

## 普通油茶全双列杂交子代种仁含油率及其相关性状的遗传分析

王安妮<sup>1,2</sup>, 王开良<sup>2</sup>, 柴静瑜<sup>2</sup>, 钟慧奇<sup>2</sup>, 滕建华<sup>3</sup>, 张磊<sup>1</sup>, 俞文仙<sup>4</sup>, 林萍<sup>2</sup>

(1. 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; 2. 中国林业科学研究院 亚热带林业研究所 林木遗传育种国家重点实验室/全省林木育种重点实验室, 浙江 杭州 311400; 3. 浙江省金华市婺城区 东方红林场, 浙江 金华 321025; 4. 杭州市富阳区农业农村局, 浙江 杭州 311400)

**摘要:** 【目的】研究普通油茶 *Camellia oleifera* 杂交子代种仁油脂相关性状的遗传变异规律, 为杂交育种中的亲本选配提供依据。【方法】以普通油茶 5 个优良无性系为亲本进行 5×5 全双列杂交 (无自交), 测定 20 个杂交子代家系的种仁含油率、木质素、纤维素和半纤维素质量分数, 分析性状间的相关性, 明确亲本的一般配合力和杂交组合的特殊配合力, 解析各性状的遗传变异规律。【结果】20 个家系的种仁含油率为 252.30~537.08 mg·g<sup>-1</sup>, 木质素质量分数为 49.64~222.20 mg·g<sup>-1</sup>, 纤维素质量分数为 42.11~130.43 mg·g<sup>-1</sup>, 半纤维素质量分数为 3.72~111.96 mg·g<sup>-1</sup>。种仁含油率、木质素、纤维素和半纤维素质量分数在 20 个家系间均存在极显著差异 ( $P<0.01$ ), 且 4 个性状间存在极显著的相关性 ( $P<0.01$ ), 含油率与木质素质量分数相关性系数最高, 为 -0.47。除木质素质量分数的特殊配合力和含油率的反交效应外, 亲本在 4 个性状中的一般配合力、特殊配合力和反交效应均差异极显著 ( $P<0.01$ )。种仁含油率和半纤维素质量分数受加性效应和显性效应共同控制, 且显性方差大于加性方差; 木质素质量分数主要受加性效应控制, 纤维素质量分数则主要受显性效应控制。4 个性状的广义遗传力为 7.86%~14.03%, 狭义遗传力为 0~14.03%, 均受到较强的环境效应影响。【结论】根据配合力分析结果, 筛选出 2 个普通油茶优良亲本 ‘长林 4 号’ 和 ‘长林 40 号’, 2 个优良组合 ‘长林 40 号’ × ‘长林 95 号’ 和 ‘长林 4 号’ × ‘长林 53 号’。表 8 参 35

**关键词:** 普通油茶; 全双列杂交; 油脂性状; 遗传分析

中图分类号: S794.4 文献标志码: A 文章编号: 2095-0756(2024)00-0001-10

## Genetic analysis of kernel oil content and related traits in complete diallel progenies of *Camellia oleifera*

WANG Anni<sup>1,2</sup>, WANG Kailiang<sup>2</sup>, CHAI Jingyu<sup>2</sup>, ZHONG Huiqi<sup>2</sup>, TENG Jianhua<sup>3</sup>,  
ZHANG Lei<sup>1</sup>, YU Wenxian<sup>4</sup>, LIN Ping<sup>2</sup>

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

**Abstract:** [Objective] The objective is to study the genetic variation patterns of oil-related traits in complete diallel progenies of *Camellia oleifera*, and to provide basis for parental selection in cross breeding. [Method] 5×5 complete diallel hybridization (no self-crossbreeding) was carried out with 5 excellent clones of *C. oleifera*

收稿日期: 2023-12-15; 修回日期: 2024-06-06

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2022YFD2200401); 浙江省林木新品种选育重大科技专项 (2021C02070-2)

作者简介: 王安妮 (ORCID: 0009-0002-3143-9959), 从事木本油料遗传育种研究。E-mail: 962179770@qq.com。通信作者: 林萍 (ORCID: 0000-0002-0376-7210), 副研究员, 博士, 从事木本油料遗传育种研究。E-mail: linping80@126.com

as parents, and the oil content, lignin, cellulose and hemicellulose contents of 20 hybrid families were determined. The correlation among traits was analyzed, the general combining ability of parents and the specific combining ability of hybrid combinations were determined, and the genetic variation rules among traits were analyzed. [Result] The kernel oil content of 20 families ranged from 252.30 to 537.08  $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ , the lignin content was from 49.64 to 222.20  $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ , the cellulose content was from 42.11 to 130.43  $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ , and the hemicellulose content was from 3.72 to 111.96  $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ . There were significant differences in oil, lignin, cellulose and hemicellulose contents of kernels among 20 families ( $P < 0.01$ ), and there were significant correlations ( $P < 0.01$ ) among the 4 traits. The correlation coefficient between oil content and lignin content was the highest ( $-0.47$ ). Except for the specific combining ability of lignin content and reciprocal cross effect of oil content, the general combining ability, specific combining ability and reciprocal cross effect of the parents were significantly different ( $P < 0.01$ ) in the 4 traits. Oil and hemicellulose contents of kernels were jointly controlled by additive and dominant effect, and dominant variance was greater than additive variance. The lignin content was mainly affected by additive effect and the cellulose content was mainly controlled by dominant effect. The broad-sense heritability of the 4 traits ranged from 7.86% to 14.03%, and the narrow-sense heritability was 0 to 14.03%, all of which were strongly influenced by environmental factors. [Conclusion] Based on the analysis of combining ability, 2 excellent parents ‘Changlin No. 4’ and ‘Changlin No. 40’, as well as 2 excellent combinations ‘Changlin No. 40’  $\times$  ‘Changlin No. 95’ and ‘Changlin No. 4’  $\times$  ‘Changlin No. 53’ are selected. [Ch, 8 tab. 35 ref.]

