

## 贵州小果油茶表型多样性分析及综合评价

徐嘉娟, 朱亚艳, 王港

(贵州省林业科学研究院, 贵州 贵阳 550005)

**摘要:** 为探析贵州小果油茶 *Camellia meiocarpa* 主要分布区的小果油茶表型性状的差异及变异规律, 利用 Shannon-weaver 多样性指数 ( $H'$ )、多重比较、变异系数对表型性状的多样性进行分析, 采用隶属函数法与主成分分析相结合的方法对 5 个居群的 32 株小果油茶进行综合评价。结果表明: 小果油茶 19 个描述型性状的多样性水平不同, 花瓣颜色和子房绒毛为稳定遗传性状, 其多样性指数均为 0, 其余 17 个性状的多样性指数在 0.139 1~1.615 9 之间, 平均为 0.657 2, 以种子形状的多样性指数最大, 叶基形状的较小。11 个数值型性状的平均变异系数 ( $CV$ ) 为 22.66%, 变异幅度为 8.90%~42.25%, 其中, 果纵径、果横径、果形指数 3 个反映果实形态的性状变异系数较小, 较为稳定; 5 个居群的平均变异系数从大到小分别为 P2 (26.16%) > P1 (23.65%) > P5 (23.24%) > P4 (20.81%) > P3 (19.43%), 均具有较高的变异系数; 居群间表型分化系数的平均值为 58.79%, 小果油茶表型变异在居群间的贡献率为 58.79%, 居群内的贡献率为 41.21%, 说明 5 个小果油茶居群在居群间和居群内都有一定程度的变异, 多样性较高。主成分分析把 11 个表型性状归为 6 个主成分 (累计贡献率为 88.54%, 反映出 11 个表型性状的大部分信息), 依次为单果质量、果形指数、果皮厚度、花瓣数、柱头开裂数、花冠直径。表型性状的综合评价由综合得分值大小判定, 排在前 5 位的分别是 12 号、1 号、7 号、10 号、17 号单株, 来自黎平洪州的 12 号单株综合得分值最高 (3.86), 来自榕江忠诚的 29 号单株最低 (-1.29)。5 个居群的小果油茶表型多样性丰富, 不同居群、不同单株的小果油茶性状存在差异, 综合评价可以为小果油茶种质资源评价提供参考。

**关键词:** 小果油茶; 居群; 表型多样性; 主成分分析; 综合评价; 贵州

中图分类号: S794.4 文献标识码: A 文章编号: 1001-3776(2021)03-0015-09

## Comprehensive Evaluation and Phenotypic Diversity Analysis of *Camellia meiocarpa* In Guizhou

XU Jia-juan, ZHU Ya-yan, WANG Gang

(Guizhou Academy of Forestry, Guiyang 550005, China)

**Abstract:** In 2017, 5 populations of *Camellia meiocarpa* were selected from its main distribution area in Guizhou for determinations on flower, leaf and fruit. The results showed that among 19 descriptive phenotypic traits, only petal color and ovary pubescence genetic diversity index was 0, the other 17 traits had 0.139 1-1.615 9, with the average of 0.657 2. The largest and the smallest index was seed shape and leaf base shape. Mean coefficient of variation of 11 numerical traits was 22.66%, ranging from 8.90% to 42.25%. Fruit length, fruit diameter and fruit shape index had smaller coefficient of variance. The average coefficient of variance of five populations was varied 26.16%-19.43%. The mean coefficient of phenotypic differentiation among populations was 58.79%, the contribution rate among and within populations was 58.79% and 41.21%, showing

收稿日期: 2020-12-17; 修回日期: 2021-04-14

基金项目: 黔科合服企〔2018〕(4003)(贵州油茶团队服务企业行动计划); 黔科合平台人才(2018)5252(贵州省油茶工程技术研究中心); 特林研 2020-15(贵州本地油茶良种选育)

作者简介: 徐嘉娟, 硕士, 从事林事林木遗传改良研究; E-mail: rrylxjj@163.com。通信作者: 王港, 副研究员, 从事林木良种选育与遗传改良研究; E-mail: 417328697@qq.com。

variation among and within the five populations of *C. meiocarpa* with rich diversity. Principal component analysis on 11 phenotypic traits resulted into 6 principal components like fruit weight, fruit shape index, pericarp thickness, number of petals, number of style splitting and corolla diameter with cumulative contribution rate of 88.54%. The 6 principal components were. Comprehensive evaluation on phenotypic traits demonstrated that the highest was from Hongzhou with 3.86, and the lowest from Zhongcheng with -1.29.

