

# 不同种源野生油茶果实表型性状多样性分析

邢凯峰, 谢昊星, 张立冬, 周军, 冯立云, 张华轩, 陈尚, 赵耀, 戎俊, 张剑

(南昌大学生命科学学院, 南昌 330031)

**摘要:** 本研究旨在探究不同种源野生油茶(*Camellia oleifera*)果实表型性状的遗传多样性, 为油茶良种选育和遗传种质资源改良提供理论依据。以广东、广西、江西、安徽、四川、湖北、湖南、陕西和贵州9个省(自治区)16个种源地的218株生长良好的野生油茶为研究对象, 采用多重比较、变异分析、巢式方差分析、相关性分析、主成分分析和聚类分析方法, 对不同种源的8个果实表型性状进行统计和分析。结果表明, 16个种源的8个果实表型性状变异系数均值范围为12.03%~35.08%, 种源间变异系数均值(42.83%)大于种源内变异系数均值(23.99%), 表型分化系数均值为88.63%, 说明不同种源野生油茶果实表型性状变异丰富。相关性分析结果表明, 鲜果重、果高、果径、果皮厚度、鲜籽重和每果籽数间互相呈极显著正相关, 果皮厚度和鲜出籽率呈极显著负相关。主成分分析结果显示, 前3个主成分的累计贡献率为90.773%, 表明野生油茶果实表型性状的大部分信息基本可以用前3个主成分来反映, 其中, 第1主成分主要反映果实大小特征, 第2主成分主要反映果实出籽率特征, 第3主成分主要反映果实形状特征。聚类分析表明, 16个种源在欧式距离10处被分为I和II类, 同时进一步在欧氏距离5处分成不同的亚类, 第I类在生产加工中比较方便, 第II类在产量和收益上更具优势。本研究野生油茶果实表型性状变异丰富, 可根据育种目标选择不同类群种源作为育种材料。

**关键词:** 野生油茶; 果实表型性状; 变异分析; 巢式方差分析; 主成分分析

## Diversity Analysis on Fruit Phenotype of Wild *Camellia oleifera* from Different Provenances

XING Kaifeng, XIE Haoxing, ZHANG Lidong, ZHOU Jun, FENG Liyun, ZHANG Huaxuan, CHEN Shang,  
ZHAO Yao, RONG Jun, ZHANG Jian

(School of Life Sciences, Nanchang University, Nanchang 330031)

**Abstract:** This study aimed to investigate the genetic diversity of fruit phenotypic traits in wild *Camellia oleifera* from various seed sources, as well as to provide a theoretical basis for selecting superior *C. oleifera* cultivars and improving genetic germplasm resources. Eight fruit phenotypic traits of *C. oleifera* were quantified and analyzed using various statistical methods, including analysis of variance, nested analysis of variance, correlation analysis, principal component analysis, and cluster analysis. This study investigated 218 well-developed *C. oleifera* specimens from 16 provenances across nine provinces (autonomous region), including Guangdong, Guangxi, Jiangxi, Anhui, Sichuan, Hubei, Hunan, Shaanxi, and Guizhou. The results demonstrated that the mean values of the coefficients of variation for eight fruit phenotypic traits of 16 provenances ranged from 12.03% to 35.08%. Notably, the mean value of the coefficients of variation between provenances (42.83%) was found to be greater than the mean value of the coefficients of variation within provenances (23.99%). The mean value of the coefficients of variation of the phenotypic differentiation coefficient was 88.63%, indicating that there were abundant variation in phenotypic traits of different germplasm

收稿日期: 2023-11-17 网络出版日期: 2024-02-02

URL: <https://doi.org/10.13430/j.cnki.jpgr.20231117002>

第一作者研究方向为作物遗传资源保护和利用, E-mail: 2286639921@qq.com

通信作者: 张剑, 研究方向为农业生态学和分子生态学, E-mail: zhangjianlab@126.com

基金项目: 国家自然科学基金项目(32260306, 32270238); 江西省自然科学基金(20232BAB215014)

**Foundation projects:** National Natural Science Foundation of China (32260306, 32270238); Jiangxi Provincial Natural Science Foundation (20232BAB215014)

resources of wild *C. oleifera* fruits. The results of the correlation analysis indicated that there were significant positive correlations between fresh fruit weight, fruit height, fruit diameter, peel thickness, fresh seed weight, and the number of seeds per fruit. Conversely, there were significant negative correlations between peel thickness and fresh seed yield. The results of principal component analysis indicated that the cumulative contribution rate of the first three principal components was 90.773%, suggesting that the majority of the phenotypic traits of wild *C. oleifera* fruits could be adequately represented by the first three principal components. The first principal component primarily reflected the characteristics of fruit size, the second mainly reflected the characteristics of fruit seeding rate, and the third mainly reflected the characteristics of fruit shape. Cluster analysis revealed that the 16 provenances were divided into I and II classes at Euclidean distance 10, with further subdivision into subclasses at Euclidean distance 5. Class I is more convenient in terms of production and processing, while Class II is more advantageous in terms of yield and profitability. The phenotypic traits of wild *C. oleifera* fruits exhibited considerable diversity, and different groups of provenances could be selected as breeding materials according to breeding objectives.

**Key words:** wild *Camellia oleifera*; fruit phenotypic characters; variation analysis; nested analysis of variance; principal component analysis

油茶(*Camellia oleifera*)属山茶科(Theaceae)山茶属(*Camellia*),是我国总产油量最高、栽培面积最广的木本油料树种,在我国已有2000多年的栽培历史<sup>[1]</sup>。截至2022年底,全国油茶栽培面积约467万hm<sup>2</sup>,预计2025年达到600万hm<sup>2</sup><sup>[2]</sup>。油茶广泛分布在秦岭、淮河以南的省、自治区和直辖市,其中江西、湖南和广西是主要种植地,占全国油茶种植面积的76%<sup>[2-3]</sup>。茶油被誉为“东方橄榄油”,其不饱和脂肪酸含量大于85%,油酸含量大于75%,富含角鲨烯、维生素、茶多酚、植物甾醇等营养保健成分,是一种优质的植物油<sup>[4-6]</sup>。油茶籽粕中含有丰富的茶多酚,这些活性物质具有抗氧化、清除自由基、抗肿瘤、降血糖和降血脂等重要生物学功能<sup>[6-7]</sup>。

目前,油茶的研究大多围绕栽培品种展开,主要集中在品种选育、生物胁迫和非生物胁迫对油茶生长与产量的影响及应对措施、茶油生物合成途径调控等方面,而对野生油茶资源研究相对较少<sup>[5]</sup>。由于受地理、气候和土壤等因素的影响,油茶良种在引种栽培后,还存在着结实量少、适应性差、生长弱、产量低等问题<sup>[1, 8]</sup>。而自然生长的野生油茶林位于不同的生态环境,经过长期的自然选择,使得野生油茶群体内和群体间含有丰富的遗传变异<sup>[9-12]</sup>。因此挖掘不同区域的优质野生油茶,可以为培育和筛选适合当地物候条件的高产稳产优良品种提供参考。而观测植物表型性状是研究其遗传多样性最简单且直观的方法<sup>[13-14]</sup>。截至目前,野生油茶的表型性状多样性分析主要集中在贵州、四川、河南、江西等种源地,研究多是在同一种源内进

