

DOI:10.12403/j.1001-1498.20220376

油茶巢式交配子代果实和 油脂性状的遗传分析

柴静瑜^{1,2}, 王开良¹, 姚小华¹, 滕建华³, 林萍^{1*}

(1. 中国林业科学研究院亚热带林业研究所, 浙江省林木育种技术研究重点实验室, 浙江 富阳 311400; 2. 南京林业大学研究生院, 江苏 南京 210037; 3. 浙江省金华市婺城区东方红林场, 浙江 金华 321025)

摘要: [目的] 为选配油茶杂交种最优亲本和最佳亲本组合, 探索种间杂交策略, 提升育种效率, 获得最大遗传增益。[方法] 以巢式交配的种内、种间杂交子代林为试材, 测定单果质量、鲜果出籽率、干籽出仁率、种仁含油率以及脂肪酸成分含量等 11 个经济性状, 分析母本的一般配合力 (GCA) 和杂交组合的特殊配合力 (SCA), 解析各性状的遗传控制模式。[结果] 11 个经济性状在 12 个杂交组合间均存在极显著差异, 且变异主要来源于父本效应 ($P < 0.01$), 母本效应仅硬脂酸和亚油酸含量差异显著 ($P < 0.05$)。综合分析亲本主要经济性状的 GCA 与 SCA 表明, 普通油茶种内杂交组合 4 × 23 在以单果质量、鲜果出籽率、干籽出仁率、种仁含油率和油酸含量等性状为育种目标时可作为优选杂交组合。普通油茶和小果油茶的种间杂交组合 53 × 小 3 可在单果质量、棕榈酸、亚油酸和 α -亚麻酸含量育种中加以利用; 组合 53 × 小 2 在鲜果出籽率、干籽出仁率、种仁含油率和油酸含量上具有育种优势。遗传效应分析表明, 硬脂酸、油酸和亚油酸含量主要受加性遗传控制, 其余 8 个经济性状的非加性遗传方差显著高于加性遗传方差。11 个经济性状的单株遗传力大于家系遗传力, 油茶杂交种中应采用全同胞家系内选择优良单株的育种策略。[结论] 油茶成林的经济性状主要受遗传控制, 受环境影响较小。单果质量、鲜果出籽率、干籽出仁率、种仁含油率、棕榈酸、棕榈烯酸、 α -亚麻酸和顺-11-二十碳烯酸含量等 8 个性状均以非加性基因效应控制为主, 加性基因效应影响程度较低。在开展种间杂交工作时, 双亲的 SCA 评估应放在首位。本研究首次以油茶杂交子代成林为材料, 探索了普通油茶与小果油茶种间杂交的亲本配置及遗传效应规律, 对指导油茶种间杂交育种奠定了理论基础。

关键词: 普通油茶; 小果油茶; 巢式交配设计; 经济性状; 一般配合力; 特殊配合力

中图分类号: S794.4

文献标志码: A

文章编号: 1001-1498(2023)01-0001-10

油茶 (*Camellia oleifera* Abel.) 是我国南方一种重要的木本食用油料作物^[1]。茶油色清味香, 单不饱和脂肪酸含量高, 富含角鲨烯、维生素 E 等保健成分, 营养丰富, 性质稳定, 长期食用可有效改善我国公民的膳食结构^[2-4]。另一方面, 发展油茶产业, 对保障我国的粮油安全具有重要意义^[5]。近年来, 油茶产业发展迅速, 已成为我国产量最高的四大油料 (油菜 (*Brassica* spp.)、大豆 (*Glycine max* (Linn.) Merr.)、花生 (*Arachis hypogaea*

Linn.) 和油茶) 之一^[6-7]。产业健康发展, 高产优质的油茶良种是基础和关键。

杂交育种作为最有成效的遗传改良技术之一, 在林木育种上普遍应用。杂交亲本的科学选配是实现多个优良性状聚合, 提高杂交育种效率的先决条件^[8-11]。配合力是亲本选择和组合配置的重要依据, 配合力包括一般配合力 (GCA) 和特殊配合力 (SCA)。一般配合力指一个个体与其他个体交配产生的后代的平均表现; 特殊配合力指某特定组合在

收稿日期: 2022-07-20 修回日期: 2022-10-07

基金项目: 浙江省林木新品种选育重大科技专项课题 (2021C02070-2); “十三五”国家重点研发专项 (2018YFD1000603-2)

* 通讯作者: 林萍, 副研究员, 博士。主要研究方向: 木本油料遗传育种。电话: 15068114868。Email: linping80@126.com

其双亲平均表现的基础上与预期结果的偏差^[12]。单个亲本的 GCA 及双亲间的 SCA 越高, 其杂交子代相应性状的表现越好。杂交育种也是现阶段油茶育种的重要手段和途径, 但主要还局限于简单的具有互补性状的亲本杂交^[13]。林萍等^[14]以杂交子代幼林为材料, 开展了杂交亲本在生长性状及油脂相关经济性状的配合力和遗传力评估, 为油茶杂交育种的亲本选配研究开展了有益探索。但幼林的各性状受环境影响较大, 且亲本配合力及各性状遗传力随着树龄的增长会发生变化, 这在马尾松^[15]、桉树^[16]等多个林木类树种中已证实。因此, 以杂交子代成林为研究材料, 开展油茶重要经济性状的亲本选配研究对油茶杂交育种具有重要意义。

普通油茶 (*C. oleifera*) 又名中果油茶, 因果实较大、产量高, 是我国油茶产业第一位的主栽物种。小果油茶 (*C. meiocarpa*) 虽果实较小, 因其果皮薄, 出籽率高, 且与普通油茶花期相近, 在普通油茶杂交育种中常被视作培育高出籽率良种的优良亲本; 但普通油茶与小果油茶开展种间杂交, 亲本重要性状的配合力、遗传力等重要遗传参数未见评估。研究组在前期以普通油茶和小果油茶为亲本采用巢式交配设计创制了 12 个杂交组合, 本研究测定分析进入盛产期的 7 年生杂交子代测定林 11 个果实和油脂性状, 估算油茶亲本的遗传参数, 比较种内杂交 (普通油茶 × 普通油茶) 与种间杂交 (普通油茶 × 小果油茶) 的差异, 为油茶杂交育种, 尤其是为普通油茶与小果油茶种间杂交育种的亲本选配提供参考依据。

