

中南林业科技大学学报

*Journal of Central South University of Forestry & Technology*

ISSN 1673-923X，CN 43-1470/S

《中南林业科技大学学报》2026年第5期

Doi:10.14067/j.cnki.1673-923X.2026.05.001

论文标题： 油茶种间杂交$F_1$代优株花果性状的比较

作　　者： 马晓玲，袁德义，王玮琦，等

收稿日期： 2025-05-09

引文格式： 马晓玲,袁德义,王玮琦,等.油茶种间杂交$F_1$代优株花果性状的比较[J].中南林业科技大学学报,2026,46(5):1-11,58.

MA X L, YUAN D Y, WANG W Q, et al. Comparative analysis of flower and fruit traits in $F_1$ generation of interspecific hybridization of *Camellia oleifera*[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2026,46(5):1-11,58.

## 相关论文推荐

Recommended articles

基于混合线性模型的高州油茶杂交亲和性遗传评估 Ⅰ

Genetic evaluation for the cross-compatibility between lines of *Camellia gauchowensis* and other species based on mixed linear model

油茶种间杂交叶表型的遗传变异分析

Analysis on genetic variation of phenotypic traits of leaves of $F_1$ progeny from interspecific hybridization of *Camellia*

油茶杂交子代叶片光合特性与形态结构

Photosynthetic characteristics and morphological structure of leaves in *Camellia oleifera* hybrid progeny

普通油茶杂交子代幼林经济性状的遗传分析

Genetic analysis of the economic traits of *Camellia oleifera* $F_1$ descendant inhalf-diallel cross design

高州油茶杂交$F_1$代群体构建及遗传评估 Ⅱ

Populations construction and genetic evaluation of hybrid $F_1$ generation of *Camellia gauchowensis* Chang Ⅱ

油茶5×5全双列杂交子代幼林生长性状的配合力分析

Analysis of genetic effects of growth traits of *Camellia oleifera* $F_1$ descendants in complete diallel cross design Ⅲ

Doi:10.14067/j.cnki.1673-923x.2026.05.001
http: //qks.csuft.edu.cn

# 油茶种间杂交 $F_1$ 代优株花果性状的比较

马晓玲，袁德义，王玮琦，柏　芮
（中南林业科技大学 木本油料资源利用全国重点实验室，湖南 长沙 410004）

**摘　要：**【目的】研究‘攸杂 2’×‘海油 3 号’杂交子代抗病优株的花果表型，为油茶种间杂交遗传变异规律研究和优良种质培育提供理论依据。【方法】以攸县油茶‘攸杂 2’为母本、‘海油 3 号’为父本进行杂交，于杂交 $F_1$ 代中选出 10 株抗病优株，对其花表型进行测定，10 株抗病优株中有 6 株结果，对其果实表型和经济品质性状进行测定分析，并使用主成分分析法计算得分，选出最优株。【结果】1）10 个抗病优株及其父本‘海油 3 号’花期为冬季，母本‘攸杂 2’花期为春季，且杂交子代花期均早于父本。花器外观和花粉特征共 11 个测量指标的变异系数为 2.98% ～ 17.47%。2）杂交子代间果实外观、经济和品质性状共 26 个测量指标的变异系数为 6.51% ～ 57.71%。3）对单果质量、果实横纵径、果皮厚度等 14 个指标进行主成分分析，提取 2 个主成分，累计贡献率为 88.86%。杂交子代 6 个抗病优株综合得分排序为 YH-10 ＞ YH-7 ＞ YH-2 ＞ YH-5 ＞ YH-4 ＞ YH-1，其中 YH-10 的综合得分最高，为 3.17。【结论】以‘攸杂 2’为母本、‘海油 3 号’为父本进行杂交后代选育后，获得的 $F_1$ 代抗病优株间花果表型变异丰富，且 $F_1$ 代中产生了结合父母本优异性状（具有抗病性且果实经济性状显著高于低亲亲本）的抗病大果优株 YH-10，其单果质量相比母本提高了 41.65 g。

**关键词：**油茶；远缘杂交；遗传变异；单株选优；花果性状
**中图分类号：**S794.4；S722.3$^{+}$4　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1673-923X(2026)05-0001-11

# Comparative analysis of flower and fruit traits in $F_1$ generation of interspecific hybridization of *Camellia oleifera*

MA Xiaoling, YUAN Deyi, WANG Weiqi, BAI Rui

(State Key Laboratory of Woody Oil Resources Utilization, Central South University of Forestry & Technology, Changsha 410004, Hunan, China)

**Abstract:**【Objective】To study the phenotype of disease-resistant superior plants in the offspring of ‘Youza 2’ × ‘Haiyou 3’, so as to provide a theoretical basis for the study of genetic variation of interspecific hybridization and the cultivation of excellent germplasm of *Camellia oleifera*.【Method】Ten disease-resistant and superior strains were selected from the $F_1$ generation of *Camellia oleifera* with ‘Youza 2’ as the female parent and ‘Haiyou 3’ as the male parent, and their flower phenotypes were determined. Among the 10 excellent disease resistant plants, six of them were fruited, and their fruit phenotype and economic quality traits were determined and analyzed, and the scores were calculated by principal component analysis, and the optimal plants were selected.【Result】1) The flowering period of the 10 resistant plants and their male parent ‘Haiyou 3’ was in winter, and the flowering period of the female parent ‘Youza 2’ was spring, and the flowering period of the hybrid offspring was earlier than that of the male parent. The coefficient of variation of the 11 measured indexes, including floral appearance and pollen characteristics, ranged from 2.98% to 17.47%; 2) The coefficient of variation of 26 measured fruit appearance, economy and quality traits among hybrid offspring ranged from 6.51% to 57.71%; 3) Principal component analysis was performed on 14 indexes, including single fruit weight, fruit transverse and longitudinal diameter, peel thickness, etc., and two principal components were extracted, with a cumulative contribution rate of 88.86%. The comprehensive ranking of 6 disease resistance results of the hybrid offspring was YH-10 ＞ YH-7 ＞ YH-2 ＞ YH-5 ＞ YH-4 ＞ YH-1, of which YH-10 has the highest comprehensive score of 3.17.【Conclusion】After cross-breeding with ‘Youza 2’ as the female parent and ‘Haiyou 3’ as the male parent, the $F_1$ generation of disease-resistant superior plants was rich in phenotypic variation among plants, and the $F_1$ generation produced a disease-resistant large-fruited superior plant YH-10 with excellent traits of both parents (disease resistance and fruit economic traits significantly higher than those of the low parents), and its single fruit weight increased by 41.65 g compared with that of the female parent.

**Keywords:** *Camellia oleifera*; distant hybridization; genetic variation; superior individual plant selection; flower and fruit traits

**收稿日期**（Received）：2025-05-09　　**修订日期**（Revised）：2025-08-04
**基金项目：**湖南省十大技术攻关项目（2024NK1020）；湖南省教育厅重点项目（24A0215）；湖南省自然科学基金青年基金项目（2023JJ41036）；中南林业科技大学引进人才科研启动基金项目（2019YJ003）。
**第一作者：**马晓玲（fanxiaoling@163.com），副教授，博士。
**引文格式：**马晓玲 , 袁德义 , 王玮琦 , 等 . 油茶种间杂交 $F_1$ 代优株花果性状的比较 [J]. 中南林业科技大学学报 ,2026,46(5):1-11,58.
MA X L, YUAN D Y, WANG W Q, et al. Comparative analysis of flower and fruit traits in $F_1$ generation of interspecific hybridization of *Camellia oleifera*[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2026,46(5):1-11,58.

油茶 *Camellia oleifera* 是山茶科 Theaceae 山茶属 *Camellia* 的一种常绿灌木或小乔木，是我国重要的木本食用油料树种 [1]。油茶在促进地方经济绿色增长、维护国家食用油安全和助力乡村振兴方面具有重要意义 [2]。茶油的不饱和脂肪酸含量高达 80% 以上，其中包括油酸、亚油酸和亚麻酸，还含有丰富的生育酚、植物甾醇和角鲨烯等营养物质，因其脂肪酸组分与橄榄油较为接近，被誉为“东方橄榄油”[3]。油茶在我国已有 2 300 多年的栽培历史，主要分布在长江流域及以南的地区，如湖南、江西、广西、福建、浙江等地 [4]。目前，我国油茶林大多为低产林，品种混杂且品质良莠不齐，进而造成油茶产量低下且稳定性不足 [5]。油茶种质创新是提升产量的关键，也是油茶产业可持续发展的基础 [6]。