行表型性状比较分析<sup>[9-12, 15-18]</sup>。但关于不同区域间野生油茶表型性状多样性分析的研究较少。因此,研究不同区域间野生油茶表型性状多样性,尤其是果实等产量性状的表型多样性,可为筛选适应当地生态条件的特色良种提供参考。

本研究以广东、广西、江西、安徽、四川、湖北、湖南、陕西和贵州9个省(自治区)共16个种源地的218株野生油茶为试验材料,对野生油茶成熟果实的8个表型性状进行遗传多样性分析,包括多重比较、变异分析、巢式方差分析和主成分分析。同时,本研究对供试的16个种源地也进行了聚类分析,以期了解不同种源野生油茶果实表型性状的遗传多样性,为培育和筛选适合当地物候条件的高产稳产优良品种提供参考,也为油茶遗传种质资源改良工作提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 种源地选择

根据崔相艳等<sup>[19]</sup>对油茶适生区的总结,本研究选定中、高适生区作为研究样地,采样点分布在武夷山脉、南岭山脉、罗霄山脉、武陵山脉及其附近的群山区域等地,最终选取广东省、广西壮族自治区、江西省、安徽省、四川省、湖北省、湖南省、陕西省和贵州省9个省(自治区)共16个种源地内的野生油茶进行研究(图1)。为了便于理解,本研究将调查的受人为干扰较少的自然林中的实生油茶树称为野生油茶。本研究野生油茶林的判断标准是:所处生境为自然林,实生油茶树呈斑块状或零星的散布,没



TMZ:广东韶关1;QXD:广东韶关2;YBS:广西柳州;SS:广西桂林;JGS:江西井冈山;LS:江西庐山;ML:江西南昌;LA:安徽六安;HS:安徽黄山;QLZ:四川达州;BRS:四川成都;YC:湖北宜昌;ES:湖北恩施;HLT:湖南张家界;SL:陕西商洛;QLS:贵州贵阳;下同  
TMZ:Shaoguan1, Guangdong;QXD:Shaoguan2, Guangdong;YBS:Liuzhou, Guangxi;SS:Guilin, Guangxi;JGS:Jinggangshan, Jiangxi;LS:Lushan, Jiangxi;ML:Nanchang, Jiangxi;LA:Liu'an, Anhui;HS:Huangshan, Anhui;QLZ:Dazhou, Sichuan;BRS:Chengdu, Sichuan;YC:Yichang, Hubei;ES:Enshi, Hubei;HLT:Zhangjiajie, Hunan;SL:Shangluo, Shaanxi;QLS:Guiyang, Guizhou;The same as below

图1 野生油茶种源地分布图

Fig.1 Map of the distribution of the wild *C. oleifera* provenances

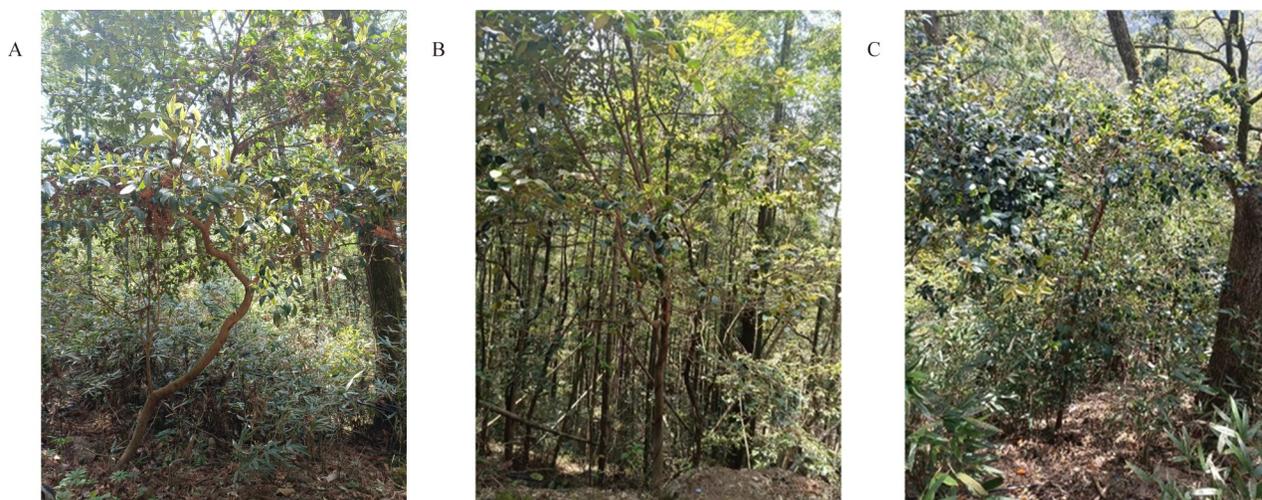
有明显的人工栽培痕迹,如均匀的株行距、连片分布、嫁接油茶树等;油茶种群具有明显的年龄结构,且有大量的幼株能够自然更新(图2)。各种源地主要土壤类型有红壤、棕壤等,地貌主要为平原和低山丘陵,油茶基径在10~25 cm,年龄结构明显,枝叶稀疏,结果较少,与其他林木混合一起。各种源地自然概况见表1。

## 1.2 试验材料

野生油茶结实率不高,因此在选择油茶样株时,样株茶果数量大于10个且果实着生位置包含4个方位。为了选取最能代表种源地野生油茶果实性状的样株,本研究在调查掌握种群状况的基础上,结合油茶年龄结构采取线性取样的方式选取样株,样株之间距离不少于5 m。一些样地油茶树密度低,零星散布在杉树、毛竹以及灌木丛中,且茶果数量又不足,因此本研究选取至少能取到3株及以上样株的种源地作为分析对象。16个种源地共选取218株野生油茶样株,每株油茶样株均在不同方位共采集果实10个,并对选取的油茶单株和采集的果实分别进行编号,将采集的油茶果实带回实验室,样果保存在硅胶干燥的自封袋中。

## 1.3 果实表型性状的测定

每株随机选取10颗鲜果,使用精度0.01 g的电子天平称量鲜果重和鲜籽重,使用精度0.01 mm的游标卡尺测量果高、果径和果皮厚度,籽数采取直接计数。根据测量结果计算鲜出籽率和果形指数。