1 材料和方法

1.1 供试材料

2010 年 11 月上旬在浙江金华东方红林场国家油茶种质资源收集库内选择具有不同优良性状的 4 个普通油茶无性系良种为母本, 7 个普通油茶和 5 个小果油茶无性系为父本 (表 1), 按照巢式设计控制授粉杂交 12 个组合 (表 2), 每组合控制授粉 200 朵花。2011 年 10 月果实成熟, 12 个组合共收获杂交果实 342 个, 杂交种子 1 200 余粒。杂交种子于 2012 年春季播种育苗, 2014 年 1 月实生苗造林。造林按照完全随机区组设计, 10 株小区, 重复 3 次, 造林密度 3 m × 2 m。

1.2 性状调查测定方法

2021 年子代测定林郁闭度达 90% 以上, 平均

单株冠幅 6 m², 单株果实产量有显著分化, 分布在 0.12~15.35 kg 范围内。每杂交组合 10 株一小区, 3 次重复, 共 30 个单株调查取样。2021 年 10 月待 5% 以上果实开裂时, 每单株随机取 30 个果实, 测定单果质量 (weight)、鲜果出籽率 (RSF) 和干籽出仁率 (RKS) 等性状平均值作为单株果实性状数据。测定种仁含油率 (OC)、油脂脂肪酸成分及含量作为单株油脂性状数据。鲜果出籽率、干籽出仁率、种仁含油率等性状测定采用姚小华等^[17]和谢一青等^[18]的方法。油脂脂肪酸成分测定采用气相色谱法, 具体参照周长富等^[19]的方法。

1.3 统计分析方法

本研究采用 DPS 统计软件^[20]对杂交子代果实和油脂相关性状数据进行分析。采用单因素方差分析评估杂交组合间的性状差异, 若杂交组合间差异显著, 根据巢式 (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。母本的 GCA 和杂交组合的 SCA 的估算参照梁一池^[21]和吴兵等^[12]的方法进行:

$$(1) \text{母本 GCA 的估算: } \hat{y}_i = \bar{x}_i - \bar{x}$$

式中: \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。

$$(2) \text{组合 SCA 的估算: } \hat{s}_{ij} = \bar{x}_{ij} - \bar{x} - \hat{y}_i$$

式中: \hat{s}_{ij} 为组合 SCA 估值; \bar{x}_{ij} 为组合子代平均值; \bar{x} 为群体平均值。

对于遗传参数的估算参照续九如^[22]的方法进行:

(1) 方差分量估算

$$\text{母本方差 } (\sigma_F^2): \sigma_F^2 = V_A/4$$

$$\text{父本方差 } (\sigma_M^2): \sigma_M^2 = V_A/4 + V_D/4$$

$$\text{加性遗传方差 } (V_A): V_A = 4\sigma_F^2$$

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

$$\text{遗传方差 } (V_g): V_g = V_A + V_D$$

$$\text{表型方差 } (V_p): V_p = V_g + \sigma_e^2$$

(2) 遗传力估算

全同胞家系遗传力 (H^2):

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

全同胞单株遗传力 (h^2):

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

表 1 12 个油茶无性系亲本特征
Table 1 Traits of 12 oil-tea clones as cross parents in this study

物种 Species	亲本 Parent	原产地 Origin	特点 Traits
普通油茶 <i>C. oleifera</i>	长林4号 Changlin No.4	江西茅岗 Maogang, Jiangxi	国家审定良种(国S-SC-CO-006-2008, 果桃形, 干出籽率26.9%, 出仁率54.0%, 含油率46.0%, 高产稳产。盛产期亩产油能达到60.0 kg。 The national approved variety (national S-SC-CO-006-2008) with high and stable fruit yield. The fruit shape is like a peach, the rate of dry seed to fresh fruit is 26.9%, the rate of kernel to seed is 54.0%, 46.0% oil content in kernel. The oil yield per mu is 60.0 kg in the peak production period.
	长林10号 Changlin No.10	江西茅岗 Maogang, Jiangxi	经过多地点区试, 长势极旺。果近橄榄型, 鲜出籽率43.63%, 干仁含油率40.56%, 产量较低。 With vigorous growth. The fruit shape is nearly olive. The rate of fresh seed to fresh fruit is 43.63%, the oil content in dry kernel is 40.56%, and the fruit yield is lower.
	长林18号 Changlin No.18	浙江安吉 Anji, Zhejiang	国家审定良种(国S-SC-CO-007-2008), 果球形至橘形, 鲜果出籽率47.4%, 干仁含油率48.6%, 丰产稳产。盛产期亩产油41.6 kg, 产量中等。 National approved variety (national S-SC-CO-007-2008) with high and stable fruit yield. The fruit shape is like a ball or orange. The rate of fresh seed to fresh fruit is 47.4%, the oil content in dry kernel is 48.6%. In the peak production period, 41.6 kg oil can be produced per mu.
	长林23号 Changlin No.23	浙江安吉 Anji, Zhejiang	国家审定良种(国S-SC-CO-008-2008), 果近橘形, 鲜果出籽率53.8%, 干仁含油率53.5%, 丰产稳产。盛产期亩产油能达到70.9 kg。 The national approved variety (national S-SC-CO-008-2008) has fruit nearly orange shape. The rate of seed to fresh fruit is 53.8%, and the oil content of dry kernel is 53.5%, with high and stable yield. The oil yield per mu can reach 70.9 kg in the peak production period.
	长林40号 Changlin No.40	浙江安吉 Anji, Zhejiang	国家审定良种(国S-SC-CO-011-2008), 果近梨形, 干出籽率25.2%, 出仁率63.1%, 干仁含油率50.3%, 高产稳产。盛产期亩产油能达到65.9 kg。 The national approved variety (National S-SC-CO-011-2008), the fruit is like pear shape, with a rate of dry seed to fresh fruit of 25.2%, a rate of dry kernel to dry seed of 63.1%, and an oil content in kernel of 50.3%. It has a high and stable yield. The oil yield per mu can reach 65.9 kg in the peak production period.
	长林53号 Changlin No.53	浙江安吉 Anji, Zhejiang	国家审定良种(国S-SC-CO-012-2008), 果梨形, 鲜果出籽率27.0%, 出仁率59.2%, 干仁含油率45.0%。盛产期亩产油能达到74.7 kg。 The national approved variety (national S-SC-CO-012-2008). The fruit is like pear shape, with the rate of fresh seed to fresh fruit of 27.0%, the rate of dry kernel to dry seed of 59.2%, and oil content in dry kernel of 45.0%. The oil yield per mu can reach 74.7 kg in the peak production period.
	长林95号 Changlin No.95	江西宜春 Yichun, Jiangxi	经过多地点区试, 果近球形, 鲜果出籽率64.91%, 干仁含油率42.96%, 产量中等。 The fruit shape is nearly a ball, the rate of fresh seed to fresh fruit is 64.91%, the oil content in dry kernel is 42.96%, and the fruit yield is medium.
小果油茶 <i>C. meiocarpa</i>	小果1号 Xiao No.1	江西分宜 Fenyi, Jiangxi	经过多地点区试, 果近橄榄型, 平均单果质量5.04 g, 鲜出籽率59.76%, 干出籽率48.94%。 The fruit shape is nearly olive, with an average single fruit weight of 5.04g. The rate of fresh seed to fresh fruit is 59.76%, and that of dry seed to fresh fruit is 48.94%.
	小果2号 Xiao No.2	江西分宜 Fenyi, Jiangxi	经过多地点区试, 长势旺, 果近橄榄型, 青色。 With vigorous growth. The fruit shape is nearly olive, and fruit color is green.
	小果3号 Xiao No.3	江西分宜 Fenyi, Jiangxi	经过多地点区试, 长势旺, 果近球形, 青色, 平均单果质量7.10 g, 鲜出籽率63.58%。 With vigorous growth. The fruit shape is nearly a ball, and fruit color is green. The average weight of single fruit is 7.10 g and the rate of fresh seed to fresh fruit is 63.58%.
	小果4号 Xiao No.4	浙江金华 Jinhua, Zhejiang	--
	小果D1号 Xiao No.D1	浙江金华 Jinhua, Zhejiang	--