**Key words:** *Camellia meiocarpa*; population; phenotypic traits; principal component analysis; comprehensive evaluation; Guizhou

植物个体在长期的自然选择过程中所产生的表型特征是生物界最基本的特性之一,这种形态特征往往是遗传与环境因素共同作用的结果,同时也是遗传因素受制于环境多样性变化的外在表现形式<sup>[1-4]</sup>。表型多样性主要研究物种在不同生境下的表型变异,是遗传多样性和环境多样性的综合体现<sup>[5-7]</sup>,能在一定程度上反映个体水平及群体水平的遗传变异情况,是遗传变异的重要表征,一直以来被广泛应用于种群遗传多样性的研究,为种质资源的评价及保护利用提供重要指标<sup>[8-11]</sup>。

小果油茶 *Camellia meiocarpa* 是山茶科 Theaceae 山茶属 *Camella* 的灌木或小乔木,其年产量及分布面积均处于山茶属油用物种的第二位,仅次于普通油茶 *C. oleifera*<sup>[12-13]</sup>。与目前栽培较为广泛的普通油茶相比,小果油茶虽然果实较小,但其具有果皮较薄、出籽率高、含油率高、适应性和抗病性较强、高产稳产、群体效应好等优点<sup>[14-17]</sup>,具有较高的开发利用价值和生产潜力。贵州小果油茶主要分布在黔东南黎平、榕江等县的偏远山区<sup>[17]</sup>,主要以人工栽培为主,伴有野生、半野生状态<sup>[18]</sup>,经过长期的自然进化、天然杂交、人工选择及引种<sup>[19]</sup>,形成了多种多样的变异类型,为良种选育提供了丰富的遗传基础。本文以小果油茶的叶、花、果实、种子等表型性状研究其表型多样性,了解不同居群的小果油茶的表型变异情况,揭示其表型变异规律,为筛选优良变异、引种、育种及种质资源保护提供参考依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验材料

于 2017 年春季抽梢期和秋季果实成熟期进行野外实地调查,在贵州小果油茶主要分布区选择了 5 个居群,其分布地点及地理生态因子见表 1。每个居群选取 5 ~ 7 株生长良好、无明显病虫害的成年植株,对其叶、花、果实等主要植物学特征进行定点观测,对每个植株进行挂牌标记以便跟踪调查,为避免试验材料中出现子代或同一农家品种的重复,两个单株间的距离大于 50 m。

表 1 小果油茶居群的地理位置及生态因子  
Table 1 Location and ecological factors of sampled *C. meiocarpa* populations

采样位置	群体	经度/E	纬度/N	海拔/m	土壤类型	个体数/株
黎平东风林场	P1	109°10'28"	26°18'41"	470	黄壤	5
黎平洪州	P2	109°25'43"	26°10'12"	530	棕黄壤	7
榕江八开	P3	108°42'38"	25°27'35"	360	黄壤	7
榕江平江	P4	108°44'24"	25°25'40"	362	棕黄壤	6
榕江忠诚	P5	108°26'32"	26°01'21"	570	黄壤	7

### 1.2 表型性状的测定

选用芽鳞绒毛、叶片颜色、花瓣颜色、果实形状、种子颜色等 19 个非数值型性状和果横径、果纵径、果皮厚度、花瓣数、萼片数等 11 个数值型性状分析小果油茶的表型多样性。于 3 月中旬抽梢期,每个植株按东、西、南、北 4 个方向随机选取 10 个生长良好的枝条观察芽鳞绒毛有无及芽鳞颜色;于 10 月中旬果实成熟和盛花期,对叶片、花朵、果实各性状进行调查测定,在供试单株各个方向随机选取 20 张完全功能叶片,观察叶片颜色、叶片形状、叶尖形状等 7 个叶片描述型性状,记录叶脉数,用游标卡尺测定叶片长度和宽度,计算叶形指数(叶长/叶宽);在各个方向随机选取 20 朵花,观察花瓣颜色、萼片颜色、花柱裂位、雌雄蕊相对高度等 6 个描述型性状,记录单朵花瓣数、萼片数、柱头开裂数,用游标卡尺测定花冠直径;每个植株随机采集 20 个果实,观察果实颜色和形状及籽粒形状和颜色,记录单果籽粒数,用表卡尺测量果纵径、果横径、果皮厚度,计算果形

指数 (果纵径/果横径), 用电子天平测定单果质量、鲜籽质量。

### 1.3 统计分析

利用 Excel 软件统计非数值型性状的变异情况, 并计算 Shannon-weaver 多样性指数 ( $H'$ ):

$$H' = - \sum_{i=1}^s P_i \ln (P_i)$$

式中,  $i$  表示级别,  $s$  表示级别数,  $P_i$  为某个性状第  $i$  级别内的样品份数占总份数的比例。

用 SPSS18.0 软件计算数值型性状的平均值 (Mean)、标准差 (SD)、变异系数 (CV) 和表型分化系数 ( $V_{st}$ ):

