were measured. The genetic effects of the important traits, the general combining ability (GCA) of the female parent, the specific combining ability (SCA) of the parent combinations were evaluated. [**Result**] The results showed that the oil content of seed kernels of 12 families ranged between 17.83% and 53.55%, the lignin content between 4.68% and 18.12%, the cellulose content between 3.66% and 13.04% and hemicellulose content between 0.54% and 12.20%. The oil, lignin, cellulose and hemicellulose contents of kernel were significantly different between the families and male parents with same female parent. Oil contents were significantly and negatively correlated with lignin and hemicellulose conents, with the correlation coefficients of −0.489 and −0.297, respectively. The GCA of Changlin No.4 in oil content of seed kernel was 1.57, which was the highest in the all females. The SCA evaluation found that the intraspecific hybrid crosses, 40×95 and 4×18, showed the higher SCA in oil content and lower SCA in lignin, cellulose and hemicellulose contents. The interspecific hybrid combinations had a usual lower SCA for oil content, except 53×Xiao 2 with a higher SCA of 2.77. Oil, cellulose, and hemicellulose contents were mainly controlled by dominant genetic effects, and the non-additive variance was higher than the additive variance. It's suggested that the SCA of the parents for these three traits was more important than the GCA. The single plant heritability of four traits were ranged between 10.84% and 58.35%, and the family heritability were between 4.23% and 21.35%. The traits in this study were influenced by strong environmental effects. [**Conclusion**] Based on the results of combining ability evaluation and phenotypic analysis, the excellent intraspecific hybrid combinations 40×95 and 4×18, the interspecific hybrid combination 53×Xiao 2 are recommended using in the creation of high oil content hybrid germplasm for oil tea.

Keywords: *Camellia oleifera*; *C. meiocarpa*; nested mating design; oil-related traits; combining ability; heritability

【研究意义】油茶为山茶科(Theaceae)山茶属(*Camellia*)常绿乔灌木,是我国重要的木本食用油料作物,与油橄榄(*Olea europaea*)、油棕(*Elaeis guineensis*)、椰子(*Cocos nucifera*)并列为世界四大木本油料作物,在我国具有2 300多年的栽培历史[1-2]。我国是世界上油茶分布最广、品系最多的国家,油茶籽产量稳居世界第一位[3]。我国栽培的油茶物种主要包括普通油茶(*Camellia oleifera*)、小果油茶(*C. meiocarpa*)、攸县油茶(*C. yuhsienensis*)等20余个种,主推的油茶品种达160多个[4]。近些年来,在国家政策的推动下,油茶种质面积不断扩大,油茶产业的质量提升和产量增长成为亟待解决的问题[5],挖掘油茶新种质资源、选育优良新品种、丰富油茶选育和评价的综合指标,对于加快油茶产业高质量发展至关重要[6]。【前人研究进展】杂交育种是最有效的植物育种方法之一[7]。种间杂交能很大程度地丰富和扩展育种筛选的基因库,有力地促进优良异源基因的交流,融合出具有各种优良性状的新变异类型,创造出良种选育所需要的新种质[8-9]。但油茶杂交过程中的细胞遗传学规律研究缺乏,倍性复杂等特点,给油茶种间杂交育种工作带来了极大的困难[10]。目前,油茶杂交育种仍集中在种内具有互补性状的亲本杂交,有关种间杂交的相关研究较少[10]。普通油茶是油茶产业中栽培面积和年产量均居首位的物种,其果实大、籽数多,广泛分布于我国长江流域及其以南的亚热带低山丘陵地区;小果油茶栽培面积和产量仅次于普通油茶,果

小、籽数少,比普通油茶果皮薄、出籽率高,主要分布在中亚热带低山丘陵地区[11]。【本研究切入点】育种工作中常以普通油茶和小果油茶为亲本开展种间杂交,期望聚合果大、皮薄的优良性状,选育出高出籽率的新品种,以显著提高油茶产量。但普通油茶和小果油茶种间杂交,重要性状的亲本配合力、遗传力及杂种优势等重要遗传参数的评估开展较少。项目组在前期以普通油茶和小果油茶为亲本按照巢式交配设计创制了一批杂交组合。【拟解决的关键问题】本研究测定了这些杂交子代种仁含油率(oil content of kernel,OC)、木质素含量(lignin content of kernel,LC)、纤维素含量(cellulose content of kernel,CC)和半纤维素含量(hemicellulose content of kernel,HC),分析评估杂交亲本油脂相关性状的遗传参数,比较普通油茶种内杂交与普通油茶与小果油茶种间杂交的差异,为油茶种内、种间杂交育种的亲本选配提供参考依据。

