

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10期

Doi:10.14067/j.cnki.1673-923X.2026.10.006

论文标题： 5个油茶优系叶片解剖结构及光合特性综合评价

作　　者： 朱宇杰，陈 婷，鲁建军，等

收稿日期： 2025-08-17

引文格式： 朱宇杰,陈婷,鲁建军,等.5个油茶优系叶片解剖结构及光合特性综合评价[J].中南林业科技大学学报,2026,46(10):72-81.

Zhu Y J, Chen T, Lu J J, et al. Comprehensive evaluation of anatomical structure and photosynthetic characteristics of leaves from five superior *Camellia oleifera* lines[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2026,46(10):72-81.

相关论文推荐

Recommended articles

油茶分子育种研究进展

Advances in the molecular breeding of *Camellia oleifera*

我国油茶科技进展与未来核心技术

Scientific and technological progress and future core technologies of oil tea *Camellia* in China

不同砧木对5年生芽苗砧嫁接油茶叶片解剖结构及其生理特性的影响

Effects of rootstocks on anatomical structure and physiological characteristics of 5-year-old *Camellia oleifera* leaves grafted on bud seedlings

8个海南油茶品系叶片表型与解剖结构的比较

Comparison of leaf phenotype and anatomical structure of eight *Camellia hainanica* varieties

2种微生物菌肥对油茶幼苗生长及光合特性的影响

Effects of two types of microbial fertilizers on growth of *Camellia oleifera* seedlings and the influence of photosynthetic characteristics

干旱-复水处理对3个油茶良种的生长与光合生理特性的影响

Effects of drought and rehydration treatment on the growth, photosynthesis and physiological characteristics of three *Camellia oleifera* cultivars

Doi:10.14067/j.cnki.1673-923x.2026.10.006 http: //qks.csuft.edu.cn

# 5 个油茶优系叶片解剖结构及光合特性综合评价

朱宇杰[1]，陈 婷[1]，鲁建军[2]，毛 丹[3]，袁德义[1]，范晓明[1]

（1. 中南林业科技大学 a. 经济林培育与保护教育部重点实验室；
b. 油茶育种湖南省高等学校重点实验室，湖南 长沙 410004；2. 长沙市林木种苗管理站，湖南 长沙 410339；
3. 湖南省国有林和种苗工作站，湖南 长沙 410007）

**摘 要：**【目的】对 5 个油茶优系叶片解剖结构和光合特性进行相关性分析及综合评价，探究 5 个油茶优系叶片解剖结构与光合能力的关系，筛选出光合特性表现最佳的优系，为后续选育良种、栽培推广提供科学依据。【方法】将“三华”与‘湘林 210’进行人工杂交授粉，选出 5 个表现较好的油茶优系‘华实’（‘华硕’×‘华金’）、‘华增’（‘华金’×‘湘林 210’）、‘华坨’（‘华金’×‘湘林 210’）、‘华丰’（‘华硕’×‘华鑫’）、‘华苹’（‘华金’×‘华鑫’），测定 5 个油茶优系的叶绿素含量、气孔特性、叶片解剖结构及光合特性等指标，最后运用相关性分析和主成分分析法对 5 个油茶优系进行评价。【结果】研究发现，‘华坨’的叶形指数最高，‘华实’的叶面积最大、叶绿素总量（10.06 mg·g$^{-1}$）显著高于其他 4 个油茶优系，‘华丰’的气孔密度表现最优（10.80 个 /mm$^2$），‘华增’上表皮厚度最大，而‘华苹’的叶片厚度（523.23 μm）、海绵组织厚度（288.22 μm）、栅栏组织厚度（171.40 μm）以及蒸腾速率均高于其他 4 个油茶优系。相关性分析显示，叶片的净光合速率与栅栏组织厚度和栅叶比均存在负相关关系，净光合速率与叶厚、上下表皮厚度和 TRPS 存在正相关关系。主成分分析表明，从 10 个叶性状指标中提取的 4 个主成分累计贡献率达 85.530%，其中第一、二、三、四主成分分别反映原始数据信息量的 29.422%、27.329%、18.203%、10.576%，能够全面反映油茶优系的叶片解剖结构和光合特性。基于主成分分析法算出各优系综合得分，根据综合得分由高到低排序依次为‘华苹’、‘华坨’、‘华丰’、‘华增’、‘华实’。【结论】本研究揭示了油茶优系叶片解剖结构与光合特性的关联，并筛选出光合特性表现最佳的优系‘华苹’，为油茶良种选育提供了重要参考。未来研究应进一步结合多性状综合评价，并考虑环境条件的影响，以提升研究的全面性和可靠性。

**关键词：**油茶优系；表型性状；叶片解剖结构；光合特性；主成分分析

**中图分类号：**S794.4；S718.43 **文献标志码：**A **文章编号：**1673-923X(2026)10-0072-10

# Comprehensive evaluation of anatomical structure and photosynthetic characteristics of leaves from five superior *Camellia oleifera* lines

Zhu Yujie[1], Chen Ting[1], Lu Jianjun[2], Mao Dan[3], Yuan Deyi[1], Fan Xiaoming[1]

（1. a. Key Laboratory of Cultivation and Protection for Non-wood Forest Trees, Ministry of Education;
b. Hunan Key Laboratory of Colleges and Universities of Oil-tea Breeding, Central South University of Forestry & Technology, Changsha 410004, Hunan, China; 2. Changsha Forest Seedling Management Station, Changsha 410339, Hunan,China;
3. State-owned Forest and Seedling Workstation of Hunan Province, Changsha 410007, Hunan, China)

**Abstract:**【Objective】Correlation analysis and comprehensive evaluation were conducted on leaf anatomical structure and photosynthetic characteristics of five *Camellia oleifera* superior lines, and the relationship between leaf anatomical structure and photosynthetic capacity of five *Camellia oleifera* superior lines was explored, and the superior lines with the best photosynthetic characteristics were screened, so as to provide scientific basis for subsequent breeding, cultivation and popularization.【Method】By artificial cross pollination between ‘Sanhua’ and ‘Xianglin 210’, five superior lines of *Camellia oleifera* were selected, namely ‘Huashi’

**收稿日期**（Received）：2025-08-17 **修订日期**（Revised）：2025-10-20

**基金项目：**湖南省十大科技攻关项目“高品质油茶新品种选育与超临界萃取加工关键技术（2024NK1020）”。

**第一作者：**朱宇杰（zzhuyujie@qq.com），硕士研究生。

**通信作者：**范晓明（fan_xiaoming001@163.com），副教授，博士，硕士研究生导师。

**引文格式：**朱宇杰 , 陈婷 , 鲁建军 , 等 .5 个油茶优系叶片解剖结构及光合特性综合评价 [J]. 中南林业科技大学学报 ,2026,46(10):72-81.
Zhu Y J, Chen T, Lu J J, et al. Comprehensive evaluation of anatomical structure and photosynthetic characteristics of leaves from five superior *Camellia oleifera* lines[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2026,46(10):72-81.