**Key words:** *Camellia oleifera*; complete diallel cross; oil-related traits; genetic analysis

油茶广义上是山茶科 Theaceae 山茶属 *Camellia* 中种子油脂含量较高的一类植物，是世界四大木本油料树种之一。其中，普通油茶 *Camellia oleifera* 是栽培面积最大、最重要的物种。科学经营油茶有保持水土、涵养水源、增加碳汇和调节气候等生态效益，具有重要的生态价值；同时茶油中不饱和脂肪酸高达 90% 以上，被誉为“油中软黄金”，具有很高的营养和经济价值<sup>[1]</sup>，因此油茶产业是中国山区林农脱贫致富的重要产业。良种是油茶产业健康发展的基础和关键。提高果实产量，发掘高含油率的种质是选育油茶高产良种的重要途径之一。前人对普通油茶的选育大多以果实产量为主要育种目标，种仁含油率的分析和评估还处于起步阶段<sup>[2]</sup>。研究普通油茶种仁含油率等经济性状的遗传变异规律，可为油茶高含油率种质创制与筛选提供科学依据，对油茶高产良种选育具有重要意义<sup>[3]</sup>。

杂交育种是林木育种的有效技术之一，通过杂交创造新的变异，可有效缩短育种周期<sup>[4]</sup>。杂交育种策略在桉树 *Eucalyptus robusta*<sup>[5]</sup>、杨树 *Populus* spp.<sup>[6]</sup>、马尾松 *Pinus massniana*<sup>[7]</sup>、杉木 *Cunninghamia lanceolata*<sup>[8]</sup> 和马褂木 *Liriodendron sino-americanum*<sup>[9]</sup> 等用材树种良种选育中发挥了重要作用，同时培育了大量良种。亲本的科学选配是杂交育种成功的先决条件<sup>[10]</sup>，对杂交亲本进行配合力等遗传参数估算，筛选优良亲本和亲本组合，能够有效提高杂交育种效率<sup>[11]</sup>。配合力是指亲本对子代性状的影响力，包括一般配合力和特殊配合力<sup>[12]</sup>。一般配合力反映亲本的育种利用价值并能预测后代的表现<sup>[13]</sup>，特殊配合力是某一特定组合后代偏离双亲一般配合力的表型偏差<sup>[14]</sup>。高配合力亲本能够更好地遗传优势性状，在一定程度上预测杂交子代表型，缩小筛选育种材料范围，节省育种时间，提高育种效率<sup>[15]</sup>。目前，普通油茶的杂交育种工作主要局限于简单互补性状的亲本杂交，关于亲本配合力、重要性状遗传力等遗传参数的研究还处于起步阶段<sup>[16]</sup>。林萍等<sup>[17]</sup>对普通油茶杂交子代幼林生长、含油率等性状进行了亲本的配合力分析，初步筛选了一批具有育种潜力的杂交亲本与组合。但由于林木大多数性状的亲本配合力、遗传力等遗传参数会随着树龄的增长而变化。以幼龄林为研究对象对杂交育种的指导具有局限性，因此，以普通油茶杂交子代成林评估各性状的遗传参数显得非常重要。

种仁含油率是油茶高产育种的最主要指标之一。木质素、纤维素、半纤维素等在植物的生长发育过程中具有重要作用，主要表现在增强植物体的机械强度、疏导水分和营养物质的运输、阻止病原菌的侵

染以及增强对各种胁迫的防御能力等<sup>[18]</sup>。MIAO 等<sup>[19]</sup>研究发现：油菜 *Brassica napus* 种皮中木质素、纤维素和半纤维素质量分数与含油率呈显著负相关。王安妮等<sup>[20]</sup>研究也发现：油茶种仁含油率与木质素、纤维素质量分数亦具有显著相关性。因此，研究木质素、纤维素和半纤维素质量分数的遗传规律，对油茶高产育种具有一定的指导意义。

本研究以普通油茶全双列杂交的 20 个杂交组合为对象，分析了林龄为 8 a 的盛产期子代群体种仁含油率、木质素、纤维素和半纤维素质量分数的变异规律，探讨了各性状间的相关关系，评估了亲本在 4 个性状的配合力效应，解析了 4 个性状在油茶成林阶段的遗传力和杂种优势，为制定油茶高产杂交育种策略提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

在浙江省金华市婺城区东方红林场国家油茶种质资源收集库内，选择普通油茶无性系‘长林 4 号’‘长林 10 号’‘长林 40 号’‘长林 53 号’‘长林 95 号’(表 1)，按照 5×5 全双列杂交设计创制了 20 个杂交组合(无自交)。于 2014 年春季利用杂交子代 2 年生幼苗营造子代测定林。控制授粉、群体的创制与子代测定林营造管理等参照林萍等<sup>[17]</sup>的方法。

### 1.2 性状调查

于 2021 年秋季采集林龄为 8 a 的子代测定林果实样品测定相关性状。各杂交组合 10 株一小区，3 次重复，共 30 株单株取样。每单株随机取 30 颗果实，测定种仁含油率、木质素、纤维素和半纤维素质量分数等性状平均值作为单株果实经济性状。种仁含油率测定采用姚小华等<sup>[21]</sup>和杨雨晨等<sup>[22]</sup>的方法。木质素、纤维素和半纤维素质量分数的测定采用王安妮等<sup>[20]</sup>的方法。

### 1.3 数据分析方法

用 Excel 2010 整理数据。性状间采用 Pearson 相关性分析，家系间的表型差异进行单因素方差分析。利用固定模型估算杂交亲本的一般配合力、特殊配合力和反交效应<sup>[23-24]</sup>，根据随机模型估算加性、显性、表型和遗传方差以及广义、狭义遗传力。估算参照林萍等<sup>[17]</sup>的方法。所有分析采用 DPS 软件<sup>[25]</sup>完成。