1　材料与方法

1.1　试验材料

2010年11月在浙江省金华市婺城区东方红林场油茶种质资源收集库中选择普通油茶长林4号、10号、18号、23号、40号、53号、95号和小果油茶1号、2号、3号、4号、D1号为亲本,按照巢式交配设计控制授粉创制12个杂交组合(表1)。2011年10月采集种子于2012年春季播种育苗,2014年春季利用杂交子代2年生苗营建子代测定林。控制授粉、营造管理子代测定林等参照[12]。

表1　亲本巢式交配设计

Tab.1　Parental nest mating design

组合 Cross	母本 Female parent	父本 Male parent	组合 Cross	母本 Female parent	父本 Male parent
1	长林4号	长林18号	7	长林40号	长林10号
2	长林4号	长林23号	8	长林40号	长林95号
3	长林4号	小果4号	9	长林40号	小果D1号
4	长林10号	长林4号	10	长林53号	小果1号
5	长林10号	长林40号	11	长林53号	小果2号
6	长林10号	长林53号	12	长林53号	小果3号

1.2　试验地概况

子代测定林保存于浙江省金华市婺城区东方红林场,地理坐标为28°32′~29°41′N,119°14′~120°47′E;属亚热带季风气候,四季分明。年平均温度15.5~16.4 ℃,无霜期257 d,年降水量1 408 mm,相对湿度77%。热量丰富,雨水充沛,适宜油茶生长。

1.3　性状调查及测定

2021年秋季采集子代测定林果实。每杂交组合10株一小区,3次重复,共30个单株调查取样。每单株随机取30个果实,测定OC、LC、CC和HC等性状平均值作为单株性状数据。

种仁含油率测定采用姚小华等[13]和谢一青等[14]的方法。木质素含量测定方法如下:

(1)称取1.0 g油茶种仁样品于100 mL烧杯中,加入15 mL 72%的硫酸不断搅拌使其均匀混合,然后放入20 ℃水浴锅中水解3 h。

(2)加入适量超纯水,置于1 000 mL的锥形瓶中加热至沸并保持微沸4 h。

(3)待反应体系冷却后,锥形瓶中的反应液经G2坩埚过滤,坩埚和残渣于105 ℃烘箱中烘干至恒重(*W1*)。

(4)坩埚和残渣在560 ℃中灰化2 h至恒重(*W2*)。

$$酸不溶木质素的含量=\frac{W1-W2}{1}\times 100\% \quad ①$$

(5)G2坩埚过滤收集的水解液,采用紫外分光光度计测定在205 nm处的吸光度以计算酸溶木质素的含量具体方法参照GB 10337-89进行

木质素含量=酸溶木质素含量+酸不溶木质素含量　②

纤维素含量按以下方法测定：

（1）称取 300 mg 油茶种仁样品于 100 mL 水解瓶中，加入 3 mL 72% 的硫酸不断搅拌使其均匀混合，然后放入 30 ℃水浴锅中水解 1 h。

（2）加入 84 mL 超纯水，置于 121 ℃高压灭菌锅中反应 1 h。

（3）冷却后，水解液经过滤、稀释，采用葡萄糖试剂盒测定葡萄糖含量。

纤维素含量=葡萄糖含量×0.90 ③

半纤维素含量测定方法：按照 GB/T 2677.10 测定综纤维素含量，减去纤维素的含量为半纤维素含量。

1.4 分析方法

对测定的 OC、LC、CC 和 HC 数据进行初步整理后，用 DPS 统计软件[15]进行分析。对杂交组合间的油脂性状开展方差分析，采用巢式（NCI）随机区组设计分析模型评估母本效应和母本内父本效应。杂交亲本的一般配合力（general combining ability，GCA）和杂交组合的特殊配合力（specific combining ability，SCA）按照吴兵等[16]和梁一池[17]的方法进行。对于遗传参数的估算参照续九如[18]的方法进行。

（1）估算母本 GCA：$\hat{y}_i = \bar{x}_i - \bar{x}$，$\hat{y}_i$ 为母本 GCA 估值；$\bar{x}_i$ 为母本平均值；$\bar{x}$ 为群体平均值。

（2）估算组合 SCA：$\hat{s}_{ij} = \bar{x}_j - \bar{x} - \hat{y}_i$，$\hat{s}_{ij}$ 为组合 SCA 估值；$\bar{x}_j$ 为组合子代平均值；$\bar{x}$ 为群体平均值。

（3）估算遗传方差分量

加性遗传方差（V_A）：$V_A=4\sigma_F^2$

非加性遗传方差（V_D）：$V_D=4(\sigma_M^2-\sigma_F^2)$

表型方差（V_p）：$V_p=V_g+\sigma_e^2$

遗传方差（V_g）：$V_g=V_A+V_D$

母本方差（σ_F^2）：$\sigma_F^2=V_A/4$

父本方差（σ_M^2）：$\sigma_M^2=V_A/4+V_D/4$

（4）估算全同胞家系遗传力（H^2）和全同胞单株遗传力（h^2）

$$H^2 = \frac{\sigma_F^2 + \sigma_M^2/M}{\sigma_M^2 + \sigma_M^2/M + \sigma_e^2/BM} = \frac{V_1 - V_3}{V_1} \quad ④$$

$$h^2 = \frac{2(\sigma_F^2 + \sigma_M^2)}{\sigma_F^2 + \sigma_M^2 + \sigma_e^2} = \frac{2[V_1 + (F-1)V_2 - FV_3]}{V_1 + (M-1)V_2 + M(B-1)V_3} \quad ⑤$$