('Huashuo' × 'Huajin'), 'Huazeng' ('Huajin' × 'Xianglin210'), 'Huatuo'('Huajin' × 'Xianglin210'), 'Huafeng' ('Huashuo' × 'Huaxin') and 'Huaping' ('Huajin' × 'Huaxin'). The chlorophyll content, stomatal characteristics, leaf anatomical structure and photosynthetic characteristics of the five superior lines were determined. Finally, correlation analysis and principal component analysis were used to analyze the five superior lines of *Camellia oleifera*.【Result】It was found that 'Huatuo' had the highest leaf shape index, 'Huashi' had the largest leaf area, and the total chlorophyll content (10.06 $mg \cdot g^{-1}$) was significantly higher than that of the other four superior lines of *Camellia oleifera*. 'Huafeng' had the best stomatal density (10.80/$mm^2$), and the upper epidermis thickness of 'Huazeng' was the largest. However, the leaf thickness (523.23 μm), spongy tissue thickness (288.22 μm), palisade tissue thickness (171.40 μm) and transpiration rate of 'Huaping' were higher than those of the other four superior lines of *Camellia oleifera*. Correlation analysis showed that the net photosynthetic rate of leaves is negatively correlated with the thickness of palisade tissue and the ratio of palisade to leaf, and positively correlated with the thickness of leaves, the thickness of the upper and lower epidermis and TRPS. Principal component analysis showed that the cumulative contribution rate of four principal components extracted from 10 leaf traits reached 85.530%, among which the first, second, third and fourth principal components reflected 29.422%, 27.329%, 18.203% and 10.576% of the original data information, respectively, which could fully reflect the leaf anatomical structure and photosynthetic characteristics of *Camellia oleifera* superior lines. Based on the principal component analysis method, the comprehensive score of each superior line is calculated, and the order is 'Huaping', 'Huatuo', 'Huafeng', 'Huazeng' and 'Huashi' according to the comprehensive score from high to low.【Conclusion】This study revealed the relationship between leaf anatomical structure and photosynthetic characteristics of superior lines of *Camellia oleifera*, and screened the superior line 'Huaping' with the best photosynthetic characteristics, which provided an important reference for the breeding of improved varieties of *Camellia oleifera*. Future research should further combine multi-trait comprehensive evaluation and consider the influence of environmental conditions to improve the comprehensiveness and reliability of the research.

**Keywords:** superior lines of *Camellia oleifera*; phenotypic traits; leaf anatomical structure; photosynthetic characteristics; principal component analysis

油茶 *Camellia oleifera* Abel. 属山茶科 Theaceae 山茶属 *Camellia*，是一种常绿灌木，作为我国独有的木本类食用油料植物品种，油茶在木本油料作物领域占据重要地位，也是全球范围内公认的四大木本油料作物之一 [1]。经过大量研究发现，油茶属于自交亲和性较差的树种，杂交可以获得综合双亲优良性状的后代 [2]。“三华”和‘湘林 210’作为国家良种油茶，具有果实大、易识别、结实早、产量高、稳定性好、适应性强等优点，开发潜力巨大，将其互为父母本进行人工杂交授粉对于丰富油茶品种资源意义重大。

选育良种是发展油茶产业的关键，在遗传育种学与经济作物栽培学中都有涉及叶片表型特征的研究 [3]。叶片作为植物生长过程中的关键性器官之一，其为植物生殖生长提供必需能量与物质基础的生理功能不可忽视 [4-5]，植物生长发育的优劣状况往往通过叶片的形态特征得以体现。因此，研究叶片性状有利于了解油茶的特性，筛选出适合推广栽培的良种。现有研究中，蔡东升等 [6] 采用“显微观察 - 石蜡切片法”观察“三华”油茶叶片解剖结构，根据叶片解剖结构与光合特性相关性分析得出“三华”中‘华硕’的光合特性表现最佳的结论。王金星等 [7] 在对核桃的叶片性状的研究中发现，叶片表型性状中与单果质量呈显著相关性的有叶宽、叶面积及叶形指数等指标。同样，张绪萍等 [8] 测定香梨杂种后代叶片性状及叶片和果实性状相关性分析，指出叶面积与叶长、叶宽、果实纵径和果形指数呈极显著的正相关关系。在香花油茶家系群体间叶片与果实表型性状差异性比较研究中，戴艳花等 [9] 采用主成分分析法筛选所获得的 11 个香花油茶家系群体，分析结果显示具有较优性状表现的家系群体数量为 3 个，该研究为香花油茶优良品种选育提供了重要参考依据。这些研究都在一定程度上印证了植物叶片在选优育种上的重要性。

植物叶片中主要进行着呼吸作用、光合作用以及蒸腾作用等生理过程，其中对光合特性最为敏感的部位是叶片。作为植物重要的形态特征之一，叶形态的性状直接影响着光合作用能力的高低，从而使植物的生长发育状态受到显著影响 [10-12]。因此，本研究选取 5 个油茶优系进行叶片解剖结构与光合特性的比较分析，以期探究叶片解剖结构与光合能力的关系，筛选出光合特性表现最佳的优系，为后续选育良种、栽培推广提供科学依据。

## 1　材料与方法

### 1.1　试验地点与试验材料

试验地位于湖南省浏阳市沙市镇，属亚热带季风性湿润气候，年平均气温 17.4 ℃，年平均降水量 1 600 mm，无霜期 266 d。阳光充足，四季分明，雨热同季，海拔 559 m，地势西北高、东南低，地形以丘陵为主，兼有山地、岗地和平原。本课题组于 2013 年在此试验地开展油茶杂交育种

研究，将“三华”（高产稳产、含油率高）与‘湘林 210’（抗逆性强、果大皮薄）进行人工杂交授粉。待 2013 年 10 月果实成熟后收获杂交种子，种子与湿沙按体积比 1∶3 做湿沙层积贮藏处理至 2014 年春季进行育苗。播种前对种子进行催芽处理，将种子放置在 25 ℃恒温箱中湿沙催芽 15 d，待 30% 种子露白后播种，播种时采用条播方式，播种后覆盖 2 cm 厚腐殖土并搭建遮阳网。待幼苗长至 10 cm 高时（2014 年 6 月）进行单株标号，按随机区组设计定植于苗圃地（株行距 1.0 m×1.5 m），常规水肥管理至 2016 年进入初果期。依据产量指标、经济性状、抗逆性、物候期等方面的表现初选出 $F_1$ 代优良单株 51 株，进一步筛选出 5 个产量高、主要经济性状优异的优系‘华实’、‘华增’、‘华坨’、‘华丰’和‘华苹’。本研究以这 5 个油茶优系为试验植株开展研究（图 1 和表 1）。



A 优树 Superior trees



B 叶片 Leaves

从左向右依次为‘华实’、‘华增’、‘华坨’、‘华丰’、‘华苹’。
From left to right are ‘Huashi’, ‘Huazeng’, ‘Huatuo’, ‘Huafeng’ and ‘Huaping’.

