

# 小果油茶表型多样性分析

黄 勇<sup>1</sup>, 谢一青<sup>1</sup>, 李志真<sup>1</sup>, 王开良<sup>2</sup>, 林 萍<sup>2</sup>, 姚小华<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 福建省林业科学研究院/国家林业局南方山地用材林培育重点实验室, 福州 350012;

<sup>2</sup> 中国林业科学研究院亚热带林业研究所, 浙江富阳 311400)

**摘要:** 在小果油茶全分布区内, 选择有代表性的 18 个居群为研究对象, 对其种实、花及叶的 23 个表型性状进行统计分析, 结果表明: 小果油茶的居群内及居群间均存在广泛的表型变异, 随环境的变化表现出较强的表型可塑性。小果油茶叶、花及种实形状大小存在显著相关关系, 可以选择重要及关键的表型性状作为测定的主要依据。小果油茶表型性状与生态地理因子有一定的相关关系, 且不同性状受地理生态因子影响也不同, 其中花性状最大, 而种实和叶相对较小。UPGMA 聚类结果表明, 18 个小果油茶居群可分为 4 个类群, 且按较明显的地理区域特征进行聚类。从系统聚类图和主成分排序图比较来看, 绝大多数居群在 2 种聚类方式中保持一致, 说明二者均能较好地区分小果油茶不同居群的亲缘关系, 为小果油茶的种质资源收集和良种选育奠定基础。

**关键词:** 小果油茶; 表型; 遗传多样性

## Analysis of *Camellia meiocarpa* Phenotype Diversity

HUANG Yong<sup>1</sup>, XIE Yi-qing<sup>1</sup>, LI Zhi-zheng<sup>1</sup>, WANG Kai-liang<sup>2</sup>, LIN Ping<sup>2</sup>, YAO Xiao-hua<sup>2</sup>

(Fujian Academy of Forestry/Key Laboratory of Southern Mountain Timber Forest

Cultivation of State Forestry Administration, Fuzhou 350012;

<sup>2</sup> Research Institute of Subtropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Fuyang Zhejiang 311400)

**Abstract:** In this study, 18 geographic population were selected in all the flora of *Camellia meiocarpa* Hu. . Twenty-three phenotypic traits from fruits, seeds, flowers, and leaves were analyzed statistically. The results showed that a wide phenotype variation within or among populations was presented, indicating a stronger phenotypic plasticity with the change of environment. The significant correlations happened among some phenotypic traits such as leaves, flowers, and fruits. Thus, we selected some important and key traits as primary parameters. Certain relationship was also found between phenotypic traits and ecogeographical factors. The phenotypic traits of flowers were more sensitive to ecogeographical environment compared with the leaves, seeds, and fruits. Eighteen populations of *C. meiocarpa* were divided into 4 groups with obvious geographic feature according to the UPGMA euclidean distance among populations. Most populations remained to be consistent between plots of the principal components analysis and cluster, and the relationship of all different populations could be distinguished by the two ways. These results would lay a good foundation for the collection of germplasm resources and fine variety breeding.

**Key words:** *Camellia meiocarpa* Hu. ; phenotype; genetic diversity

小果油茶 (*Camellia meiocarpa* Hu.) 又名江西子、小茶、鸡心子等, 主要分布在福建、江西、广西、湖南、贵州、广东及浙江等省 (自治区), 栽培面积及产量仅次于普通油茶, 具有皮薄、出子率高、出油率高、

丰产性及稳产性好等优点, 有着良好的开发利用前景, 特别是在中亚热带及南亚热带北部山地丘陵地带具有极大的生产潜力<sup>[1-2]</sup>。表型多样性是植物遗传多样性的重要组成部分<sup>[3]</sup>。自 19 世纪达尔文进

收稿日期: 2013-04-18      修回日期: 2013-07-04      网络出版日期: 2014-01-24

URL: <http://www.cnki.net/kcms/detail/10.13430/j.cnki.jpgr.2014.02.007.html>

**基金项目:** “十一五” 国家科技支撑计划项目 (2009BADB1B01, 2009BADA8B04, 2006BAD01A1706); 中国林科院公益性科研基金专项 (CAFYBB2008005); 福建省自然科学基金项目 (2010J01088); 福建省林业厅种苗攻关项目 (闽林科 (2013) 1 号)