式④、⑤中：σ_F^2 为母本方差，σ_M^2 为母本内父本方差，σ_e^2 为环境方差（机误），F 为母本个数，M 为与同一母本杂交的父本个数，B 为重复数。

2 结果与分析

2.1 相关性分析

对油茶种仁中的 OC、LC、CC 和 HC 进行相关性分析（图 1），结果表明，OC 与 LC 和 HC 均呈显著负相关，相关系数分别为-0.489 和-0.297。LC 和 CC、HC 呈显著正相关，相关系数为 0.187 和 0.214。CC 和 HC 呈显著负相关，相关系数为-0.154。项目组前期在其他油茶群体的研究中也发现，种仁含油率与木质素、纤维素含量具有相关性。因此在以含油率为目标的油茶育种工作中，除了 OC，LC、CC 和 HC 也可作为高油种质筛选的重要判断依据。

2.2 方差分析

方差分析结果（表 2）表明，OC、LC、CC 和 HC 在组合间均存在显著差异，说明杂交能够创造丰富的变异。12 个组合 OC、LC、CC 和 HC 的平均值分别为 39.90%、10.44%、7.93% 和 5.22%。HC 的变异系数最高，为 39.08%。OC 的变异系数最低，为 17.52%。LC 和 CC 的变异系数分别是 21.36% 和 20.30%。这种变异主要是母本内父本间的差异造成的，所有性状父本间差异均极显著，这和本研究中父本中既有普通油茶又有小果油茶，母本只包括普通油茶的设置是一致的。

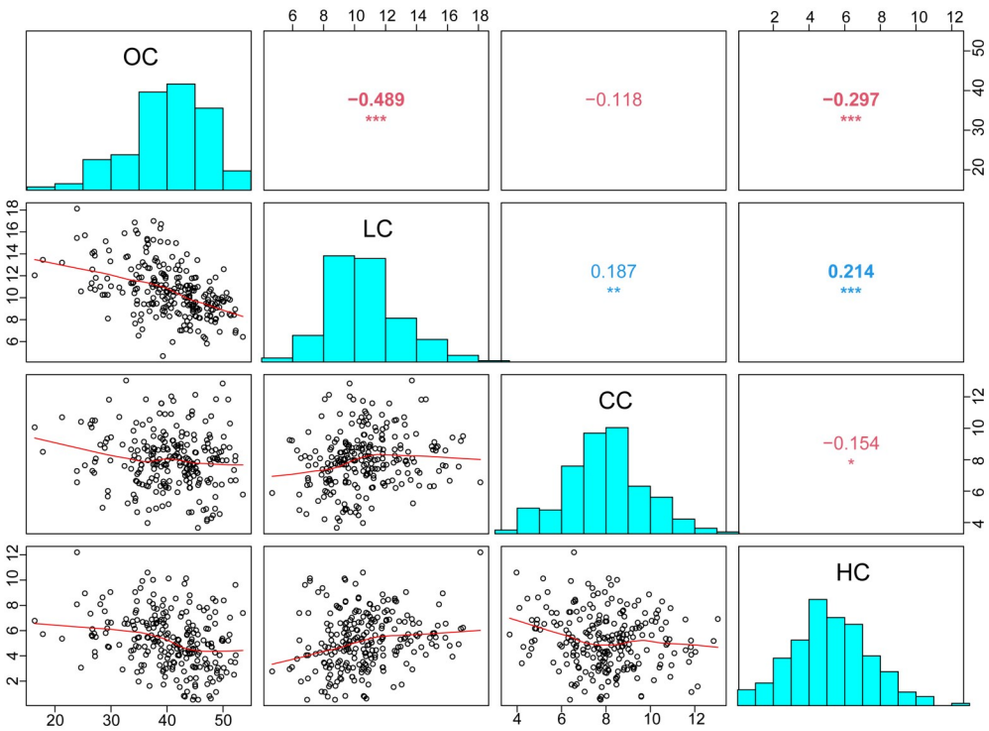


图 1　油茶 F_1 群体种仁性状相关性分析结果

Fig.1　Correlation analysis of the kernel traits of the F_1 progency

表 2　油茶杂交子代种仁性状方差分析结果

Tab.2　Variance analysis of the kernel traits of the F_1 progeny

性状 Traits	变异来源 Source of variation				误差 Error	平均值/% Mean	变异范围/% Variance range	变异系数/% CV
	区组 Block	组合 Cross	母本间 Female parent	母本内父本间 Male parent with same female parent				
OC/%	2.517 4	4.578 0**	1.060 9	7.768 1**	34.077 2	39.90	17.83~53.55	17.52
LC/%	1.237 7	12.053 0**	5.360 0	5.290 3**	3.740 6	10.44	4.68~18.12	21.36
CC/%	0.796 1	7.579 0**	0.512 1	7.030 9**	2.241 8	7.93	3.66~13.04	20.30
HC/%	3.864 9	2.701 0**	0.543 1	3.848 4**	3.983 6	5.22	0.54~12.20	39.08