A: 贵州贵阳; B: 江西庐山; C: 湖南张家界

A: QLS; B: LS; C: HLT

图2 野生油茶样株及其生境

Fig. 2 Wild *C. oleifera* sample plants and their habitats

表 1 样地信息

Table 1 Plot information

编号 ID	种源 Provenance	样本数 Sample numbers	海拔(m) Altitude	年平均温度(℃) Annual mean temperature	年均降水量(mm) Annual precipitation
1~20	广东韶关1	20	1033	15.4	1671
21~39	广东韶关2	19	893	16.0	1602
40~47	广西柳州	8	1806	12.0	1621
48~50	广西桂林	3	427	17.1	1581
51~61	江西井冈山	11	477	16.2	1566
62~67	江西庐山	6	1158	12.1	1838
68~83	江西南昌	16	468	15.6	1661
84~90	安徽六安	7	248	15.0	1310
91~110	安徽黄山	20	489	14.4	1662
111~120	四川达州	10	815	15.4	1227
121~140	四川成都	20	752	15.4	1000
141~158	湖北宜昌	18	982	13.1	1233
159~184	湖北恩施	26	472	16.3	1455
185~194	湖南张家界	10	1050	13.6	1493
195~205	陕西商洛	11	708	13.5	773
206~218	贵州贵阳	13	1170	15.2	1115

鲜出籽率(%) = 鲜籽重/鲜果重 × 100%

果形指数 = 果高/果径

果实的形状可以通过果形指数的大小来反映,根据彭邵锋的果形分类标准<sup>[20]</sup>,果形指数<0.89为桔形,范围在0.89~1.07之间为球形,范围在1.07~1.25之间为卵形,≥1.25为橄榄形。

#### 1.4 数据分析

所有数据采用平均值±标准误表示。利用Excel 2021软件进行数据统计;利用SPSS 27.0软件对各表型性状进行多样性分析,包括多重比较、变异分析、巢式方差分析;利用Origin 2021软件对8个果实表型性状进行主成分分析;进一步使用Origin 2021软件对16个种源地的果实类型进行聚类,分析使用的性状为直接测定的6个果实性状(鲜果重、果高、果径、果皮厚度、每果籽数和鲜籽重)。

$V_{ST}$ 为表型分化系数,表示群体间变异占遗传总变异的百分比, $V_{ST}(\%) = [\delta_{us}^2 / (\delta_{us}^2 + \delta_s^2)] \times 100\%$ 。式中: $\delta_{us}^2$ 为群体间方差分量, $\delta_s^2$ 为群体内方差分量<sup>[21]</sup>。

香浓维纳指数(Shannon-Wiener)是描述性状多样性变异程度的量化体现,计算公式为 $H' = -\sum_{i=1}^n P_i \ln P_i$ 。式中: $H'$ 为多样性指数, $P_i$ 为某一性状第*i*级材料内分布频率的有效百分比<sup>[22]</sup>。

用性状特征变异系数(CV)表示性状离散程度, $CV(\%) = s/\bar{x} \times 100\%$ 。式中: $\bar{x}$ 为性状平均值, $s$ 为标准差<sup>[20]</sup>。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同种源野生油茶果实表型性状遗传多样性分析

不同种源野生油茶果实表型性状测定结果(表2)显示,江西南昌种源的鲜果重(22.96 g)、果高(3.79 cm)、果径(3.97 cm)、果皮厚度(0.59 cm)和每果籽数(5.55个)均最大,其鲜果重、果径、果皮厚度和每果籽数均显著大于其他15个种源,而果高显著大于除广西桂林和陕西商洛外的其他13个种源。陕西商洛种源的鲜籽重(6.08 g)最大,显著高于除江西南昌外的其他14个种源。安徽六安种源的鲜出籽率(42.35%)最大,显著高于广东韶关2等8个种源。江西井冈山种源的果形指数(1.23)最大,显著高于除广西柳州外其他14个种源,江西井冈山、广西柳州、广西桂林、四川成都、四川达州、陕西商洛、江西庐山和安徽黄山8个种源的果实为卵形,果形指数分别为1.23、1.18、1.14、1.13、1.12、1.10、1.08和1.07,而广东韶关1、贵州贵阳、安徽六安、湖北宜昌、广东韶关2、湖南张家界、湖北恩施和江西南昌8个种源的果实为球形,果形指数分别为1.05、1.03、1.00、1.00、1.00、0.98、0.97和0.95。8个果实表型性状香浓维纳指数在1.00~1.71之间,平均值为1.35,其中,每果籽数最高,果径最低,表明野生油茶果实性状具有较高的多样性。

表2 不同种源野生油茶果实表型性状的比较  
Table 2 Comparison of phenotypic traits of wild *Camellia oleifera* fruits from different provenances

种源 Provenance	鲜果重(g) FFW	果高(cm) FH	果径(cm) FD	果皮厚度(cm) PT	每果籽数 NSPF	鲜籽重(g) FSW	鲜出籽率(%) FSY	果形指数 FSI
广东韶关1 TMZ	9.19±0.67de	2.71±0.07c	2.59±0.08de	0.27±0.01de	3.84±0.33bc	3.62±0.31cde	38.88±1.25abcd	1.05±0.02cdef
广东韶关2 QXD	7.22±0.48efg	2.47±0.06cd	2.46±0.06ef	0.31±0.01cd	3.08±0.17bcdef	2.16±0.20fgh	29.33±1.60fgh	1.00±0.01efg
广西柳州 YBS	3.81±0.38hij	2.63±0.15c	2.21±0.08fgh	0.33±0.02c	1.85±0.17g	1.46±0.14ghi	37.61±2.27abcde	1.18±0.04ab
广西桂林 SS	13.08±0.26c	3.49±0.29a	3.07±0.03bc	0.23±0.02ef	2.67±0.45defg	4.80±0.30bc	35.76±1.28bcdef	1.14±0.10bc
江西井冈山 JGS	1.73±0.09j	1.88±0.04fg	1.55±0.05j	0.21±0.01f	2.01±0.19fg	0.68±0.08i	37.5±3.00abcde	1.23±0.04a
江西庐山 LS	6.00±0.64efghi	2.31±0.13de	2.14±0.07gh	0.30±0.02cd	2.63±0.46defg	2.51±0.24defg	41.96±1.13ab	1.08±0.03cde
江西南昌 ML	22.96±2.89a	3.79±0.20a	3.97±0.19a	0.59±0.04a	5.55±0.40a	5.63±0.54ab	26.64±1.66h	0.95±0.01g
安徽六安 LA	5.68±1.06fghi	2.19±0.12def	2.20±0.13fgh	0.20±0.02f	3.75±0.86bcd	2.47±0.57efg	42.35±3.69a	1.00±0.03efg
安徽黄山 HS	11.60±0.86cd	3.03±0.07b	2.83±0.06cd	0.24±0.01ef	3.10±0.34bcdef	4.48±0.30bc	38.84±1.77abcd	1.07±0.02cde
四川达州 QLZ	4.55±0.35ghij	2.28±0.17de	2.04±0.07h	0.19±0.01f	2.02±0.19fg	1.49±0.15ghi	30.62±2.32fgh	1.12±0.07bc
四川成都 BRS	7.11±0.67efgh	2.67±0.09c	2.38±0.08efg	0.21±0.01f	3.05±0.35cdef	2.93±0.31def	40.77±1.96abc	1.13±0.03bc
湖北宜昌 YC	4.53±0.31ghij	2.09±0.06ef	2.10±0.05gh	0.20±0.01f	2.52±0.32efg	1.60±0.16ghi	33.90±1.74defg	1.00±0.01efg
湖北恩施 ES	8.25±1.06def	2.44±0.07cd	2.55±0.10de	0.18±0.01f	3.30±0.27bcde	3.66±0.56cd	40.98±1.92abc	0.97±0.02fg
湖南张家界 HLT	3.62±0.49ij	1.89±0.11fg	1.94±0.09hi	0.18±0.02f	2.23±0.23efg	1.12±0.19hi	29.01±2.60gh	0.98±0.04fg
陕西商洛 SL	17.78±1.25b	3.56±0.09a	3.25±0.09b	0.44±0.01b	4.21±0.55b	6.08±0.32a	34.88±0.81cdefg	1.10±0.03bcd
贵州贵阳 QLS	2.99±0.38ij	1.78±0.08g	1.73±0.07ij	0.22±0.02ef	1.99±0.37fg	0.99±0.16hi	31.93±2.45efgh	1.03±0.03defg
香浓维纳指数 $H'$	1.13	1.11	1.00	1.42	1.71	1.69	1.37	1.07