## 2 结果与分析

### 2.1 普通油茶杂交一代群体种仁性状的相关性分析

相关性分析(表 2)发现：杂交群体中，普通油茶种仁中的含油率与木质素、纤维素、半纤维素质量分数呈显著( $P < 0.05$ )或者极显著负相关( $P < 0.01$ )。木质素与纤维素、半纤维素质量分数呈极显著正相关( $P < 0.01$ )。纤维素和半纤维素质量分数呈极显著负相关( $P < 0.01$ )。因此，在高产油茶良种选育中，除了含油率，木质素、纤维素和半纤维素质量分数也可作为高产种质筛选的重要判断依据。

### 2.2 普通油茶杂交一代群体含油率、木质素、纤维素、半纤维素质量分数的差异分析

20 个家系的含油率、木质素、纤维素、半纤维素质量分数的平均值依次为 411.84、106.36、80.19 和 42.93  $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ ，变异幅度分别为 14.46%~53.71%、4.68%~22.02%、3.70%~13.00% 和 0.08%~11.89%，其中，半纤维素质量分数的变异系数最大，达 38.03%。方差分析结果(表 3)表明：含油率、木质素、纤维素、半纤维素质量分数在不同组合间的差异均达到极显著水平( $P < 0.01$ )，表明采用不同优良性状的无性系开展杂交可为油茶育种创造出变异丰富的育种群体。

多重比较结果(表 4)表明：含油率最高的前 2 个家系为‘长林 4 号’×‘长林 40 号’和‘长林

表 1 亲本种仁含油率相关性状的平均值

亲本	含油率/ ( $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ )	木质素质 量分数/ ( $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ )	纤维素质 量分数/ ( $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ )	半纤维素质 量分数/ ( $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ )
‘长林4号’	425.32	109.06	84.73	42.65
‘长林10号’	402.81	105.87	75.48	49.02
‘长林40号’	421.91	98.70	77.87	46.87
‘长林53号’	412.38	109.38	77.73	40.82
‘长林95号’	400.05	108.78	85.14	35.31

表2 普通油茶杂交一代群体种仁性状的相关性

Table 2 Correlation of the kernel traits of the first-filial progeny of *C. oleifera*

性状	含油率	木质素质量分数	纤维素质量分数	半纤维素质量分数
含油率	1			
木质素质量分数	-0.47**	1		
纤维素质量分数	-0.11*	0.19**	1	
半纤维素质量分数	-0.30**	0.22**	-0.25**	1

说明: \*表示显著相关( $P<0.05$ ); \*\*表示极显著相关( $P<0.01$ )。

表3 普通油茶杂交子代种仁性状方差分析

Table 3 Variance analysis of the kernel traits of the first-filial progeny of *C. oleifera*

性状	自由度	F	平均值/ ( $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ )	变异 幅度/%	变异 系数/%
含油率	19	4.61**	411.84	14.46~53.71	13.22
木质素质量分数	19	6.54**	106.36	4.68~22.02	16.82
纤维素质量分数	19	7.06**	80.19	3.70~13.00	16.23
半纤维素质量分数	19	5.27**	42.93	0.08~11.89	38.03

说明: \*\*表示极显著相关( $P<0.01$ )。

表4 普通油茶杂交组合子代各种仁性状及其多重比较

Table 4 Multiple comparison results of kernel traits in first-filial progeny of *C. oleifera*

组合 (母本×父本)	含油率/ ( $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ )	木质素质量分数/ ( $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ )	纤维素质量分数/ ( $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ )	半纤维素质量分数/ ( $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ )
‘长林4号’×‘长林40号’	451.58±44.39 a	95.08±20.05 fgh	79.89±14.75 bcdef	37.18±17.58 def
‘长林4号’×‘长林53号’	443.71±51.98 ab	109.13±15.61 bcdef	81.50±17.41 abcde	50.47±28.34 abc
‘长林53号’×‘长林4号’	443.37±30.62 ab	107.01±17.97 bcdef	76.47±13.62 cdef	43.49±20.44 bcdef
‘长林40号’×‘长林95号’	435.78±63.22 abc	89.47±13.94 h	69.54±15.58 f	42.08±19.71 bcdef
‘长林10号’×‘长林4号’	424.45±55.25 abcde	108.06±20.22 bcdef	72.66±14.60 ef	46.04±20.28 bcde
‘长林40号’×‘长林4号’	420.91±56.76 abcdef	107.72±15.00 bcdef	76.74±16.14 cdef	37.94±12.10 cdef
‘长林95号’×‘长林40号’	419.66±59.79 abcdef	111.95±24.13 abcde	85.03±13.79 abc	32.03±15.26 ef
‘长林53号’×‘长林40号’	416.62±44.69 abcdef	98.72±13.67 defgh	77.14±11.50 cdef	34.09±18.79 ef
‘长林40号’×‘长林53号’	412.07±50.31 bcdef	97.63±19.16 efgh	74.13±15.27 def	47.78±18.34 abcd
‘长林95号’×‘长林53号’	411.12±45.76 bcdef	106.66±24.80 bcdefg	78.83±13.87 bcdef	37.15±16.84 def
‘长林10号’×‘长林95号’	410.69±28.82 bcdef	109.58±4.43b cdef	70.68±6.51 ef	52.95±15.12 ab
‘长林4号’×‘长林10号’	408.77±19.15 bcdef	107.98±7.25 bcdef	86.05±5.39 ab	44.08±6.72 bcdef
‘长林95号’×‘长林4号’	403.41±80.21 cdef	101.71±13.46 cdefgh	87.75±14.86 ab	36.32±13.56 def
‘长林4号’×‘长林95号’	397.24±38.43 def	124.07±14.67 a	91.48±5.42 a	38.87±11.49 cdef
‘长林53号’×‘长林10号’	395.50±57.45 ef	111.34±37.01 abcde	83.36±13.95 abcd	40.06±16.08 bcdef
‘长林53号’×‘长林95号’	394.00±65.17 ef	120.46±24.40 ab	73.96±11.38 def	45.63±16.09 bcde
‘长林10号’×‘长林53号’	391.03±45.67 ef	113.45±20.75 abcd	79.91±13.28 bcdef	50.08±15.41 abc
‘长林95号’×‘长林10号’	388.98±48.55 ef	114.81±17.24 abc	88.96±15.89 ab	35.74±10.70 def
‘长林10号’×‘长林40号’	385.08±40.73 ef	92.39±15.12 gh	78.66±9.01 bcdef	47.02±13.68 bcde
‘长林40号’×‘长林10号’	382.87±65.80 f	99.97±20.04 cdefgh	91.08±20.64 a	59.66±20.08 a