第一作者主要从事经济林良种选育方面的研究。E-mail: huangyfujian@163.com

**通信作者:** 姚小华, 主要从事经济林培育与利用研究。E-mail: yaohx168@.com

化论的诞生以来,通过测定表型性状研究植物遗传多样性一直是众多学者最常用的技术方法。已有研究<sup>[4-5]</sup>表明表型性状变异通常具有适应和进化上的意义。本研究在小果油茶全分布区全面种质资源调查的基础上,对小果油茶的表型遗传多样性进行研究,揭示其表型变异规律,为进一步的良种选育及良种利用奠定基础。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

在小果油茶自然分布区内选择具有代表性的18个居群,基本涵盖了小果油茶的整个分布区,且

能反映其分布特点。(1)在取样之前通过拜访当地林业部门及查阅当地林业志,详细了解当地小果油茶起源情况,从而为试验样株的选择提供科学依据。(2)尽量选择树龄60年以上的壮龄树,因为我国从20世纪50年代才开始进行油茶物种的大范围调查,60年代才开始进行油茶的选育工作,所以此树龄的样株能最大限度保证其本土性。(3)所选样株能代表居群平均状态、生长正常、成熟结实、无严重缺陷及病虫害。(4)为了尽量避免采样株间的亲缘关系,样株间距为100 m以上,每个地理居群采样20株,每个样株均用GPS定位,且测定其叶、花及种实等性状。居群的分布地点及生态地理因子见表1。

表1 小果油茶采样点生态地理因子

Table 1 Ecological and geographical factors of the sample sites

群体编号	种源地	经度(E)	纬度(N)	海拔(m)	无霜期(d)	全年日照时数(h)	7月降雨量(mm)	8月降雨量(mm)
Population code	Locality	Longitude	Latitude	Elevation	Nonfrost period	Annual sunshine hours	Rainfall in July	Rainfall in August
P1	广西融水	109°13'12"	25°32'34"	221	320	1450.9	271.8	169.8
P2	湖南通道	109°44'4"	26°0'11"	492	298	1426.0	193.6	139.0
P3	广西龙胜	109°54'36"	26°1'1"	370	314	1237.3	217.6	169.8
P4	广西三江	109°33'8"	25°47'8"	165	320	1334.3	192.0	153.0
P5	贵州黎平	109°25'	26°10'34"	530	270	1317.9	169.4	162.2
P6	福建浦城	118°28'27"	27°40'36"	200	258	1875.1	146.6	124.4
P7	福建闽清	118°49'12"	26°4'41"	209	262	1776.5	113.0	165.0
P8	福建漳浦	117°47'51"	24°6'36"	345	358	2138.2	198.0	225.0
P9	江西定南	115°6'39"	24°55'51"	600	296	1778.0	108.6	128.5
P10	江西崇仁	116°14'24"	27°54'38"	56	266	1776.0	92.0	120.0
P12	福建建宁	116°45'39"	26°41'10"	387	260	1805.6	110.2	112.2
P13	江西黎川	116°52'56"	27°12'47"	130	278	1776.6	123.0	115.0
P14	福建宁化	116°42'23"	26°36'39"	396	242	1748.0	130.0	161.0
P15	福建仙游	118°40'39"	25°33'22"	410	296	1936.0	163.4	128.5
P16	湖南平江	113°38'26"	28°34'18"	103	265	1725.9	123.2	106.3
P17	湖北阳新	115°1'	29°29'39"	160	255	1904.0	139.5	149.0
P18	江西宜春	114°3'59"	27°59'37"	251	275	1883.6	128.8	116.3

### 1.2 方法

**1.2.1 种实表型性状测定方法** 每个样株随机采集20个果实,用电显式游标卡尺分别测定果高、果径、果皮厚度、种子长、种子宽<sup>[6-7]</sup>,计算果形指数(果高/果径)及种形指数(种子长/种子宽);测定并计算单果平均重、单果平均子数、鲜果出子率,鲜果出子率=20个鲜果的出子质量/20个球果质量。