杂交育种是油茶种质创新的重要手段，通过杂交能够极大拓展和丰富育种筛选的基因库，有效促进各种优良基因的重组与交流，这不仅提升了油茶的抗逆性、产量及品质，还为良种选育提供了所需的新种质 [7]。油茶杂交育种工作始于 20 世纪 70 年代，至今在普通油茶种内杂交、普通油茶与攸县油茶种间杂交以及普通油茶与香花油茶种间杂交育种等方面已经开展了大量研究，培育出了一批优良的杂交品系 [7-8]。吕欢欢等 [9] 开展了普通油茶杂交子代重要经济性状的遗传分析与选择，筛选出 3 个优良家系和 13 个优良单株。陈雅 [10] 以攸县油茶和普通油茶种间杂交产生的 18 个 $F_1$ 代优株为研究对象，选育出具有果大、皮薄、鲜出籽率高等优良特性的 YH15。梁斌等 [11] 对普通油茶与香花油茶杂交 $F_1$ 代叶片表型性状遗传多样性研究发现，145 个后代单株的 9 个叶表型性状存在丰富的变异和遗传多样性。这些研究为良种选育提供了参考。

攸县油茶 *Camellia yuhsienensis* 又名薄壳香油茶、长瓣短柱茶等。作为一种优良的油茶品种，在中国油茶抗炭疽病品种调查中发现于湖南省株洲市攸县 [12]。攸县油茶与普通油茶相比，环境适应性强且抗炭疽病 [13]。攸县油茶在春天开花，当年结果，果实在霜降成熟，产量相对稳定，并且出籽率和含油率高 [14]。海南油茶 *Camellia hainanica* 是 2020 年在海南省发现的油茶组新物种。海南油茶主要分布于海南省澄迈县、琼中黎族苗族自治县和屯昌县等地，常见于当地村庄附近或者常绿阔叶林的边缘地带。海南油茶被当地人称为“山柚”，具有果大、产量高、茶油品质佳等优良性状 [15]。攸县油茶和海南油茶各自具有优良的遗传性状，而有关攸县油茶和海南油茶种间杂交育种方面的研究还相对较少。本研究以攸县油茶和海南油茶种间杂交子代及其亲本为试验材料，对其花果性状进行测定分析，以期聚合亲本的特殊性状，培育出综合性状优良的新种质。同时分析各表型性状的遗传变异及其联系，构建油茶种质资源的科学评价体系，为油茶育种指标体系的建立、优良种质筛选与评价等提供研究基础。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

本试验以‘攸杂 2’（YZ-2）与‘海油 3 号’（HY3）及其杂交 $F_1$ 代 10 个抗病优株（分别命名为 YH-1、YH-2、…、YH-10）为材料。2018 年用海南地区油茶 HY3 花粉对攸县油茶 YZ-2 进行授粉，同年收种，次年（2019 年）播种，2023 年对获得的 10 个抗病优株和双亲（双亲为 8 年生油茶树）进行分析。试验地位于湖南省长沙市中南林业科技大学油茶杂交育种试验园（112°59′E，28°6′N），全年平均气温为 17.2 ℃，年平均降水量为 1 361.6 mm，土壤类型为红壤，常规水肥管理。HY3（父本）为十倍体，YZ-2（母本）为六倍体，杂交 $F_1$ 代 10 个抗病单株均为八倍体。

### 1.2 花数据采集与分析

#### 1.2.1 花器外观和花期统计

于 2022 年 11 月—2023 年 3 月盛花期，每株随机采集 3 朵完全盛开的花，使用游标卡尺和植物解剖学等方法对其花冠直径、花瓣数、花柱数、雄蕊数、花柱长、雄蕊高、雌蕊高、萼片数 8 个形态指标进行测定 [16]，统计子代各表型指标的平均值、标准差、变异系数和杂交优势指数。参照果树花期划分标准 [17]，对杂交子代及其亲本进行物候期观测，分为始花期（5% ～ 25% 花朵开放）、盛花期（25% ～ 75% 花朵开放）、末花期（75% 以上花朵开放）。

#### 1.2.2 花粉特征的测定

花粉数量的测定：采用纤维素酶法 [18]。采摘即将开放的 50 朵花苞，取 10 枚完整的花药，25 ℃烘干，加入 1% 纤维素酶溶液 1 mL，在 25 ℃下处理 24 h，充分振荡后，吸取 5 μL 于载玻片上，显微镜下统计花粉粒数，重复 3 次。计算公式如下：

$$P=\frac{200p}{10}。\qquad(1)$$

式中：$P$ 为单个花药花粉数量（粒 / 花药）；$p$ 为每个载玻片上花粉粒总数。

花粉粒直径的测定：滴 1 ～ 2 滴卡宝品红溶液于载玻片上，用毛笔尖取少许烘干的花粉，抖落进卡宝品红溶液中，搅拌均匀后盖上盖玻片，染色 5 ～ 10 min[19]。在 Olympus DP71 光学显微镜下进行拍照，使用 ImageJ 软件测定花粉粒直径。

花粉活力的测定：将配制好的培养基（5% 蔗糖 +0.01% 硼酸 +1% 琼脂糖）滴在单凹载玻片上，将烘干的花粉撒在凝固后的培养基上，25 ℃培养箱培养 4 h[19]。在 Olympus DP71 光学显微镜下进行拍照，使用 ImageJ 软件统计花粉萌发数量。

### 1.3　果实数据采集与分析

#### 1.3.1　果实外观的测定

于 2023 年 11 月果实成熟后，每株油茶树随机采集 8 个果实。测定性状包括单果质量、果实横径、果实纵径、果皮厚度、果形指数 [9]。果形指数计算公式如下：

$$S=\frac{L}{T}。\tag{2}$$

式中：$S$ 为果形指数；$L$ 为果实纵径；$T$ 为果实横径。

#### 1.3.2　经济性状的测定

对采集的油茶果实剥皮后统计籽粒数，并称鲜籽质量，再将种子烘干后称干籽质量和干仁质量，计算百籽质量、鲜出籽率、鲜籽出仁率、干出籽率、籽含水率、种仁含水率、干籽出仁率、干籽含油率，共 8 个经济性状指标 [9]。公式如下：

$$X_1=\frac{m_1}{m_2}\times 100;\tag{3}$$

$$X_2=\frac{m_1}{m_3}\times 100\%;\tag{4}$$

$$X_3=\frac{m_4}{m_1}\times 100\%;\tag{5}$$

$$X_4=\frac{m_5}{m_3}\times 100\%;\tag{6}$$

$$X_5=\frac{m_1-m_5}{m_1}\times 100\%;\tag{7}$$

$$X_6=\frac{m_4-m_6}{m_4}\times 100\%;\tag{8}$$

$$X_7=\frac{m_6}{m_5}\times 100\%;\tag{9}$$

$$X_8=k\times X_7\times 100\%。\tag{10}$$

式中：$X_1$ 为百籽质量；$X_2$ 为鲜出籽率；$X_3$ 为鲜籽出仁率；$X_4$ 为干出籽率；$X_5$ 为籽含水率；$X_6$ 为种仁含水率；$X_7$ 为干籽出仁率；$X_8$ 为干籽含油率；$m_1$ 为鲜籽质量；$m_2$ 为籽粒数；$m_3$ 为单果质量；$m_4$ 为鲜仁质量；$m_5$ 为干籽质量；$m_6$ 为干仁质量；$k$ 为种仁含油率。

采用索氏抽提法 [20] 对油茶种仁含油率进行测定，种仁含油率计算公式为：

$$k=\frac{M_{总}-M_{杯}}{M_{样}}\times 100\%。\tag{11}$$

式中：$M_{总}$为提油杯与油的总质量；$M_{杯}$为提油杯净质量；$M_{样}$为粉碎后的样品质量。

#### 1.3.3　品质性状的测定

采用气相色谱法对脂肪酸进行检测 [20]，计算不饱和脂肪酸含量。

对茶油功能性成分如角鲨烯、$\beta$- 谷甾醇、维生素 E 和总酚含量进行测定。角鲨烯、$\beta$- 谷甾醇的测定参照汤富彬等 [21] 的实验方法，维生素 E 含量和总酚含量的测定分别参照 GB/T 5009.82—2003 和 LS/T 6119—2017。

### 1.4　数据分析

使用 Excel 2021 软件整理数据，利用 SPSS 25.0 软件进行方差分析、数据标准化处理和主成分分析。所有结果均用平均值 ± 标准差表示。变异系数和杂交优势指数的计算公式如下：

$$C_{\mathrm{V}}=\frac{\sigma}{\mu}\times 100\%;\tag{12}$$

$$H=\frac{F_1}{\left(\frac{P_1+P_2}{2}\right)}\times 100\%。\tag{13}$$

式中：$C_{\mathrm{V}}$ 为变异系数；$\sigma$ 为标准差；$\mu$ 为平均值；$H$ 为杂交优势指数；$F_1$ 为杂交后代的性状平均值；$P_1$ 和 $P_2$ 分别为两个亲本的性状平均值。

## 2　结果与分析

### 2.1　花期比较分析

对 YZ-2、HY3 及其 10 个杂交后代的花期进行统计，发现亲本与子代的花期存在显著差异（表 1）。具体表现为：母本 YZ-2 的花期集中在 2 月下旬至 4 月上旬（2023 年 2 月 23 日—2023 年 4 月 5 日），父本 HY3 及所有 $F_1$ 代植株的花期均在 11 月下旬至次年 1 月下旬（2022 年 11 月 23 日—2023 年 1 月 19 日），且杂交子代的花期均早于 YZ-2 和 HY3。杂交子代始花期较 HY3 提前 7 ～