说明: 数据为平均值±标准差。同列不同小写字母表示差异极显著( $P<0.01$ )。

4号’×‘长林53号’，其含油率均值为451.58和443.71  $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ ，分别是含油率最小家系‘长林40号’×‘长林10号’的1.18和1.16倍。‘长林4号’×‘长林95号’和‘长林40号’×‘长林95号’的木质素和纤维素质量分数在所有的家系中分别是最高和最低的，前者分别是后者的1.39和1.32倍。半纤维素质量分数均值最高的家系为‘长林40号’×‘长林10号’，是最低家系‘长林95号’×‘长林40号’的1.86倍。家系‘长林40号’×‘长林10号’半纤维素质量分数排名第1位，但含油率在所有家系中最低，这与含油率和半纤维素质量分数呈显著负相关关系一致。

### 2.3 杂交亲本的一般配合力、特殊配合力和反交效应

本研究中不同组合间各性状均差异极显著( $P<0.01$ )。在此基础上，进一步采用固定模型评估杂交亲本的配合力。由表5可知：杂交亲本在纤维素和半纤维素质量分数的一般配合力、特殊配合力和反交效应值差异均达极显著水平( $P<0.01$ )。亲本含油率的一般配合力和特殊配合力差异达极显著水平( $P<0.01$ )，反交效应值无显著差异。木质素质量分数的亲本一般配合力和反交效应值差异达极显著水平( $P<0.01$ )，特殊配合力差异不显著。可见，普通油茶杂交育种中，一般配合力、特殊配合力和反交效应

值对杂交群体含油率、木质素、纤维素和半纤维素质量分数等性状具有极显著影响 ( $P < 0.01$ )。

对差异极显著的各亲本一般配合力多重比较 (表 6) 表明：‘长林 4 号’含油率和纤维素质量分数的一般配合力均最高，分别为 1.64 和 0.18，这与该良种年平均产油量高的特性一致。在半纤维素质量分数中，‘长林 10 号’的一般配合力最高，为 0.54，明显高于其他亲本，同时‘长林 10 号’的含油率一般配合力最低，为 -1.79。‘长林 95 号’木质素质量分数的一般配合力排名第 1 位，为 0.46，含油率的一般配合力为 -0.56，排名倒数第 2 位。可见，在高含油率杂交种质创制时，除了选择含油率一般配合力高的亲本外，选择木质素、纤维素和半纤维素质量分数一般配合力较低的父母本也是可行的。

不同杂交组合含油率的特殊配合力为 -2.23~1.66，根据含油率的特殊配合力效应选出前 5 个亲本组合为‘长林 40 号’×‘长林 95 号’(‘长林 95 号’×‘长林 40 号’)、‘长林 4 号’×‘长林 53 号’(‘长林 53 号’×‘长林 4 号’)、‘长林 10 号’×‘长林 95 号’(‘长林 95 号’×‘长林 10 号’)、‘长林 4 号’×‘长林 10 号’(‘长林 10 号’×‘长林 4 号’)和‘长林 4 号’×‘长林

40 号’(‘长林 40 号’×‘长林 4 号’)(表 7)。由于木质素、纤维素、半纤维素质量分数与含油率呈负相关，因此在以含油率为育种目标时，宜选择特殊配合力较低的组合。各杂交组合木质素含量的特殊配合力为 -0.22~0.31，由于组合间差异不显著 (表 5)，因此该特殊配合力效应只作为筛选优良组合的参考，不具有决定性。根据纤维素和半纤维素质量分数的特殊配合力，筛选出纤维素质量分数特殊配合力较低的组合有‘长林 4 号’×‘长林 10 号’(‘长林 10 号’×‘长林 4 号’)、‘长林 10 号’×‘长林 95 号’(‘长林 95 号’×‘长林 10 号’)、‘长林 4 号’×‘长林 40 号’(‘长林 40 号’×‘长林 4 号’)、‘长林 40 号’×‘长林 95 号’(‘长林 95 号’×‘长林 40 号’)和‘长林 53 号’×‘长林 95 号’(‘长林 95 号’×‘长林 53 号’)。筛选出半纤维素质量分数特殊配合力较低的组合有‘长林 40 号’×‘长林 95 号’(‘长林 95 号’×‘长林 40 号’)、‘长林 4 号’×‘长林 40 号’(‘长林 40 号’×‘长林 4 号’)、‘长林 40 号’×‘长林 53 号’(‘长林 53 号’×‘长林 40 号’)、‘长林 4 号’×‘长林 10 号’(‘长林 10 号’×‘长林 4 号’)、‘长林 10 号’×‘长林 53 号’(‘长林 53 号’×‘长林 10 号’)