式中: 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 杂交子代果实与油脂性状差异分析

表 3 表明: 油茶单果质量、鲜果出籽率、干籽

出仁率、种仁含油率及油脂中各脂肪酸成分含量在不同杂交组间均差异极显著 ($P < 0.01$), 意味着选择具有不同性状表现的无性系开展杂交, 可为油茶育种创制出变异丰富的育种群体。12 个杂交组合的平均单果质量、鲜果出籽率和干籽出仁率分别为 14.91 g、25.69% 和 60.79%, 变异系数分别为 36.29%、25.05% 和 11.40%。在油脂性状中,

表2 亲本巢式交配设计
Table 2 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53号 Changlin No.53	小果1号 Xiao No.1	7	长林10号 Changlin No.10	长林4号 Changlin No.4
2	长林53号 Changlin No.53	小果2号 Xiao No.2	8	长林10号 Changlin No.10	长林40号 Changlin No.40
3	长林53号 Changlin No.53	小果3号 Xiao No.3	9	长林10号 Changlin No.10	长林53号 Changlin No.53
4	长林4号 Changlin No.4	长林18号 Changlin No.18	10	长林40号 Changlin No.40	长林10号 Changlin No.10
5	长林4号 Changlin No.4	长林23号 Changlin No.23	11	长林40号 Changlin No.40	长林95号 Changlin No.95
6	长林4号 Changlin No.4	小果4号 Xiao No.4	12	长林40号 Changlin No.40	小果D1号 Xiao No.D1

种仁含油率、棕榈酸、棕榈烯酸、硬脂酸、油酸、亚油酸、亚麻酸和顺-11-二十碳烯酸含量的平均值分别是 39.99%、8.74%、0.12%、1.96%、78.66%、9.65%、0.36% 和 0.53%；变异系数分别为 17.62%、7.72%、24.76%、18.83%、3.62%、25.58%、27.24% 和 10.89%。在测定的 11 个性状中，单果质量的变异系数最高，单果质量的最高单株是最低单株的 6.2 倍；油酸含量的变

异系数最低，油酸含量的最高单株仅是最低单株的 1.28 倍。亚油酸、亚麻酸含量及鲜果出籽率亦具有较高的变异系数。进一步分析结果表明，除硬脂酸和亚油酸含量在母本间差异显著外 ($P < 0.05$)，各经济性状的变异来源主要存在于母本内父本间效应，均在 $P < 0.01$ 水平上差异显著。这与本研究中母本只包括普通油茶，父本中既有普通油茶亦有小果油茶的设置是一致的。

表3 油茶杂交子代经济性状方差分析结果
Table 3 Variance analysis of the economic traits of the F1 progeny

编号 Number	性状 Traits	变异来源 Sources of variation					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	误差 Error			
1	单果质量 Weight of single fruit/g	2.675 1	721.247**	365.287	9.273 4**	16.193	14.91	4.90~30.60	36.29
2	鲜果出籽率 Rate of dry seed to fresh fruit (RSF)/%	0.000 3	0.011**	0.024 5	0.002 2**	0.003 7	25.69	4.60~64.40	25.05
3	干籽出仁率 Rate of dry kernel to dry seed (RKS)/%	0.000 9	0.011 6**	0.066 0	0.002 1**	0.003 4	60.79	32.30~75.30	11.40
4	种仁含油率 Oil content of kernel (OC)/%	0.000 5**	0.045**	0.035 5	0.003 9**	0.003 5	39.99	16.30~53.60	17.62
5	棕榈酸C16:0 Palmitic acid/%	1.048 0	7.499**	4.649 6	0.216 2**	0.301 4	8.74	7.10~10.90	7.72
6	棕榈烯酸C16:1 Palmitoleic acid/%	0.000 4	0.005 1**	0.007 3	0.000 6**	0.000 6	0.12	0.06~0.33	24.76
7	硬脂酸C18:0 Stearic acid/%	0.040 5	4.307 9**	1.076 8*	0.024 8**	0.082 4	1.96	1.15~3.32	18.83
8	油酸C18:1 Oleic acid/%	6.193 1	216.880**	68.961 5	2.324 9**	5.126	78.66	65.60~83.90	3.62
9	亚油酸C18:2 Linoleic acid/%	2.604 3	199.578**	49.508*	1.422 7**	3.599 1	9.65	3.90~20.80	25.58
10	α -亚麻酸C18:3 Linolenic acid/%	0.004 2	0.150 8**	0.083 7	0.005 3**	0.006 9	0.36	0.10~0.83	27.24
11	顺-11-二十碳烯酸C20:1 Cis-11-eicosenoic acid/%	0.000 3	0.045 7**	0.028 0	0.001 0**	0.002 5	0.53	0.40~0.74	10.89

注：各性状的变异来源数值均为期望均方；*表示在 $P < 0.05$ 水平差异显著，**表示在 $P < 0.01$ 水平差异显著。

Note: The values of the sources of variation for traits are expected mean squares; * means significant difference at the 0.05 level, ** means significant difference at the 0.01 level.