$$V_{st} = \frac{\delta_{t/s}^2}{\delta_{t/s}^2 + \delta_s^2}$$

式中,  $\delta_{t/s}^2$  为群体间方差分量,  $\delta_s^2$  为群体内方差分量)。

## 2 结果与分析

### 2.1 小果油茶描述型性状的多样性分析

由表 2 和表 3 可知, 32 个小果油茶单株的 19 个描述型性状中有 17 个性状存在不同程度的变异, 仅花瓣颜色和子房绒毛不存在变异, 其余各性状在其描述级别上均有分布, 但不均匀, 芽鳞绒毛有 2 种表型, 大部分无芽鳞绒毛; 芽鳞颜色有 7 种表型, 以绿色所占比率最高, 其余 6 种颜色频率分布均匀; 叶片颜色有 5 种表型, 以绿色为主; 叶片有 3 种表型, 以平滑型居多; 叶缘有 3 种表型, 以平滑型所占比例较高, 其次是隆起, 微隆起所占比例最少, 其中 P1、P2 居群的叶缘为隆起或微隆起, 而 P3、P4、P5 居群的叶缘均为平滑型; 叶形有 4 种表型, 以椭圆形为主; 叶片质地以革质为主, 有小部分为厚革质; 叶尖形状有 2 种表型, 大部分为渐尖; 叶基形状有 2 种表型, 以楔形为主; 萼片颜色有 3 种表型, 以绿色所占比例最高, 其次为红色, 有小部分褐色; 萼片绒毛有 2 种表型, 大部分萼片无绒毛; 花柱裂位有 2 种表型, 以浅裂为主; 雌雄蕊相对高度有 2 种表型, 以雄蕊高于雌蕊所占比例较大, 少部分等高; 果实形状有 5 种表型, 以球形所占比例最大; 果实颜色有 6 种表型, 以青黄色所占比例较高, 其余颜色的频率分布分散; 种子形状有 6 种表型, 以半圆形所占比例较高, 其次为圆形、不规则形; 种子颜色以黑色为主。

表 2 小果油茶描述性性状的赋值  
Table 2 Assignment of descriptive traits of *C.meiocarpa*

性状	变异范围及表型级别	性状	变异范围及表型级别
1	有 (1); 无 (2)	11	绿色 (1); 褐色 (2); 红 (3)
2	黄绿 (1); 淡绿 (2); 青绿 (3); 褐绿 (4); 绿 (5); 青黄 (6); 红 (7)	12	有 (1); 无 (2)
3	灰绿 (1); 青绿 (2); 绿 (3); 深绿 (4); 青黄 (5)	13	有 (1)
4	平 (1); 微隆起 (2); 隆起 (3)	14	浅裂 (1); 中 (2)
5	平 (1); 微波 (2); 波 (3)	15	等高 (1); 雄蕊高 (2)
6	近圆形 (1); 椭圆形 (2); 长椭圆形 (3); 披针形 (4)	16	桃形 (1); 卵形 (2); 橄榄形 (3); 桔形 (4); 球形 (5)
7	革质 (1); 厚革质 (2)	17	青色 (1); 青黄色 (2); 黄色 (3); 黄褐色 (4); 黄红色 (5); 红色 (6)
8	渐尖 (1); 钝尖 (2)	18	半圆形 (1); 圆形 (2); 半肾形 (3); 肾形 (4); 锥形 (5); 不规则 (6)
9	近圆形 (1); 楔形 (2)	19	褐色 (1); 棕褐色 (2); 黑色 (3)
10	白 (1)		

注: 1-芽鳞绒毛; 2-芽鳞颜色; 3-叶片颜色; 4-叶面; 5-叶缘; 6-叶形; 7-叶片质地; 8-叶尖形状; 9-叶基形状; 10-花瓣颜色; 11-萼片颜色; 12-萼片绒毛; 13-子房绒毛; 14-花柱裂位; 15-雌雄蕊相对高度; 16-果实形状; 17-果实颜色; 18-种子形状; 19-种子颜色。

可见, 小果油茶 19 个描述型性状的遗传多样性水平不同, 花瓣颜色和子房绒毛为稳定遗传性状, 其多样性指数均为 0, 其余 17 个性状的遗传多样性指数在 0.139 1 ~ 1.615 9 之间, 平均为 0.657 2, 其中种子形状的遗传多样性指数最大, 叶基形状的最小, 果实颜色、芽鳞颜色的遗传多样性指数较大, 分别为 1.499 3、1.354 8, 花

柱裂位较小, 为 0.165 4。

表 3 小果油茶 19 个描述型性状的频率分布及多样性指数  
Table 3 Diversity index and frequency distribution of 19 descriptive traits of *C.meiocarpa*

性状	表型级别							$H'$
	1	2	3	4	5	6	7	
1	0.187 5	0.812 5	0	0	0	0	0	0.482 6
2	0.062 5	0.093 8	0.031 3	0.062 5	0.593 8	0.031 3	0.125 0	1.354 8
3	0.031 3	0.062 5	0.781 3	0.062 5	0.031 3	0	0	0.756 3
4	0.875 0	0.093 8	0.031 2	0	0	0	0	0.447 0
5	0.625 0	0.156 2	0.218 8	0	0	0	0	0.916 2
6	0.062 5	0.750 0	0.156 3	0.031 2	0	0	0	0.787 3
7	0.843 8	0.156 3	0	0	0	0	0	0.433 4
8	0.781 3	0.218 8	0	0	0	0	0	0.525 3
9	0.031 3	0.968 8	0	0	0	0	0	0.139 1
10	1.000 0	0	0	0	0	0	0	0
11	0.784 3	0.098 0	0.117 6	0	0	0	0	0.669 9
12	0.215 7	0.784 3	0	0	0	0	0	0.521 4
13	1.000 0	0	0	0	0	0	0	0
14	0.960 8	0.039 2	0	0	0	0	0	0.165 4
15	0.156 9	0.843 1	0	0	0	0	0	0.434 5
16	0.151 5	0.090 9	0.060 6	0.030 3	0.666 7		0	1.125 8
17	0.078 1	0.375 0	0.062 5	0.031 3	0.156 3	0.296 9	0	1.499 3
18	0.318 8	0.232 8	0.037 5	0.120 3	0.084 4	0.206 3	0	1.615 9
19	0.093 8	0.093 8	0.812 5	0	0	0	0	0.612 7