**1.2.2 叶表型性状测定方法** 选取生长状态良好样株的成龄叶片,且无病虫害<sup>[8]</sup>,每个样株按东西

南北中5个方向各选取1根标准枝,每根枝条上随机采6张成熟的完整叶片,共计30张。利用Epson Perfection V700 Photo扫描仪扫描叶片,再用Win FOLIA Reg 2007b叶片软件分析,得出叶长、叶宽、叶面积、叶周长、叶形指数(叶长/叶宽)、叶性状系数等性状参数。叶性状系数公式: $SC = 4 \times PI \times A / P^2$ ,其中PI为圆周率,A为叶面积,P为叶周长。叶柄长及叶片厚度用电显示游标卡尺测定,目测叶形和叶先端。

**1.2.3 花表型性状测定方法** 测定指标包括花柱长、花冠冠幅、花径、花高及单朵花瓣数等<sup>[9]</sup>。每个待测单株按东、西、南及北 4 个方向各选取 1 个标准枝,每个标准枝测定 5 朵花,每株总测定数为 20 朵,花柱长、花冠冠幅、花径及花高用游标卡尺测量。

**1.2.4 小果油茶居群表型多样性指数测定方法** 用 Shanmon-Weaver 多样性指数评定不同地理居群形态变异频率差异及变异程度,采用数量性状分级数据,即对数量性状数据进行 10 级分类,1 级 < X-2σ, 10 级 > X+2σ,中间每级间隔 0.5σ,σ 为标准差。

Shanmon-Weaver 多样性指数  $H' = -\sum P_i \ln(P_i)$ , 其中  $P_i$  为某个性状第  $i$  级别内的材料份数占总份数的百分比<sup>[10-12]</sup>。

**1.2.5 统计分析** 对小果油茶各表型性状采用巢式方差分析<sup>[13-14]</sup>,其线性模型如下:(1)  $Y_{ijk} = \mu + \tau_i + \delta_{(i)j} + \varepsilon_{(ij)k}$ ,式中, $Y_{ijk}$  为第  $i$  个地理居群中第  $j$  个单株的第  $k$  个观测值, $\mu$  为总的均值, $\tau_i$  为居群间变异(固定), $\delta_{(i)j}$  为亚组间变异(随机), $\varepsilon_{(ij)k}$  为随机误差,同一亚组内各观察值的随机变异遵循  $N_{(0,\sigma^2)}$ 。(2)  $V_{ST} = \delta_{t/s}^2 / (\delta_{t/s}^2 + \delta_s^2)$ ,其中  $\delta_{t/s}^2$  为居群间方差分量, $\delta_s^2$  为居群内方差分量, $V_{ST}$  表型分化系数<sup>[15]</sup>。

用变异系数(CV)表示表型性状离散程度,相对

极差  $R'_i$  表示极端差异程度<sup>[16]</sup>。 $R'_i = R_i / R_0$ ,其中  $R_i$  为居群内极差, $R_0$  为性状总极差。趋势面的数学表达式用多项式函数,3 次和 4 次函数方程分别为  $F(x,y) = b_0 + b_1x + b_2y + b_3x^2 + b_4xy + b_5y^2 + b_6x^3 + b_7x^2y + b_8xy^2 + b_9y^3$  和  $F(x,y) = b_0 + b_1x + b_2y + b_3x^2 + b_4xy + b_5y^2 + b_6x^3 + b_7x^2y + b_8xy^2 + b_9y^3 + b_{10}x^4 - b_{11}x^3Y - b_{12}x^2y^2 - b_{13}y^3 - b_{14}y^4$ 。

趋势面分析、系统聚类、Shanmon-Weine 多样性指数、巢式方差分析及主成分分析采用 DPS 12.01 软件进行;得出相关系数后,运用 NTsys 2.10 软件进行主成分排序;利用 GenAlEx 6 软件进行 Mantle's 检验;其他数据采用 Excel 2003 及 Spss 17.0 软件进行。