进一步对差异显著的性状进行多重比较，结果（表4）显示：12个杂交组合中，单果质量最大的是种内杂交组合 10 × 4，其平均值为 19.62 g；

最小组合为种间杂交组合 40 × 小 D1，其平均值仅为 8.02 g，前者是后者的 2.45 倍，差异显著。种内杂交单果质量最低组合（40 × 95）的平均值为

16.33 g, 种间杂交单果质量最高组合 (53 × 小 3) 的平均值为 13.33 g。可见, 种内杂交单果质量均显著大于种间杂交组合。鲜果出籽率较高的组合是 40 × 95 和 4 × 23, 平均值分别为 29.38% 和 29.14%。种间杂交组合 53 × 小 1、53 × 小 2 和 53 × 小 3 鲜果出籽率略低, 与种内杂交组合 40 × 95 和 4 × 23 差异不显著; 4 × 小 4 和 40 × 小 D1 在鲜果出籽率上表现较差, 不具有好的杂交收益。组合 4 × 23 的干籽出仁率最高, 达到 65.64%;

其次是 10 × 4、40 × 95 和 4 × 18, 其平均值均高于 64%。与种内杂交组合相比, 大多数种间杂交组合的干籽出仁率均较低, 仅 53 × 小 2 和 40 × 小 D1 两个组合的干籽出仁率超过了 60%, 均值分别为 61.72% 和 61.00%。种仁含油率相对较高的组合分别是 4 × 23、4 × 18 和 40 × 95, 其平均值分别为 46.53%、45.05% 和 43.58%, 在该性状上表现出较好的杂交优势。

表 4 油茶杂交组合子代各经济性状及其多重比较

Table 4 Multiple comparison results of economic traits in F1 progeny

组合 Cross	单果质量 Weight of single fruit/g	鲜果出籽率 RSF/%	干籽出仁率 RKS/%	种仁含油率 OC/%	棕榈酸C16:0 Palmitic acid/%	棕榈烯酸C16:1 Palmitoleic acid/%
53 × 小1	11.78 ± 2.12 D	26.30 ± 3.98 ABC	58.84 ± 4.52 E	35.26 ± 8.64 EF	8.40 ± 0.73 EF	0.12 ± 0.02BCD
53 × 小2	10.01 ± 1.58 DE	28.73 ± 2.87 AB	61.72 ± 4.25 BCDE	40.43 ± 3.72 CDE	8.43 ± 0.36 EF	0.11 ± 0.02 CDEF
53 × 小3	13.33 ± 5.71 D	26.51 ± 11.82 ABC	58.20 ± 6.39 E	35.16 ± 8.59 F	9.60 ± 0.69 A	0.14 ± 0.06 AB
4 × 18	19.14 ± 3.92 AB	25.03 ± 2.71 BCD	64.07 ± 3.32 ABCD	45.05 ± 1.63 AB	9.39 ± 0.51 AB	0.14 ± 0.02 A
4 × 23	17.65 ± 4.33 ABC	29.14 ± 11.82 A	65.64 ± 5.14 A	46.53 ± 4.82 A	8.82 ± 0.71 CD	0.09 ± 0.02 G
4 × 小4	10.80 ± 2.07 D	23.42 ± 4.29 CD	50.50 ± 10.61 F	36.80 ± 6.43 EF	9.16 ± 0.43 BC	0.11 ± 0.02 CDEF
10 × 4	19.62 ± 4.25 A	25.58 ± 3.32 ABC	65.18 ± 4.92 AB	42.44 ± 5.43 BCD	8.75 ± 0.57 DE	0.10 ± 0.01 EFG
10 × 40	17.40 ± 5.80 ABC	22.74 ± 2.35 CD	60.02 ± 4.90 E	38.47 ± 6.42 EF	8.29 ± 0.47 F	0.12 ± 0.01 CDE
10 × 53	17.92 ± 3.37 ABC	26.67 ± 3.67 ABC	60.64 ± 4.19 DE	39.48 ± 4.35 DE	8.47 ± 0.42 DEF	0.10 ± 0.01 FG
40 × 10	16.94 ± 4.93 BC	21.07 ± 4.07 D	59.18 ± 6.62 E	38.29 ± 6.47 EF	8.56 ± 0.51 DEF	0.11 ± 0.02 DEFG
40 × 95	16.33 ± 3.18 C	29.38 ± 5.00 A	64.48 ± 5.26 ABC	43.58 ± 6.22 ABC	8.66 ± 0.55 DE	0.12 ± 0.02 ABC
40 × 小D1	8.02 ± 2.55 E	23.74 ± 4.48 CD	61.00 ± 4.69 CDE	38.35 ± 6.70 EF	8.39 ± 0.35 EF	0.12 ± 0.01 ABC
组合 Cross	硬脂酸C18:0 Stearic acid/%	油酸C18:1 Oleic acid/%	亚油酸C18:2 Linoleic acid/%	α-亚麻酸C18:3 Linolenic acid/%	顺-11-二十碳烯酸C20:1 Cis-11-eicosenoic acid/%	
53 × 小1	1.67 ± 0.20 E	78.63 ± 2.75 C	10.24 ± 2.21 BCD	0.38 ± 0.07 BC	0.57 ± 0.06 AB	
53 × 小2	1.68 ± 0.14 E	78.69 ± 1.58 C	10.17 ± 1.32 BCD	0.34 ± 0.05 CDE	0.57 ± 0.03 A	
53 × 小3	1.68 ± 0.21 E	74.54 ± 4.39 E	13.32 ± 3.44 A	0.45 ± 0.16 A	0.54 ± 0.06 BCD	
4 × 18	1.88 ± 0.17 CD	76.81 ± 0.80 D	10.86 ± 0.44 BC	0.42 ± 0.03 AB	0.50 ± 0.02 EF	
4 × 23	2.06 ± 0.17 BC	78.64 ± 1.95 C	9.57 ± 1.46 D	0.32 ± 0.05 DEF	0.50 ± 0.05 EF	
4 × 小4	1.74 ± 0.24 DE	76.61 ± 2.11 D	11.35 ± 1.90 B	0.46 ± 0.12 A	0.56 ± 0.07 ABC	
10 × 4	1.81 ± 0.19 DE	78.88 ± 2.35 BC	9.68 ± 2.07 CD	0.29 ± 0.06 EF	0.49 ± 0.05 EF	
10 × 40	2.42 ± 0.61 A	80.67 ± 1.83 A	7.63 ± 1.91 E	0.34 ± 0.05 CDE	0.52 ± 0.03 DE	
10 × 53	2.03 ± 0.19 BC	80.35 ± 1.54 AB	8.15 ± 1.27 E	0.33 ± 0.04 CDEF	0.57 ± 0.05 A	
40 × 10	2.33 ± 0.32 A	80.66 ± 1.56 A	7.44 ± 1.48 E	0.37 ± 0.09 BCD	0.53 ± 0.06 CD	
40 × 95	2.13 ± 0.30 B	78.69 ± 1.73 C	9.62 ± 1.47 CD	0.28 ± 0.06 F	0.49 ± 0.04 EF	
40 × 小D1	2.05 ± 0.24 BC	80.80 ± 1.56 A	7.79 ± 1.31 E	0.34 ± 0.07 CDE	0.49 ± 0.04 F	