同列中不同小写字母表示在 0.05 水平上差异显著,下同

Different lowercases in the same column indicate the significant difference at 0.05 level; FFW: Fresh fruit weight; FH: Fruit height; FD: Fruit diameter; PT: Peel thickness; NSPF: Number of seeds per fruit; FSW: Fresh seed weight; FSY: Fresh seed yield; FSI: Fruit shape index; The same as below

不同种源野生油茶8个果实表型性状的变异系数分析结果(表3)显示,鲜果重的种源间变异系数(81.34%)最大,鲜籽重的种源间变异系数(71.21%)次之,果形指数的种源间变异系数(12.10%)最小。在16个种源中,果实表型性状变异系数均值大于30%的种源有3个,均值小于20%的种源有6个,其

中湖北恩施种源的变异系数均值(35.08%)最大,贵州贵阳种源的变异系数均值(34.23%)次之,广西桂林种源的变异系数均值(12.03%)最小。野生油茶果实的8个表型性状在16个种源间变异系数的平均值为42.83%,大于种源内变异系数的平均值(23.99%)。

表3 不同种源野生油茶果实表型性状的平均变异系数

Table 3 Average variation coefficient of phenotypic traits of wild *Camellia oleifera* fruits from different provenances (%)

种源 Provenance	鲜果重 FFW	果高 FH	果径 FD	果皮厚度 PT	每果籽数 NSPF	鲜籽重 FSW	鲜出籽率 FSY	果形指数 FSI	均值 Mean
广东韶关1 TMZ	32.48	11.45	13.73	22.47	38.27	37.76	14.33	7.84	22.29
广东韶关2 QXD	28.88	11.46	10.33	15.60	24.49	40.31	23.76	3.93	19.84
广西柳州 YBS	28.07	16.01	9.82	17.58	25.32	27.35	17.05	9.90	18.89
广西桂林 SS	3.42	14.26	1.42	15.86	29.06	10.66	6.21	15.32	12.03
江西井冈山 JGS	16.70	7.65	11.38	13.53	31.89	40.43	26.50	10.11	19.77
江西庐山 LS	26.30	13.27	7.50	19.96	43.11	23.87	6.60	7.69	18.54
江西南昌 ML	50.29	21.03	19.38	28.99	28.84	38.50	25.00	5.37	27.18
安徽六安 LA	49.42	14.70	16.05	21.87	60.61	61.44	23.07	7.95	31.89
安徽黄山 HS	33.12	10.99	10.28	21.57	49.45	30.05	20.39	8.39	23.03
四川达州 QLZ	24.49	22.96	10.51	15.11	29.68	31.32	23.92	19.84	22.23
四川成都 BRS	41.82	15.73	14.99	23.91	51.71	47.30	21.48	12.42	28.67
湖北宜昌 YC	28.93	11.24	10.32	26.66	54.38	41.58	21.77	5.98	25.11
湖北恩施 ES	65.30	15.49	19.51	25.45	41.96	78.12	23.94	10.85	35.08
湖南张家界 HLT	43.25	18.91	14.90	27.61	33.20	53.97	28.31	13.27	29.18
陕西商洛 SL	23.41	8.80	9.35	9.22	43.32	17.57	7.73	8.05	15.93
贵州贵阳 QLS	45.26	15.84	14.12	32.98	67.01	60.16	27.71	10.78	34.23
种源间变异系数 Coefficient of variation among provenances	81.34	26.07	27.39	47.91	51.60	71.21	25.05	12.10	

巢式方差分析结果(表4)显示,鲜籽重和鲜出籽率2个性状在种源间以及种源内的差异均为极显著。鲜果重、果高、果径、果皮厚度、每果籽数和果形指数6个性状在种源间均差异极显著,在种源内差异不显著。

野生油茶8个果实表型性状中,鲜果重、果高、果径、果皮厚度和每果籽数的表型分化系数均大于90%,其中果高的表型分化系数(99.77%)最大,鲜出籽率的表型分化系数(47.27%)最小。8个野生油茶果实表型性状的表型分化系数均值为88.63%。

## 2.2 主要性状间的相关性分析

相关性分析(图3)表明,野生油茶8个果实表型性状间存在复杂的相互关系。其中,鲜果重与果

高、果径、果皮厚度、每果籽数、鲜籽重5个性状均呈极显著正相关,而与果形指数呈极显著负相关。果高与果径、果皮厚度、每果籽数、鲜籽重4个性状均呈极显著正相关。果径与果皮厚度、每果籽数、鲜籽重均呈极显著正相关,与果形指数呈极显著负相关。果皮厚度与每果籽数、鲜籽重均呈极显著正相关,与鲜出籽率呈极显著负相关。每果籽数与鲜籽重呈极显著正相关,与果形指数呈极显著负相关。鲜籽重与鲜出籽率呈极显著正相关,而与果形指数呈极显著负相关。综上所述,野生油茶果实相关性状大多关系紧密,当其中一个性状指标发生变化时可能会引起其他性状指标的变化。

表4 不同种源野生油茶果实表型性状的巢式方差分析及表型分化系数比较

Table 4 Comparison of nested ANOVA and phenotypic differentiation coefficients for phenotypic traits of wild *Camellia oleifera* fruits from different provenances