依据反交效应。可判断一对杂交亲本中哪个做母本更易获得性状优良的杂交子代。通常，反交效应值为正时，正交组合能够更容易获得较高水平表型的子代，反交效应值为负时，采用反交组合将更易创制较高水平表型的子代。对依据特殊配合力筛选出的 5 个亲本组合，进一步根据反交效应确定高含油率的杂交组合为‘长林 40 号’×‘长林 95 号’、‘长林 4 号’×‘长林 53 号’、‘长林 10 号’×‘长林 95 号’、‘长林 10 号’×‘长林 4 号’和‘长林 4 号’×‘长林 40 号’。低纤维素特殊配合力的杂交组合为‘长林 10 号’×‘长林 4 号’、‘长林 10 号’×‘长林 95 号’、‘长林 40 号’×‘长林 4 号’、‘长林 40 号’×‘长林 95 号’和‘长林 53 号’×‘长林 95 号’。低半纤维素的杂交组合有‘长林 53 号’×‘长林 10 号’、‘长林 4 号’×‘长林 40 号’、‘长林 53 号’×‘长林 40 号’、‘长林 4 号’×‘长林 10 号’和‘长林 95 号’×‘长林 40 号’。综合子代含油率、纤维素、半纤维素质量分数的配合力分析结果，筛选出‘长林 40 号’×‘长林 95 号’和‘长林 4 号’×‘长林 53 号’，这 2 个组

表 5 普通油茶全双列杂交 (无自交) 配合力及反交效应值的方差分析

Table 5 Variance analysis of combining ability and reciprocal cross effect in complete diallel cross of *C. oleifera*

变异来源	自由度	F			
		含油率	木质素质量分数	纤维素质量分数	半纤维素质量分数
一般配合力	4	11.18**	15.57**	3.98**	7.26**
特殊配合力	5	6.45**	0.88	7.32**	3.88**
反交效应值	10	1.31	6.08**	8.10**	5.03**

说明：\*\*表示差异极显著 ( $P < 0.01$ )。

表 6 各组合母本一般配合力估计值

Table 6 Estimated general combining ability of female parent of each cross

亲本	一般配合力估计值			
	含油率	木质素质量分数	纤维素质量分数	半纤维素质量分数
‘长林 4 号’	1.64	0.16	0.18	-0.15
‘长林 10 号’	-1.79	0.11	0.16	0.54
‘长林 40 号’	0.50	-0.97	-0.16	-0.09
‘长林 53 号’	0.21	0.23	-0.27	0.09
‘长林 95 号’	-0.56	0.46	0.08	-0.38

说明：表中数据均为平均值。

表7 普通油茶亲本组合的特殊配合力及反交效应值

Table 7 Values of specific combining ability and reciprocal cross effect for different combinations of *C. oleifera*

序号	组合 (母本×父本)	含油率		木质素质量分数		纤维素质量分数		半纤维素质量分数	
		特殊配合力	反交效应值	特殊配合力	反交效应值	特殊配合力	反交效应值	特殊配合力	反交效应值
1	‘长林4号’ × ‘长林53号’	1.31	0.02	-0.22	0.11	-0.03	0.25	0.47	0.35
	‘长林53号’ × ‘长林4号’								
2	‘长林4号’ × ‘长林95号’	-2.23	-0.31	0.02	0.03	0.68	0.19	-0.01	0.13
	‘长林95号’ × ‘长林4号’								
3	‘长林53号’ × ‘长林95号’	-0.57	-0.86	0.03	0.69	-0.18	-0.24	0.14	0.42
	‘长林95号’ × ‘长林53号’								
4	‘长林4号’ × ‘长林40号’	0.30	1.53	0.31	-0.63	-0.22	0.16	-0.29	-0.04
	‘长林40号’ × ‘长林4号’								
5	‘长林40号’ × ‘长林53号’	-0.46	-0.23	-0.08	-0.05	-0.03	-0.15	-0.19	0.68
	‘长林53号’ × ‘长林40号’								
6	‘长林40号’ × ‘长林95号’	1.66	0.81	-0.06	-1.12	-0.21	-0.77	-0.11	0.50
	‘长林95号’ × ‘长林40号’								
7	‘长林4号’ × ‘长林10号’	0.62	-0.78	-0.11	0.27	-0.43	0.67	-0.17	-0.10
	‘长林10号’ × ‘长林4号’								
8	‘长林10号’ × ‘长林53号’	-0.28	-0.22	0.27	0.11	0.25	-0.17	-0.41	0.50
	‘长林53号’ × ‘长林10号’								
9	‘长林10号’ × ‘长林95号’	1.15	1.08	0.01	-0.26	-0.28	-0.91	-0.02	0.86
	‘长林95号’ × ‘长林10号’								
10	‘长林10号’ × ‘长林40号’	-1.50	0.11	-0.16	-0.38	0.46	-0.62	0.60	-0.63
	‘长林40号’ × ‘长林10号’								

合含油率的特殊配合力较高，含油率在20个家系中的排名分别为第4位和第5位，在纤维素质量分数排名为第20位和第8位；在半纤维素质量分数排名为第11位和第3位。推测这2个组合在普通油茶高含油率育种中具有重要的育种潜力和价值。

#### 2.4 普通油茶含油率、木质素、纤维素和半纤维素质量分数的遗传控制方式

在本研究群体中，含油率、纤维素和半纤维素质量分数的显性方差均大于加性方差(表8)。其中，含油率的加性方差和显性方差分别为1.38、2.39，显性方差是加性方差的1.73倍；纤维素质量分数的遗传方差主要为显性方差，加性方差为0；半纤维素质量分数的显性方差略大于加性方差，是加性方差的1.24倍。可见这3个性状均以非加性遗传效应控制为主，加性效应次之，尤其是纤维素质量分数主要由显性遗传效应控制。