**图 1 5 个油茶优系叶片**
**Fig. 1 Leaves of five superior *C. oleifera* lines**

**表 1 5 个油茶优系父母本来源**
**Table 1 Parent sources of five superior *C. oleifera* lines**

| 优系 Superior lines | 母本（♀） Female parent（♀） | 父本（♂） Male parent（♂） |
|---|---|---|
| 华实 Huashi | 华硕 Huashuo | 华金 Huajin |
| 华增 Huazeng | 华金 Huajin | 湘林 210 Xianglin 210 |
| 华坨 Huatuo | 华金 Huajin | 湘林 210 Xianglin 210 |
| 华丰 Huafeng | 华硕 Huashuo | 华鑫 Huaxin |
| 华苹 Huaping | 华金 Huajin | 华鑫 Huaxin |

## 1.2 测定指标与方法

### 1.2.1 叶片外观形态指标测定

于 2023 年 10 月，选取试验植株枝端第 2 片叶处生长健壮、无病虫害、土壤与光照条件基本一致、长势一致、形态相似的成熟功能叶片，每个单株随机采集 3 个方位的叶片作为生物学重复（$n$=3），测量叶长、叶宽、叶形指数、叶面积、叶片厚度 5 个形态指标，统计各表型指标的平均值、标准差[13]。叶长、叶宽、叶面积拍照后用 ImageJ 1.52 软件测量，叶片厚度用游标卡尺测量，计算得到叶形指数。

### 1.2.2 叶片叶绿素含量测定

于 2023 年 8 月上午 8:00—10:00 进行采样，叶片选择标准同 1.2.1。采样后立即将叶片置于液氮中快速冷冻，全部采集后转移至 -80 ℃超低温冰箱中保存，待测前放于 4 ℃解冻 2 h 以减少叶绿素降解。使用 95% 乙醇研磨 - 过滤法[14]测定叶片叶绿素含量，制作待测液后将溶液倒入比色皿中（高度不得超过比色皿总高的 4/5），第 1 个比色皿中放 95% 乙醇溶液为空白对照。然后使用分光光度计测定其在波长 663、645 nm 处的吸光度，每个重复在不同波长下测 3 次，取平均值，通过计算得出叶绿素 a 与叶绿素 b 含量比值。其中叶绿素计算公式如下：

$$C_{叶绿素\ a}=12.71\ A_{663}-2.59\ A_{645} \quad (1)$$

$$C_{叶绿素\ b}=22.88\ A_{645}-4.67\ A_{663} \quad (2)$$

$$C_{叶绿素\ a+b}=C_a+C_b=20.29\ A_{645}+8.04\ A_{663} \quad (3)$$

式中：$C$ 代表浓度，单位为 g·mL$^{-1}$；$A$ 代表检测到的吸光度。

$$叶绿素含量（mg\cdot g^{-1}）=V_{总提取液}\times C/1\ 000 \quad (4)$$

#### 1.2.3　叶片气孔密度测定

使用透明指甲油印迹法测定气孔密度[15]，于2024 年 5 月油茶新梢生长期上午 7:00—9:00 采集树冠外围健康植株枝端第 2 片成熟叶，每株随机选取 3 个方位叶片共 30 片（3 处理 ×10 重复）。用清水将上述叶片表面冲洗干净后用滤纸吸干表面水分，在叶片下表皮叶基、叶中、叶尖三处避开主脉均匀涂上一层大约 1 $cm^2$ 的透明指甲油，置于阴凉、通风处 2 ～ 3 min 晾干。指甲油干燥后撕下涂有指甲油的部分放在载玻片上，滴 1 ～ 2 滴纯水固定在载玻片上，盖上盖玻片，制成临时玻片，通过 Olympus DP 71 光学显微镜随机采集每区域 3 个非重叠视野观察气孔形态并拍照，使用 ImageJ 1.52 软件测量气孔的长度、宽度和面积，计算气孔密度与开度。

#### 1.2.4　叶片解剖结构测定

于 2024 年秋季，采集树冠中上部完全展开的成熟功能叶片，每株随机选取 3 个方位叶片共 30 片（3 处理 ×10 重复），将样叶用石蜡切片法[16]制片后在电子显微镜下观察叶片解剖结构，测量叶片的上下表皮、栅栏组织和海绵组织厚度，并计算出栅海比（TRPS）、栅叶比（DCTR）。每 1 处理观察 10 张切片，每个制片选 3 个视野进行测量，所有数据为 30 个视野的平均值。其中 TRPS、DCTR 计算公式如下：

TRPS= 栅栏组织 / 海绵组织的比值　　（5）

DCTR= 栅栏组织 / 叶片厚度的比值　　（6）

#### 1.2.5　光合特性测定

2024 年 8 月，选择 3 个典型晴天，于 9:00—13:00 利用 Li-6400 便携式光合速率测定仪测定光合指标，叶片选择标准同 1.2.1，测定时以单株植株为 1 个生物学重复，每组处理设置 3 个重复，共测定 18 片叶片。测定时保持叶片干净整洁，测定指标包括 $P_n$（净光合速率）、$G_s$（气孔导度）、$C_i$（胞间 $CO_2$ 浓度）、$T_r$（蒸腾速率）。

### 1.3　数据处理与分析

采用 Excel 2021 软件处理试验数据，采用 SPSS 22.0 软件进行单因素方差分析，采用主成分分析法进行PCA分析[17]，采用Origin 2018软件制图。

## 2　结果与分析

### 2.1　5 个油茶优系叶表型性状的差异性对比

对 5 个油茶优系成熟叶片的各叶表型性状的平均值、标准差进行差异性对比，结果如表 2 所示。5 个油茶优系中，‘华坨’的叶长最长，均值为 8.26 cm，显著高于其他 4 个油茶优系；‘华实’的叶宽最宽，均值为 4.24 cm，显著高于其他 4 个油茶优系；叶形指数是反映叶片相对长宽的指标，各优系间该指数存在显著性差异，‘华坨’的叶形指数最高，表明其叶片形状更狭长；‘华实’的叶片面积最大，为光合作用和蒸腾作用提供了更大的潜在表面积；‘华苹’的叶面积最小，厚度最大，较厚的叶片可能具有更多的细胞层，有可能增强其储存水分和抵御干旱或强光等环境胁迫的能力。

### 2.2　5 个油茶优系叶片叶绿素含量比较

对 5 个油茶优系叶片的叶绿素 a、叶绿素 b 及叶绿素总量进行测定，结果见图 2。‘华实’的叶绿素 a（6.99 $mg·g^{-1}$）含量与‘华苹’的叶绿素 a（5.05 $mg·g^{-1}$）含量无显著性差异，但二者都显著高于‘华增’‘华丰’‘华坨’；各优系的叶绿素 b 含量整体低于叶绿素 a，‘华实’的叶绿素 b（3.07 $mgg^{-1}$）含量显著高于‘华苹’‘华增’‘华丰’‘华坨’，叶绿素 b 在光系统中有助于拓宽光吸收范围，其含量的差异可能影响油茶对弱光的利用能力；‘华实’叶绿素总量最高，显著高于其他优系，‘华苹’的叶绿素总量次之，‘华增’‘华丰’‘华坨’的总叶绿素含量较为接近且相对较低，叶绿素总量反映了叶片整体的光合色素水平。