2 结果与分析

**2.1 小果油茶表型性状变异系数及相对极差比较** 从表 2 可知,小果油茶种实的变异系数最大,叶居中,而花则最小;小果油茶 3 种表型多样性均较为丰富,其中种实表型多样性最为丰富。从不同居群表型平均变异系数来看,P16(湖南平江)最大,表型多样性最为丰富,其他居群总体上相差不大。3 个表型性状的相对极差总体相差不大。

表 2 18 个地理居群表型性状变异系数和相对极差

Table 2 Variation coefficient and relative extreme value of phenotypic traits of 18 geographical populations

群体编号 Population code	种实 Seed and fruit		花 Flower		叶 Leaf	
	变异系数(%) CV	相对极差 $R_i$	变异系数(%) CV	相对极差 $R_i$	变异系数(%) CV	相对极差 $R_i$
P1	0.175	0.469	0.149	0.445	0.165	0.518
P2	0.134	0.350	0.164	0.516	0.175	0.557
P3	0.136	0.375	0.181	0.574	0.177	0.293
P4	0.144	0.407	0.151	0.488	0.188	0.597
P5	0.173	0.431	0.199	0.712	0.188	0.542
P6	0.159	0.370	0.162	0.512	0.163	0.557
P7	0.215	0.620	0.126	0.533	0.144	0.495
P8	0.200	0.412	0.152	0.413	0.200	0.516
P9	0.195	0.571	0.154	0.621	0.201	0.543
P10	0.184	0.615	0.168	0.668	0.153	0.506
P11	0.205	0.515	0.167	0.633	0.184	0.652
P12	0.246	0.528	0.147	0.512	0.158	0.454
P13	0.226	0.383	0.144	0.569	0.191	0.489
P14	0.198	0.499	0.156	0.563	0.172	0.604
P15	0.177	0.639	0.151	0.645	0.200	0.649
P16	0.265	0.607	0.166	0.624	0.206	0.625
P17	0.188	0.497	0.169	0.430	0.200	0.663
P18	0.164	0.382	0.153	0.586	0.174	0.538
总计 Total	0.247	0.482	0.216	0.564	0.218	0.546

2.2 小果油茶居群间表型分化

从表 3 可知,小果油茶的表型分化系数为 56.481%,居群间略大于居群内,说明小果油茶表型多样性的差异由其本身的遗传变异造成,反映了其对不同环境、生态条件等的适应能力。3 种器官的表型分化系数排序为花>种实>叶,与辜云杰等<sup>[17]</sup>对川西云杉研究结果相异,而与罗建勋等<sup>[18]</sup>对云杉研究结果相近。

表 3 小果油茶表型性状方差分量、居群间表型分化系数  
Table 3 Variance portions and differentiation coefficients of morphological traits among populations in *Camellia meiocarpa* Hu.

性状 Traits	方差分量百分比(%) Percentage of variance portions			表型分化 系数(%) Differentiation coefficient of morphological traits
	居群间 Among population	居群内 Within population	随机误差 Random errors	
种实Seed and nit	41.297	35.539	23.164	53.560
叶 Leaf	27.718	27.0523	45.231	50.610
花 Flower	36.021	19.106	44.874	65.274
平均 Mean	35.012	27.232	37.756	56.481

2.3 小果油茶叶、花及种实表型性状间的相关性

小果油茶叶和花表型性状相关性分析(表 4)表明,花径、花柱长、花冠冠幅均与叶面积、叶周长、叶长、叶宽呈极显著正相关,花高与叶长呈显著正相关,花冠冠幅与叶柄长呈显著正相关。

表 5 小果油茶种实与花、叶表型性状之间的相关性

Table 5 Correlation coefficients among phenotypic traits of *Camellia meiocarpa* Hu.