木质素质量分数的加性方差为0.58，显性方差为0，这一性状主要由加性效应控制，这与木质素质量分数的特殊配合力方差差异不显著是一致的。含油率、木质素、纤维素和半纤维素质量分数的广义遗传力为7.86%~14.03%，狭义遗传力为0~14.03%，遗传力均较低，说明这些数量性状受到较强的环境效应影响。

### 3 讨论

#### 3.1 普通油茶种仁含油率与木质素、纤维素质量分数的相关性

在本研究中，含油率与木质素、纤维素和半纤维素质量分数在油茶群体中具有显著负相关关系。MIAO等<sup>[19]</sup>研究发现：油菜籽含油率与木质素和纤维素质量分数也存在显著负相关，且相关性系数与油茶相当；与半纤维素质量分数的相关性系数略低。WANG等<sup>[26]</sup>研究表明：油菜籽中的纤维组分包括木质素、纤维素和半纤维素，对含油率有负面影响。推测可能是纤维素和半纤维素的合成减少了进入种子油

表8 普通油茶种仁性状的主要遗传参数

Table 8 Major genetic parameters for kernel traits of *C. oleifera*

遗传参数	加性方差	显性方差	遗传方差	表型方差	广义遗传力/%	狭义遗传力/%
含油率	1.38	2.39	3.74	30.00	12.55	4.60
木质素含量	0.58	0.00	0.58	4.17	14.03	14.03
纤维素含量	0.00	0.20	0.20	2.05	9.52	0.00
半纤维素含量	0.11	0.14	0.25	3.16	7.86	3.51

生物合成途径中的光合同化物，从而导致含油率降低<sup>[27-28]</sup>。SCHILBERT 等<sup>[29]</sup>研究发现：*BnaPAL4* 基因在这个过程中起重要作用。可见，木质素、纤维素、半纤维素质量分数等 3 个性状作为间接参考指标，衡量油茶种仁含油率是可行的。当油脂测定不便或样本材料较少时，可通过测定饼粕中木质素、纤维素和半纤维素质量分数间接评估油茶中的含油率。

### 3.2 普通油茶杂交亲本评估的必要性

目前，油茶产业上用的无性系良种多来源于选择育种，但通过选择育种来培育高产优质新品种的潜力逐渐减小。正确选择亲本是普通油茶杂交育种成功的基础和关键，开展杂交亲本一般配合力和特殊配合力的估算，能够更高效地提高育种效率。本研究发现：普通油茶杂交亲本在油脂性状上的一般配合力、特殊配合力和反交效应都差异极显著，表明亲本评估对以含油率为育种目标的普通油茶杂交非常关键。

本研究中，5 个亲本在含油率、木质素、纤维素和半纤维素质量分数等 4 个性状中的一般配合力有较大差异。同一亲本的一般配合力在不同的性状间存在明显差异，同一性状在不同亲本的一般配合力间也存在显著差异。如‘长林 4 号’在含油率的一般配合力最高，在半纤维素质量分数的一般配合力是倒数第 2 位。亲本在半纤维素质量分数的一般配合力范围较大，最高的‘长林 10 号’一般配合力为 0.54，最低的‘长林 95 号’一般配合力为 -0.38，这与桤木 *Alnus cremastogyne* 种间杂交亲本种实性状(种子长度、宽度、千粒重)的配合力情况相同<sup>[30]</sup>。同样地，各组合在 4 个油脂相关性状上的特殊配合力值也存在显著差异。

### 3.3 一般配合力与特殊配合力的相对重要性

一般配合力和特殊配合力的相对重要性一直是林木杂交育种中亲本的评估重点<sup>[17]</sup>。研究表明：一般配合力和特殊配合力的相对重要性受测试材料、性状、地点和树龄等的影响<sup>[15]</sup>。牛慧敏等<sup>[31]</sup>研究发现：对于杉木幼林的干形性状，一般配合力测定比特殊配合力测定更重要。吴兵等<sup>[32]</sup>研究发现：桉树种间杂交子代的生长性状受加性与非加性效应的共同作用，但是以加性效应为主，所以应更关注双亲的一般配合力。林萍等<sup>[15]</sup>针对油茶 5×5 全双列杂交子代幼林生长性状的研究表明：一般配合力比特殊配合力更重要；对(不完全双列杂交)设计的油茶子代林分析发现：林龄不同其生长性状的一般配合力和特殊配合力方差分量也不相同，1 年生子代林的一般配合力方差分量高于特殊配合力，而 2 年生子代林一般配合力方差分量均明显低于特殊配合力<sup>[16]</sup>。柴静瑜等<sup>[33]</sup>对进入盛产期的油茶巢式杂交子代群体进行遗传分析显示：组合间含油率和脂肪酸质量分数的差异主要来源于双亲的特殊配合力，评估双亲的特殊配合力远比亲本的一般配合力更重要。赵颖等<sup>[14]</sup>评估了马尾松纸浆材主要经济性状，发现特殊配合力相对重要性大于一般配合力。在本研究中，油茶杂交子代成林的含油率和纤维素质量分数的显性方差显著大于加性方差，这 2 个性状亲本的特殊配合力比一般配合力更重要。半纤维素质量分数的显性方差与加性方差相当，说明半纤维素质量分数亲本的一般配合力和特殊配合力同等重要。因此，在以含油率为育种目标的油茶杂交中，优先选择特殊配合力较高的亲本组合，同时兼顾亲本的一般配合力。