表 2　5 个油茶优系叶表型性状分析 †

**Table 2　Analysis of leaf phenotypic characteristics of five superior *C. oleifera* lines**

| 优系 Superior lines | 叶片长度 Blade length /cm | 叶片宽度 Blade width /cm | 叶形指数 Leaf shape index | 叶面积 Leaf area /$cm^2$ | 叶片厚度 Blade thickness /mm |
|---|---|---|---|---|---|
| 华实 Huashi | 7.03±0.34 b | 4.24±0.32 a | 1.66±0.09 d | 22.57±3.07 a | 0.48±0.05 c |
| 华增 Huazeng | 6.77±0.91 b | 3.31±0.23 bc | 2.04±0.21 bc | 15.94±2.79 b | 0.47±0.03 d |
| 华坨 Huatuo | 8.26±0.67 a | 3.64±0.31 b | 2.28±0.22 a | 21.20±2.93 a | 0.50±0.05 b |
| 华丰 Huafeng | 6.44±0.73 b | 3.48±0.23 b | 1.85±0.41 cd | 16.77±3.07 b | 0.43±0.02 e |
| 华苹 Huaping | 6.76±0.78 b | 3.06±0.30 c | 2.21±0.13 ab | 14.33±2.93 b | 0.52±0.02 a |

† 存在显著差异的处理组间，采用不同小写字母进行标记（$P < 0.05$）。下同。
The treatment groups with significant differences were marked with different lowercase letters ($P < 0.05$). The same below.

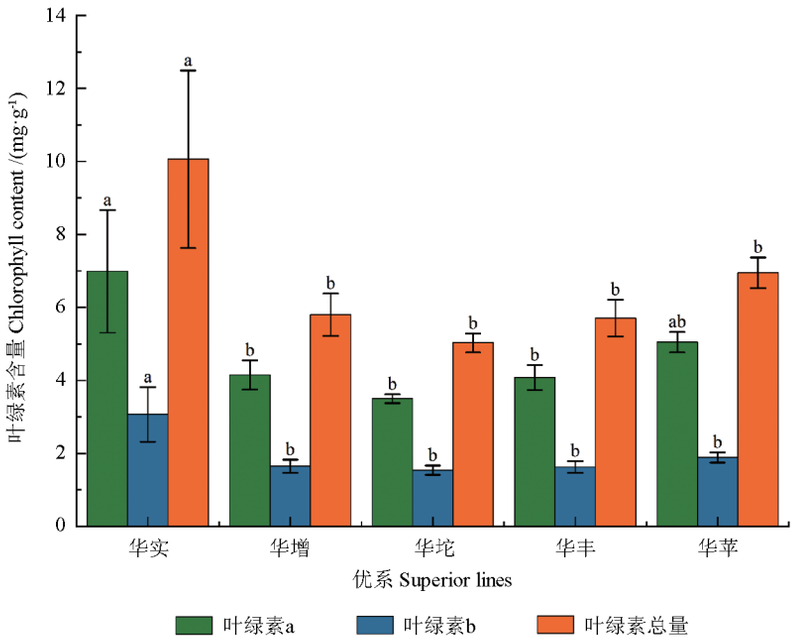



图 2　5 个油茶优系叶片叶绿素含量比较

**Fig. 2　Comparison of chlorophyll content in leaves of five superior *C. oleifera* lines**

## 2.3　5 个油茶优系叶片气孔特征的比较

油茶叶片的气孔主要分布在下表皮，对 5 个油茶优系的气孔长度、气孔宽度、气孔密度、气孔开度进行测定，结果见表 3。‘华丰’的气孔长度最长，显著高于‘华实’、‘华增’、‘华坨’及‘华苹’，不同气孔长度影响气孔对环境信号的响应速度和气体交换速率；‘华实’气孔宽度最大，显著高于其他 4 个优系，气孔宽度影响气孔开闭的幅度以及气体通过气孔的阻力，进而对植物的水分散失和气体交换产生影响；5 个油茶优系叶片的气孔密度差异显著，其中‘华丰’气孔密度最大，为 10.80 个 /mm$^2$，‘华实’气孔密度最小，为 4.64 个 /mm$^2$；5 个油茶优系气孔开度无显著性差异。

表 3　5 个油茶优系叶面气孔特征值

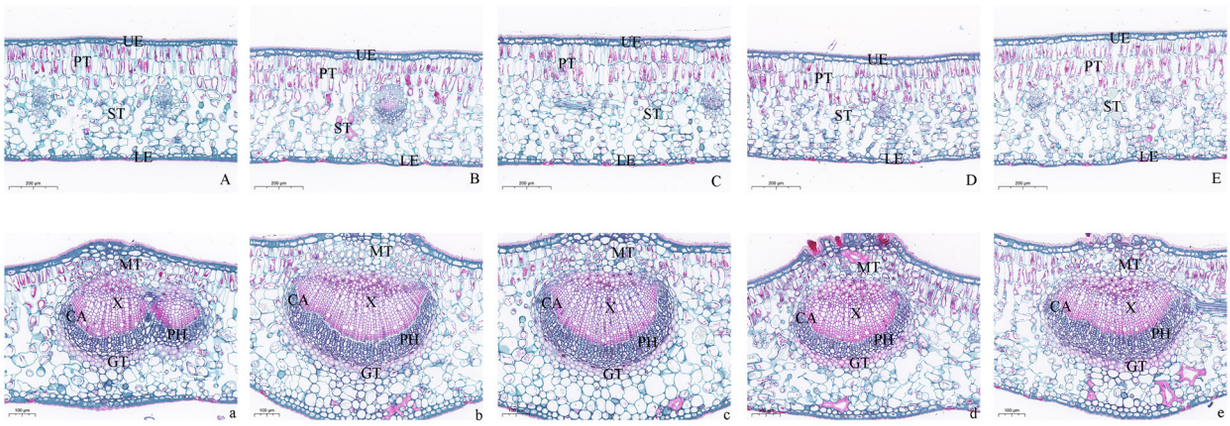
**Table 3　Leaf stomatal characteristic values of five superior *C. oleifera* lines**

| 优系 Superior lines | 气孔长度 Stomatal length /μm | 气孔宽度 Stomatal width /μm | 气孔密度 Stomatal density /( 个·mm$^{-2}$) | 气孔开度 Stomatal aperture /μm |
|---|---|---|---|---|
| 华实 Huashi | 35.85±7.36 ab | 23.29±0.71 a | 4.64±0.43 d | 505.65±207.79 a |
| 华增 Huazeng | 31.20±2.19 ab | 18.73±0.51 bc | 6.66±0.88 c | 458.10±21.79 a |
| 华坨 Huatuo | 28.64±0.87 b | 20.04±1.40 b | 7.82±0.60 bc | 450.80±37.48 a |
| 华丰 Huafeng | 37.48±0.61 a | 16.94±1.86 c | 10.80±1.22 a | 497.89±46.79 a |
| 华苹 Huaping | 32.92±3.33 ab | 20.03±0.94 b | 8.51±0.61 b | 519.05±76.82 a |