性状 Traits	种源间 Among provenances			种源内 Within provenances			随机误差 Random error		表型分化 系数(%) Phenotypic differentiation coefficient
	均方 Mean square	F值 F value	分量(%) Component	均方 Mean square	F值 F value	分量(%) Component	均方 Mean square	分量(%) Component	
鲜果重 FFW	430.229	23.084**	95.52	1.551	0.083	0.34	18.637	4.14	99.64
果高 FH	4.434	28.432**	96.39	0.010	0.065	0.22	0.156	3.39	99.77
果径 FD	4.785	34.685**	96.16	0.053	0.383	1.07	0.138	2.77	98.90
果皮厚度 PT	0.175	38.548**	93.58	0.007	1.595	3.74	0.005	2.67	96.15
每果籽数 NSPF	12.598	6.871**	86.99	0.051	0.028	0.35	1.833	12.66	99.60
鲜籽重 FSW	35.834	16.653**	75.91	9.223	4.286**	19.54	2.152	4.56	79.53
鲜出籽率 FSY	376.790	6.480**	44.06	420.254	7.227**	49.14	58.148	6.80	47.27
果形指数 FSI	0.082	7.296**	78.85	0.011	1.016	10.58	0.011	10.58	88.17
均值 Mean	108.116	20.256	83.43	61.593	1.835	10.62	10.135	5.95	88.63

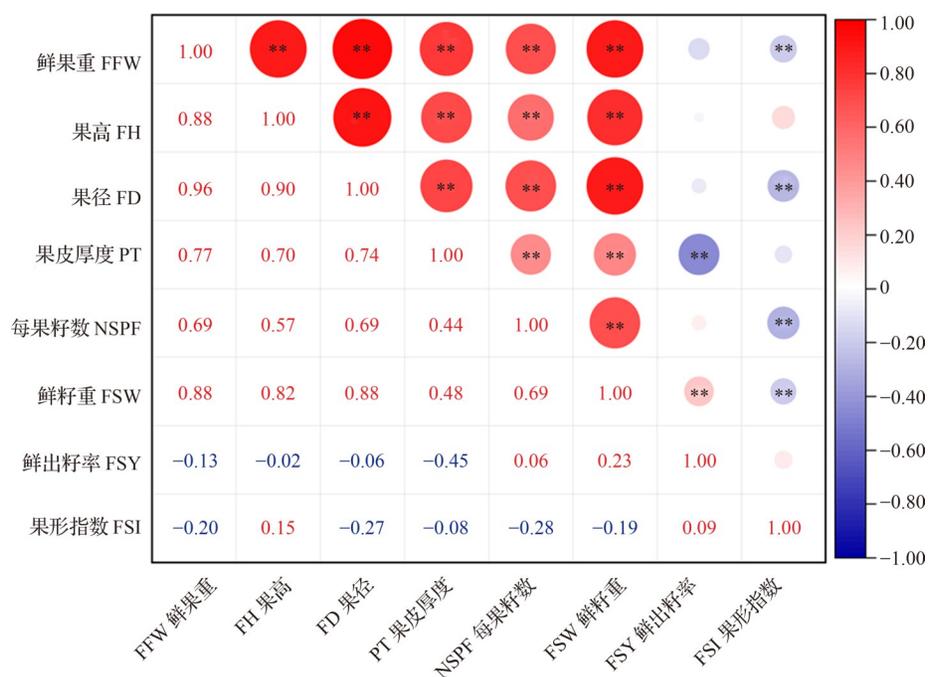
\*,\*\*分别表示在 $P < 0.05$ 和 $P < 0.01$ 上差异显著;下同\*,\*\* indicates significant difference at  $P < 0.05$  and  $P < 0.01$ , respectively; The same as below

图3 野生油茶8个果实表型性状间相关性分析

Fig. 3 Correlation analysis among 8 fruit phenotypic traits of wild *Camellia oleifera*

### 2.3 果实表型性状的主成分分析及综合得分排在前20的野生油茶单株

主成分分析结果(表5)显示,前3个主成分的累计贡献率为90.773%,表明野生油茶果实表型性状的大部分信息基本可以用前3个主成分来反映。其中,第1主成分的贡献率为59.796%,特征值为4.784,其中鲜果重(0.447)、果高(0.415)、果径(0.449)和鲜籽重(0.410)载荷系数的绝对值较大,

均大于0.4,表明第1主成分主要反映果实大小的性状特征。第2主成分的贡献率为16.800%,特征值为1.344,其中,鲜出籽率(0.826)载荷系数的绝对值最大,表明第2主成分主要反映果实出籽率的性状特征。第3主成分的贡献率为14.177%,特征值为1.134,其中,果形指数(0.901)载荷系数的绝对值最大,表明第3主成分主要反映果实形状的特征。

表5 野生油茶果实性状在各主成分上的载荷系数及贡献率

Table 5 Loading coefficients and contribution rates of wild *Camellia oleifera* fruit traits on each principal component

性状指标 Character index	第1~3轴主成分的载荷系数 Loading coefficients of principal components of axes 1-3		
	PC1	PC2	PC3
鲜果重 FFW	0.447	-0.037	0.013
果高 FH	0.415	0.028	0.346
果径 FD	0.449	0.014	-0.043
果皮厚度 PT	0.355	-0.434	0.109
每果籽数 NSPF	0.349	0.181	-0.222
鲜籽重 FSW	0.410	0.305	-0.008
鲜出籽率 FSY	-0.040	0.826	0.066
果形指数 FSI	-0.095	0.030	0.901
特征值 Eigenvalue	4.784	1.344	1.134
贡献率(%) Contribution rate	59.796	16.800	14.177
累计贡献率(%) Cumulative contribution rate	59.796	76.596	90.773

根据野生油茶单株在3个主成分上的载荷系数及3个主成分各自的贡献率,计算每株野生油茶的综合得分(油茶单株综合得分 $=0.59796X_1 + 0.16800X_2 + 0.14177X_3$ ),从而获得综合得分前20名的野生油茶单株(表6),编号依次为80、71、79、162、81、83、76、68、196、109、198、199、72、69、97、195、197、17、131和200,得分范围为1.75~4.77,其中江西南昌种源有9株,陕西商洛种源有6株,安徽黄山种源有2株,四川成都、广东韶关1和湖北恩施种源各1株。这20株优异单株的鲜果重范围是12.98~40.06 g,鲜籽重范围是4.98~15.41 g,鲜出籽率范围是18.48%~51.65%(表6)。

### 2.4 野生油茶不同种源的聚类分析

基于野生油茶的6个果实表型相关性状,对16个种源进行聚类分析(图4),同时计算每个类群的果实性状平均值(表7)。结果显示,16个种源在欧式距离10处被分为I类和II类2个类群;同时进一步在

欧氏距离5处分成不同的亚类,其中,I类分为i和ii类,II类分为iii和iv亚类。

第I类包含广东韶关1、安徽黄山、广西桂林、江西庐山、安徽六安、四川成都、湖北恩施、广东韶关2、四川达州、湖南张家界、贵州贵阳、湖北宜昌、广西柳州和江西井冈山14个种源;第II类包含江西南昌和陕西商洛2个种源。第II类果实特征总体表现为果实大、果皮厚、籽数多,其鲜果重(20.85 g)、果高(3.70 cm)、果径(3.68 cm)、果皮厚度(0.53 cm)、每果籽数(5.00个)和鲜籽重(5.82 g)均显著大于第I类种源,第II类种源油茶在种植产量和经济收益上更具有优势;第I类种源果实总体特征为果实小、果皮薄、籽数少,在油茶籽生产加工中较为方便;其中第i亚类种源的鲜果重(5.98 g)最小,第iii亚类种源的鲜果重(22.96 g)最高,第iv亚类种源鲜籽重(6.08g)最高(表7)。