### 3.4 遗传力的评估

因受测试材料、性状、地点和树龄等因素的不同，遗传力也有差别。吴兵等<sup>[32]</sup>研究发现：桉树幼林各生长性状遗传力均在 0.57 以上。黄逢龙等<sup>[34]</sup>发现：杨树无性系的各树冠性状遗传力都较低，均小于 0.50。在马尾松巢式交配子代生长性状遗传分析发现：胸径、树高和单株材的广义遗传力为 0.48~0.69，受中度遗传控制<sup>[7]</sup>，这与红松 *Pinus koraiensis*<sup>[35]</sup> 的研究结果一致。林萍等<sup>[17]</sup>研究发现：普通油茶杂交子代林幼龄时期种仁含油率、脂肪酸成分及其质量分数等经济性状受环境影响较大，遗传控制力度较弱。柴静瑜等<sup>[33]</sup>研究发现：盛产期后油茶油脂性状的遗传力显著升高，尤其是硬脂酸、油酸、亚油酸等决定油脂品质的脂肪酸质量分数。可见，子代幼林的遗传力评估仅可作为油茶杂交育种策略制定的参考，重点应关注成林的遗传力参数。

## 4 结论

本研究发现：普通油茶含油率、木质素、纤维素、半纤维素质量分数 4 个性状在组合间存在显著差异，且含油率与木质素、纤维素、半纤维素质量分数间存在显著负相关；4 个性状的亲本一般配合力、

特殊配合力和反交效应值差异显著。含油率和纤维素质量分数的遗传方差以显性效应为主,半纤维素质量分数的加性方差与显性方差相当,而木质素质量分数的遗传方差则以加性效应为主;4个性状的遗传力均较低,受环境影响较大。在此基础上,筛选出可用于高含油率种质创制的优良亲本‘长林4号’和‘长林40号’,优良杂交组合‘长林40号’×‘长林95号’和‘长林4号’×‘长林53号’。

## 5 参考文献

- [1] 谭晓风. 油茶分子育种研究进展[J]. 中南林业科技大学学报, 2023, 43(1): 1–24.  
TAN Xiaofeng. Advances in the molecular breeding of *Camellia oleifera* [J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2023, 43(1): 1–24.
- [2] 张恒, 袁汕, 傅志强, 等. 广宁红花油茶优树综合评价及指标筛选[J]. 浙江农林大学学报, 2023, 40(2): 374–381.  
ZHANG Heng, YUAN Shan, FU Zhiqiang, et al. Comprehensive evaluation and index screening of excellent plants of *Camellia semiserrata* [J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2023, 40(2): 374–381.
- [3] 李佳妮, 吴美珍, 李煜, 等. 浙江红花油茶实生群体性状变异及综合评价[J]. 森林与环境学报, 2024, 44(3): 274–282.  
LI Jiani, WU Meizhen, LI Yu, et al. Comprehensive analysis of the phenotypic variation among seedling populations of *Camellia chekiangoleosa* [J]. *Journal of Forest and Environment*, 2024, 44(3): 274–282.
- [4] XIE Hui, ZHU Wei, TENG Fengkui, et al. Thinking and practice of high quality japonica hybrid rice breeding [J]. *Hybrid Rice*, 2023, 38(4): 44–47.
- [5] WANG Chubiao, LAN Jun, WANG Jianzhong, et al. Population structure and genetic diversity in *Eucalyptus pellita* based on SNP markers [J/OL]. *Frontiers in Plant Science*, 2023, 14: 1278427[2023-12-05]. doi: 10.3389/fpls.2023.1278427.
- [6] YING Liu, ZHAN Jianghan, MENG Xusu, et al. Transcriptomic profile analysis of *Populus talassica*×*Populus euphratica* response and tolerance under salt stress conditions [J/OL]. *Genes*, 2022, 13(6): 1032[2023-12-05]. doi: 10.3390/genes13061032.
- [7] 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 Qinghua, JIN Guoqing, WANG Hui, et al. Genetic 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.
- [8] 叶代全. 杉木第4代育种候选群体的12年生全同胞子代测定表现与选择[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2022, 46(6): 240–50.  
YE Daiquan. Performances and selections on a 12-year-old full-sib progeny testing from one of the candidate population for the 4th generation Chinese fir breeding [J]. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)*, 2022, 46(6): 240–50.
- [9] 方扬辉. 亚美马褂木优良无性系选择及遗传参数估计[J]. 福建热作科技, 2022, 47(3): 29–34.  
FANG Yanghui. Selection and genetic parameter estimation of superior clones of *L. sino-americanum* [J]. *Fujian Science & Technology of Tropical Crops*, 2022, 47(3): 29–34.
- [10] JONES G, LIZINIEWICZ M, ADAMOPOULOS S, et al. Genetic parameters of stem and wood traits in full-sib silver birch families [J/OL]. *Forests*, 2021, 12(2): 159[2023-12-05]. doi: 10.3390/f12020159.
- [11] QUAMRUZZAMAN A, SALIM M M R, AKHTER L, et al. Heterosis, combining ability and gene action for yield in bottle gourd [J]. *American Journal of Plant Sciences*, 2020, 11(5): 642–562.
- [12] 王家焱, 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 Jiayi, CHEN Huanwei, ZHANG Rui, 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.
- [13] 晏姝, 韦如萍, 王润辉, 等. 南洋楹半同胞家系苗期变异及选择[J]. 浙江农林大学学报, 2024, 41(2): 306–313.  
YAN Shu, WEI Ruping, WANG Runhui, et al. Variation and selection of half-sib families of *Falcataria falcata* during seedling stage [J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2024, 41(2): 306–313.
- [14] 赵颖, 周志春, 金国庆. 马尾松苗木生长和根系性状的GCA/SCA及磷素环境影响[J]. 林业科学, 2009, 45(6): 27–33.  
ZHAO Ying, ZHOU Zhichun, JIN Guoqing, et al. GCA/SCA of seedling growth and root parameters in *Pinus massoniana*