## 2.4　5 个油茶优系叶片解剖结构特征比较

观察 5 个油茶优系的叶片解剖结构（图 3），可以看出，5 个油茶优系的叶表皮均为扁长方形的单层细胞排列构成。叶片的上表皮细胞排列最紧密的是‘华苹’和‘华丰’，其次是‘华坨’、‘华增’和‘华实’。5 个油茶优系的叶片切片的叶肉组织有明显的栅栏组织和海绵组织分化现象，排列紧密的柱状细胞构成栅栏组织，排列松散的椭球形和球形细胞构成海绵组织。各叶肉组织的厚度测量结果见表 4，5 个油茶优系叶片的叶肉组织解剖结构呈现显著性差异。‘华苹’的叶片厚度（523.23 μm）＞‘华坨’（508.51 μm）＞‘华实’（489.46 μm）＞‘华增’（475.49 μm）＞‘华丰’（434.58 μm）；海绵组织厚度的变化范围为 244.75 ～ 288.22 μm，栅栏组织厚度的变化范围为 141.45 ～ 171.40 μm。海绵组织厚度明显大于栅栏组织，其中‘华实’、‘华坨’、‘华苹’的海绵组织厚度相对较大，‘华苹’的栅栏组织厚度最大，显著高于‘华增’和‘华丰’。油茶叶片的各组织结构中，叶绿素含量较高的是栅栏组织与海绵组织，其中栅栏组织表现最为突出，较厚的栅栏组织有利于提高光合能力。‘华增’的上表皮厚度最大，显著高于其他 4 个优系；‘华

实’的下表皮厚度最大；‘华增’的栅海比最高，栅海比反映了栅栏组织与海绵组织的比例关系。栅栏组织的发达程度可采用其与叶片厚度的比值（DCTR）来表示，5 个油茶优系样本中，DCTR 无显著性差异。




A ～ E 分别代表‘华实’、‘华增’、‘华坨’、‘华丰’、‘华苹’叶肉组织横切面；a ～ e 分别代表‘华实’、‘华增’、‘华坨’、‘华丰’、‘华苹’叶脉组织横切面；UE- 上表皮；ST- 海绵组织；PT- 栅栏组织；LE- 下表皮；MT- 机械组织；X- 木质部；PH- 韧皮部；GT- 基本组织；CA- 形成层。
A-E represent the cross section of mesophyll tissue of ‘Huashi’, ‘Huazeng’, ‘Huatuo’, ‘Huafeng’ and ‘Huaping’ respectively; a-e represent the transverse section of leaf vein tissue of ‘Huashi’, ‘Huazeng’, ‘Huatuo’, ‘Huafeng’ and ‘Huaping’ respectively; UE-Upper epidermis; ST-Spongy tissue; PT-palisade tissue; LE-Lower epidermis; MT-Mechanical tissue; X-Xylem; PH-Phloem; GT-Basic tissue; CA-Cambium.

**图 3　光学显微镜下 5 个油茶优系叶片的解剖特征**
**Fig. 3　Anatomical characteristics of five lines of *C.oleifera* leaves under an optical microscope**

**表 4　5 个油茶优系叶片解剖结构特征值**
**Table 4　Anatomical structural characteristic values of leaves in five superior *C. oleifera* lines**

| 优系 Superior lines | 厚度 Thickness /μm | | | | | 栅海比 TRPS | 栅叶比 DCTR |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 叶片 Blade | 海绵组织 Spongy tissue | 栅栏组织 Palisade tissue | 上表皮 Upper epidermal | 下表皮 Lower epidermal | | |
| 华实 Huashi | 489.46±18.40 c | 280.67±25.78 a | 157.75±33.20 ab | 30.28±4.42 b | 21.75±5.29 a | 0.57±0.14 b | 0.32±0.06 a |
| 华增 Huazeng | 475.49±13.78 d | 248.02±32.01 b | 154.57±34.51 bc | 33.87±3.95 a | 21.53±3.85 a | 0.64±0.18 a | 0.32±0.07 a |
| 华坨 Huatuo | 508.51±6.96 b | 286.16±36.13 a | 168.04±37.65 ab | 27.81±5.99 c | 14.73±3.30 c | 0.60±0.17 ab | 0.33±0.08 a |
| 华丰 Huafeng | 434.58±13.09 e | 244.75±20.19 b | 141.45±20.36 c | 27.92±4.03 c | 13.78±3.04 c | 0.58±0.11 ab | 0.33±0.04 a |
| 华苹 Huaping | 523.23±9.12 a | 288.22±26.97 a | 171.40±31.42 a | 30.21±3.45 b | 19.41±3.18 b | 0.60±0.13 ab | 0.33±0.06 a |

## 2.5　5 个油茶优系光合特性比较

由表 5 可知，5 个油茶优系的净光合速率无显著性差异；‘华苹’的蒸腾速率最高，蒸腾作用不仅影响植物的水分平衡，还与矿物质的吸收和运输以及叶片的冷却有关。‘华实’的气孔导度显著低于‘华坨’‘华苹’‘华增’‘华丰’，气孔导度控制着气体进出叶片的速率，较高的气孔导度有利于 $CO_2$ 的吸收，从而促进光合作用，但同时也可能增加水分的散失；‘华实’的胞间 $CO_2$ 浓度显著低于‘华坨’‘华苹’，其他优系之间无显著性差异，胞间 $CO_2$ 浓度是光合作用的一个重要指标。

## 2.6　5 个油茶优系叶片解剖结构与光合特性的相关性分析

采用相关系数矩阵的直观检验法对 5 个油茶优系 10 种综合评价指标的适用性进行评价，结果

**表 5　5 个油茶优系叶片光合特性差异比较**
**Table 5　Comparison of leaf photosynthetic characteristics among five superior *C. oleifera* lines**

| 优系 Superior lines | 净光合速率 $P_n$ /(μmol·m$^{-2}$·s$^{-1}$) | 蒸腾速率 $T_r$ /(mmol·m$^{-2}$·s$^{-1}$) | 气孔导度 $G_s$ /(μmol·m$^{-2}$·s$^{-1}$) | 胞间 $CO_2$ 浓度 $C_i$ /(μmol·mol$^{-1}$) |
|---|---|---|---|---|
| 华实 Huashi | 7.03±0.84 a | 2.45±1.18 c | 0.07±0.03 b | 303.70±60.46 b |
| 华增 Huazeng | 7.42±0.95 a | 5.49±0.87 ab | 0.16±0.02 a | 339.81±40.10 ab |
| 华坨 Huatuo | 7.34±0.77 a | 5.90±0.73 a | 0.19±0.02 a | 358.78±34.62 a |
| 华丰 Huafeng | 7.57±0.88 a | 4.87±0.55 b | 0.18±0.04 a | 350.09±41.61 ab |
| 华苹 Huaping | 7.85±0.75 a | 6.22±1.00 a | 0.19±0.04 a | 344.57±42.60 a |