表 6 综合得分排名前 20 单株油茶的主成分分值、综合得分和表型性状

Table 6 Principal component scores, composite scores and phenotypic traits of the top 20 individual *Camellia oleifera* plants with comprehensive scores

编号 ID	单株在主成分上的得分 The scores of individual plants on PC			得分 Scores	排名 Ranking	鲜果重 (g) FFW	果高 (cm) FH	果径 (cm) FD	果皮厚度 (cm) PT	每果籽数 NSPF	鲜籽重 (g) FSW	鲜出籽率 (%) FSY	果形指数 FSI
	1	2	3										
	80	8.40	-2.36										
71	8.32	-1.30	-0.21	4.73	2	37.96	4.58	4.94	0.73	7.20	9.30	24.49	0.93
79	7.80	-2.57	0.42	4.29	3	40.06	4.45	4.71	0.88	4.00	8.57	21.40	0.95
162	6.62	3.59	-2.01	4.28	4	31.10	3.45	4.33	0.23	7.50	15.41	49.62	0.80
81	7.58	-2.60	0.93	4.23	5	34.51	4.96	4.83	0.81	5.71	6.54	18.94	1.03
83	7.52	-1.35	-1.16	4.11	6	36.27	4.10	4.82	0.64	7.75	8.03	22.14	0.85
76	6.48	-0.57	0.32	3.82	7	27.50	4.55	4.57	0.59	6.14	8.16	29.69	0.99
68	6.44	-2.29	-0.19	3.44	8	27.86	4.16	4.37	0.78	7.10	5.76	20.68	0.95
196	5.50	0.15	-0.54	3.24	9	27.99	3.58	3.60	0.51	9.00	7.47	32.67	1.00
109	4.31	0.51	-0.04	2.66	10	22.03	3.75	3.54	0.32	8.00	7.04	30.75	1.06
198	3.91	0.36	1.57	2.62	11	18.71	4.16	3.54	0.45	4.75	7.08	37.39	1.17
199	4.23	0.26	0.06	2.58	12	21.69	3.60	3.54	0.46	5.50	7.84	35.43	1.02
72	4.89	-2.03	-0.32	2.54	13	23.45	3.87	4.11	0.63	5.43	4.98	21.25	0.94
69	4.00	0.34	-1.28	2.27	14	17.01	3.18	3.56	0.49	7.60	6.35	37.31	0.89
97	3.52	0.85	-0.30	2.21	15	21.31	3.46	3.62	0.33	3.75	8.27	38.42	0.96
195	2.78	0.35	2.31	2.05	16	15.40	3.91	3.08	0.46	3.75	6.18	39.87	1.27
197	3.22	-0.67	0.62	1.90	17	19.25	3.83	3.74	0.44	2.25	5.98	30.98	1.02
17	2.99	1.42	-0.96	1.89	18	15.32	3.12	3.20	0.26	8.13	6.16	40.16	0.97
131	2.45	2.73	-0.46	1.86	19	12.98	3.10	3.01	0.21	7.60	6.76	51.65	1.03
200	2.58	-0.13	1.59	1.75	20	16.28	3.66	3.09	0.44	3.38	5.84	35.49	1.18

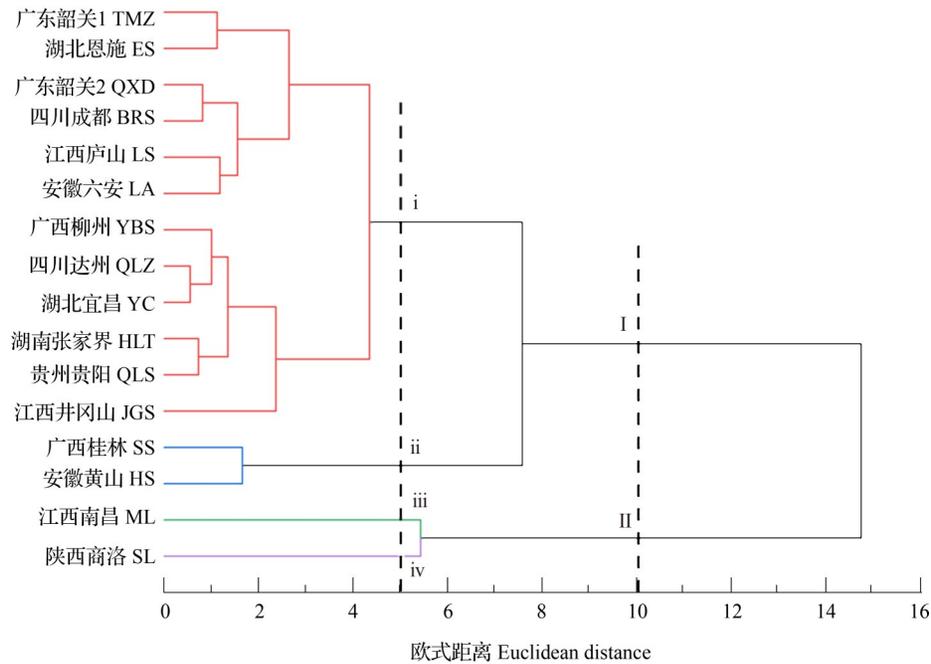


图4 基于野生油茶果实表型性状的16个种源的聚类分析结果

Fig. 4 Cluster analysis result of 16 provenances based on fruit phenotypic traits of wild *Camellia oleifera*

表7 不同类群野生油茶果实表型性状的比较

Table 7 Comparison of phenotypic traits of different groups of wild *C. oleifera* fruit

类群/亚类群 Group/Subgroup	鲜果重(g) FFW	果高(cm) FH	果径(cm) FD	果皮厚度(cm) PT	每果籽数 NSPF	鲜籽重(g) FSW
I	6.68±0.29b	2.42±0.04b	2.31±0.03b	0.23±0.01b	2.85±0.10b	2.57±0.13b
II	20.85±1.83a	3.70±0.12a	3.68±0.14a	0.53±0.03a	5.00±0.34a	5.82±0.34a
i	5.98±0.28d	2.33±0.03c	2.24±0.03d	0.23±0.01c	2.83±0.11c	2.30±0.13c
ii	11.79±0.75c	3.09±0.08b	2.86±0.06c	0.24±0.01c	3.05±0.30c	4.52±0.26b
iii	22.96±2.89a	3.79±0.20a	3.97±0.19a	0.59±0.04a	5.55±0.40a	5.63±0.54a
iv	17.78±1.25b	3.56±0.09a	3.25±0.09b	0.44±0.01b	4.21±0.55b	6.08±0.32a