36 d，盛花期较 HY3 提前 4 ～ 29 d，末花期较 HY3 提前 1 ～ 19 d。最早始花期出现在 YH-1 和 YH-2（2022 年 11 月 23 日），最晚末花期出现在 YH-3（2023 年 1 月 19 日）。以上结果表明，杂交 $F_1$ 代植株在保持父本冬季开花特性的同时，表现出显著的花期提前现象。这种杂交后代花期相比双亲提前的现象暗示杂交过程中可能涉及花期调控相关基因的重组与表达改变，为进一步探究油茶花期调控机制及培育不同花期新品种提供了理论依据。

表 1 杂交 $F_1$ 代 10 个抗病优株及亲本花期
**Table 1 Flowering period of parents and 10 disease-resistant elite F1 hybrid strains**

| 材料 Material | 始花期 Initial flowering stage | 盛花期 Full flowering stage | 末花期 Late flowering stage |
|---|---|---|---|
| YZ-2 | 2023 年 2 月 23 日—2023 年 3 月 7 日 | 2023 年 3 月 8 日—2023 年 3 月 29 日 | 2023 年 3 月 30 日—2023 年 4 月 5 日 |
| HY3 | 2022 年 12 月 29 日—2023 年 1 月 2 日 | 2023 年 1 月 3 日—2023 年 1 月 9 日 | 2023 年 1 月 10 日—2023 年 1 月 14 日 |
| YH-1 | 2022 年 11 月 23 日—2022 年 12 月 12 日 | 2022 年 12 月 13 日—2022 年 12 月 30 日 | 2022 年 12 月 31 日—2023 年 1 月 4 日 |
| YH-2 | 2022 年 11 月 23 日—2022 年 12 月 4 日 | 2022 年 12 月 5 日—2022 年 12 月 21 日 | 2022 年 12 月 22 日—2022 年 12 月 30 日 |
| YH-3 | 2022 年 12 月 22 日—2022 年 12 月 28 日 | 2022 年 12 月 29 日—2023 年 1 月 8 日 | 2023 年 1 月 9 日—2023 年 1 月 19 日 |
| YH-4 | 2022 年 12 月 22 日—2022 年 12 月 29 日 | 2022 年 12 月 30 日—2023 年 1 月 6 日 | 2023 年 1 月 7 日—2023 年 1 月 18 日 |
| YH-5 | 2022 年 12 月 21 日—2022 年 12 月 28 日 | 2022 年 12 月 29 日—2023 年 1 月 8 日 | 2023 年 1 月 9 日—2023 年 1 月 15 日 |
| YH-6 | 2022 年 12 月 21 日—2022 年 12 月 24 日 | 2022 年 12 月 25 日—2023 年 1 月 2 日 | 2023 年 1 月 3 日—2023 年 1 月 6 日 |
| YH-7 | 2022 年 12 月 15 日—2022 年 12 月 19 日 | 2022 年 12 月 20 日—2022 年 12 月 25 日 | 2022 年 12 月 26 日—2023 年 1 月 1 日 |
| YH-8 | 2022 年 12 月 20 日—2022 年 12 月 24 日 | 2022 年 12 月 25 日—2022 年 12 月 30 日 | 2022 年 12 月 31 日—2023 年 1 月 3 日 |
| YH-9 | 2022 年 12 月 20 日—2022 年 12 月 22 日 | 2022 年 12 月 23 日—2022 年 12 月 28 日 | 2022 年 12 月 29 日—2022 年 12 月 31 日 |
| YH-10 | 2022 年 12 月 10 日—2022 年 12 月 21 日 | 2022 年 12 月 22 日—2022 年 12 月 28 日 | 2022 年 12 月 29 日—2023 年 1 月 14 日 |

## 2.2 花器外观性状比较分析

对 YZ-2、HY3 及其 10 个杂交后代的 8 个花器外观性状（图 1）进行比较分析，发现不同材料间各性状存在显著差异（表 2）。YH-5、YH-6 和 YH-10 的花径均显著高于双亲；YH-9 的花瓣数最多（8.20±0.41），而 YH-3 的花瓣数最少（5.20±0.41）；HY3、YH-2 和 YH-10 的花柱数较多（4.13 ～ 4.20），显著高于母本 YZ-2（3.67±0.49）；HY3 的雄蕊数最多（82.33±3.58），其次是 YH-9（81.33±2.53），YZ-2 最 少（49.93±2.84）；YH-10 的花柱长（7.83±0.21）mm 和雌蕊高（11.12±0.06）mm 均显著高于其他材料；YH-3 的雄蕊高最高，为（16.16±0.34）mm，显著高于双亲；YH-2 和 YH-10 的萼片数较多，分别为（7.47±0.52）和（7.67±0.72），均显著高于双亲（表 2）。综合来看，杂交 $F_1$ 代在多个花器性状上表现出显著的杂种优势，尤其是 YH-10 在花径、花柱长和雌蕊高等性状指标上表现突出。这种杂种优势现象表明杂交过程有效整合了双亲优良性状，为后续定向选育具有特定花器外观性状的观赏或育种材料提供了丰富的遗传资源。




A ～ L 依次为 YZ-2、HY3、YH-1、YH-2、YH-3、YH-4、YH-5、YH-6、YH-7、YH-8、YH-9 和 YH-10。
A-L are: YZ-2, HY3, YH-1, YH-2, YH-3, YH-4, YH-5, YH-6, YH-7, YH-8, YH-9 and YH-10.

图 1 花器示意
**Fig. 1 Schematic diagram of flowers**

表 2　亲本及杂交 $F_1$ 代 10 个抗病优株花器外观 †

**Table 2　Flower organ appearance of parents and 10 disease-resistant elite F1 hybrid strains**

| 材料 Material | 花径 Flower diameter /mm | 花瓣数 Number of petals | 花柱数 Number of styles | 雄蕊数 Number of stamens | 花柱长 Style length /mm | 雄蕊高 Stamen height /mm | 雌蕊高 Pistil height /mm | 萼片数 Number of sepals |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| YZ-2 | 73.82±1.17 c | 6.67±0.49 f | 3.67±0.49 d | 49.93±2.84 e | 3.95±0.47 h | 13.43±0.75 h | 5.54±0.28 g | 5.67±0.49 de |
| HY3 | 66.54±2.41 e | 7.80±0.41 b | 4.13±0.35 a | 82.33±3.58 a | 5.44±0.19 g | 12.73±0.72 i | 9.62±0.49 d | 6.73±0.46 b |
| YH-1 | 73.73±1.45 c | 7.13±0.35 d | 3.20±0.41 e | 76.53±3.98 b | 7.29±0.41 b | 15.44±0.35 c | 10.95±0.18 b | 5.47±0.52 ef |
| YH-2 | 71.08±7.50 d | 7.47±0.52 c | 4.20±0.41 a | 67.80±3.69 d | 5.67±0.15 f | 14.69±0.58 d | 8.65±0.21 e | 7.47±0.52 a |
| YH-3 | 58.81±1.42 g | 5.20±0.41 g | 3.80±0.41 c | 71.93±3.88 c | 6.46±0.22 e | 16.16±0.34 a | 9.48±0.35 d | 6.87±0.64 b |
| YH-4 | 76.19±1.25 b | 7.07±0.26 de | 3.20±0.41 e | 71.67±4.03 c | 6.64±0.21 cd | 15.95±0.43 ab | 8.55±0.19 ef | 6.00±0.76 cd |
| YH-5 | 81.00±1.43 a | 7.93±0.26 ab | 3.27±0.46 e | 80.47±4.17 a | 6.57±0.18 de | 15.76±0.35 b | 9.52±0.09 d | 5.47±0.52 ef |
| YH-6 | 82.24±2.24 a | 7.07±0.26 de | 3.07±0.59 e | 72.73±4.61 c | 6.73±0.09 cd | 14.18±0.17 ef | 9.95±0.21 c | 5.13±0.35 fg |
| YH-7 | 64.50±1.71 f | 6.87±0.35 ef | 4.00±0.53 ab | 69.07±2.63 d | 6.61±0.20 ce | 14.27±0.48 e | 8.49±0.15 f | 6.33±0.62 cd |
| YH-8 | 75.24±1.77 bc | 7.13±0.35 d | 3.27±0.46 e | 76.67±3.04 b | 5.65±0.09 f | 13.28±0.35 h | 8.55±0.15 ef | 4.73±0.46 h |
| YH-9 | 69.94±1.13 d | 8.20±0.41 ab | 3.80±0.41 ab | 81.33±2.53 a | 5.69±0.22 f | 13.87±0.49 fg | 8.50±0.13 f | 4.93±0.80 gh |
| YH-10 | 82.15±0.65 a | 7.13±0.35 de | 4.13±0.52 ab | 76.13±1.81 b | 7.83±0.21 a | 13.83±0.51 g | 11.12±0.06 a | 7.67±0.72 a |

† 表中每列不同的小写字母，表示不同样本之间各指标的值存在显著差异（$P < 0.05$）。下同。
The different lowercase letters in each column in the table indicate that there is a significant difference in the values of each index between different samples ($P < 0.05$). The same below.