性状 Traits	花径 Flower diameter	花高 Spend height	花柱长 Styles length	花冠冠幅 Corolla canopy widths	花瓣数 Petal count	叶面积 Leaf area	叶周长 Leaf perimete	叶长 Leaf length	叶宽 Leaf width	叶宽长比 Ratio of leaf width and length	叶性状系数 Coefficient of leaf form	叶柄长 Petiolar length	叶厚 Leaf thickness
果高 Fruit height	0.71 **	0.51 *	0.60 **	0.68 **	-0.04	0.55 *	0.61 **	0.61 **	0.46 *	-0.23	-0.18	0.35	0.23
果径 Fruit width	0.62 **	0.46 *	0.49 *	0.53 *	-0.06	0.51 *	0.55 *	0.52 *	0.53 *	-0.3	-0.28	0.36	0.09
果高径比 Ratio of high and width	0.37	0.11	0.41	0.46 *	-0.12	0.33	0.23	0.34	0.45	0.19	0.28	0	0.37
果皮厚度 Pericarp thickness	0.58 **	0.62 **	0.35	0.62 **	-0.05	0.31	0.49 *	0.46 *	0.14	-0.60 **	-0.4	0.12	0.08
出子率Seed percent- age	-0.57 *	-0.49 *	-0.35	-0.52 *	0.14	-0.36	-0.51 *	-0.54 *	-0.23	0.57 *	0.38	-0.16	-0.17
单果种子数 Seed number of single fruit	0.42	0.05	0.22	0.25	-0.47 *	0.52 *	0.57 *	0.54 *	0.46 *	-0.19	-0.36	0.06	0.33
种子长 Seed length	0.48 *	0.25	0.50 *	0.39	0.07	0.38	0.32	0.31	0.38	0.15	0.08	0.25	0.07
种子宽 Seed width	0.15	0.53 *	0.06	0.23	0.50 *	0.04	-0.11	0.07	-0.13	-0.28	0.14	0.29	-0.28
种子长宽比 Ratio of length and width	0.22	-0.28	0.34	0.12	-0.35	0.24	0.33	0.17	0.39	0.39	0.01	-0.03	0.35
单果重 Single - fruit weight	0.64 **	0.46 *	0.53 *	0.59 **	-0.05	0.55 *	0.57 *	0.58 **	0.46 *	-0.14	-0.16	0.25	0.17

小果油茶种实和花表型性状相关性分析(表 5)表明,花径、花柱长、花冠冠幅、花高与果高、果径、单果重呈极显著或显著正相关;花径、花冠冠幅、花高与果皮厚度呈极显著正相关,与出子率呈显著负相关;花径、花柱长与种子长呈显著正相关;花高与果皮厚度极显著正相关,与果高、果径、种子宽、单果重呈正显著相关;花瓣数与单果种子数呈显著负相关。

表 4 小果油茶叶和花表型性状之间的相关性  
Table 4 Correlation coefficients among leaf and flower phenotypic traits of *Camellia meiocarpa* Hu.

性状 Traits	花径 Flower diameter	花高 Spend height	花柱长 Styles length	花冠冠幅 Corolla canopy width	花瓣数 Petal count
叶面积 Leaf area	0.73 **	0.41	0.63 **	0.64 **	-0.28
叶周长 Leaf pe- rimete	0.67 **	0.35	0.59 **	0.66 **	-0.30
叶长 Leaf length	0.75 **	0.48 *	0.58 **	0.68 **	-0.26
叶宽 Leaf width	0.69 **	0.17	0.60 **	0.60 **	-0.30
宽长比Ratio of width and length	-0.08	-0.24	0.24	-0.08	0.02
叶形系数 Coeffi- cient of leaf form	-0.12	0.17	0.14	0.03	0.37
叶柄长Petiolar length	0.41	0.39	0.50 *	0.47 *	0.24
叶厚 Leaf thickness	0.31	-0.05	0.31	0.31	-0.05

\*:P<0.05 的显著水平, \*\*:P<0.01 的显著水平,下同  
\*:Significant level at 0.05, \*\*:Significant level at 0.01,the same as below