变异来源部分的数值表示 F 值。**表示 $P<0.01$。

The data in the source of variation block of the table mean the F values.** means $P<0.01$.

2.3　多重比较

对 4 个性状进行多重比较(表 3)表明,OC 最高的前 3 个组合是 4×23、4×18 和 40×95,其平均值分别为 46.53%、44.95% 和 43.57%,3 个组合皆为普通油茶种内杂交组合;最低的 3 个组合是 53×小 1、4×小 4 和 53×小 3,其平均值依次为 36.85%、36.17% 和 35.12%,均是普通油茶和小果油茶的种间杂交组合。杂交组合 53×小 3、53×小 1、10×53 和 53×小 2 的 LC 排在前 4 位,以长林 53 号为母本的种间杂交组合为主。种内组合 40×95 的 CC 和 HC 均排第 12 位,分别为 6.95% 和 4.21%。4×18 和 10×4 的 CC 和 HC 也较低,4×18 的 CC 排第 10 位,均值为 7.23%,HC 则排第 8 位,均值为 4.70%。10×4 的 CC 均值为 7.27%,排名第 9,在 HC 排名第 10 位,是 4.60%。40×10 的 CC 和 HC 均最高,分别为 9.12% 和 6.01%,40×小 D1 的 CC 和 HC 次之,分别是 8.91% 和 5.92%。

2.4　杂交组合亲本一般配合力效应分析

一般配合力指一个亲本和多个亲本杂交后子代在某个性状上的平均表现,主要由基因的加性效应决定,是可以稳定遗传的部分[19-20]。4 个母本的 GCA 效应值见表 4。对于 OC 而言,长林 4 号、10 号和 40 号

有显著的GCA正效应，其中长林4号最高，为1.57，53号的GCA最低，为−2.55。由于OC和LC、HC呈显著的负相关关系，因此选择优良亲本开展高含油率良种选育时应当选择LC和HC的GCA较低的亲本。长林53号的LC和HC一般配合力均为正值。长林4号的木质素、纤维素和半纤维素含量的GCA都是负值，木质素和纤维素含量的GCA低于其他亲本。长林4号在OC、LC和HC性状的一般配合力综合表现说明，在高含油率良种选育中可优先选择长林4号为杂交亲本。

表3 油茶杂交子代各经济性状多重比较

Tab.3 Multiple comparison results of kernel traits in F_1 progency

组合 Cross	含油率/% OC	木质素含量/% LC	纤维素含量/% CC	半纤维素含量/% HC
4×23	46.52^{a}	9.85^{def}	8.21^{abcd}	5.53^{abc}
4×18	44.95^{ab}	9.72^{def}	7.23^{de}	4.70^{abc}
40×95	43.57^{abc}	8.95^{f}	6.95^{e}	4.21^{c}
10×4	42.44^{bcd}	10.80^{cde}	7.26^{de}	4.60^{bc}
10×53	40.18^{cde}	11.39^{bc}	7.87^{cde}	5.21^{abc}
53×小2	40.07^{cdef}	11.01^{bcd}	7.51^{de}	5.47^{abc}
10×40	38.46^{defg}	9.03^{f}	7.81^{cde}	5.21^{abc}
40×小D1	38.27^{efg}	10.00d^{ef}	8.91^{ab}	5.92^{abc}
40×10	37.84^{efg}	9.99^{def}	9.12^{a}	6.01^{a}
53×小1	36.85^{efg}	12.29^{ab}	8.02^{bcd}	5.82^{ab}
4×小4	36.17^{fg}	9.54^{ef}	7.94^{bcde}	5.64^{ab}
53×小3	35.12^{g}	12.73^{a}	8.57^{abc}	4.94^{abc}

表中数据均为平均值，同列不同小写字母表示在$P<0.05$，水平差异显著。

The means are displayed in the table, the different little letters means the significant difference at $P<0.05$ level.