遗传变异分析结果（表 3）表明，花器外观各性状的变异程度和杂交优势存在显著差异。8 个性状的变异系数为 6.10% ～ 17.47%，其中萼片数的变异系数最高（17.47%），表明其遗传多样性较为丰富；而雄蕊数的变异系数最低（6.10%），显示其遗传稳定性较强。从杂交优势指数来看，花柱长表现出最强的杂交优势（138.66%），其次是雌蕊高（123.75%）和雄蕊高（112.69%），而花柱数的杂交优势指数最低（92.05%）。此外，花径的变异幅度为 58.81 ～ 82.24 mm，花瓣数为 5.20 ～ 7.93（表 3），其他性状的变异幅度也反映了不同程度的离散分布。这些结果揭示了油茶杂交 $F_1$ 代花器性状的遗传变异规律，为后续抗病优株的选育提供了重要的理论依据。

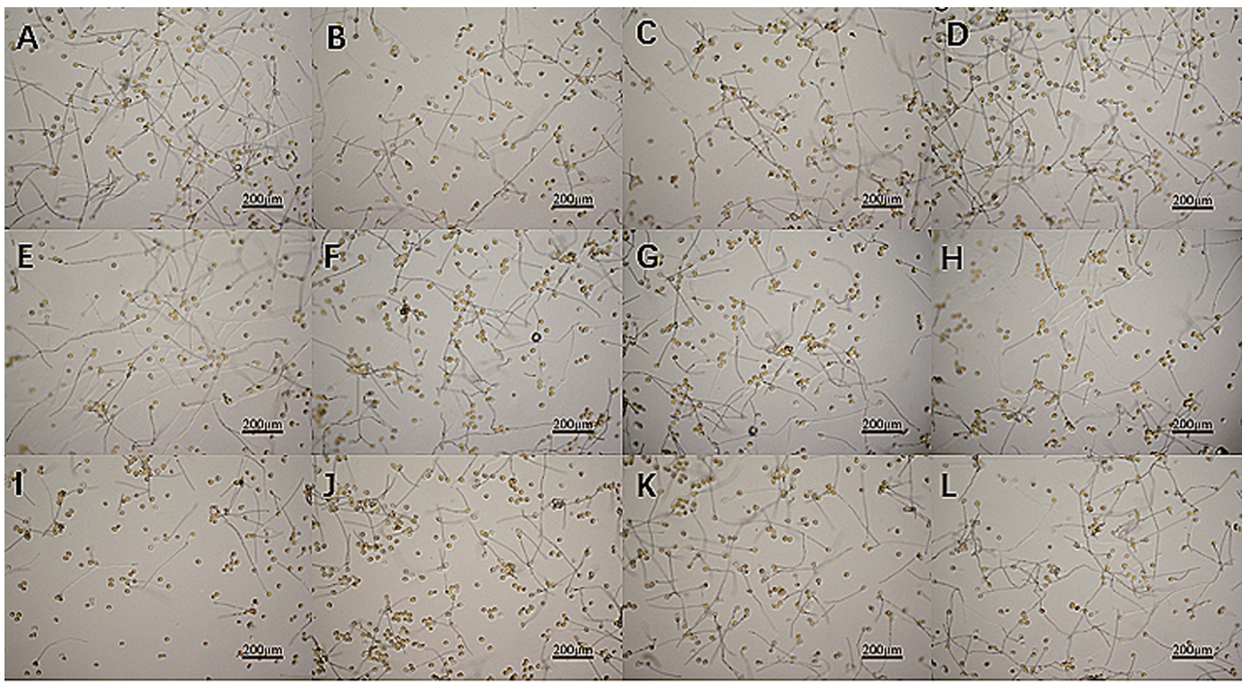
表 3　亲本及杂交 $F_1$ 代 10 个抗病优株花器性状和花粉特征遗传变异分析

**Table 3　Analysis of genetic variation in floral organ traits and pollen characteristics of parents and 10 disease-resistant elite F1 hybrid strains**

| 指标 Index | 花径 Flower diameter / mm | 花瓣数 Number of petals | 花柱数 Number of styles | 雄蕊数 Number of stamens | 花柱长 Style length / mm | 雄蕊高 Stamen height / mm | 雌蕊高 Pistil height/ mm | 萼片数 Number of sepals | 单个花药花粉数量 Pollen number per anther | 花粉粒直径 Pollen grain diameter / μm | 花粉活力 Pollen viability / % |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 平均值 Mean | 73.49 | 7.12 | 3.59 | 74.43 | 6.51 | 14.74 | 9.38 | 6.01 | 3 803.33 | 30.80 | 78.58 |
| 标准差 Standard deviation | 7.70 | 0.80 | 0.44 | 4.54 | 0.71 | 1.01 | 1.02 | 1.05 | 493.43 | 2.26 | 2.34 |
| 最小值 Min. | 58.81 | 5.20 | 3.07 | 67.80 | 5.65 | 13.28 | 8.49 | 4.73 | 3 248.89 | 27.21 | 75.86 |
| 最大值 Max. | 82.24 | 7.93 | 4.20 | 81.33 | 7.83 | 16.16 | 11.12 | 7.67 | 4 944.44 | 33.73 | 82.56 |
| 变异系数 Coefficient of variation/% | 10.48 | 11.24 | 12.26 | 6.10 | 10.91 | 6.85 | 10.87 | 17.47 | 12.97 | 7.35 | 2.98 |
| 杂交优势指数 Heterosis index /% | 104.72 | 98.41 | 92.05 | 112.55 | 138.66 | 112.69 | 123.75 | 96.94 | 91.18 | 111.18 | 97.49 |

## 2.3　花粉特征比较分析

对 YZ-2、HY3 及其 10 个杂交后代的花粉特征进行遗传变异分析，结果（表 3）表明，单个花药花粉数量平均为 3 803.33，变异幅度为 3 248.89 ～ 4 944.44，变异系数为 12.97%，表现出较高的变异性，但其杂交优势指数仅为 91.18%；花粉粒直径平均为 30.80 μm，变异系数较低（7.35%），但表现出显著的杂交优势（111.18%），说明该性状在杂交后代中具有明显的正向超亲遗传效应。对 YZ-2、HY3 及其 10 个杂交后代的花粉管萌发进行观察并测定花粉活力，结果（表 3、图 2）表明，花粉活力平均值为 78.58%，变异系数最小（2.98%），遗传稳定性较强，其杂交优势指数接近亲本水平（97.49%）。综合来看，$F_1$ 代花粉特征在单个花药花粉数量上呈现较大变异，但杂交优势不明显，而在花粉粒直径上则表现出显著的杂种优势，这为后续杂交育种中花粉性状的选择提供了重要依据。

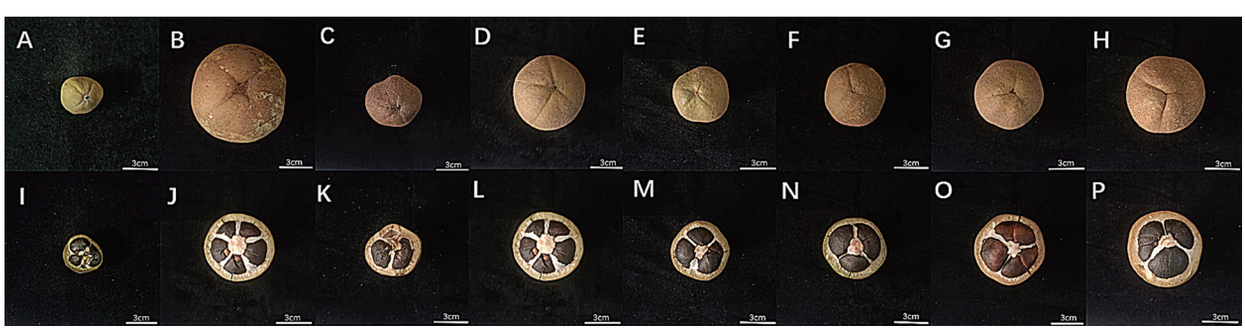



A ～ L 依次为 YZ-2、HY3、YH-1、YH-2、YH-3、YH-4、YH-5、YH-6、YH-7、YH-8、YH-9 和 YH-10，标尺长度为 200 μm。
A-L are: YZ-2, HY3, YH-1, YH-2, YH-3, YH-4, YH-5, YH-6, YH-7, YH-8, YH-9 and YH-10, the length of the bar is 200 μm.