### 3 讨论

16个种源的8个果实表型性状变异系数均值范围为12.03%~35.08%,并且8个野生油茶果实表型性状的种源间变异系数均值(42.83%)大于种源内变异系数均值(23.99%),表明野生油茶果实表型性状在种源间和种源内均存在丰富的变异,且变异主要来源于种源间<sup>[10]</sup>,也说明是野生油茶自身遗传因素和长期的环境异质性共同作用的结果<sup>[23]</sup>。鲜果重(81.34%)种源间变异系数最大,这与朱雯等<sup>[24]</sup>的研究结果一致。野生油茶果实表型分化系数的变异范围为47.27%~99.77%,平均为88.63%,明显高于苦楝的23.89%<sup>[25]</sup>、板栗 *Castanea mollissima* 的23.42%<sup>[20]</sup>和东北杏 *Armeniaca mandshurica* 的47.81%<sup>[26]</sup>,表明不同种源的野生油茶果实表型分化

程度较高。野生油茶分布范围较广,对环境的适应性变异导致其较高的果实表型多样性,在育种时,可以将种源地和单株有效结合,充分利用种源内和种源间的遗传变异,选择适应性更强和性状更加优良的种质资源<sup>[25]</sup>。

本研究通过主成分分析,发现前3个主成分的累计贡献率达90.773%,说明前3个主成分可基本反映野生油茶果实表型性状的大部分信息,第1主成分主要反映果实大小特征,第2主成分主要反映果实出籽率特征,第3主成分主要反映果实形状特征。各主成分中载荷系数绝对值较大的性状是导致野生油茶果实表型差异的主要因子。而表型性状相关性分析结果表明,鲜果重、果高、果径、果皮厚度、每果籽数和鲜籽重间均存在极显著正相关,而果皮厚度和鲜出籽率呈极显著负相关。主成分

和相关性分析可以对多个性状进行综合分析,以得到更直观、更简单的结果,同时排除多个性状指标间复杂相互关系对结果分析的干扰<sup>[23]</sup>。结果表明在生产实践中,可以选择鲜果重、鲜出籽率和果形指数等较直观的性状作为评判油茶产量潜力的重点观测性状<sup>[14]</sup>。

根据野生油茶单株的综合得分,获得综合得分最高的20棵野生油茶单株,得分范围为1.75~4.77。20个优异单株来自于6个种源,其中江西南昌种源的优异单株主要特征为果实较大(编号分别为68、69、71、72、76、79、80、81和83),湖北恩施种源果实特征为出籽率高(编号为162)。本研究选出的这20株优异单株可以为油茶育种研究提供一定的参考。

聚类分析结果显示,16个种源的野生油茶分为两大类。第II类仅包含陕西商洛和江西南昌两个群体,剩余14个种源的野生油茶则聚为第I类。第II类的两个种源在地理上有显著的分隔,其中江西南昌与第I类中的一些群体(江西庐山和江西井冈山)所在区域临近。在聚类结果上没有发现野生油茶果实性状的分化与地理环境之间的相关性。进一步分析表明,第II类2个种源的油茶果实大、籽数多,显著高于第I类野生油茶,表明第II类两个区域的油茶可能受到一定程度的人工选择。第I类野生油茶进一步在欧式距离5处又明显分为i与ii两个类群,经过比较分析发现,相比于第i类群,第ii群体的果实更大,且种籽数显著提高,更符合人为选择具有高产潜力的油茶树的标准。

## 4 结论

本研究采集了中国9个省(自治区)16个种源的野生油茶果实表型性状进行分析,结果表明我国野生油茶果实性状含有丰富的变异,且变异主要来源于种源间。鲜果重、出籽率和果形指数可作为油茶性状最主要和直观的观测性状。根据单株综合得分筛选出的20棵野生油茶优异单株,为油茶育种研究提供一定的参考。

### 参考文献

- [1] 陈永忠.我国油茶科技进展与未来核心技术.中南林业科技大学学报, 2023,43(7):1-22  
Chen Y Z. Scientific and technological progress and future core technologies of oil tea *Camellia* in China. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2023,43(7):1-22
- [2] 谭晓风.油茶分子育种研究进展.中南林业科技大学学报, 2023,43(1):1-24

- Tan X F. Advances in the molecular breeding of *Camellia oleifera*. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2023,43(1):1-24
- [3] 秦声远,戎俊,张文驹,陈家宽.油茶栽培历史与长江流域油茶遗传资源.生物多样性, 2018,26(4):384-395  
Qin S Y, Rong J, Zhang W J, Chen J K. Cultivation history of *Camellia oleifera* and genetic resources in the Yangtze River Basin. Biodiversity Science, 2018,26(4):384-395
- [4] Zhang F, Zhu F, Chen B, Su E, Chen Y, Cao F L. Composition, bioactive substances, extraction technologies and the influences on characteristics of *Camellia oleifera* oil: A review. Food Research International, 2022, 156:111159
- [5] 陈丰林,谢海,游昌乔,蒋帅,彭果,周苹,郭新红.我国油茶资源研究与开发利用现状及展望.生命科学研究, 2021,25(5):425-431  
Chen F L, Xie H, You C Q, Jiang S, Peng G, Zhou P, Guo X H. Current situation and prospect of research, development and utilization of *Camellia oleifera* resources in China. Life Science Research, 2021,25(5):425-431
- [6] Kong Q, Jiang H, Guo C, Chen T, Feng S L, Ding C B, Zhou L J. Research progress on main chemical constituents and pharmacological activities of *Camellia oleifera*. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2022,37(4):194-202
- [7] Wei Z, Guo M, Wang Y, Duan Z Q, Yang K Z, Luan X. Recent advances in research on polyphenol compounds in *Camellia oleifera* seed oil. Food Science, 2021, 42(3):311-320
- [8] 向婷婷,孔庆博,郑倩,丁春邦,冯士令,周莉君,陈涛.野生油茶资源与引进品种的经济性状及脂肪酸组成对比分析.中国粮油学报, 2022,37(8):253-260  
Xiang T T, Kong Q B, Zheng Q, Ding C B, Feng S L, Zhou L J, Chen T. Comparative analysis of economic characters and fatty acid composition between wild *Camellia Oleifera* resources and introduced varieties. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2022,37(8):253-260
- [9] 程离,夏建梅,胡冬南,闫梦,杨陆暘,孙荣喜,周增亮,曾凡朴.河南新县野生油茶群体表型变异特征研究.河南农业大学学报, 2020,54(1):52-58  
Chen L, Xia J M, Hu D N, Yan M, Yang L Y, Sun R X, Zhou Z L, Zeng F P. Phenotypic variation of natural *Camellia oleifera* populations in Xinxian county of Henan province. Journal of Henan Agricultural University, 2020,54(1):52-58
- [10] 石宗坤,胡玉玲,姜佳艳,杨慧琴,龙雪燕,杨小菊,杨胜优,罗倩,李木良.铜仁地区野生油茶果实性状变异研究.南方林业科学, 2021,49(3):24-28  
Shi Z K, Hu Y L, Jiang J Y, Yang H Q, Long X Y, Yang X J, Yang S Y, Luo Q, Li M L. Study on variation of fruit characters of wild *Camellia oleifera* in Tongren Region. South China Forestry Science, 2021,49(3):24-28
- [11] 向婷婷,郑倩,汪秋凤,丁春邦,冯士令,周莉君,陈涛.四川雅安野生油茶经济性状及脂肪酸组成.中国油脂, 2021,46(10):98-103