表4 各组合母本一般配合力分析

Tab.4 Estimated GCA of female parent of each cross

母本 Female parents	含油率/% OC	木质素/% LC	纤维素/% CC	半纤维素/% HC
长林4号 Changlin No.4	1.57	−0.74	−0.03	−0.76
长林10号 Changlin No.10	0.11	−0.14	−0.28	0.40
长林40号 Changlin No.40	0.10	0.06	−0.39	0.16
长林53号 Changlin No.53	−2.55	1.57	0.11	0.19

2.5 杂交亲本组合特殊配合力效应分析

特殊配合力是等位基因间的相互作用，主要由基因的非加性效应决定，被认为是能遗传但不能被固定的遗传效应[21-22]。本研究中的12个杂交组合的不同性状的特殊配合力效应值见表5。分析发现，同一性状不同组合间和同一组合各个性状间SCA效应差异均较大，这表明各组合之间非加性效应的多样化，且同一个组合内亲本间的基因互作也存在丰富的多样性。

同一性状SCA在不同组合间有较大差异。含油率SCA是正值的组合有40×95、4×23、53×小2、4×18和10×4 5个组合，仅有一个是种间杂交组合。其中，40×95的SCA最高，为4.28。4×23次之，是3.97。所有组合中种间杂交组合4×小4的含油率SCA最低，仅为−6.38。LC的SCA效应值为负的组合有4个，其余8个为正向效应。其中，10×53排在所有组合的第一位，为0.99，组合53×小3次之，为0.76，组合10×40

的LC特殊配合力最低,是-1.38。组合53×小3、4×23、4×小4、40×10和40×小D1在CC的SCA为正值,40×10排第一位,效应值为1.18,40×小D1次之,效应值为1.02,10×4最低,为-0.63。40×10和40×小D1在HC的SCA也排在前两位,分别是0.63和0.54。40×18最低,为-0.58。

种间杂交组合在含油率性状上的SCA多低于种内杂交组合,在LC、CC和HC的SCA多高于普通油茶种内杂交组合。如组合40×小D1,其含油率SCA值是-1.62,纤维素和半纤维素含量的SCA效应值分别为1.02、0.54,显著高于其他亲本组合。所以,通过40×小D1种间杂交选育高含油率优良性状的新种质的概率极低。组合53×小2在含油率、LC、CC和HC的SCA的表现优于其他种间杂交组合及部分种内杂交组合,OC的SCA为2.77,CC和HC的SCA为-0.53、-0.47,在以含油率为主要育种目标的种间杂交育种中可重点关注。种内杂交组合中,OC的SCA效应值为正值,LC、CC、HC均较低的组合有40×95和4×18,这2个组合是可供选择的的比较理想的组合。

表5　各杂交组合特殊配合力效应

Tab.5　The SCAs of parent combinations in OC,LC,CC and HC

组合 Cross	含油率/% OC	木质素含量/% LC	纤维素含量/% CC	半纤维素含量/% HC
4×18	2.39	0.02	-0.56	-0.58
4×23	3.97	0.15	0.31	0.25
4×小4	-6.38	-0.16	0.04	0.36
10×4	2.07	0.40	-0.63	-0.23
10×40	-1.90	-1.38	-0.09	-0.16
10×53	-0.18	0.99	-0.03	0.38
40×10	-2.52	0.32	1.18	0.63
40×95	4.28	-0.73	-0.22	-1.17
40×小D1	-1.62	0.32	1.02	0.54
53×小1	-0.49	0.29	-0.02	0.42
53×小2	2.77	-0.96	-0.52	0.06
53×小3	-2.22	0.76	0.53	-0.47

2.6　油茶杂交子代油脂相关性状的遗传参数

遗传参数的估算,有助于确定选育方法,制定合理的育种策略。母本效应、母本内父本效应和加性/非加性基因效应的方差分量大小可体现出杂交子代生长性状的遗传控制方式。从表6可以看出,OC的母本方差为0.261 7,父本方差为11.230 7;CC的母本方差和父本方差分别为-0.084 4和0.445 0;HC的母本方差为-0.061 5,父本方差为0.289 7。OC、CC和HC的父本效应的方差分量均大于母本。LC的母本方差为0.989 0,父本方差为0.551 8。说明本研究所用的巢式杂交群体中,父本对子代油脂性状的贡献率比母本更大。参试杂交组合子代OC的加性方差是1.046 8,非加性遗传方差是43.876 0,CC和HC的非加性方差也显著大于加性方差,CC的加性方差和非加性方差为-0.337 6和2.117 6。HC的加性方差和非加性方差分别是-0.246 0和1.404 8。表明在基因作用的方式上OC,CC和HC均以非加性遗传效应控制为主,加性效应影响程度较低。LC的加性方差为3.956 0,非加性方差为-1.748 8,说明LC以加性效应控制为主。在本研究的所有杂交组合中,OC、CC和HC 3个性状均以非加性基因效应控制为主,表明在以含油率为目的的种间杂交育种中,双亲间的SCA评估较为重要。