**图 2 花粉管萌发示意**
**Fig. 2 Schematic diagram of pollen tube germination**

### 2.4 果实外观比较分析

对 YZ-2、HY3 及其杂交 $F_1$ 代 6 个抗病优株（YH-1、YH-2、YH-4、YH-5、YH-7、YH-10）的果实外观形态进行比较分析，结果（图 3、表 4）表明，各材料的果实性状存在显著差异，变异系数为 12.57% ～ 57.71%，其中果皮厚度和单果鲜籽质量的变异系数分别为最低和最高。父本 HY3 在单果质量（86.70 g）、果实横径（58.22 mm）、果实纵径（47.89 mm）和单果鲜籽质量（34.45 g）等性状上均表现最优，显著高于母本 YZ-2 和其他杂交后代，而母本 YZ-2 的各项指标均处于较低水平。在杂交后代中，YH-10 表现最为突出，其单果质量（48.35 g）、果实纵径（45.26 mm）和单果鲜籽质量（20.62 g）显著高于其他杂交后代，且果实纵径接近父本水平；YH-2 和 YH-7 在果实横径（47.89 mm 和 34.74 mm）和单果鲜籽质量（11.16 g 和 13.17 g）上表现较好；YH-5 和 YH-4 的果实性状相对中等，而 YH-1 的各项指标均显著较低。值得注意的是，所有杂交后代的果皮厚度（3.18 ～ 4.35 mm）均显著低于父本但高于母本，呈现中间型遗传特征；籽粒数在各材料间变异较小（2.50 ～ 5.75），其中 YH-2、YH-7 和 YH-10 达到或接近父本水平（5.75）。综合分析表明，杂交 $F_1$ 代在果实性状上表现出明显的分离现象，其中 YH-10 在多个重要性状上表现出显著的杂种优




A ～ H 依次为 YZ-2、HY3、YH-1、YH-2、YH-4、YH-5、YH-7、YH-10；I-P 依次为 YZ-2、HY3、YH-1、YH-2、YH-4、YH-5、YH-7 和 YH-10，标尺长度为 3 cm。
A-H are: YZ-2, HY3, YH-1, YH-2, YH-4, YH-5, YH-7, YH-10; I-P is YZ-2, HY3, YH-1, YH-2, YH-4, YH-5, YH-7 and YH-10, the length of the scale is 3cm.

**图 3 果实外观示意**
**Fig. 3 Schematic diagram of fruit appearance**

势。这些结果表明，通过远缘杂交获得的后代材料间果实性状指标变异较大，YH-10 等优势株系整合了双亲的优良性状，为培育兼具高产与优质果实性状的油茶新品种提供了材料基础。

## 2.5　经济性状比较分析

对 YZ-2、HY3 及其杂交 $F_1$ 代 6 个抗病优株的果实经济性状进行分析，结果（表 5）表明，

表 4　亲本及杂交 $F_1$ 代 6 个抗病优株果实性状比较分析

**Table 4　Comparative analysis of fruit traits of parents and six disease-resistant elite $F_1$ hybrid strains**

| 材料 Sample | 单果质量 Fruit weight /g | 果实横径 Fruit transverse diameter /mm | 果实纵径 Fruit longitudinal diameter /mm | 果皮厚度 Peel thickness / mm | 籽粒数 Seed number per fruit | 单果鲜籽质量 Fresh seed weight per fruit /g |
|---|---|---|---|---|---|---|
| YZ-2 | 6.70±0.92 e | 24.25±1.24 e | 23.82±1.37 e | 1.19±0.02 e | 4.00±0 c | 3.95±0.50 e |
| HY3 | 86.70±1.69 a | 58.22±0.66 a | 47.89±2.75 a | 7.83±0.59 a | 5.75±0.50 a | 34.45±2.79 a |
| YH-1 | 9.20±1.41 e | 23.82±2.37 e | 27.20±1.49 d | 3.25±0.10 cd | 2.50±0.58 d | 3.28±0.05 e |
| YH-2 | 28.82±3.28 c | 47.89±2.56 c | 34.76±1.78 c | 3.67±0.15 cd | 5.50±1.29 a | 11.16±1.65 c |
| YH-4 | 16.50±1.86 d | 27.20±1.08 d | 34.74±3.24 c | 3.26±0.52 cd | 4.25±0.96 bc | 6.55±1.14 d |
| YH-5 | 19.87±5.72 d | 34.76±2.72 d | 33.57±2.41 c | 3.77±0.33 c | 5.00±1.41 ac | 8.16±2.37 d |
| YH-7 | 27.32±3.67 c | 34.74±2.15 c | 37.94±0.80 b | 3.18±0.68 d | 5.25±0.50 ab | 13.17±1.94 c |
| YH-10 | 48.35±4.34 b | 33.57±1.04 b | 45.26±2.46 a | 4.35±0.42 b | 5.50±0.58 a | 20.62±2.73 b |
| 均值 Mean | 25.01 | 33.66 | 35.57 | 3.58 | 4.67 | 10.49 |
| 标准差 Standard deviation | 13.52 | 8.29 | 5.91 | 0.45 | 1.61 | 6.05 |
| 变异系数 Coefficient of variation /% | 54.04 | 24.62 | 16.62 | 12.57 | 24.82 | 57.71 |

表 5　亲本及杂交 $F_1$ 代 6 个抗病优株果实经济性状比较分析

**Table 5　Comparative analysis of fruit economic traits of parents and six disease-resistant elite $F_1$ hybrid strains**

| 材料 Sample | 百籽质量 100-seed weight /g | 籽含水率 Seed moisture content /% | 种仁含水率 Kernel moisture content /% | 鲜出籽率 Fresh seed yield /% |
|---|---|---|---|---|
| YZ-2 | 99.17±15.28 e | 44.02±3.21 b | 43.82±1.10 cd | 45.97±7.31 ab |
| HY3 | 588.44±72.38 a | 47.24±1.17 ab | 42.42±1.12 d | 37.94±1.26 ab |
| YH-1 | 144.94±32.58 de | 30.87±19.04 c | 35.76±8.14 e | 33.45±3.59 b |
| YH-2 | 195.16±22.90 cd | 52.62±0.99 ab | 61.56±0.32 a | 39.69±3.06 ab |
| YH-4 | 159.99±29.74 d | 48.63±0.52 ab | 52.43±1.22 b | 36.44±7.07 ab |
| YH-5 | 165.98±40.65 d | 46.14±0.58 b | 48.95±6.12 bc | 41.05±3.92 ab |
| YH-7 | 249.96±15.41 c | 59.43±0.09 a | 64.79±1.46 a | 48.96±13.61 a |
| YH-10 | 366.26±36.86 b | 54.90±0.13 ab | 61.57±1.21 a | 43.11±2.49 ab |
| 均值 Mean | 213.72 | 48.77 | 54.18 | 40.45 |
| 标准差 Standard deviation | 83.45 | 9.93 | 10.88 | 5.39 |
| 变异系数 Coefficient of variation /% | 39.05 | 20.37 | 20.07 | 13.34 |

| 材料 Sample | 鲜籽出仁率 Fresh seed kernel percentage /% | 干出籽率 Dry seed yield /% | 干籽出仁率 Dry seed kernel percentage /% | 干籽含油率 Dry seed oil content /% |
|---|---|---|---|---|
| YZ-2 | 85.36±2.24 a | 25.75±4.54 a | 85.86±5.67 a | 37.85±2.58 e |
| HY3 | 44.02±0.35 f | 20.02±1.11 a | 48.06±1.32 f | 92.02±2.51 ab |
| YH-1 | 54.99±0.64 e | 23.53±8.42 a | 52.61±8.29 ef | 96.53±16.10 a |
| YH-2 | 68.72±1.68 b | 18.80±1.48 a | 55.74±0.76 ce | 61.36±0.84 d |
| YH-4 | 67.65±0.54 bc | 18.70±3.48 a | 62.64±0.99 b | 56.68±0.90 d |
| YH-5 | 64.00±7.13 cd | 22.11±2.15 a | 60.16±2.59 bc | 71.24±3.07 c |
| YH-7 | 68.59±1.67 b | 19.85±5.48 a | 59.51±1.56 bd | 56.83±1.51 d |
| YH-10 | 63.08±0.59 d | 19.44±1.08 a | 53.74±1.14 df | 85.43±1.80 b |
| 均值 Mean | 64.51 | 20.41 | 57.40 | 71.35 |
| 标准差 Standard deviation | 5.24 | 1.97 | 3.97 | 16.48 |
| 变异系数 Coefficient of variation /% | 8.12 | 9.65 | 6.91 | 23.10 |

不同材料间各经济性状存在显著差异，8 个性状变异系数为 6.91% ～ 39.05%，其中干籽出仁率的变异系数最低，而百籽质量的变异系数最高。父本 HY3 在百籽质量（588.44 g）和干籽含油率（92.02%）方面表现较优，显著高于其他材料；而母本 YZ-2 则在鲜籽出仁率（85.36%）、干出籽率（25.75%）和干籽出仁率（85.86%）等性状上表现突出。在杂交 $F_1$ 代中，YH-10 的百籽质量（366.26 g）显著高于其他杂交后代，达到父本的 62.24%；YH-7 和 YH-2 在种仁含水率（64.79% 和 61.56%）和鲜出籽率（48.96% 和 39.69%）方面表现优异；YH-1 虽然百籽质量最低（144.94 g），但其干籽含油率（96.53%）显著高于父本，表现出超亲优势。值得注意的是，所有杂交后代的鲜籽出仁率（54.99% ～ 68.72%）均显著高于父本（44.02%），但低于母本；干籽出仁率（52.61% ～ 62.64%）则介于双亲之间。在含水率方面，YH-7 的籽含水率（59.43%）和种仁含水率（64.79%）均为最高，显著高于其他材料。综合分析表明，杂交 $F_1$ 代在经济性状上表现出明显的分离和超亲现象，其中 YH-10 在百籽质量、YH-1 在干籽含油率、YH-7 在含水率等方面表现出显著优势，为油茶高含油量、高产量的抗病育种提供了重要材料基础。这些性状的协同改良可能源于双亲优良基因的互补效应，未来可通过分子标记辅助选择进一步优化育种效率，实现油茶品质与产量的同步提升。