## 2.2 数值型性状的变异特征

从表 4 中 5 个小果油茶居群的 11 个数值型性状的平均值、标准差及多重比较结果可以看出, P2 的果实最大, 果高、果径均与其他 4 个群体存在显著差异 ( $P < 0.05$ ); P3、P4 具有相同的果形指数, 并与其他 3 个群体之间存在显著差异 ( $P < 0.05$ ); P1 的平均果皮厚度最大, P4 最小, 两者之间差异显著 ( $P < 0.05$ ), 且与其余 3 个群体差异显著 ( $P < 0.05$ ); P2 平均单果质量最大, P5 最小; P2 单果籽粒数最多、籽粒质量最大、花冠直径最大, 与其余居群之间存在显著差异 ( $P < 0.05$ ); P3 和 P5 的萼片数最多, 二者间差异不显著, 但与其他三个群体之间差异显著 ( $P < 0.05$ )。由表 5 可知, 果高、果皮厚度等 11 个性状的变异幅度为 8.90% ~ 42.25%, 平均变异系数为 22.66%。其变异程度为单果籽粒数>果皮厚度>单果质量>鲜籽质量>花瓣数>花冠直径>萼片数>果径>果高>果形指数>柱头开裂数。其中, 单果籽粒数、果皮厚度、单果质量、鲜籽质量 4 个性状的平均变异系数超过 35%, 稳定性较低; 果高、果径、果形指数柱头开裂数的变异较小, 平均变异系数不到 10%, 其中 P4 居群的柱头开裂数均为 3 裂, 变异系数为 0。5 个居群所有性状的平均变异系数从大到小分别为 P2(26.16%)>P1(23.65%)>P5(23.24)>P4(20.81)>P3(19.43%), 均有较高的变异系数, 说明这 5 个群体的表型变异丰富。相同性状在不同群体间的变异幅度也具有一定差异, 其中以 P2 各性状的平均变异系数最大, P3 的平均变异系数最小。P2 居群的果皮厚度变异最大, 变异系数为 55.69%, P3 居群的较小, 为 22.98%。

表 4 5 个居群间表型性状的平均值、标准差及多重比较  
Table 4 The mean value standard deviation and multiple comparison on phenotypic traits of 5 populations

性状	P1	P2	P3	P4	P5
FL/cm	2.11±0.252bc	2.38±0.418a	2.14±0.235b	2.04±0.217c	2.07±0.291
FD/cm	1.84±0.247d	2.10±0.328a	2.05±0.270b	1.98±0.236c	1.87±0.264
FSI	1.16±0.101a	1.13±0.093ab	1.05±0.110c	1.05±0.204c	1.11±0.121
PT/cm	0.12±0.055a	0.11±0.059b	0.10±0.023bc	0.08±0.023d	0.09±0.029
FW/g	4.35±1.585b	6.09±3.006a	4.03±1.441bc	3.83±1.182c	3.20±1.095
SNF/粒	1.70±0.75c	2.60±0.97a	2.10±0.80b	1.80±0.77c	1.70±0.83c
FSW/g	2.40±0.737c	3.71±1.288a	2.58±1.023bc	2.72±1.109b	2.05±0.768
NP/枚	7.10±1.06a	6.30±1.51c	6.80±0.60ab	6.30±0.75c	6.50±1.71b
CD/cm	3.97±0.802c	4.85±0.805a	3.43±0.454d	4.34±0.767b	3.84±0.489
NS/枚	5.40±1.23c	5.20±0.84c	8.10±1.00a	6.60±0.89b	8.10±0.89a
NSF/裂	3.10±0.33b	3.20±0.37ab	3.10±0.26b	3.00±0.00b	3.30±0.45a

注: 果纵径 (FL)、果横径 (FD)、果形指数 (FSI)、果皮厚度 (PT)、单果质量 (FW)、单果籽粒数 (SNF)、鲜籽质量 (FSW)、花瓣数 (NP)、花冠直径 (CD)、萼片数 (NS)、柱头开裂数 (NSF); 同一列中不同小写字母表示同一性状在不同群体间差异显著 ( $P < 0.05$ ), 相同字母则表示差异不显著。

表 5 5 个居群表型性状的变异系数  
Table 5 Coefficient variation of phenotypic traits of 5 populations