遗传力反映遗传变量占表型变量的比率,是选择育种中确定选种方法的重要依据。遗传力越高,亲本将优良性状遗传给后代的能力越强,说明选择的可靠性越高,获得的遗传增益也越大[23]。本研究中4个性状的家系遗传力均较低,分布在0.042 3~0.213 5范围内(表6)。其中OC的家系遗传力最高,为0.213 5。单株遗传力范围为0.108 4~0.583 5,单株遗传力最高的性状是LC,达到0.583 5。HC的家系遗传力和单株遗传力均最低,分别为0.042 3和0.108 4。4个性状的单株遗传力均高于家系遗传力,说明在油茶杂交育种中,相比较于家系选择,通过单株选择,可以获得更高的遗传增益。

表6 种仁性状遗传参数估值

Tab.6 Estimated value of genetic parameters for differnet Kernel traits

遗传参数 Genetic parameters	含油率 OC	木质素 LC	纤维素 CC	半纤维素 HC
母本方差 σ_F^2 Female parent variance	0.261 7	0.989 0	−0.084 4	−0.061 5
父本方差 σ_M^2 Male parent variance	11.230 7	0.551 8	0.445 0	0.289 7
环境方差 σ_e^2 Environmental variance	34.077 2	3.740 6	2.241 8	3.983 6
加性遗传方差 V_A Additive genetic variance	1.046 8	3.956 0	−0.337 6	−0.246 0
非加性遗传方差 V_D Non−additive genetic Variance	43.876 0	−1.748 8	2.117 6	1.404 8
遗传方差 V_g Genetic variance	44.922 8	2.207 2	1.780 0	1.158 8
表型方差 V_P Phenotypic variance	79.000 0	5.947 8	4.021 8	5.142 4
全同胞家系遗传力 H^2 Heritability of Full−sib families	0.213 5	−	0.075 9	0.042 3
全同胞单株遗传力 h^2 Heritability of single plant	0.504 4	0.583 5	0.277 1	0.108 4

3 讨 论

巢式交配设计又名北卡一号设计，其特点是从群体中随机选择若干个个体作为父本，然后对于每一个父本再从群体中选择若干个不同的母本与之交配[24]。巢式设计由于其设计简单并能产生大量的子代，在林木遗传育种中广泛应用。火炬松[24]、桉树[25]、杉木[26]、马尾松[27]等树种的遗传育种工作中均运用了巢式交配设计。本研究将巢式遗传交配设计应用于油茶遗传改良中，在以较少的杂交组合为研究对象的前提下，评估尽量多的亲本组合的配合力，比较油茶种内和种间杂交的差异，为油茶种间杂交育种工作提供理论指导。

Sprague 等[28]在玉米杂交育种中首次提出 GCA 和 SCA 的概念后，配合力分析在林木育种实践中得到了广泛应用。其不仅可以为杂交育种的优良亲本选配提供依据，还可以解析林木不同性状的控制方式，用以科学指导改良方案和提高育种效率[29−31]。林萍等[32]对油茶半双列子代幼林的经济性状研究发现，果实性状、干籽出仁率、种仁含油率、硬脂酸含量等多数性状，评估亲本的 GCA 比亲本间的 SCA 更重要；但油酸含量等性状主要由非加性效应控制，评估亲本的 SCA 比 GCA 更重要。本研究结果表明，在开展普通油茶和小果油茶的种间杂交育种时，想要创制含油率高的新种质，首先需要考虑亲本间的 SCA，再考虑亲本的 GCA。

研究发现，油茶种内和种间杂交子代的油脂相关性状受加性与非加性效应的共同作用，但以非加性效应为主。刘青华等[27]在马尾松纸浆材主要经济性状研究中也有相同的观点。赵建诚等[33]发现杨树各树冠性状的遗传力较低，均小于 0.5，受环境因素影响大。林萍等[32]发现油茶杂交子代林幼龄时期种仁含油率、脂肪酸成分与含量等经济性状受环境影响较大，遗传控制弱，和本研究中盛产期的油茶种仁含油率遗传力较低的结论一致。柴静瑜等[12]在油茶巢式交配子代果实和油脂性状的研究中发现，硬脂酸、油酸和亚油酸的遗传力较高，均大于 0.6。可见，油茶不同的性状的遗传力水平不同，同一性状的遗传力也可能随树龄的变化而变化。本研究中各性状的全同胞单株遗传力均显著高于家系遗传力。因此，在以油茶含油率性状作为目标的育种工作中，应采用以全同胞家系内选择优良单株培育成优良品种的育种策略。

4　结　论

本研究选取油茶种内杂交(普通油茶×普通油茶)和种间杂交(普通油茶×小果油茶)子代为研究对象开展遗传分析,解析油茶种内、种间杂交亲本对子代油脂相关性状的影响。杂交子代的OC、LC、CC和HC在组合间存在显著差异,且这种差异主要来源于父本效应。杂交子代的单株遗传力普遍高于家系遗传力,在油茶遗传改良中,可通过优良单株选择获得更高的遗传增益。在基因作用的方式上,除LC外的3个性状均以非加性效应控制为主,加性基因效应次之,证明在种间杂交时亲本的SCA评估比GCA更重要。根据配合力分析结果,结合各组合的表型数据,筛选最佳亲本长林4号,最佳种间杂交组合53×小2,种内杂交组合40×95和4×18,可在油茶高含油率杂交育种中进一步应用。

参考文献 References:

[1] KINNEY A J.Development of genetically engineered soybean oils for food applications[J].Journal of food lipids,1996,3(4):273-292.