- and the phosphorus environment influence [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2009, **45**(6): 27 – 33.
- [15] 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 Ping, YAO Xiaohua, TENG Jianhua, *et al.* Analysis of genetic effects of growth traits of *Camellia oleifera* F<sub>1</sub> descendants in complete diallel cross design III [J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2016, **36**(5): 26 – 32.
- [16] 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.
- LIN Ping, YAO Xiaohua, TENG Jianhua, *et al.* Genetic analysis of growth characteristics of young hybrid progeny forest in *Camellia oleifera* [J]. *Non-wood Forest Research*, 2016, **34**(1): 6 – 11.
- [17] 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 Ping, WANG Kailiang, YAO Xiaohua, *et al.* Genetic analysis of the economic traits of *Camellia oleifera* F<sub>1</sub> descendant in half-diallel cross design [J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2017, **37**(12): 31 – 38.
- [18] 涂白连, 伍艳芳, 刘新亮, 等. 近红外光谱法测定闽楠纤维长度及木质素质量分数[J]. 东北林业大学学报, 2024, **52**(7): 91 – 95.
- TU Bailian, WU Yanfang, LIU Xinliang, *et al.* Determination of fiber length and lignin content of *Phoebe bournei* using infrared spectroscopy [J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2024, **52**(7): 91 – 95.
- [19] MIAO Liyun, CHAO Hongbo, CHEN Li, *et al.* Stable and novel QTL identification and new insights into the genetic networks affecting seed fiber traits in *Brassica napus* [J]. *Theoretical and Applied Genetics*, 2019, **132**(6): 1762 – 1775.
- [20] 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 Anni, WANG Kailiang, CHAI Jingyu, *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.
- [21] 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 Xiaohua, WANG Yaping, WANG Kailiang, *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.
- [22] 杨雨晨, 陈娟娟, 姚小华, 等. 50 个普通油茶果实性状综合评价[J]. 中国粮油学报, 2022, **37**(12): 175 – 182.
- YANG Yuchen, CHEN Juanjuan, YAO Xiaohua, *et al.* Comprehensive evaluation of fruit quality of 50 varieties of *Camellia oleifera* [J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2022, **37**(12): 175 – 182.
- [23] HAN Yanyun, WANG Kaiyi, LIU Zhongqiang, *et al.* Research on hybrid crop breeding information management system based on combining ability analysis [J]. *Sustainability*, 2020, **12**(12): 11 – 16.
- [24] 吴珂, 余渝, 何良荣, 等. 陆地棉品质和产量性状配合力及杂种优势分析[J]. 江苏农业科学, 2023, **51**(6): 67 – 73.
- WU Ke, YU Yu, HE Liangrong, *et al.* Combining ability and heterosis analysis of quality and yield characters of upland cotton [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2023, **51**(6): 67 – 73.
- [25] 唐启义. DPS 数据处理系统 [M]. 北京: 科学出版社, 2013: 108 – 110.
- TANG Qiyi. *Data Processing System* [M]. Beijing: Science Press, 2013: 108 – 110.
- [26] WANG Jia, JIAN Hongju, WEI Lijuan, *et al.* Genome-wide analysis of seed acid detergent lignin (ADL) and hull content in rapeseed (*Brassica napus* L.) [J/OL]. *PLoS One*, 2015, **10**(12): 145045 [2023-12-05]. doi: [10.1371/journal.pone.0145045](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0145045).
- [27] 赵卫国, 塔娜, 王灏, 等. 甘蓝型油菜种子硫代葡萄糖苷含量的 QTL 定位及候选基因分析[J]. 西北植物学报, 2024, **44**(8): 1261 – 1272.
- ZHAO Weiguo, TA Na, WANG Hao, *et al.* QTL mapping and candidate gene identification of seed glucosinolate content in *Brassica napus* [J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2024, **44**(8): 1261 – 1272.
- [28] LIU Liezhao, QU Cunmin, WITKOP B, *et al.* A high-density SNP map for accurate mapping of seed fibre QTL in *Brassica napus* L. [J/OL]. *PLoS One*, 2013, **8**(12): 83052 [2023-12-05]. doi: [10.1371/journal.pone.0083052](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0083052).
- [29] SCHILBERT H M, HOLZENKAMP K, VIEHÖVER P, *et al.* Homoeologous non-reciprocal translocation explains a major QTL for seed lignin content in oil seed rape (*Brassica napus* L.) [J/OL]. *Theoretical and Applied Genetics*, 2023, **136**(8): 172 [2023-12-05]. doi: [10.1007/s00122-023-04407-w](https://doi.org/10.1007/s00122-023-04407-w).

- [30] 徐远, 刘世杰, 杨勇智, 等. 桉木属内种间杂交亲本种实性状的配合力及竞争优势分析[J]. 四川林业科技, 2020, **41**(4): 51 – 57.  
XU Yuan, LIU Shijie, YANG Yongzhi, *et al.* Analysis of parental combining ability and competitive advantage for *Alnus* Mill. interspecific hybridization [J]. *Journal of Sichuan Forestry Science and Technology*, 2020, **41**(4): 51 – 57.
- [31] 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 Huimin, ZHANG Zhen, QIU Yongbin, *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.
- [32] 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 Bing, LAN Jun, PANG Zhenwu, *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.
- [33] 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 Jingyu, WANG Kailiang, YAO Xiaohua, *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.
- [34] 黄逢龙, 焦一杰, 梁军, 等. 杨树无性系树冠性状间的相关性与遗传差异[J]. 西北林学院学报, 2010, **25**(1): 61 – 65.  
HUANG Fenglong, JIAO Yijie, LIANG Jun, *et al.* Correlation and genetic difference of crown traits of *poplar* clones [J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2010, **25**(1): 61 – 65.
- [35] 张金博, 杨圆圆, 徐柏松, 等. 红松半同胞家系生长性状变异及优良家系和单株的筛选[J]. 东北林业大学学报, 2024, **52**(2): 9 – 12.  
ZHANG Jinbo, YANG Yuanyuan, XU Baisong, *et al.* Variation in growth traits of half-sibling families and selection of fine families and individual plants in *Pinus koraiensis* [J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2024, **52**(2): 9 – 12.