小果油茶种实和叶表型性状相关性分析(表5)表明,叶面积、叶周长、叶长、叶宽均与果高、果径、单果种子数、单果重呈极显著或显著正相关,与沙守峰等<sup>[19]</sup>、王昆等<sup>[20]</sup>在苹果表型性状中的研究结果相似;叶周长、叶长与果皮厚度呈显著正相关,与出子率负相关;宽长比与果皮厚度呈显著负相关,其他性状之间相关不明显。

综上所述,小果油茶叶、花及种实性状之间存在着密切的相关关系,可以从中选出表型性状中的重要及关键性状,以提高表型性状测定效率和准确率。今后测定表型性状时,可以将叶面积、叶周长、叶长、叶宽、花径、花柱长、花冠冠幅、花高、果高、果径、单果种子数、种子宽、果皮厚度及出子率14个性状作为主要测定指标。

2.4 小果油茶表型性状聚类分析

利用23个表型性状的平均值,对18个不同地理群的小果油茶进行聚类(图1),在欧氏平均距离6.26的阈值处,将18个小果油茶居群分为4类,P9(定南)、P10(崇仁)及P17(阳新)归为第Ⅰ类;P7(闽清)、P11(清流)及P15(仙游)归为第Ⅱ类;居群P8单独为第Ⅲ类;而西南地区5个居群和其他居群划为第Ⅳ类。在欧氏平均距离4.69的阈值处,第Ⅳ类群又可分为3个亚类,西南地区5个居群为第ⅰ亚类,P6(浦城)、P12(建宁)、P13(黎川)及P14(宁化)为第ⅱ亚类,P16(平江)及P18(宜春)为第ⅲ类。与小果油茶种实表型性状聚类结果相比,小果油茶表型性状聚类同样呈现较强的地理区域特征,福建中部的3个居群P7(闽清)、P11(清流)及P15(仙游)划为一个大类;P6(浦城)、P12(建宁)、P13(黎川)及P14(宁化)划为一个亚类,都位于闽赣交界及武夷山脉边缘,而地理位置相近的西南5个居群(P1~P5),也是划分在一个亚群内;P16(平江)和P18(宜春)同为一个亚居群,其地理位置相近,与种实性状聚类结果完全一致<sup>[21]</sup>,说明小果油茶种实性状是表型性状中最重要的分类性状。

利用 Mantel 检验对不同居群的遗传距离与相应的地理距离进行相关分析<sup>[22]</sup>,结果表明二者之间相关不显著( $R=0.065, P=0.427$ )。

2.5 小果油茶表型性状主成分分析

本研究所调查的小果油茶23个表型性状指标中,大多数性状之间互相有影响,同时还可能会夹杂某些并不重要的或随其他指标变化而变化的指标<sup>[23]</sup>,给表型分类带来较大困难。为了排除统计信息的重叠,将过多的性状指标整合成几个较为重要

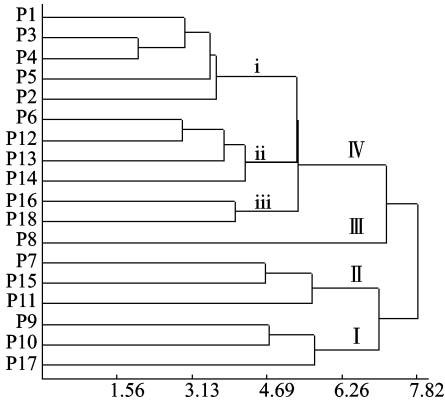


图1 小果油茶表型性状 UPGMA 聚类图  
Fig. 1 UPGMA cluster based on the phenotypic traits of *Camellia meiocarpa* Hu.