### 2.6 品质性状比较分析

对油茶亲本及杂交 $F_1$ 代 6 个抗病优株的油体脂肪酸组分和功能性成分进行了比较分析，结果（表 6）显示，不同材料间各指标存在显著差异，12 个性状变异系数为 6.51% ～ 39.86%，其中油酸的变异系数最低，而亚油酸的变异系数最高。在功能性成分方面，YH-10 的角鲨烯含量最高（686.4 mg/kg），显著高于父本 HY3（324.2 mg/kg）和母本 YZ-2（253.4 mg/kg）；YH-4 的维生素 E 含量达 19.60 mg/100g，为所有材料中最高。含油率方面，YH-1 表现最优（49.9%），超过父本（44.2%）和母本（32.4%）。脂肪酸组成分析表明，父本 HY3 的油酸含量最高（84.3%），而母本 YZ-2 的

**表 6 亲本及杂交 $F_1$ 代 6 个抗病优株油体脂肪酸组分和功能性成分分析**

**Table 6 Analysis of fatty acid composition and functional components in oil of parents and six disease-resistant elite $F_1$ hybrid strains**

| 材料 Material | β- 谷甾醇 β-Sitosterol / ($mg \cdot kg^{-1}$) | 角鲨烯 Squalene / ($mg \cdot kg^{-1}$) | 含油率 Oil content /% | 总多酚 Total polyphenols / ($mg \cdot g^{-1}$) | 棕榈酸 Palmitic acid /% | 棕榈烯酸 Palmitoleic acid /% |
|---|---|---|---|---|---|---|
| YZ-2 | 416.4 | 253.4 | 32.4 | 10.9 | 13.3 | 0.044 8 |
| HY3 | 412.2 | 324.2 | 44.2 | 23.3 | 9.1 | 0.058 1 |
| YH-1 | 279.9 | 303.7 | 49.9 | 6.8 | 8.8 | 0.078 4 |
| YH-2 | 407.5 | 352.5 | 34.2 | 15.9 | 13.0 | 0.097 0 |
| YH-4 | 357.8 | 344.7 | 35.5 | 16.1 | 13.6 | 0.081 3 |
| YH-5 | 346.3 | 338.0 | 42.8 | 15.4 | 11.8 | 0.043 4 |
| YH-7 | 389.7 | 537.6 | 33.8 | 20.6 | 12.3 | 0.096 8 |
| YH-10 | 360.1 | 686.4 | 45.9 | 12.3 | 10.8 | 0.071 4 |
| 均值 Mean | 356.88 | 427.15 | 40.35 | 14.52 | 11.72 | 0.08 |
| 标准差 Standard deviation | 44.02 | 151.64 | 6.82 | 4.61 | 1.71 | 0.02 |
| 变异系数 Coefficient of variation /% | 12.33 | 35.50 | 16.89 | 31.76 | 14.60 | 25.41 |

| 材料 Material | 硬脂酸 Stearic acid /% | 油酸 Oleic acid /% | 亚油酸 Linoleic acid /% | 亚麻酸 Linolenic acid /% | 花生烯酸 Arachidonic acid /% | 维生素 E Vitamin E / [$mg \cdot (100g)^{-1}$] |
|---|---|---|---|---|---|---|
| YZ-2 | 1.56 | 69.4 | 14.20 | 0.989 | 0.516 | 17.00 |
| HY3 | 3.55 | 84.3 | 2.39 | 0.184 | 0.404 | 1.87 |
| YH-1 | 4.40 | 81.7 | 4.09 | 0.448 | 0.403 | 12.10 |
| YH-2 | 1.76 | 71.5 | 12.30 | 0.780 | 0.434 | 15.70 |
| YH-4 | 1.82 | 68.5 | 14.90 | 0.579 | 0.544 | 19.60 |
| YH-5 | 2.45 | 74.9 | 9.82 | 0.511 | 0.445 | 9.72 |
| YH-7 | 2.45 | 73.2 | 10.80 | 0.586 | 0.492 | 12.10 |
| YH-10 | 2.55 | 79.0 | 6.66 | 0.451 | 0.406 | 6.44 |
| 均值 Mean | 2.57 | 74.80 | 9.76 | 0.56 | 0.45 | 12.61 |
| 标准差 Standard deviation | 0.96 | 4.87 | 3.89 | 0.12 | 0.05 | 4.59 |
| 变异系数 Coefficient of variation /% | 37.28 | 6.51 | 39.86 | 22.09 | 12.04 | 36.40 |

亚油酸（14.2%）和亚麻酸（0.989%）含量显著高于父本；杂交后代中 YH-2 的亚油酸含量（12.3%）接近母本水平，YH-4 的亚油酸含量（14.9%）甚至超过母本。值得注意的是，YH-7 在总多酚含量（20.6 mg/g）和角鲨烯含量（537.6 mg/kg）方面表现突出，而 YH-5 在油酸含量（74.9%）和含油率（42.8%）方面具有优势。*β*- 谷甾醇含量在各材料间相对稳定（279.9 ～ 416.4 mg/kg），其中母本 YZ-2 含量最高（416.4 mg/kg）。综合分析表明，杂交 $F_1$ 代在功能性成分和脂肪酸组成上表现出明显的分离和超亲现象，特别是 YH-10 的角鲨烯含量、YH-4 的维生素 E 含量以及 YH-1 的含油率等性状表现优异，为选育高品质油茶新品种提供了重要材料基础。这些结果也证实，通过杂交育种可以显著改良油茶的营养品质和功能特性。从遗传学角度分析，这些功能性成分的协同改良可能源于亲本间代谢通路的优势互补，后续可通过转录组和代谢组的联合分析，深入解析这些活性物质合成的调控网络，为油茶的品质育种提供更精准的分子标记和育种策略。

### 2.7　6 个油茶种间杂交后代的单株选优

对单果质量、果实横径、果实纵径、果皮厚度、籽粒数、单果鲜籽质量、百籽质量、鲜出籽率、鲜籽出仁率、籽含水率、种仁含水率、干籽含油率，种仁含油率和亚油酸 14 个指标进行主成分分析，并计算最终得分，所得相关矩阵的特征值和方差贡献率见表 7。按照特征值大于 1.0 的原则提取 2 个主成分，累计贡献率为 88.86%，提取的主成分可代表原始数据的大部分信息。其中，第 1 主成分方差贡献率为 56.35%，包括果皮厚度、百籽质量、单果质量、单果鲜籽质量、果实横径、果实纵径、鲜籽出仁率、亚油酸、干籽含油率；第 2 主成分方差贡献率为 32.51%，包括籽含水率、种仁含水率、鲜出籽率、籽粒数、种仁含油率。杂交子代 6 个结果优株综合得分排序为 YH-10 ＞ YH-7 ＞ YH-2 ＞ YH-5 ＞ YH-4 ＞ YH-1，其中 YH-10 综合得分最高，为 3.17，介于高亲亲本与低亲亲本之间；YH-1 综合得分最低，为 −5.59，低于低亲亲本（表 8）。YH-10 是杂交子代中结合父母本优异性状最优株，其单果质量较母本提高了 41.65 g，其次为 YH-7、YH-2、YH-5。YH-10 等优株在保持高含油率的同时实现了果实大小的显著改良，这种性状协同改良可能源于亲本间控制不同性状的有利基因的重新组合，为油茶产量和品质的同步提升提供了新的育种思路。后续可深入研究这些优株优异性状形成的分子机制。

**表 7　主成分分析结果**
**Table 7　Principal component analysis result**

| 主成分 Principal component | 特征值 Eigenvalue | 方差贡献率 Variance contribution rate /% | 累计方差贡献率 Cumulative variance contribution rate /% |
|---|---|---|---|
| 1 | 7.89 | 56.35 | 56.35 |
| 2 | 4.55 | 32.51 | 88.86 |

**表 8　主成分分析计算得分**
**Table 8　Principal component analysis calculated scores**

| 材料 Sample | 主成分得分 Principal component score |
|---|---|
| YZ-2 | −3.39 |
| HY3 | 5.07 |
| YH-1 | −5.59 |
| YH-2 | 0.97 |
| YH-4 | −1.39 |
| YH-5 | −1.01 |
| YH-7 | 2.15 |
| YH-10 | 3.17 |