[2] 庄瑞林.中国油茶[M].北京:中国林业出版社,1988:66.
ZHUANG R L.Oil-tea *Camellia* in China [M].Beijing:China Forestry Publishing House,1988:66.

[3] 孟桂元,韩杰铖,詹兴国,等.我国油茶产业分析与发展对策[J].中国油脂,2021,46(7):104-108.
MENG G Y,HAN J C,ZHAN X G,et al.Industry analysis and development strategy of oil-tea camellia in China[J].China oils and fats,2021,46(7):104-108.

[4] 陈丰林,谢海,游昌乔,等.我国油茶资源研究与开发利用现状及展望[J].生命科学研究,2021,25(5):425-431.
CHEN F L,XIE H,YOU C Q,et al.Current situation and prospect of research,development and utilization of *Camellia oleifera* resources in china[J].Life science research,2021,25(5):425-431.

[5] 王金凤,谭新建,吴喜昌,等.我国油茶产业发展现状与对策建议[J].世界林业研究,2020,33(6):80-85.
WANG J F,TAN X J,WU X C,et al.Development status and suggestions of camellia industry in China [J].World forestry research,2020,33(6):80-85.

[6] 郭鑫淼,袁迎春,胡观兴,等.油茶杂交子代花器官性状的遗传分析[J].植物遗传资源学报,2023,24(6):1649-1658.
GUO X M,YUAN Y C,HU G X,et al.Genetic analysis of floral organ traits in hybrid progenioes of *Camellia oleifera* [J].Journal of plant genetic resources,2023,24(6):1649-1658.

[7] 王明庶.林木育种学概论[M].北京:中国林业出版社,1989:72-73.
WANG M X.Forest breeding[M].Beijing:China Forestry Publishing House,1989:72-73.

[8] MASON A S,BATLEY J.Creating new interspecific hybrid and polyploid crops[J].Trends in biotechnology,2015,33(8):436-441.

[9] KARTAL G K,SENBEK G,KARACA M,et al.Hybridization studies in *Vicia sativa* complex[J].Euphytica,2020,216(2):175-180.

[10] 李艳民,袁德义,叶天文,等.油茶种间杂交F_1代18个优良单株核型分析[J].林业科学,2022,58(4):165-174.
LI Y M,YUAN D Y,YE T W,et al.Karyotype analysis of 18 excellent individuals in F_1 generation of interspecific hybridization of Oil-Tea(*Camellia oleifera*)[J].Scientia silvae Sinicae,2022,58(4):165-174.

[11] 姚小华.油茶优质高效实用栽培技术[M].北京:科学出版社,2010:60-62.
YAO X H.Efficient and practical cultivation techniques of oil-tea *Camellia*[M].Beijing:Science Press,2010:60-62.

[12] 柴静瑜,王开良,姚小华,等.油茶巢式交配子代果实和油脂性状的遗传分析[J].林业科学研究,2023,36(1):1-10.
CHAI J Y,WANG K L,YAO X H,et al.Genetic analysis of the fruit and oil related traits on hybrid offspring of nested mating of *Camellia oleifera*[J].Forest research,2023,36(1):1-10.

[13] 姚小华,王亚萍,王开良,等.地理经纬度对油茶籽中脂肪及脂肪酸组成的影响[J].中国油脂,2011,36(4):31-34.
YAO X H,WANG Y P,WANG K L,et al.Effects of geographic latitude and longitude on fat and its fatty acid composition of oil-tea camellia seeds[J].China oils and fats,2011,36(4):31-34.

[14] 谢一青,李志真,姚小华,等.小果油茶果实性状与含油率及脂肪酸组成相关性分析[J].中国油脂,2013,38(5):80-83.
XIE Y Q,LI Z Z,YAO X H,et al.Correlation of fruit characters and oil content and fatty acid composition of *Camellia meiocarpa*[J].China oils and fats,2013,38(5):80-83.

[15] 唐启义.DPS数据处理系统[M].北京:科学出版社,2021:108-110.

TANG Q Y.Data processing system[M].Beijing:Science Press,2021:108-110.

[16] 吴兵,庞贞武,沈云,等.桉树巢式交配设计子代配合力效应分析[J].安徽农业科学,2013,41(28):11410-11413.
WU B,PANG Z W,SHEN Y,et al.Combining ability analysis of *Eucalyptus* hybrid progeny obtained by nested mating design[J].Journal of Anhui agricultural sciences,2013,41(28):11410-11413.