如表 6 所示。叶片的栅栏组织厚度与栅海比、栅叶比呈显著正相关，表明栅栏组织厚度的增加往往伴随着栅海比和栅叶比的升高；栅海比与栅叶比呈极显著正相关，说明这 2 个反映叶片组织结构比例的指标在变化趋势上具有高度一致性；叶片的净光合速率与栅栏组织厚度和栅叶比均呈负相关关系，净光合速率与叶厚、上下表皮厚度和 TRPS 呈正相关关系，但都并非显著相关性，油茶的净光合速率可能更多地受到生理生化因素（如光合酶活性、光合色素含量等）或其他环境因素的综合影响，而非单纯由叶片解剖结构决定；叶片的蒸腾速率与叶片的上下表皮厚度以及栅叶比均呈负相关，其中与下表皮厚度的负相关性尤为显著，表明下表皮厚度的增加显著降低了蒸腾速率，这可能与下表皮的结构特性（如角质层厚度、气孔分布等）对水分散失的调控有关；进一步分析气孔导度指标，发现其与海绵组织厚度、栅栏组织厚度、上下表皮厚度、栅叶比均呈负相关，气孔导度与叶片厚度、栅海比指标之间呈正相关；对于胞间 $CO_2$ 浓度这一参数，数据表明其与上表皮厚度、净光合速率之间呈极显著负相关，与下表皮厚度则呈显著负相关，表明表皮厚度的变化可能影响叶片内部 $CO_2$ 的扩散和积累，进而对胞间 $CO_2$ 浓度产生调节作用。

**表 6　5 个油茶优系叶片解剖结构与光合特性相关性分析**

**Table 6　Correlation analysis between leaf anatomical structure and photosynthetic characteristics of five superior *C. oleifera* lines**

| 指标 Indicators | 叶厚 Blade thickness | 栅栏 PT | 上表皮 UE | 下表皮 LE | 栅海比 TRPS | 栅叶比 DCTR | $P_n$ | $T_r$ | $G_s$ | $C_i$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 叶厚 Blade thickness | 1 | | | | | | | | | |
| 栅栏 PT | 0.313* | 1 | | | | | | | | |
| 上表皮 UE | -0.073 | -0.100 | 1 | | | | | | | |
| 下表皮 LE | 0.230 | 0.195 | 0.391** | 1 | | | | | | |
| 栅海比 TRPS | 0.066 | 0.882** | -0.049 | 0.195 | 1 | | | | | |
| 栅叶比 DCTR | 0.051 | 0.963** | -0.086 | 0.142 | 0.909** | 1 | | | | |
| $P_n$ | 0.056 | -0.060 | 0.029 | 0.036 | 0.037 | -0.068 | 1 | | | |
| $T_r$ | 0.225 | 0.005 | -0.146 | -0.372** | 0.035 | -0.056 | 0.384** | 1 | | |
| $G_s$ | 0.080 | -0.008 | -0.257* | -0.503** | 0.022 | -0.031 | 0.395** | 0.946** | 1 | |
| $C_i$ | -0.104 | 0.046 | -0.341** | -0.248* | 0.017 | 0.075 | -0.473** | 0.009 | 0.071 | 1 |

† “*”表示在 0.05 水平（双侧）显著相关；“**”表示在 0.01 水平（双侧）显著相关。
“*” indicates significant correlation at the level of 0.05 (Bilateral); “**” indicates significant correlation at the level of 0.01 (Bilateral).

运用主成分分析法对 5 个油茶优系的 10 项关键指标展开综合评估。由表 7 可以看出，各个主成分均承载了原始变量的部分信息，其中特征值这一指标，直观体现了主成分所涵盖的原始变量信息的丰富程度。通过 PCA 分析成功提取出了 4 个特征值大于 1 的主成分，并且这 4 个主成分的累计方差贡献率为 85.530%，能够较为全面地反映所有变量的初始信息。基于此结果，选用这 4 个主成分对油茶优系实施综合评价切实可行。在主成分分析所构建的矩阵体系里，5 个油茶优系综合评价指标在各主成分矩阵内对应的权重系数见表 8，权重系数的数值大小直观反映了原始变量对相应因子影响程度的强弱；而系数的正负方向则明确指示了这种影响是正向作用还是负向作用。由表 8 可以看出，对第 1 主成分贡献较大的主要是栅栏组织厚度、TRPS、DCTR 等性状；决定第 2 主成分大小的主要是下表皮厚度、$P_n$、$T_r$、$G_s$ 等性状；第 3 主成分中，上表皮厚度、下表皮厚度、$P_n$、$C_i$ 等性状贡献较大；对第 4 主成分贡献较大的是叶厚、$P_n$、$T_r$ 等性状分量。把油茶优系经过标准化处理的 10 个性状指标代入已确定的 4 个主成分当中，计算出各优系在这 4 个主成分上的得分情况。这 4 个主成分各自从不同层面展现了油茶优系的综合特征。若仅依据某一个主成分，则难以对优系作出全面、综合的评价。基于 PCA 结果，以每个主成分对应的方差相对贡献率为权重，构建综合评价函数：$F=0.344\ F_1+0.320\ F_2+0.213\ F_3+0.124\ F_4$。通过该函数，可算出各油茶优系的综合得分值（F），依据得分对 5 个油茶优系进行排序（表 9）。

**表 7　各主成分的特征值及贡献率**

**Table 7　Eigenvalues and contribution rates of each principal component**

| 主成分 Principal component | 特征值 Characteristic value | 贡献率 Contribution rate /% | 累计贡献率 Cumulative contribution rate /% |
|---|---|---|---|
| 1 | 2.942 | 29.422 | 29.422 |
| 2 | 2.733 | 27.329 | 56.751 |
| 3 | 1.820 | 18.203 | 74.954 |
| 4 | 1.058 | 10.576 | 85.530 |

表 8　各主成分特征向量与载荷矩阵
**Table 8　Eigenvectors of principal components and the load matrix**

| 综合指标 Comprehensive index | PC1 | | PC2 | | PC3 | | PC4 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 特征向量 Eigenvectors | 载荷 Load | 特征向量 Eigenvectors | 载荷 Load | 特征向量 Eigenvectors | 载荷 Load | 特征向量 Eigenvectors | 载荷 Load |
| 叶厚 Blade thickness | 0.146 | 0.251 | 0.100 | 0.166 | 0.189 | 0.255 | 0.868 | 0.893 |
| 栅栏 PT | 0.572 | 0.981 | 0.032 | 0.053 | -0.053 | -0.071 | 0.064 | 0.066 |
| 上表皮 UE | -0.031 | -0.053 | -0.199 | -0.329 | 0.474 | 0.640 | -0.256 | -0.263 |
| 下表皮 LE | 0.176 | 0.302 | -0.319 | -0.527 | 0.403 | 0.544 | 0.227 | 0.234 |
| 栅栏 / 海绵 TRPS | 0.549 | 0.941 | 0.052 | 0.086 | -0.021 | -0.028 | -0.197 | -0.203 |
| 栅栏 / 叶厚 DCTR | 0.561 | 0.962 | 0.007 | 0.011 | -0.107 | -0.144 | -0.170 | -0.175 |
| $P_n$ | 0.047 | 0.080 | 0.422 | 0.698 | 0.425 | 0.574 | -0.174 | -0.179 |
| $T_r$ | -0.023 | -0.039 | 0.572 | 0.945 | 0.073 | 0.098 | 0.074 | 0.076 |
| $G_s$ | -0.038 | -0.065 | 0.583 | 0.963 | -0.036 | -0.049 | -0.040 | -0.041 |
| $C_i$ | 0.003 | 0.005 | -0.011 | -0.019 | -0.612 | -0.825 | 0.142 | 0.146 |