群体	FL/%	FD/%	FSI/%	PT/%	FW/%	SNF/%	FSW/%	NP/%	CD/%	NS/%	NSF/%	平均值/%
P1	11.95	13.45	8.74	47.63	36.43	42.93	30.67	14.88	20.19	22.56	10.74	23.65
P2	17.56	15.65	8.20	55.69	49.40	38.02	34.76	24.11	16.60	16.17	11.61	26.16
P3	11.00	13.17	10.51	22.98	35.79	37.74	39.62	8.88	13.25	12.35	8.44	19.43
P4	10.62	11.92	19.43	29.30	30.86	43.12	40.69	11.88	17.68	13.44	0	20.81
P5	14.07	14.15	10.84	31.68	34.17	49.43	37.38	26.44	12.75	11.03	13.70	23.24
平均值	13.04	13.67	11.54	37.46	37.33	42.25	36.62	17.24	16.09	15.11	8.90	22.66

### 2.3 群体间性状的表型分化

表型分化系数表示种群间方差分量占遗传总变异（种群间和种群内方差分量之和）的百分比，反映了种群间表型分化的大小，其值越大，表明种群间的遗传分化和遗传变异也越大。为明确小果油茶 11 个数值型性状的变异来源，采用巢氏方差分析将其变异分为种群间、种群内、随机误差三部分，以每一部分的方差分量百分比来反映小果油茶的变异来源。5 个小果油茶居群表型分化系数统计结果见表 6。

表 6 小果油茶表型性状的方差分量及群体间表型分化系数  
Table 6 Variance components of phenotypic traits and differentiation coefficient of *C.meiocarpa* populations

性状	方差分量			方差分量百分比/%			$V_{st}/\%$
	群体间 $\delta_{t/s}^2$	群体内 $\delta_s^2$	随机误差 $\delta_e^2$	群体间 $P_{t/s}$	群体内 $P_s$	随机误差 $P_{se}$	
FL	1.392	1.214	0.025	52.91	46.14	0.95	53.42
FD	1.207	0.992	0.034	54.05	44.42	1.52	54.89
FSI	0.243	0.095	0.008	70.23	27.46	2.31	71.89
PT	0.015	0.032	0	31.91	68.09	0	31.91
FW	78.760	50.654	0.939	60.42	38.86	0.72	60.86
SNF	11.062	5.621	0.549	64.19	32.62	3.19	66.31
FSW	28.475	12.031	0.458	69.51	29.37	1.12	70.30
NP	6.833	14.568	0.464	31.25	66.63	2.12	31.93
CD	20.173	5.879	0.329	76.47	22.28	1.25	77.43
NS	100.112	25.683	0.416	79.32	20.35	0.33	79.58
NSF	0.692	0.743	0.055	46.44	49.87	3.69	48.22
均值	-	-	-	57.88	40.55	1.56	58.79

由表 6 可知，各性状在群体间和全体内存在较大的遗传差异，5 个居群间的方差百分比在 31.25% ~ 79.32% 之间，平均为 57.88%；居群内的方差百分比在 20.35% ~ 68.09% 之间，平均为 40.55%。其中，果形指数、花冠直径、萼片数和鲜籽质量 4 个性状在居群间的变异大于居群内的变异，分化较大。果皮厚度、花瓣数、柱头开裂数 3 个性状的表型分化系数较小，说明这些性状以种群内的变异为主，在居群间的变异较小，相对稳定。5 个居群小果油茶的 11 个表型性状的平均表型分化系数为 58.79%，即小果油茶表型变异在居群间的贡献率为 58.79%，居群内的贡献率为 41.21%。说明 5 个小果油茶居群在居群间和居群内都有一定程度的变异，多样性较大。进一步说明基因型和环境因子对小果油茶的生长存在着较为复杂的影响。

### 2.4 小果油茶表型性状的综合评价

2.4.1 表型性状间的相关性分析 由表 7 相关性分析表明，11 个表型性状间存在不同程度的相关性。其中，果纵径与果横径、果形指数、果皮厚度、单果质量、单果籽粒数、鲜籽质量、花冠直径呈极显著正相关 ( $P < 0.01$ )，与花瓣数、萼片数呈极显著负相关 ( $P < 0.01$ )；果横径与果形指数、花瓣数呈极显著负相关 ( $P < 0.01$ )，与果皮厚度、单果质量、单果籽粒数、鲜籽质量、花冠直径呈极显著正相关 ( $P < 0.01$ )；果形指数与果皮厚度间呈极显著正相关 ( $P < 0.01$ )，与单果籽粒数、花冠直径、萼片数呈极显著负相关 ( $P < 0.01$ )；果皮厚度与单果质量、单果籽粒数、鲜籽质量呈极显著正相关 ( $P < 0.01$ )，与花冠直径呈显著正相关 ( $P < 0.05$ )；单果质量与单果籽粒数、鲜籽质量、花冠直径呈极显著正相关 ( $P < 0.01$ )，与花瓣数、萼片数呈极显著负相关 ( $P < 0.01$ )；单果籽粒数与鲜籽质量、花冠直径呈极显著正相关 ( $P < 0.01$ )；鲜籽质量与花冠直径呈极显著正相关