## 3　讨　论

杂交育种技术是推动油茶良种选育与产业化进程的有效途径 [22]。不同种源的野生油茶果实表型性状存在较大变异，在油茶育种中，可根据育种目标将不同种源地单株有效结合，培育出适应性更强和性状更优异的种质资源 [23]。梁斌等 [11] 发现普通油茶与香花油茶杂交 $F_1$ 代的 9 个叶片表型性状均存在不同程度的变异。陈雅 [10] 以攸县油茶和普通油茶种间杂交，选育出具有果大、皮薄、鲜出籽率高和高 *β*- 谷甾醇等特性的优株。本研究以具有抗病性强、春天开花和果皮薄等特点的攸县油茶 YZ-2 为母本，以具有果大、产量高、茶油品质佳等优良性状的 HY3 为父本，通过攸县油茶和海南油茶种间杂交，培育出了兼具抗病性强、果皮薄、果大和茶油品质佳等性状的 YH-10 优株，为高产优质油茶新品种的创制提供了理论基础。

花的表型特征与树体坐果和产量之间存在密切的关联 [24]。近年来，国内外针对油茶花的研究主要集中在开花物候、花器外观性状和花粉特征等方面。不同油茶物种盛花期不同，普通油茶盛花期在 10—11 月，越南油茶、博白大果、红皮糙果茶和大花红山茶在 12 月，攸县油茶在次年 2 月。本研究中 10 个优株及其父本花期集中在 12 月—次年 1 月，且基本花期相遇，而母本 YZ-2 为春天

开花，其杂交子代花期显著早于父本 HY3。这一发现与金笑龙 [25] 报道的油茶花期在同一地区分化程度较弱的结论存在差异，表明品种遗传背景对油茶花期性状具有决定性影响。油茶的授粉受精与花柱、花粉密切相关 [26]。普通油茶和攸县油茶之间的单向杂交不亲和主要是由花柱抑制花粉管的生长导致的 [27]。攸县油茶的花柱较短，丁涛等 [26] 对 YZ-2×HS、YZ-2×DY2、DY2×YZ-2 三个杂交子代群体花柱长进行分析，发现 YZ-2×DY2 子代群体最易获得花柱较短的单株。郭鑫淼等 [24] 对 DY2×HS 油茶杂交子代群体花器官性状的研究发现，花柱长的遗传明显倾向于母本 DY2。本研究对 YZ-2×HY3 杂交子代和亲本的花柱长分析发现，子代材料的花柱长均超过双亲，但由于双亲和子代材料的雄蕊高均高于雌蕊，因此，不影响柱头的可授性。贺胜等 [28] 发现 6 个油茶品种的花粉活力为 65.02% ～ 72.70%，存在显著差异。而本研究中花粉活力为 75.86% ～ 82.56%，其变异系数是测定的 11 个花器外观性状和花粉特征指标中最低的（2.98%），这些结果表明，通过种间杂交获得的 10 个抗病优株花粉育性均较高。

对于油料树种来说，果实性状是其重要的经济指标和育种选择的重要参考性状。选育高产优质的新品种是油茶育种的主要目标，这对油茶产业的发展具有十分重要的意义。本研究发现，$F_1$ 代 10 个抗病优株及其亲本的果实和经济性状变异显著。在果实性状方面，父本 HY3 在单果质量（86.70 g）等性状上表现最优，而杂交后代 YH-10 在多个性状上接近父本水平。以上结果说明，父本 HY3 的大果性状对子代果形遗传影响显著，但这一结果与前人研究的遗传变异分析 [29] 存在不一致性，反映了不同杂交组合间遗传背景的差异。在茶油功能性成分分析方面，YH-10 的角鲨烯含量（686.4 mg/kg）显著高于双亲，YH-4 的维生素 E 含量（19.60 mg/100g）为所有试验材料中最高，这些结果表明，YH-10 和 YH-4 具有重要的应用潜力。主成分分析法能够科学、简便和直观地对植物种质资源进行评价，已广泛应用于油茶种质资源研究及评价。本研究通过主成分分析证实了 YH-10 为综合表现最优的杂交后代，其得分（3.17）介于双亲之间。这一结果验证了杂交育种在整合双亲优良性状方面的有效性。由于本研究选取的杂交子代材料均处于初果期，因此，后续还需进一步测定果实经济性状指标，以此支撑优良单株选育工作。

## 4 结 论

本研究以 YZ-2（六倍体）、HY3（十倍体）和杂交 $F_1$ 代 10 株优株（八倍体）为试验材料，对其花、果表型性状进行测定分析，结果发现，10 个抗病优株及其父本 HY3 的花期为冬季，母本 YZ-2 的花期为春季，且杂交子代花期早于父本。对单果质量、果实横径、果实纵径、果皮厚度、籽粒数、单果鲜籽质量、百籽质量、鲜出籽率、鲜籽出仁率、籽含水率、种仁含水率、干籽含油率、种仁含油率和亚油酸 14 个指标进行主成分分析，提取 2 个主成分，累计贡献率为 88.86%，其中 YH-10 的综合得分最高，为 3.17，选育出大果优株 YH-10，其单果质量较 YZ-2 提高了 41.65 g。本研究证实了通过杂交育种可以创制出具有超亲优势的新种质，明确了不同性状的遗传特点和变异规律，并筛选出了多个在特定性状上表现突出的优良材料，对油茶遗传改良实践具有重要指导意义。

**参考文献：**

[1] 廖德胜 , 许俊波 . 木本油料植物油茶的品质研究展望 [J]. 农业与技术 ,2021,41(16):11-13.
LIAO D S, XU J B. Research prospects on quality of woody oil plant *Camellia oleifera*[J]. Agriculture and Technology,2021, 41(16):11-13.

[2] 陈永忠 , 王德斌 . 湖南省油茶良种选育及推广应用概况 [J]. 湖南林业科技 ,2001,28(3):23-27.
CHEN Y Z, WANG D B. The selection of fine varieties and application of *Camellia oleifera* in Hunan Province[J]. Hunan Forestry Science and Technology,2001,28(3):23-27.

[3] 杨海余 , 龚文芳 , 崔坤鹏 , 等 . 油茶籽油品质性状研究进展 [J]. 中国粮油学报 ,2024,39(8):210-223.
YANG H Y, GONG W F, CUI K P, et al. Progress of research on quality characteristics of *Camellia oleifera* seed oil[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association,2024,39(8):210-223.

[4] 黄俊毅 . 推动油茶产业高质量发展 [J]. 食品界 ,2023(9):29-31.
HUANG J Y. Promoting high-quality development of *Camellia oleifera* industry[J]. Food Industry,2023(9):29-31.

[5] 王瑞 , 陈永忠 . 我国油茶产业的发展现状及提升思路 [J]. 林业科技开发 ,2015(4):6-10.
WANG R, CHEN Y Z. Development status and improvement strategies of *Camellia oleifera* industry in China[J]. China Forestry Science and Technology,2015(4):6-10.

[6] 高雅莉 , 田茂秀 , 李科霖 . 种质差异对油茶果实主要性状的影响探讨 [J]. 南方农业 ,2023,17(6):252-254.
GAO Y L, TIAN M X, LI K L. Discussion on the influence of germplasm differences on the main characters of *Camellia*

*oleifera* fruit[J]. South China Agriculture,2023,17(6):252-254.

[7] 郭财源 , 李艳民 , 胡观兴 , 等 . 油茶杂交子代叶片光合特性与形态结构 [J]. 中南林业科技大学学报 ,2025,45(9):59-70.
GUO C Y, LI Y M, HU G X, et al. Photosynthetic characteristics and morphological structure of leaves in *Camellia oleifera* hybrid progeny[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2025,45(9):59-70.

[8] 江泽鹏 , 曾雯珺 , 夏莹莹 , 等 . 不同地理种源油茶无性系杂交果实及 $F_1$ 代苗期特性 [J]. 广西林业科学 ,2018,47(2):212-215.
JIANG Z P, ZENG W J, XIA Y Y, et al. Hybrid fruits of *Camellia oleifera* from different geographical provenances and seedling growth characteristics of $F_1$ generation[J]. Guangxi Forestry Science,2018,47(2):212-215.

[9] 吕欢欢 , 伍岳峰 , 李煜 , 等 . 普通油茶杂交子代重要经济性状的遗传分析与选择 [J]. 经济林研究 ,2022,40(3):14-26.
LYU H H, WU Y F, LI Y, et al. Genetic analysis and selection for important traits of the crossing offspring in *Camellia oleifera*[J]. Non-wood Forest Research,2022,40(3):14-26.

[10] 陈雅 . 油茶种间杂交 $F_1$ 代 18 个优良单株主要性状比较分析 [D]. 长沙 : 中南林业科技大学 ,2020.
CHEN Y. Comparative analysis on the main characters of 18 excellent individual plants in $F_1$ generation of interspecific hybridization of *Camellia oleifera*[D]. Changsha: Central South University of Forestry & Technology,2020.

[11] 梁斌 , 张幸 , 叶维军 , 等 . 普通油茶与香花油茶杂交 $F_1$ 代叶片表型性状遗传多样性研究 [J]. 北方园艺 ,2025(2):23-29.
LIANG B, ZHANG X, YE W J, et al. Genetic diversity of leaf phenotypic traits in progeny of *Camellia oleifera* and *Camellia osmantha*[J]. Northern Horticulture,2025(2):23-29.