[17] 梁一池.矩形区组方"RBS"设计及其在树木育种中的应用Ⅳ."RBS"-NCI设计统计分析[J].福建林业科技,1998(4):2-7.
LIANG Y C.The rectangular block square ("RBS") design and its application in the tree breedingIV.The statistic analysis of "RBS"-NCI design[J].Journal of Fujian forestry science and technology,1998(4):2-7.

[18] 续九如.林木数量遗传学[M].北京:高等教育出版社,2006:51-53.
XU J R.Quantiaive senelics in foresry[M].Beijing:Higher Education Press,2006:51-53.

[19] JONES G,LIZINIEWICZ M,ADAMOPOULOS S,et al.Genetic parameters of stem and wood traits in full-sib silver birch families[J].Forests,2021,12(2):159-169.

[20] PARVEEN A B M,MUTHUPANDI M,KUMAR N,et al.Quantitative genetic analysis of wood property traits in biparental population of *Eucalyptus camaldulensis* x E. tereticornis[J].Journal of genetics,2021,100(2):46-55.

[21] VÁZQUEZ-GONZÁLEZ C,LÓPEZ-GOLDAR X,ALÍA R,et al.Genetic variation in resin yield and covariation with tree growth in maritime pine[J].Forest ecology and management,2021,482(4):118843-118850.

[22] 王家燚,陈焕伟,张蕊,等.木荷全同胞家系生长与分枝性状的遗传变异及效应分析[J].浙江农林大学学报,2023,40(4):738-746.
WANG J Y,CHEN H W,ZHANG R,et al.Genetic variation and effect of growth and branching traits in full-sib families of *Schima superba*[J].Journal of Zhejiang A & F university,2023,40(4):738-746.

[23] 沈熙环.林木育种学[M].北京:高等教育出版社,2021:32-35.
SHEN X H.Forest Tree breeding[M] Beijing:Higher Education Press,2021:32-35.

[24] NEGREIROS J R D S ,ALEXANDRE R S ,VIRGÍNIA de S L.Genetic parameter estimates in Yellow passion fruit based on design I[J].Brazilian archives of biology and technology,2009,52(3):523-530.

[25] 吴兵,兰俊,庞贞武,等.桉树巢式交配设计子代林早期生长性状的遗传分析[J].西部林业科学,2014,43(2):53-57.
WU B,LAN J,PANG Z W,et al.Genetic analysis of early growth traits of *Eucalyptus* forest by nested mating design[J].Journal of west China forestry science,2014,43(2):53-57.

[26] 黄金桃.杉木巢式交配设计生长性状的遗传分析[J].福建林业科技,1996(3):1-6.
HUANG J T.Genetic analyses of growth characters of *Cunninghamia lanceolataby* means of the nest-mode mating design[J].Journal of Fujian forestry science and technology,1996(3):1-6.

[27] 刘青华,金国庆,王晖,等.马尾松巢式交配子代产脂力、生长和木材密度遗传分析[J].林业科学研究,2014,27(6):715-720.
LIU Q H,JIN G Q,WANG H,et al.Genetie analysis of resin-producing capability,growth and wood basic density on progeny of nested mating design of *Pinus massoniana*[J].Forest research,2014,27(6):715-720.

[28] SPRAGUE G F,TATUM L A.General vs. specific combining ability in single crosses of Corn[J].Agronomy journal,1942,34(10):923-932.

[29] SINGH,N,B,et al.Genetic analysis in intra- and inter-specific crosses of tree willows[J].The Indian journal of genetics & plant breeding,2015,75(3):372-378.

[30] NA Z,YAMEI M,DONG X,et al.Genetic analysis of main traits of cross combinations after 6×6 diallel crossing in *Faba Bean*[J].Journal of nuclear agricultural sciences,2020,34(1):45-54.

[31] WU H X,HALLINGBCK H R,SÁNCHEZ L.Performance of seven tree breeding strategies under conditions of inbreeding depression[J].G3(Bethesda,Md),2016,6(3):529-540.

[32] 林萍,王开良,姚小华,等.普通油茶杂交子代幼林经济性状的遗传分析[J].中南林业科技大学学报,2017,37(12):31-38.
LIN P,Wang K L,YAO X H,et al.Genetic analysis of the economic traits of *Camellia oleifera* F1 descendant inhalf-diallel-cross design[J].Journal of central south university of forestry & technology,2017,37(12):31-38.

[33] 赵建诚,曹帮华,吴丽云,等.杨树无性系根系特征及地上与地下部分相关性研究[J].山东大学学报(理学版),2013,48(11):7-13.
ZHAO J C,CAO B H,WU L Y,et al.Studies on roots characteristics and correlations between the aerial and underground parts of *Populus* clones[J].Journal of Shandong university(natural science),2013,48(11):7-13.