( $P < 0.01$ ), 与花瓣数、萼片数呈极显著负相关 ( $P < 0.01$ ); 花冠直径与萼片数呈极显著负相关 ( $P < 0.01$ )。上述分析表明, 种实性状与花朵性状间相关性显著。

表7 表型性状间相关性分析  
Table 7 Correlation analysis of phenotypic traits of *C.meiocarpa*

性状	FL	FD	FSI	PT	FW	SNF	FSW	NP	CD	NS
FD	0.721**									
FSI	0.357**	-0.379**								
PT	0.475**	0.318**	0.166**							
FW	0.854**	0.812**	0.030	0.533**						
SNF	0.359**	0.530**	-0.261**	0.158**	0.516**					
FSW	0.751**	0.814**	-0.083	0.167**	0.889**	0.494**				
NP	-0.281**	-0.151**	-0.162**	0.020	-0.153**	-0.029	-0.201**			
CD	0.252**	0.140**	0.099	0.133*	0.300**	0.244**	0.226**	0.002		
NS	-0.180**	0.049	-0.314**	-0.056	-0.250**	0.020	-0.223**	0.083	-0.223**	
NSF	0.017	-0.026	0.057	-0.073	-0.021	0.048	0.005	-0.031	0.009	-0.095

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

2.4.2 小果油茶表型性状的主成分分析 主成分分析可以在不损失或很少损失原有信息的前提下, 将原来个数较多而且彼此相关的指标转换为新的个数较少且彼此独立的综合指标<sup>[20-23]</sup>。本研究对 32 个小果油茶单株的 11 个数值型性状进行主成分分析 (表 8), 分析结果显示, 前 6 个主成分的累计贡献率达到 88.54%, 表明前 6 个主成分代表了小果油茶表型性状的大部分信息。

第 I 主成分的特征值为 4.12, 解释了 11 个表型性状 37.44% 的变化, 特征向量值较大的为单果质量、籽粒质量、果纵径、果横径, 说明第 I 主成分主要是与果实大小相关的性状; 第 II 主成分的特征值为 1.73, 贡献率为 15.71%, 特征向量绝对值最大的为果形指数 (0.89), 表明在第 II 主成分中果形指数为主要的性状决定因子, 说明第 II 主成分主要与果实形状有关; 第 III 主成分的特征值为 1.09, 贡献率为 10.21%, 果皮厚度的特征向量值最高; 第 IV 主成分的贡献率为 9.91%, 花瓣数的特征向量值最高 (0.71), 其次是花冠直径 (0.62), 主要解释花部特征; 第 V 主成分的贡献率为 8.34%, 柱头开裂数特征向量值最大; 第 VI 主成分的贡献率为 6.94%, 花冠直径和萼片数的特征向量值较大。总的来说, 前三个主成分主要反映的是油茶产量有关性状情况, 第 IV、第 V、第 VI 三个主成分主要解释花部特征性状情况。

表8 11个表型性状主成分分析  
Table 8 Principal component analysis on phenotype traits of *C.meiocarpa*

性状	主成分					
	I	II	III	IV	V	VI
FL	0.89	0.28	0.11	-0.17	0.10	0.03
FD	0.87	-0.39	-0.01	-0.12	0.03	-0.08
FSI	0	0.89	0.14	-0.09	0.09	0.10
PT	0.49	0.20	0.60	0.11	0.40	0.12
FW	0.97	0.04	0.08	0.03	0.04	-0.11
SNF	0.61	-0.38	-0.20	0.22	-0.01	0.20
FSW	0.90	-0.09	-0.18	-0.08	-0.12	-0.21
NP	-0.24	-0.26	0.28	0.71	0.27	-0.35
CD	0.35	0.22	-0.13	0.62	-0.33	0.51
NS	-0.22	-0.61	0.30	-0.28	0.23	0.50
NSF	0	0.14	-0.68	0.07	0.70	0.09
特征值	4.12	1.73	1.12	1.09	0.92	0.76
贡献率/%	37.44	15.71	10.21	9.91	8.34	6.94
累计贡献率/%	37.44	53.15	63.36	73.26	81.60	88.54

为了更直观地展现小果油茶表型性状的分布情况, 以第 I 主成分为横坐标, 第 II 主成分为纵坐标得出主成分分析散点图, 如图 1。由图 1 可看出, 将 32 个小果油茶单株分为 3 个类群, 类群 I 包括了 2 个单株, 分别为来自 P3 居群的 14 号单株和来自 P5 居群的 29 号单株; 类群 II 包括了 29 个单株, 来自不同居群, 遗传特性较丰富; 类群 III 仅有来自 P2 居群的 12 号单株。