注: 表中数据均为平均值 ± 标准差, 同列不同大写字母表示在 $P < 0.01$ 水平差异显著。

Notes: The different letters of LSD indicate the significant difference at 0.01 level

在脂肪酸成分中, 棕榈酸含量较高的组合是 53 × 小 3 和 4 × 18, 分别占脂肪酸成分的

9.60% 和 9.39%。硬脂酸含量较高的组合为 10 × 40 和 40 × 10, 种间杂交组合 40 × 小 D1 在该性

状上表现较好, 与其余种间杂交组合差异显著。油茶脂肪酸的主要成分油酸含量较高的组合为 $40 \times$ 小 D1、 10×40 、 40×10 和 10×53 , 分别为 80.80%、80.67%、80.66% 和 80.35%, $53 \times$ 小 3 油酸含量最低, 仅为 74.54%, 显著低于其余组合。 $53 \times$ 小 3 的亚油酸含量最高, 显著高于其他组合的平均值, 在该性状上具有较高的杂交收益。棕榈烯酸、 α -亚麻酸和顺-11-二十碳烯酸在油茶油脂中绝对含量较低, 其含量在组合间的变异范围较小。 $53 \times$ 小 3 和 4×18 的棕榈烯酸含量相当, 在所有组合中最高, 平均值均为 0.14%, $4 \times$ 小 4 和 $53 \times$ 小 3 在所有组合中 α -亚麻酸含量最高, 分别为 0.46% 和 0.45%; $53 \times$ 小 2、 $53 \times$ 小 1 和 10×53 的顺-11-二十碳烯酸含量均达到了 0.57%, 在该性状上具有较好的杂交优势。综上所述, 组合 4×23 在鲜果出籽率、干籽出仁率、种仁含油率等指标上均表现出优势, 组合 $53 \times$ 小 3 在棕榈酸、棕榈烯酸、亚油酸和 α -亚麻酸等油茶

油脂性状关键指标上显示出优势, 组合 10×40 在硬脂酸、油酸等油脂性状上也表现出一定的优势。种间杂交组合 $4 \times$ 小 4 和 $40 \times$ 小 D1 在单果质量、鲜果出籽率、干籽出仁率和种仁含油率等性状上均较差, 不具有很好的性状表现。

2.2 杂交组合亲本一般配合力 (GCA) 和特殊配合力 (SCA) 分析

GCA 和 SCA 是杂交代育种中亲本选择的重要依据, GCA 和 SCA 值越大, 获得的遗传增益更好^[23]。杂交亲本 GCA 分析结果 (表 5) 表明: 母本长林 53 号在鲜果出籽率和亚油酸含量的 GCA 最高, 分别为 1.49 和 1.59; 长林 4 号在种仁含油率、棕榈酸和亚油酸含量上具有较高的 GCA, 其杂交子代表现出良好的遗传增益; 长林 10 号在单果质量、干籽出仁率和油酸含量的 GCA 较高, 分别为 3.40、1.16 和 1.30; 长林 40 号的杂交子代在油酸和硬脂酸含量有较好的遗传增益。

表 5 各组合母本 GCA 估计值

Table 5 Estimated GCA of female parent of each cross

亲本 Parents	单果质量 Weight of single fruit	鲜果出 籽率 RSF	干籽出 仁率 RKS	种仁含 油率 OC	棕榈酸 C16:0Palmitic acid	棕榈烯酸 C16:1Palmitoleic acid	硬脂酸 C18:0Stearic acid	油酸 C18:1Oleic acid	亚油酸 C18:2Linoleic acid	α -亚麻酸 C18:3Linolenic acid	顺-11-二十碳烯酸 C20:1Cis-11-eicosenoic acid
长林53号 Changlin No.53	-3.20	1.49	-1.20	-3.04	0.07	0.01	-0.28	-1.38	1.59	0.03	0.03
长林4号 Changlin No.4	0.95	0.17	-0.72	2.81	0.38	0.00	-0.06	-1.31	0.94	0.04	-0.01
长林10号 Changlin No.10	3.40	-0.70	1.16	0.15	-0.24	-0.01	0.13	1.30	-1.17	-0.04	0.00
长林40号 Changlin No.40	-1.15	-0.96	0.76	0.08	-0.21	0.00	0.21	1.39	-1.37	-0.03	-0.02

12 个杂交组合的各经济性状的 SCA (表 6) 表明: 种内杂交组合在果实性状的 SCA 多高于种间杂交组合。种间杂交组合 $4 \times$ 小 4 在 4 个果实性状的 SCA 分别为 -5.06、-2.44、-9.57 和 -5.99, 该组合在果实性状上的综合表现显著低于其他组合相应的 SCA。因此, 通过 $4 \times$ 小 4 种间杂交选育聚合大果和高出籽率优良性状的新种质的概率极低。种内杂交组合 4×23 和 40×95 在单果质量、鲜果出籽率、干籽出仁率和种仁含油率 4 个性状上均具有较高的 SCA 值, 4×23 在这 4 个性状

的 SCA 分别为 1.79、3.27、5.57 和 3.74, 40×95 在这 4 个性状的 SCA 分别为 2.57、4.65、2.93 和 3.51, 这两个组合在这 4 个性状上的综合表现明显优于其他种内种间组合, 是创制聚合多个果实优良性状新种质的首选组合。种间杂交组合 $53 \times$ 小 2 在鲜果出籽率、干籽出仁率和种仁含油率上具有较高的 SCA, $53 \times$ 小 3 在单果质量的 SCA 具有较好表现, 这 2 个组合在通过种间杂交创制具备优良果实性状的种质中可深入探索和应用。