表 9　5 个油茶优系基于 PCA 法排序
**Table 9　Ranking of five superior *C. oleifera* lines based on the PCA method**

| 优系 Superior lines | 综合得分值 Comprehensive score (F) | 排序 Ranking |
|---|---|---|
| 华实 Huashi | -1.813 | 5 |
| 华增 Huazeng | -0.662 | 4 |
| 华坨 Huatuo | 1.247 | 2 |
| 华丰 Huafeng | 0.343 | 3 |
| 华苹 Huaping | 2.485 | 1 |

## 3　讨　论

光合特性是植物生长发育进程中的一项重要生理指标，植物生长和物质积累与光合作用密不可分。叶绿素吸收光能为植株的叶片提供能量以推动植物光合作用，其比例和含量可作为植物适应环境的重要指标，对植物的光合效率有很大的影响，在植物进行光合作用的过程中起到至关重要的作用 [18-20]。栅海比作为衡量植物耐弱光能力的重要指标，在植物学研究中占据重要地位。当植物表皮细胞呈现出较大厚度，且栅栏组织与海绵组织的厚度均处于较高水平时，该植物往往展现出更强的光适应性，其光合作用效能也更为突出 [21-23]。气孔是植物与外界进行气体交换的通道和控制蒸腾的结构，气孔导度反映叶片 $CO_2$ 和水汽交换能力的强弱，气孔密度、气孔导度影响植物净光合速率 [24]，而净光合速率直接决定着植物光合能力的强弱和生长速率。

相关性分析旨在探究 2 个或多个相关变量间的关联紧密程度 [25]，本研究对筛选出的 5 个油茶优系的叶厚、栅栏组织厚度、上表皮厚度、下表皮厚度、栅海比、栅叶比、$P_n$、$T_r$、$G_s$、$C_i$ 等 10 项叶性状指标进行相关性分析，从而确定这些变量之间的相关程度。结果表明，叶片的净光合速率与 DCTR 存在负相关关系，净光合速率与 TRPS 存在正相关关系；蒸腾速率与 DCTR 存在负相关关系，与 TRPS 存在正相关关系；气孔导度与 DCTR 存在负相关关系，与 TRPS 存在正相关关系；胞间 $CO_2$ 浓度与 TRPS、DCTR 呈正相关关系。主成分分析作为一种数据处理方法，其核心优势在于能在最大程度确保原始数据完整无损，或仅出现极微小损失的条件下对形态学性状中所蕴含的信息实施降维处理。这一过程不仅有助于简化性状分类的繁杂工作，更能够精准捕捉到数据中的关键要素，聚焦于主要矛盾展开分析 [26]。本研究基于主成分分析法从 10 个叶性状指标中抽取出 4 个主成分，这 4 个主成分提供了 5 个油茶优系叶片解剖结构和光合特性 85.530% 的原始性状信息，能够反映叶片解剖结构和光合特性的大部分信息。邹玉玲 [27] 研究发现，攸县油茶无性系幼苗的净光合速率和气孔导度、蒸腾速率之间呈极显著的正相关关系（$P < 0.01$），此结论与本研究所得分析结果相契合。邹天才等 [28] 针对山茶属 5 种植物的叶片解剖特征与光合生理相关性展开研究，结果发现栅栏组织厚度、栅海比和净光合速率的关联最为紧密；上表皮厚度与净光合速率呈弱正向关联；下表皮厚度、海绵组织厚度与各项光合生理指标之间的相关性极弱。陈雅 [29] 的研究表明，净光合速率与叶片内部结构之间不存在明显的相关关系，这一研究结论与本研究分析相符。

## 4　结　论

本研究对 5 个油茶优系的叶表型性状开展了相关性分析和主成分分析，并依据综合得分对 5 个油茶优系进行排序。结果显示，表现较优的依

次为‘华苹’、‘华坨’、‘华丰’、‘华增’、‘华实’，在后续试验中，可以将‘华苹’作为 5 个油茶优系选育的重点研究对象。然而，本研究仅对 5 个油茶优系的叶片表型性状、叶片解剖结构及光合特性进行了分析与评价，存在一定的局限性。未来的研究应进一步纳入更多性状，如果实表型性状、果实油脂品质等，开展深入研究与综合评价，以筛选出综合表现最佳的优系进行栽培推广。同时，需考虑不同环境条件对油茶优系的影响，从而提升研究的全面性与可靠性。

## 参考文献：


[1] 龚守富 , 朱赞彬 .6 个油茶果实经济性状及茶油品质比较分析 [J]. 森林工程 ,2022,38(3):40-46.
Gong S F, Zhu Z B. Comparative analysis of economic characters and tea oil quality of six *Camellia oleifera* varieties[J]. Forest Engineering,2022,38(3):40-46.

[2] 潘晓凤 , 程诗明 , 韩素芳 , 等 . 油茶遗传育种研究进展 [J]. 浙江林业科技 ,2024,44(1):96-100.
Pan X F, Cheng S M, Han S F, et al. Research progress in genetics and breeding of *Camellia* spp.[J]. Journal of Zhejiang Forestry Science and Technology,2024,44(1):96-100.

[3] 张林 , 罗天祥 . 植物叶寿命及其相关叶性状的生态学研究进展 [J]. 植物生态学报 ,2004,28(6):844-852.
Zhang L, Luo T X. Advances in ecological studies on leaf lifespan and associated leaf traits[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2004,28(6):844-852.

[4] 朱振家 , 姜成英 , 史艳虎 , 等 . 库源比改变对油橄榄产量及源叶光合作用的调节 [J]. 中国农业科学 ,2015,48(3):546-554.
Zhu Z J, Jiang C Y, Shi Y H, et al. Response of yield and leaf photosynthesis to sink-source ratio altering demand in *Olive* L.[J]. Scientia Agricultura Sinica,2015,48(3):546-554.

[5] Iglesias J D, Lliso I, Tadeo R F, et al. Regulation of photosynthesis through source: sink imbalance in citrus is mediated by carbohydrate content in leaves[J]. Physiologia Plantarum,2002, 116(4):563-572.

[6] 蔡东升 , 裴欣睖 , 闵筱筱 , 等 .“ 三华系列 ” 油茶叶片解剖结构与光合特性比较分析 [J]. 安徽农学通报 ,2023,29(7):52-57.
Cai D S, Pei X X, Min X X, et al. Comparative analysis of anatomical structure and photosynthetic characteristics of *Camellia oleifera* leaves in “Sanhua series”[J]. Anhui Agricultural Science Bulletin,2023,29(7):52-57.

[7] 王金星 , 潘刚 , 王滑 , 等 . 西藏核桃叶片和坚果表型多样性及其相关关系研究 [J]. 林业科学研究 ,2012,25(2):236-240.
Wang J X, Pan G, Wang H, et al. The phenotypic polymorphism of walnut leaves and nuts and their correlations in Xizang[J]. Forest Research,2012,25(2):236-240.