2.4.3 32 个单株表型性状的综合评价 根据特征向量矩阵及标准化的 11 个表型性状值, 代入上述 6 个主成分中, 由此可以获得 6 个因子的得分公式, 如下:

$$F_1=0.44X_1+0.43X_2+0.24X_4+0.48X_5+0.3X_6+0.44X_7 - 0.12X_8+0.17X_9 - 0.11X_{10}$$

$$F_2=0.21X_1 - 0.13X_2+0.68X_3+0.16X_4+0.03X_5 - 0.29X_6 - 0.07X_7 - 0.2X_8+0.17X_9 - 0.46X_{10}+0.1X_{11}$$

$$F_3=0.10X_1 - 0.01X_2+0.13X_3+0.57X_4+0.07X_5 - 0.18X_6 - 0.17X_7+0.27X_8 - 0.13X_9+0.28X_{10} - 0.64X_{11}$$

$$F_4=-0.16X_1 - 0.12X_2 - 0.09X_3+0.11X_4+0.03X_5+0.21X_6 - 0.07X_7+0.68X_8+0.59X_9 - 0.27X_{10}+0.07X_{11}$$

$$F_5=0.10X_1+0.03X_2+0.09X_3+0.41X_4+0.04X_5 - 0.01X_6 - 0.13X_7+0.28X_8 - 0.34X_9+0.24X_{10}+0.73X_{11}$$

$$F_6=0.04X_1 - 0.09X_2+0.11X_3+0.14X_4 - 0.12X_5+0.23X_6 - 0.24X_7 - 0.40X_8+0.58X_9+0.57X_{10}+0.11X_{11}$$

根据计算所得  $F_1$ 、 $F_2$ 、 $F_3$ 、 $F_4$ 、 $F_5$ 、 $F_6$  的数值, 以及各主成分的贡献率权重 (0.42、0.18、0.12、0.11、0.09、0.08) 得出每个品种的综合得分 ( $F$  值) 公式:

$$F=0.42F_1+0.18F_2+0.12F_3+0.11F_4+0.09F_5+0.08F_6$$

由上述公式计算得出  $F$  值<sup>[20]</sup>, 对 32 个小果油茶单株的表型性状进行综合评价, 综合评价根据  $F$  值大小进行排序 (表 9),  $F$  值越高表型综合性状越好<sup>[21]</sup>。由表 9 可知, 按照综合得分, 排在前 5 位的依次是 12 号、1 号、7 号、10 号、17 号单株。其中, 来自黎平洪州的 12 号单株  $F$  值最高 (3.86), 说明 12 号单株的综合性状最好; 来自榕江忠诚的 29 号单株  $F$  值最低 (-1.29), 表明 29 号单株的综合表现最差。

表 9 小果油茶表型性状的综合评价

Table 9 Comprehensive assessment on phenotypic traits of *C.meiocarpa*

群体	单株编号	综合得分	排名	群体	单株编号	综合得分	排名	
P1	1	1.31	2	P3	17	0.41	5	
	2	-0.36	21		18	-0.13	18	
	3	-0.23	19		19	-0.55	26	
	4	-0.58	28		P4	20	-0.37	22
	5	-0.09	16			21	0.23	8
P2	6	0.19	9	22		-0.49	24	
	7	0.90	3	23		-0.74	30	
	8	0.25	6	24		0.10	11	
	9	0.25	7	25	-0.57	27		
	10	0.89	4	P5	26	-0.47	23	
	11	-0.05	15		27	-0.70	29	
12	3.86	1	28		-0.36	22		
P3	13	0.06	13		29	-1.29	32	
	14	-0.90	31		30	0.11	10	
	15	-0.52	25		31	-0.02	14	
	16	0.09	12	32	-0.10	17		

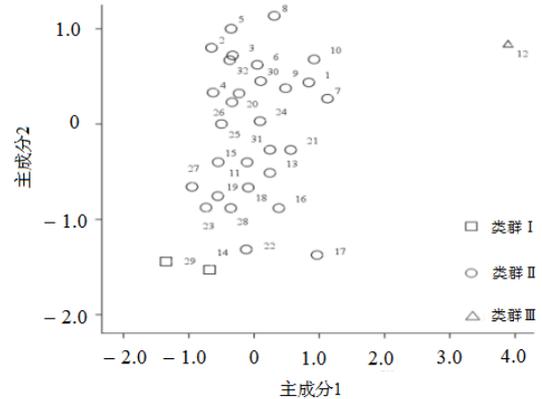


图 1 32 个小果油茶单株的主成分分析图

Figure 1 Principal component analysis of 32 single *C. meiocarpa*

### 3 结论与讨论

表型性状是基因型与生态环境相互作用的结果, 表型变异必然蕴涵着遗传变异<sup>[24-25]</sup>, 表型多样性研究是植

物遗传多样性研究中最基础、最直观的方法<sup>[20]</sup>，能简便、快捷地对遗传资源做出评价，已广泛应用在很多植物的种质资源评价研究<sup>[20-23,25]</sup>。本研究选用30个表型性状对5个居群32个小果油茶的单株遗传多样性分析表明，小果油茶形态特征变异丰富。在19个描述型性状中，小果油茶的花瓣颜色均为白色，子房均有绒毛，不存在变异，其余17个性状表现出不同程度的遗传分化，Shannon-Weaver多样性指数在0.139 1~1.615 9之间，其中有4个性状（芽鳞颜色、果实形状、果实颜色、种子形状）的多样性指数大于1，有7个性状（叶片颜色、叶缘、种子颜色等）的多样性指数大于0.5，而叶基形状多样性指数最小（0.139 1），这与蒋会兵等<sup>[24]</sup>对云南不同地区的830份茶树种质资源的表型多样性分析一致。