表 6 组合双亲间的 SCA 效应值

Table 6 SCA value between female and male parents of different combinations

组合 Cross	单果质量 Weight of single fruit	鲜果 出籽率 RSF	干籽 出仁率 RKS	种仁 含油率 OC	棕榈酸 C16:0 Palmitic acid	棕榈烯酸 C16:1 Palmitoleic acid	硬脂酸 C18:0 Stearic acid	油酸 C18:1 Oleic acid	亚油酸 C18:2 Linoleic acid	α -亚麻酸 C18:3 Linolenic acid	顺-11-二十碳烯酸 C20:1 Cis-11-eicosenoic acid
53 × 小1	0.08	-0.88	-0.74	-1.69	-0.41	0.00	-0.01	1.34	-1.00	-0.01	0.01
53 × 小2	-1.70	1.55	2.13	3.48	-0.38	-0.01	0.00	1.41	-1.08	-0.05	0.01
53 × 小3	1.62	-0.67	-1.39	-1.79	0.79	0.01	0.00	-2.75	2.08	0.06	-0.02
4 × 18	3.27	-0.83	4.00	2.25	0.27	0.03	-0.01	-0.54	0.27	0.02	-0.02
4 × 23	1.79	3.27	5.57	3.74	-0.30	-0.02	0.17	1.29	-1.03	-0.08	-0.02
4 × 小4	-5.06	-2.44	-9.57	-5.99	0.04	0.00	-0.15	-0.74	0.76	0.06	0.04
10 × 4	1.31	0.58	3.23	2.31	0.24	0.00	-0.28	-1.09	1.19	-0.03	-0.04
10 × 40	-0.92	-2.26	-1.92	-1.66	-0.21	0.01	0.34	0.71	-0.85	0.02	-0.01
10 × 53	-0.39	1.68	-1.30	-0.65	-0.03	-0.01	-0.06	0.38	-0.34	0.01	0.04
40 × 10	3.18	-3.66	-2.37	-1.78	0.02	-0.01	0.16	0.61	-0.84	0.04	0.03
40 × 95	2.57	4.65	2.93	3.51	0.13	0.01	-0.04	-1.36	1.34	-0.05	-0.01
40 × 小D1	-5.74	-0.99	-0.55	-1.72	-0.15	0.01	-0.12	0.75	-0.50	0.01	-0.02

种间杂交组合在油脂性状, 尤其是油酸或亚油酸含量的 SCA 比种内杂交组合具有更好的表现。53 × 小2 和 53 × 小1 油酸含量的 SCA 较高, 分别为 1.41 和 1.34, 创制高油酸含量种质可优先考虑这 2 个组合。53 × 小3 亚油酸含量的 SCA 较高, 在以亚油酸含量为育种目的杂交育种中优先使用该杂交组合。种内杂交组合 4 × 23 和 40 × 95 分别在油酸和亚油酸含量上的 SCA 较高。结合亲本组合的 GCA 值和 SCA 值, 种内杂交组合 4 × 23 在果实性状和部分油脂性状均表现出较好的配合力, 具有较高的遗传增益, 种间杂交组合 53 × 小2 在鲜果出籽率和油酸含量、53 × 小3 在单果质量、棕榈酸和亚油酸含量等性状上表现出较高的配合力。

2.3 杂交亲本的遗传参数估计

分析父母本方差的相对大小 (σ_F^2/σ_M^2) 和加性/非加性遗传方差的相对大小 (V_A/V_D) 可说明各经济性状的遗传控制方式。表 7 表明: 除硬脂酸和亚油酸含量的母本方差与父本方差相当外, 其余经济性状的父本方差均显著高于母本方差, 其 σ_F^2/σ_M^2 最低的性状为单果质量, 比值达 0.34, 说明父本比母本对子代经济性状变异的贡献率更大, 这与方差分析结果一致 (表 3)。除硬脂酸、油酸和亚油酸之外的 8 个经济性状的非加性遗传方差均明显高于加性遗传方差, 非加性遗传方差占遗传方差的比例超过 66.06%, 说明在本研究的所有杂交组合中, 单果质量、鲜果出籽率、干籽出仁率、种仁含油率、棕榈酸、棕榈烯酸、 α -亚麻酸和顺-11-二十碳

烯酸 8 个经济性状均以非加性基因效应控制为主。因此, 在以相关性状为目的的杂交育种中, 双亲间的 SCA 的评估很重要。

遗传力是反映遗传变量占表型变量的比率, 是选择育种中确定亲本, 估算遗传增益的重要参数^[24]。结果 (表 7) 表明: 本研究中所有性状的家系遗传力范围为 0.025 0~0.896 5, 单株遗传力范围为 0.243 9~0.997 8。亚油酸、硬脂酸和油酸含量的家系遗传力普遍高于其它经济性状, 分别为 0.896 5、0.885 1 和 0.694, 这 3 个性状主要受遗传因素的影响, 由基因控制, 受环境条件影响较小。说明通过家系选择, 这些性状可以获得较好的改良。鲜果出籽率的遗传力最小, 主要受环境条件影响。杂交子代所测定的硬脂酸、油酸和亚油酸的家系遗传力和单株遗传力相对较高, 故在油茶遗传改良中, 以脂肪酸经济性状为育种目标, 进行优良杂交组合或优良单株选择均可以获得更高的遗传增益。

3 讨论

在育种工作中, 估测杂交亲本的 GCA 和 SCA, 可根据育种目的有效筛选最优亲本和最佳组合, 从而提高育种效率^[25-27]。本研究选取处于盛产期的种内杂交子代和种间杂交子代为研究对象开展遗传分析, 旨在揭示普通油茶与小果油茶种间杂交育种的可行性及亲本选配规律, 为种间杂交育种策略提供理论基础。齐明^[28]在杉木杂交育种的研究中发现, 亲本 GCA 评估比亲本间 SCA 评估更重