- Xiang T T, Zheng Q, Wang Q F, Ding C B, Feng S L, Zhou L J, Chen T. Economic characters and fatty acid composition of wild *Camellia oleifera* in Ya'an Sichuan. *China Oils and Fats*, 2021, 46(10):98-103
- [12] 张明刚, 罗扬, 刘四黑, 韦堂灵, 杨学军. 贵州油茶果实性状变异分析. *贵州林业科技*, 2018, 46(4):28-32  
Zhang M G, Luo Y, Liu S H, Wei T L, Yang X J. Analysis on the variation of fruit traits of *Camellia oleifera* in different areas of Guizhou. *Guizhou Forestry Science and Technology*, 2018, 46(4): 28-32
- [13] 李赢, 刘海翠, 石晓旭, 石吕, 韩笑, 刘建, 魏亚凤. 398 份裸大麦种质资源表型性状遗传多样性分析. *植物遗传资源学报*, 2023, 24(5):1311-1320  
Li Y, Liu H C, Shi X X, Shi L, Han X, Liu J, Wei Y F. Phenotypic diversity analysis of 398 naked barley germplasm resources. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2023, 24(5): 1311-1320
- [14] 吴昊, 苏万龙, 石美娟, 薛晓芳, 任海燕, 王永康, 赵爱玲, 李登科. 枣种质果实性状多样性分析与综合评价. *植物遗传资源学报*, 2022, 23(6):1613-1625  
Wu H, Su W L, Shi M J, Xue X F, Ren H Y, Wang Y K, Zhao A L, Li D K. Diversity analysis and comprehensive evaluation of jujube fruit traits. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2022, 23(6):1613-1625
- [15] Chen T, Liu L, Zhou Y L, Zheng Q, Luo S Y, Xiang T T, Zhou L J, Feng S L, Yang H Y, Ding C B. Characterization and comprehensive evaluation of phenotypic characters in wild *Camellia oleifera* germplasm for conservation and breeding. *Frontiers in Plant Science*, 2023, 14:1052890
- [16] 陈小露, 陈百莹, 王玫, 李静, 邹玉璟, 戎俊, 邓泽元. 10 个地区不同单粒质量野生油茶籽油及其营养成分的比较. *食品科学*, 2019, 40(16):227-234  
Chen X L, Chen B Y, Wang M, Li J, Zhou Y J, Rong J, Deng Z Y. Comparative nutrient composition of seed oils of wild *Camellia oleifera* with different single kernel masses grown in ten regions. *Food Science*, 2019, 40(16):227-234
- [17] Huang X M, Chen J M, Yang X Q, Duan S H, Long C, Ge G, Rong J. Low genetic differentiation among altitudes in wild *Camellia oleifera*, a subtropical evergreen hexaploid plant. *Tree Genetics & Genomes*, 2018, 14(2):21
- [18] 刘小亚, 李静, 温志刚, 黄小毛, 戎俊, 刘小如, 邓泽元. 庐山和井冈山不同海拔高度野生油茶籽油及化学成分的比较. *中国食品学报*, 2019, 19(8):248-256  
Liu X Y, Li J, Wen Z G, Huang X M, Rong J, Liu X R, Deng Z Y. Comparison of oil and chemical compositions of wild tea seeds from different altitudes above sea level in lushan and jinggangshan. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2019, 19(8):248-256
- [19] 崔相艳, 王文娟, 杨小强, 李述, 秦声远, 戎俊. 基于生态位模型预测野生油茶的潜在分布. *生物多样性*, 2016, 24(10):1117-1128
- Cui X Y, Wang W J, Yang X Q, Li S, Qin S Y, Rong J. Potential distribution of wild *Camellia oleifera* based on ecological niche modeling. *Biodiversity Science*, 2016, 24(10): 1117-1128
- [20] 彭邵锋, 陈永忠, 张日清, 杨小胡, 王湘南, 陆佳. 油茶果形色分类及经济性状. *中南林业科技大学学报*, 2007, 27(5):33-39  
Peng S F, Chen Y Z, Zhang R Q, Yang X H, Wang X N, Lu J. Classification of fruit shape and color and analysis of the economic traits of oil-tea *Camellia*. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2007, 27(5): 33-39
- [21] 江锡兵, 龚榜初, 刘庆忠, 陈新, 吴开云, 邓全恩, 汤丹. 中国板栗地方品种重要农艺性状的表型多样性. *园艺学报*, 2014, 41(4):641-652  
Jiang X B, Gong B C, Liu Q Z, Chen X, Wu K Y, Deng Q E, Tang D. Phenotypic diversity of important agronomic traits of local cultivars of chinese chestnut. *Acta Horticulturae Sinica*, 2014, 41(4):641-652
- [22] 李伟, 王攀, 其其格, 张启昌, 黄兵军, 肖泽军. 蓝莓种质资源表型多样性研究. *北京林业大学学报*, 2020, 42(2):124-134  
Li W, Wang P, Qi Q G, Zhang Q C, Huang B J, Xiao Z J. Phenotypic diversity analysis of blueberry germplasm resources. *Journal of Beijing Forestry University*, 2020, 42(2):124-134
- [23] 吉德娟, 张得芳, 于倩. 柴达木盆地唐古特白刺的表型多样性. *中南林业科技大学学报*, 2021, 41(10):57-66  
Ji D J, Zhang D F, Yu Q. Phenotypic diversity of *Nitraria tangutorum* bobr. in qaidam basin. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2021, 41(10):57-66
- [24] 朱雯, 许逸林, 徐佳琦, 戚嘉敏, 奚如春. 高州油茶优树果实性状评价. *福建林业科技*, 2016, 43(4):43-48  
Zhu W, Xu Y L, Xu J Q, Qi J M, Xi R C. Analysis and assessment on the characters of fruits from plus trees of *Camellia gauchowensis*. *Journal of Fujian Forestry Science and Technology*, 2016, 43(4):43-48
- [25] 蔡金峰, 郁万文, 汪贵斌, 曹福亮. 不同产地苦楝果实和果核表型多样性分析. *中南林业科技大学学报*, 2021, 41(11):1-9  
Cai J F, Yu W W, Wang G B, Cao F L. Analysis on phenotypic variations of fruit and core traits of *Melia azedarach* from different seed sources. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2021, 41(11): 1-9
- [26] 董胜君, 王若溪, 张皓凯, 陈建华, 刘立新, 于庆福. 不同种源东北杏果实表型性状多样性分析. *植物资源与环境学报*, 2020, 29(6):42-50  
Dong S J, Wang R X, Zhang H K, Chen J H, Liu L X, Yu Q F. Analysis on diversity of fruit phenotypic characters of *Armeniaca mandshurica* from different provenances. *Journal of Plant Resources and Environment*, 2020, 29(6):42-50