[8] 张绪萍 , 张琦 , 张金兰 , 等 . 香梨杂种后代叶片与果实性状的相关性研究 [J]. 江西农业学报 ,2009,21(4):53-54.
Zhang X P, Zhang Q, Zhang J L, et al. Study on correlation between leaf character and fruit character of hybrid pear[J]. Acta Agriculturae Jiangxi,2009,21(4):53-54.

[9] 戴艳花 , 杜佩莲 , 郝丙青 , 等 . 香花油茶不同家系群体叶片和果实表型性状的比较 [J]. 经济林研究 ,2023,41(4):109-117.
Dai Y H, Du P L, Hao B Q, et al. Comparison of phenotypic characters of leave and fruit in different family groups of *Camellia* osmantha[J]. Non-wood Forest Research,2023,41(4):109-117.

[10] 吴学琴 , 申开成 , 肖红星 , 等 .50 种茶花叶表型性状的多样性分析 [J]. 中南林业科技大学学报 ,2024,44(10):165-180.
Wu X Q, Shen K C, Xiao H X, et al. Diversity analysis of leaf phenotypic traits in 50 camellia species[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2024,44(10):165-180.

[11] 周云龙 . 植物生物学 [M]. 北京 : 高等教育出版社 ,1999:112-118.
Zhou Y L. Plant Biology[M]. Beijing: Higher Education Press, 1999:112-118.

[12] 胡宝忠 , 胡国宣 . 植物学 [M]. 北京 : 中国农业出版社 ,2002: 160-175.
Hu B Z, Hu G X. Botany[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2002:160-175.

[13] 杜铃 , 王华新 , 廖美兰 , 等 . 杜鹃红山茶叶面积回归方程的建立 [J]. 广西林业科学 ,2014,43(3):312-315.
Du L, Wang H X, Liao M L, et al. Establishment of regressive equation for leaf area of *Camellia azalea*[J]. Guangxi Forestry Science,2014,43(3):312-315.

[14] 程贵文 , 龚洪恩 , 颜送宝 , 等 . 油茶叶绿素提取方法的比较研究 [J]. 湖北林业科技 ,2017,46(6):11-13,58.
Cheng G W, Gong H E, Yan S B, et al. Comparison of chlorophyll extraction methods in *Camellia oleifera*[J]. Hubei Forestry Science and Technology,2017,46(6):11-13,58.

[15] 江慧欣 , 王嘉琪 , 黄春岩 , 等 .8 种绿化树种光合特性及叶片解剖结构比较 [J]. 植物研究 ,2019,39(1):10-16.
Jiang H X, Wang J Q, Huang C Y, et al. Photosynthetic characteristics and leaf anatomical structure of eight tree species[J]. Bulletin of Botanical Research,2019,39(1):10-16.

[16] 王秀文 . 石蜡切片法中染色技术的改良 [J]. 植物研究 ,2015, 35(1):158-160.
Wang X W. The improved stained methods of paraffin sections production[J]. Bulletin of Botanical Research,2015,35(1): 158-160.

[17] 李俊秀 , 姜三平 . 基于主成分分析的图像自适应阈值去噪算法 [J]. 红外技术 ,2014,36(4):311-314,319.

Li J X, Jiang S P. Adaptive threshold image denoising algorithm based on principal component analysis[J]. Infrared Technology, 2014,36(4):311-314,319.

[18] 盘鑫海 . 油茶生长发育对不同光质的生理响应研究 [D]. 长沙 : 中南林业科技大学 ,2023:23-24.
Pan X H. Physiological responses of *Camellia oleifera* to different light quality during growth and development [D]. Changsha: Central South University of Forestry & Technology,2023:23-24.

[19] 辛国凤 . 甜椒幼苗光合作用对不同光质的响应及其机制 [D]. 泰安 : 山东农业大学 ,2019:4-5.
Xin G F. Response and mechanism of photosynthesis to different light quality in sweet pepper seedlings[D].Tai'an: Shandong Agricultural University,2019:4-5.

[20] 张现征 . 光质调控番茄植株生长及果实品质的机理研究 [D]. 泰安 : 山东农业大学 ,2018:3-4.
Zhang X Z. Study on the mechanism of light quality on tomato plant growth and fruit quality[D].Tai'an: Shandong Agricultural University,2018:3-4.

[21] 杜晋城 , 李欣欣 , 王泽亮 , 等 .20 个油橄榄品种间叶片特性分析 [J]. 安徽农业科学 ,2024,52(24):94-97,149.
Du J C, Li X X, Wang Z L, et al. Analysis of leaf characteristics between 20 *Olive europaea* L.varieties[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences,2024,52(24):94-97,149.

[22] 祁传磊 , 靳春莲 , 李开隆 , 等 . 不同倍性大青杨的光合特性及叶片解剖结构比较 [J]. 植物生理学通讯 ,2010,46(9):917-922.
Qi C L, Jin C L, Li K L, et al. Comparison of photosynthetic characteristics and leaf anatomy structure of different ploidy *Populus ussuriensis* Kom.[J]. Plant Physiology Journal, 2010,46(9):917-922.

[23] 刘慧民 , 马艳丽 , 王柏臣 , 等 . 两种绣线菊耐弱光能力的光合适应性 [J]. 生态学报 ,2012,32(23):7519-7531.
Liu H M, Ma Y L, Wang B C, et al. Photosynthetic adaptability of the resistance ability to weak light of 2 species spiraea[J]. Acta Ecologica Sinica,2012, 32(23):7519-7531.

[24] 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.

[25] 董博文 , 李继东 , 郑先波 , 等 . 山茱萸种质资源表型性状多样性及相关性分析 [J]. 经济林研究 ,2014,32(2):163-166.
Dong B W, Li J D, Zheng X B, et al. Diversity and correlation analysis of phenotypic characteristics in *Cornus officinalis* germplasm resources[J]. Non-wood Forest Research,2014,32(2): 163-166.

[26] 李晓曼 , 段蒙蒙 , 王鹏 , 等 . 栽培萝卜植株地上部表型多样性分析 [J]. 植物遗传资源学报 ,2018,19(4):668-675.
Li X M, Duan M M, Wang P, et al. Phenotypic diversity analysis of cultivated radish (*Raphanus sativus* L.)[J]. Journal of Plant Genetic Resources,2018,19(4):668-675.

[27] 邹玉玲 . 攸县油茶优良无性系评价及遗传多样性研究 [D]. 北京 : 中国林业科学研究院 ,2021:48.
Zou Y L. Evaluation and genetic diversity of *Camellia yuhsienensis* Hu. superior clones[D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry,2021:48.

[28] 邹天才 , 张著林 , 周洪英 , 等 . 山茶属五种植物叶片解剖特征及与光合生理相关性研究 [J]. 西北植物学报 ,1996,16(1): 42-51.
Zou T C, Zhang Z L, Zhou H Y, et al. Study on phytotomic characteristic and correlation between it and photosynthetic physiologic index in leaves of five species from *Camellia*[J]. Acta Botanica Boreali-occidentalia Sinica,1996,16(1):42-51.

[29] 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 ,2020:24-25.
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,2020:24-25.

[ 本文编校：吴　彬 ]