本研究中小果油茶5个居群的11个数值性状的平均变异系数为22.66%，变异系数在8.9%~42.25%之间，变化幅度大，表明小果油茶表型性状的离散程度较高，具有丰富的变异。其中，单果籽粒数、果皮厚度、单果质量和鲜籽质量的变异系数较大，果纵径、果横径、果形指数的变异系数较小，这3个性状是果实形态的一个直观表现，是小果油茶表型性状中较为稳定的遗传特征，与其他研究中认为果实形态在许多物种的表型性状中是较稳定的遗传性状的结论一致<sup>[26-28]</sup>。同一居群的不同表型性状变异程度不同，表明小果油茶的相同性状对不同环境条件的适应性不同，不同表型性状对相同环境条件的响应也不同。小果油茶表型变异在居群间的贡献率为58.79%，居群内的贡献率为41.21%，说明5个小果油茶居群在居群间和居群内都有一定程度的变异，多样性较高。果形指数、花冠直径、萼片数和鲜籽质量4个性状在居群间的变异大于居群内的变异，分化较大；果皮厚度、花瓣数、柱头开裂数3个性状的表型分化系数较小，以种群内的变异为主，在居群间的变异较小，相对稳定。小果油茶丰富的变异可以为育种提供良好的材料。

本研究基于5个居群小果油茶的表型性状，利用隶属函数法与主成分分析相结合的方法对小果油茶种质资源进行评价，此方法已在陆地棉 *Gossypium hirsutum*<sup>[29]</sup>、落花生 *Arachis hypogaea*<sup>[20]</sup>、柑橘 *Citrus reticulata*<sup>[21]</sup>等物种表型性状的综合评价中得到应用。对小果油茶的11个表型性状进行主成分分析结果表明，前6个主成分因子的累计贡献率达88.54%，认为单果质量、籽粒质量、果纵径、横径、果形指数、果皮厚度、花瓣数、花冠直径等是小果油茶表型多样性的重要指标，反映了油茶产量有关性状和花部特征性状情况。李春侨等<sup>[30]</sup>对天山樱桃桃 *Cerasus tianschanica* 表型性状的主成分认为果实纵径、果实横径、雌蕊长度、花瓣长和1年生枝长度可以代表原始数据的大部分信息。刁松锋等<sup>[31]</sup>对无患子 *Sapindus mukorossi* 种实表型性状进行主成分分析表明，种子质量、种子纵径、种子横径、果实纵径和果实横径可以代表原始因素的大部分信息。本文的研究结果与前人的结果具有相似之处，但也存在一定的差异，可能与物种和测定指标不同有关。通过表型性状综合得分（*F*值）对32个小果油茶单株进行排序，评价其综合优劣程度。结果表明，来自黎平洪州的12号单株的综合得分最高，来自榕江忠诚的29号单株的综合得分最低。通过比较综合得分值的大小筛选出的优异种质资源，可以作为杂交育种亲本材料或优异种质在育种和生产中利用<sup>[20-21]</sup>。

## 参考文献:

- [1] 王丹, 庞春华, 高亚卉, 等. 茶条槭不同海拔种群的表型多样性[J]. 云南植物研究, 2010, 32(2): 117-125.
- [2] 董文婧, 张雪, 申仕康, 等. 都市园林植物云南樱花的表型多样性研究[J]. 广西植物, 2016, 36(3): 349-354, 334.
- [3] 王楚天, 游璐, 钟琳珊, 等. 江西29个油茶品种始果早期表型变异分析[J]. 西南林业大学学报(自然科学), 2017, 37(1): 73-81.
- [4] 苏应雄, 张雪, 王文礼, 等. 红棕杜鹃不同海拔种群的表型多样性研究[J]. 西北植物学报, 2017, 37(2): 356-362.
- [5] GARCÍA-VERDUGO C, MÉNDEZ M, VELÁZQUEZ-ROSAS N, et al. Contrasting patterns of morphological and physiological differentiation across insular environments: phenotypic variation and heritability of light-related traits in *Olea europaea*[J]. Oecologia, 2010, 164(3): 647-655.
- [6] 陈玲, 张颖, 邱显钦, 等. 云南木香花天然居群的表型多样性研究[J]. 云南大学学报(自然科学版), 2010, 32(2): 243-248.
- [7] 李萍萍, 孟衡玲, 陈军文, 等. 云南岩陀及其近缘种质资源群体表型多样性[J]. 生态学报, 2012, 32(24): 7747-7756.
- [8] GARCIA D, ZAMORA R, GOMEZ J M, et al. Geographical variation in seed production, predation and abortion in *Juniperus communis* throughout its range in Europe[J]. J Ecol, 2000, 88(3): 435-446.
- [9] GARCÍA-VERDUGO C, FAY M F, GRANADOYELA C, et al. Genetic diversity and differentiation processes in the ploidy series of *Olea europaea* L.: a multiscale approach from subspecies to insular populations[J]. Molec Ecol, 2009, 18(3): 454-467.