表 7 油茶各经济性状的遗传参数

Table 7 Genetic parameters of economic characters of *C. oleifera*

遗传参数 Genetic parameters	单果质量 Weight of single fruit	鲜果出籽率 RSF	干籽出仁率 RKS	种仁含油率 OC	棕榈酸 C16:0 Palmitic acid	棕榈烯酸 C16:1 Palmitoleic acid	硬脂酸 C18:0 Stearic acid	油酸 C18:1 Oleic acid	亚油酸 C18:2 Linoleic acid	α -亚麻酸 C18:3 Linolenic acid	顺-11-二十碳烯酸 C20:1 Cis-11-eicosenoic acid
母本方差 σ_F^2 Female parent variance	3.955 1	-0.000 2	-0.000 6	0.000 1	0.031 7	0.000 0	0.035 9	1.644	1.667 4	0.000 7	0.000 2
父本方差 σ_M^2 Male parent variance	11.653 6	0.000 7	0.002 1	0.001 1	0.145 0	0.000 2	0.033 3	2.134	1.535 1	0.002 6	0.000 9
环境方差 σ_e^2 Environmental variance	15.678 0	0.003 6	0.003 3	0.003 5	0.300 3	0.000 6	0.078 5	4.955	3.455 8	0.006 8	0.002 4
加性遗传方差 V_A Additive genetic variance	15.820 4	-0.000 8	-0.002 4	0.000 4	0.126 6	-0.000 1	0.143 6	6.574	6.669 8	0.003 0	0.000 8
非加性遗传方差 V_D Non-additive genetic variance	30.794 0	0.003 6	0.010 8	0.003 8	0.453 3	0.001 0	-0.010 5	1.960	-0.529 5	0.007 3	0.002 6
遗传方差 V_g Genetic variance	46.614 4	0.002 8	0.008 4	0.004 3	0.579 9	0.000 9	0.133 1	8.534	6.140 3	0.010 3	0.003 4
表型方差 V_p Phenotypic variance	62.292 4	0.006 4	0.011 7	0.007 7	0.880 2	0.001 5	0.211 6	13.49	9.596 0	0.017 0	0.005 8
全同胞家系遗传力 H^2 Heritability of full-sib families	0.453 7	0.025 0	0.031 6	0.254 9	0.352 9	0.136 2	0.885 1	0.694	0.896 5	0.383 6	0.343 5
全同胞单株遗传力 h^2 Heritability of single plant	0.997 8	0.243 9	0.625 0	0.504 3	0.740 7	0.479 4	0.936 8	0.865	0.962 0	0.658 1	0.613 0

要。林萍等^[13]在普通油茶种内杂交育种研究中同样证实了该结论。本研究结果表明,当同时分析种内和种间杂交组合时,组合间的差异主要来源于双亲间的 SCA,表明在开展种间杂交时组合 SCA 的评估更重要,可作为优先考虑的因素。本研究中以长林 53 号为母本的种间杂交组合为例,长林 53 号的单果质量、干籽出仁率和种仁含油率的 GCA 在所有母本中均最低,但以长林 53 号为母本的种间杂交组合分别在这 3 个性状上具有较高的 SCA。结合长林 53 号果实大和小果油茶出籽率高的特点,双亲的优良性状分别在 3 个种间组合中获得了良好的遗传增益。因此,在开展普通油茶和小果油茶的杂交中,想要选育果实较大、出籽率高的新品种,首先需要考虑的是亲本的 SCA 效应,再考虑亲本的 GCA。

优树选择和子代测定是林木育种最基本的方法^[29-31]。通过杂交子代的遗传力测定进行优良家系或优良单株选育,可大大提高选择育种的效率^[32-34]。

遗传力的理论值一般为 0~1,遗传力越高,说明该性状变异受环境因素影响越小,遗传能力越强^[35]。本次实验首次尝试了选择油茶种间与种内亲本进行杂交测定遗传力,根据本研究的遗传效应评估值,发现油茶的经济性状主要受非加性遗传效应影响。绝大多数经济性状的父本方差大于母本的方差,父本对子代变异的贡献值更大。林萍等^[13]对油茶杂交子代幼龄时期的遗传力进行研究,发现各经济性状主要受环境影响较大,遗传控制力度较弱,通过筛选优良家系作为优良品种选育的策略是不可取的,在全同胞家系内选择优良单株培育成优良品种的效率更高。本研究发现,进入盛产期后油茶各性状的遗传力显著升高,尤其是硬脂酸、油酸、亚油酸含量等油脂性状主要受遗传控制,受环境影响较小。

综合考虑亲本配合力和各性状的遗传控制模式,普通油茶种内杂交组合 4 × 23 在以单果质量、鲜果出籽率、干籽出仁率、种仁含油率和油酸含量等性状为育种目标时可作为优选杂交组合。普

通油茶和小果油茶的种间杂交组合 53 × 小 3 可在单果质量、棕榈酸、亚油酸和 α-亚麻酸含量育种中加以利用; 组合 53 × 小 2 在鲜果出籽率、干籽出仁率、种仁含油率和油酸含量上具有育种优势。本研究以油茶杂交子代成林为材料, 首次对油茶种间杂交的亲本配置及遗传效应开展了分析评估, 为油茶种间杂交策略提供了理论基础, 为科学指导普通油茶与小果油茶种间杂交育种提供了理论指导。

4 结论

本研究以油茶种内杂交(普通油茶 × 普通油茶)和种间杂交(普通油茶 × 小果油茶)家系为研究对象, 研究子代经济性状的遗传变异规律, 解析亲本及亲本组合对子代经济性状的影响。研究发现, 杂交子代经济性状在家系间存在极显著的差异, 且变异主要来源于父本效应。随着树龄的增长, 油茶的多数经济性状主要受遗传控制, 环境因素影响较小。遗传效应分析表明, 硬脂酸、油酸和亚油酸含量主要受加性遗传控制, 其余 8 个经济性状的非加性遗传方差显著高于加性遗传方差。比较种内和种间杂交亲本配合力的差异表明, 组合间的差异主要来源于双亲间的 SCA, 因此, 在油茶杂交育种中, 尤其是开展种间杂交时, 应将双亲 SCA 值的估测放在首位。单株遗传力显著高于家系遗传力, 因此, 油茶杂交育种中应采用全同胞家系内选择优良单株的育种策略。

参考文献:

- [1] 姚小华, 王开良, 任华东, 等. 油茶资源与科学利用研究[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- [2] 姚小华, 林 萍, 王开良. 与油茶种仁油中亚麻酸含量相关的关键 SNP 分子标记及其应用: 10442342.4 [P]: 2020-07-28.
- [3] ZHANG D, JIN Q, XUE Y, *et al.* Nutritional value and adulteration identification of oil-tea camellia seed oil[J]. *China Oils and Fats*, 2013, 38(8): 47-50.
- [4] CHEN D, FENG Z, ZHANG C. Comparison of fatty acid compositions of tea seed oil and oil-tea camellia seed oil[J]. *China Oils and Fats*, 2011, 36(3): 69-71.
- [5] 国家林业和草原局对“推进油茶产业高质量发展 保障国家食用油料安全的建议”复文[J]. *中国林业产业*, 2021, 18(4): 24-25.
- [6] 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.
- [7] 刘跃祥. 木本油料产业的国家粮油安全战略[J]. *中国林业产业*, 2014, 11 (1): 76-78.
- [8] CHOUDHARY P, SINGH N B, VERMA A. Genetic analysis in intra- and inter-specific crosses of tree willows[J]. *Indian Journal of Genetics & Plant Breeding*, 2015, 75(3): 372-378.
- [9] ZHAO N, MIAO Y, XUE D, *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.
- [10] WU H X, HALLINGBCK H R, LEOPOLDO S. Performance of seven tree breeding strategies under conditions of inbreeding depression[J]. *G3:Genes Genomes Genetics*, 2019, 6(3): 529-540.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 林 萍, 姚小华, 滕建华, 等. 油茶杂交子代幼林生长性状的遗传分析[J]. *经济林研究*, 2016, 34 (1): 6-11.
- [15] 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.
- [16] DE RESENDE BARONI G, DE PIERE C, FURTADO E L, *et al.* Genetic parameters of Eucalyptus pilularis resistance to rust in controlled and field conditions[J]. *Australasian Plant Pathology: Journal of the Australasian Plant Pathology Society*, 2020, 49(5): 65-68.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 周长富, 姚小华, 林 萍, 等. 油茶种子发育过程组分含量动态研究[J]. *中国油料作物学报*, 2013, 35 (6): 680-685.
- [20] 唐启义. DPS 数据处理系统[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [21] 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, 25 (4): 2-7.
- [22] 续九如. 林木数量遗传学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [23] JASSIML A H, AZIZ J M. Estimation of the combining ability and the gene action for several of genotypes for Flax (*Linum usitatissimum* L.) [J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, 904(1): 12018-12025.
- [24] 吴 裕, 毛常丽. 树木育种学中遗传力、重复力和遗传增益的概念及思考[J]. *热带农业科技*, 2012, 35 (1): 47-50.
- [25] SHIPN, SINGH, PARMAR, *et al.* Heterosis and combining ability studies for yield and quality traits in bottle gourd (*Lagenaria siceraria* (Mol.) Standl.) [J]. *Environment and Ecology*, 2018, 36(3): 798-807.
- [26] QUAMRUZZAMAN A, SALIM M, AKHTER L, *et al.* Heterosis, combining ability and gene action for yield in bottle gourd[J]. *American Journal of Botany*, 2020, 11(5): 642-652.
- [27] 谭小梅, 金国庆, 邵纪清, 等. 马尾松巢式交配子代生长和木材基本密度遗传分析[J]. *林业科学*, 2011, 47 (6): 30-35.
- [28] 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.
- [29] ZHANG G. Generation of genetic determination of Fraxinus mandshurica seed orchard of half-sib and superior family selection[J]. *Forestry Science & Technology*, 2014, 39(4): 5-8.
- [30] YU D, ACADEMY C F. Selection and breeding of olive superior trees in Longnan of Gansu Province [J]. *Nonwood Forest Re-*

search, 2013, 31(3): 86-92.

- [31] TAO S. The research on the superior tree selection and seed breeding technology of *Chosenia arbutifolia*[J]. *Forestry Science & Technology*, 2014, 39(1): 29-31.
- [32] JIAN-DE O U, BUREAU M F. Combination selection of excellent families and plus trees of *Phoebe bournei*[J]. *Journal of Southwest Forestry University*, 2015, 35(1): 33-37.
- [33] LIU H. Selection of excellent families and individual plants of Korean *koraiensis*[J]. *Forestry Science & Technology*, 2019, 44(6): 9-11.
- [34] 邓玉华. 大叶栎优良种源与家系选择研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2019.
- [35] CHAOQUN D U, YEZHOU X U, YANG D, *et al.* Variations for growth and oleoresin traits of half-sib families of *Pinus elliotii*[J]. *Journal of Forest and Environment*, 2017, 37(4): 423-428.

Genetic Analysis of the Fruit and Oil Related Traits on Hybrid Offspring of Nested Mating of *Camellia oleifera*

CHAI Jing-yu^{1,2}, WANG Kai-liang¹, YAO Xiao-hua¹, TENG Jian-hua³, LIN Ping¹

(1. Research Institute of Subtropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Key Laboratory of Zhejiang Province, Hangzhou 311400, Zhejiang, China; 2. Graduate School of Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, Jiangsu, China; 3. Dongfanghong Forest Farm of Zhejiang Province, Jinhua 321025, Zhejiang, China)

Abstract: [Objective] To Select the optimal parent and parental combination for improving breeding efficiency and maximize genetic gain in oil-tea hybrid breeding. [Method] In this study, 11 fruit and oil related traits were detected in the intraspecific and interspecific hybrid progeny in nest design, including weight of single fruit, seed rate of fresh fruit, kernel rate of dry seeds, oil content of kernel and seven kinds of fatty acid content in the oil. The general combining ability (GCA) of female parent and special combining ability (SCA) of hybridized combination were analyzed. The genetic control modes for 11 traits were analyzed. [Result] There were highly significant differences in 11 traits among 12 families. These differences mainly caused by paternal effects at the level of $P < 0.01$, and only the differences of stearic acid and linoleic acid content were affected by maternal effects at the level of $P < 0.05$. The GCA and SCA of the parents were comprehensively analyzed. The intraspecific hybridization 'Changlin No.4' × 'Changlin No.23' showed better combining ability in weight of single fruit, seed rate of fresh fruit, kernel rate of dry seeds, oil content of kernel and oleic acid content in oil. The interspecific hybridization of *Camellia oleifera* and *C. meiocarpa* 'Changlin No. 53' × 'Xiao No.3' had a better performance on weight of single fruit, palmitic acid, linoleic acid and linolenic acid content. The cross of 'Changlin No. 53' × 'Xiao No.2' had advantages in seed rate of fresh fruit, kernel rate of dry seeds, oil content of kernel and oleic acid content. The analysis of genetic effect showed that stearic acid, oleic acid and linoleic acid content were mainly controlled by additive genetic effect, while the other eight traits were mainly influenced by non-additive genetic effect. The heritability of 11 economic traits of per plant was greater than that of families. The breeding strategy of selecting excellent individual plants within the full-sib families should be adopted in the cross breeding of *C. oleifera*. [Conclusion] The economic traits of *C. oleifera* are mainly controlled by inheritance, and less affected by environment. Weight of single fruit, seed rate of fresh fruit, kernel rate of dry seeds, oil content of kernel, palmitic acid, palmitoleic acid, linolenic acid and cis-11-eicosenoic acid content were mainly controlled by non-additive gene effect, and the influence of additive gene effect is relatively low. In interspecific hybridization, SCA evaluation of hybridized combination should be given priority. In this study, we explored the parental allocation and genetic effects of interspecific hybridization between *C. oleifera* and *C. meiocarpa*, which laid a theoretical foundation for guiding interspecific hybridization breeding of *C. oleifera*.

Keywords: *Camellia oleifera*; *C. meiocarpa*; nest mating design; economic traits; general combining ability; special combining ability