[12] 翁月霞 , 丰炳才 , 胡锦生 , 等 . 高保健油料新树种 : 长瓣短柱茶 [J]. 林业实用技术 ,2004(4):42.
WENG Y X, FENG B C, HU J S, et al. *Camellia grijsii*: a novel tree species with high-value health-care oil[J]. Forest Science and Technology,2004(4):42.

[13] 邹锋 . 攸县油茶生殖生物学研究 [D]. 长沙 : 中南林业科技大学 ,2010.
ZOU F. The researches on reproductive biology of *Camellia yubsienensis* Hu[D]. Changsha: Central South University of Forestry & Technology,2010.

[14] 邹玉玲 , 钟秋平 , 曹林青 , 等 . 攸县油茶无性系果实性状与茶油品质的综合评价 [J]. 中南林业科技大学学报 ,2021,41(11):46-55.
ZOU Y L, ZHONG Q P, CAO L Q, et al. Comprehensive evaluation of fruit traits and *Camellia* oil quality of *Camellia yuhsienensis* clones[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2021,41(11):46-55.

[15] 张健 , 叶天文 , 陈雅 , 等 . 外源激素处理接穗对海南油茶高接换冠的影响 [J]. 经济林研究 ,2020,38(2):53-59.
ZHANG J, YE T W, CHEN Y, et al. Effects of using exogenous hormones treat *Camellia hainanica* scions on crown replacement by top grafting in Hainan[J]. Non-wood Forest Research,2020,38(2):53-59.

[16] 黄飞毅 , 段继华 , 康彦凯 , 等 . 第三次全国农作物种质资源调查与收集行动湖南茶树专项总结报告 [J]. 茶叶通讯 ,2020,47(1):32-36.
HUANG F Y, DUAN J H, KANG Y K, et al. The third national crop germplasm resources investigation & collection action: summary report on *Camellia sinensis* in Hunan[J]. Journal of Tea Communication,2020,47(1):32-36.

[17] 北京市农业学校 . 果树栽培学实验实习指导 [M]. 北京 : 农业出版社 ,1984.
Beijing Agricultural School. Laboratory and field manual of fruit tree cultivation[M]. Beijing: Agriculture Press,1984.

[18] 张绍铃 , 谢文暖 , 陈迪新 , 等 . 8 种果树花粉量及花粉萌发与生长的差异 [J]. 上海农业学报 ,2003,19(3):67-69.
ZHANG S L, XIE W N, CHEN D X, et al. The differences of pollen content and pollen germination and tube growth among eight species of fruit trees[J]. Acta Agriculturae Shanghai,2003,19(3):67-69.

[19] 王金花 , 张健琴 , 成良强 , 等 . 不同方法测定花生花粉活力的比较研究 [J]. 种子 ,2022,41(8):126-130.
WANG J H, ZHANG J Q, CHENG L Q, et al. Comparative Study on pollen vitality determination of peanut by different methods[J]. Seed,2022,41(8):126-130.

[20] 王玮琦 , 陈怡汀 , 张嘉锡 , 等 . 乙烯利对油茶采后种仁含油率及脂肪酸组成的影响 [J]. 中国油脂 ,2024,49(10):29-33.
WANG W Q, CHEN Y T, ZHANG J X, et al. Effects of ethephon on quality of postharvest seed kernels of *Camellia oleifera*[J]. China Oils and Fats,2024,49(10): 29-33.

[21] 汤富彬 , 沈丹玉 , 刘毅华 , 等 . 油茶籽油和橄榄油中主要化学成分分析 [J]. 中国粮油学报 ,2013,28(7):108-113.
TANG F B, SHEN D Y, LIU Y H, et al. Analysis of main chemical components in camellia oil and olive oil[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association,2013,28(7):108-113.

[22] 李楠昕 , 姜毅 , 袁迎春 , 等 . 油茶种间杂交子代花期与花器官性状的变异分析 [J]. 森林与环境学报 ,2024,44(2):183-189.
LI N X, JIANG Y, YUAN Y C, et al. Variation analysis of flowering period and floral organ traits in the hybrid progeny of *Camellia oleifera*[J]. Journal of Forest and Environment,2024,44(2):183-189.

[23] 邢凯峰 , 谢昊星 , 张立冬 , 等 . 不同种源野生油茶果实表型性状多样性分析 [J]. 植物遗传资源学报 ,2024,25(7):1106-1117.

（下转第 58 页）

的油松人工林碳储量生长模型 [J]. 林草资源研究 ,2024(3):79-87.
GAO Y L, LAI G H, WANG Y R, et al. Growth model of carbon storage in *Pinus tabuliformis* plantation based on national forest inventory data[J]. Forest and Grassland Resources Research, 2024(3):79-87.

[31] 谢瑞麟 , 崔展齐 , 陈翔 , 等 . IADT: 基于解释分析的深度神经网络差分测试 [J]. 软件学报 ,2024,35(12):5452-5469.
XIE R L, CUI Z Q, CHEN X, et al. IADT: interpretability-analysis-based differential testing for deep neural network[J]. Journal of Software,2024,35(12):5452-5469.

[32] 李晓燕 , 段爱国 , 张建国 , 等 . 不同良种与初植密度杉木林分密度指标动态特征 [J]. 林业科学研究 ,2021,34(2):72-80.
LI X Y, DUAN A G, ZHANG J G, et al. Dynamic characteristics of stand density measure of Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*) plantations with different improved varieties and initial planting densities[J]. Forest Research,2021,34(2):72-80.

[33] WHITE J, HARPER J L. Correlated changes in plant size and number in plant populations[J]. Journal of Ecology,1970,58(2):467-485.

[34] WESTOBY M. The self-thinning rule[M]//Advances in Ecological Research Volume 14. Amsterdam: Elsevier,1984:167-225.

[35] GABIRA M M, GIRONA M M, DESROCHERS A, et al. The impact of planting density on forest monospecific plantations: an overview[J]. Forest Ecology and Management,2023,534:120882.

[36] 张薇 . 抚育间伐对杉木人工林生长及碳储量的影响 [D]. 长沙 : 中南林业科技大学 , 2024.
ZHANG W. Effects of tending thinning on growth and carbon storage of *Cunninghamia lanceolata* plantation[D]. Changsha: Central South University of Forestry & Technology,2024.

[37] ZHAO M F, SUN M D, XIONG T, et al. On the link between tree size and ecosystem carbon sequestration capacity across continental forests[J]. Ecosphere, 2022,13:e4079.

[38] 周威 , 龙成 , 杨小波 , 等 . 海南铜鼓岭灌木林稀疏规律 [J]. 生态学报 ,2013,33(20):6569-6576.
ZHOU W, LONG C, YANG X B, et al. The thinning regular of the the shrubbery at Tongguling national nature reserve on Hainan island, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013,33(20):6569-6576.

[ 本文编校：谢荣秀 ]

（上接第 11 页）

XING K F, XIE H X, ZHANG L D, et al. Diversity analysis on fruit phenotype of wild *Camellia oleifera* from different provenances[J]. Journal of Plant Genetic Resources,2024,25(7):1106-1117.

[24] 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 progenies of *Camellia oleifera*[J]. Journal of Plant Genetic Resources, 2023,24(6):1649-1658.

[25] 金笑龙 . 安徽省大别山地区油茶优树选择研究 [D]. 合肥 : 安徽农业大学 ,2011.
JIN X L. Study on selection of superior *Camellia oleifera* in the area of Dabie mountain[D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2011.

[26] 丁涛 , 姜毅 , 赵芷萱 , 等 . 油茶杂交子代群体花柱和花粉性状的遗传分析 [J]. 森林与环境学报 ,2025,45(2):212-217.
DING T, JIANG Y, ZHAO Z X, et al. Genetic analysis of style and pollen traits in hybrid progeny populations of *Camellia oleifera*[J]. Journal of Forest and Environment,2025,45(2):212-217.

[27] GONG H, CHANG Y H, XU J M, et al. Unilateral cross-incompatibility between *Camellia oleifera* and *C. yuhsienensis* provides new insights for hybridization in *Camellia* spp.[J]. Frontiers in Plant Science,2023,14:1182745.

[28] 贺胜 , 胡观兴 , 胡东兵 , 等 . 油茶新品种 ‘ 德油 2 号 ’ 开花特性及品种配置 [J]. 森林与环境学报 ,2025,45(3):283-289.
HE S, HU G X, HU D B, et al. Flowering characteristics and configuration of a new *Camellia oleifera* cultivar ‘Deyou 2’[J]. Journal of Forest and Environment,2025,45(3):283-289.

[29] 江泽鹏 , 蔡娅 , 张幸 , 等 . 油茶产量与果实主要经济性状相关性分析 [J]. 中国农学通报 ,2023,39(25):16-20.
JIANG Z P, CAI Y, ZHANG X, et al. Correlation analysis of *Camellia oleifera* yield and main fruit economic character[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin,2023,39(25):16-20.

[ 本文编校：谢荣秀 ]