的综合性指标,即降维,本研究利用小果油茶不同地理居群的表型性状平均值进行了主成分分析,根据累计贡献率大于85%的原则<sup>[24-25]</sup>,由表6可知,前6个主成分的累计贡献率为89.8555%,基本能够反映小果油茶表型性状的全部信息。主成分特征向量的大小体现了相应的变量对主成分的影响程度,其中特征向量的绝对值越大,对主成分的影响也就越大<sup>[26]</sup>。第1主成分主要反映了花、叶及果的大小特征的信息,特征向量按其绝对值大小顺序为果高>花径>叶长>单果重>叶周长;第2主成分主要反映了种子、叶的形状及花大小特征的信息,按特征向量绝对值大小顺序为种子长宽比>叶宽长比>花高;第3主成分主要反映了叶形、种实和花特征的信息,特征向量绝对值大小顺序为叶性状系数>出子率>种长>花瓣数;第4主成分主要反映种实特征信息,特征向量绝对值大小顺序为单果种子数>果径;第5主成分主要反映叶性状特征信息,特征向量绝对值大小顺序为叶柄长>叶厚;第6主成分主要反映果型及叶性状特征信息,特征向量绝对值大小顺序为果高径比>叶面积>叶厚。

以第1主成分为横坐标,第2主成分为纵坐标得到小果油茶主成分排序图(图2),从中可得出,18个不同地理居群可分为4组,第1组包括P9(定南)、P10(崇仁)、P16(平江)及P17(阳新)共4个居群,主要反映了第2主成分信息,体现为花较大,种子长宽比及叶宽长比较大;第2组为P7(闽清)、P8(漳浦)、P11(清流)、P15(仙游)及P18(宜春)共5个居群,主要体现第1或第1、第2主成分综合信息;第3组有P6(浦城)、P12(建宁)、P13(黎川)、P14(宁化)共4个居群,体现了第1主成分信息;第4组为西南地区(融水、通道、龙胜、三江及黎平)共5个



表 6 小果油茶表型性状主成分分析特征值和贡献率

Table 6 The eigenvalue and contribution rate of principal component based on phenotypic traits of *Camellia meiocarpa* Hu.

性状 Traits	因子 1 Factor 1	因子 2 Factor 2	因子 3 Factor 3	因子 4 Factor 4	因子 5 Factor 5	因子 6 Factor 6
花径 Flower diameter	0.2874	-0.0016	0.0014	0.1334	-0.1035	-0.0412
花高 Spend height	0.1947	-0.2975	0.1075	0.2475	-0.1485	-0.0313
花柱长 Styles length	0.2488	0.0548	0.1708	0.2547	-0.0344	0.0543
花冠冠幅 Corolla canopy width	0.2699	-0.0858	0.0727	0.2671	-0.1040	0.1319
花瓣数 Petal count	-0.0437	-0.2660	0.3049	0.2254	0.2330	0.2447
叶面积 Leaf area	0.2679	0.1422	-0.0512	0.1207	0.0933	-0.3739
叶周长 Leaf perimete	0.2734	0.1173	-0.1814	0.0356	0.1259	-0.1084
叶长 Leaf length	0.2812	0.0675	-0.1314	0.1108	0.0812	-0.2327
叶宽 Leaf width	0.2340	0.2579	-0.0231	0.1169	0.0758	-0.3313
叶宽长比 Ratio of leaf width and length	-0.0544	0.3196	0.3343	0.1476	-0.0516	-0.3030
叶性状系数 Coefficient of leaf form	-0.0760	0.0214	0.4358	0.2618	-0.2111	-0.0399
叶柄长 Petiolar length	0.1541	-0.1002	0.0462	0.1682	0.5857	0.1558
叶厚 Leaf thickness	0.1369	0.2026	-0.1675	0.1052	0.4457	0.3723
果高 Fruit height	0.2891	-0.0649	0.1310	-0.2115	-0.0674	0.1473
果径 Fruit width	0.2599	-0.1393	0.1060	-0.3057	0.0058	0.0384
果高径比 Ratio of high and width	0.1176	0.2642	0.0780	0.2172	-0.3063	0.3848
果皮厚度 Pericarp thickness	0.2028	-0.2682	-0.2432	0.0019	-0.2980	0.1384
出子率 Seed percentage	-0.1682	0.1991	0.3751	-0.1717	0.2252	-0.0293
单果种子数 Seed number of single fruit	0.2159	0.1217	-0.0392	-0.4083	-0.0205	-0.0003
种子长 Seed length	0.2035	0.0227	0.3727	-0.2872	0.0371	0.0277
种子宽 Seed width	0.0712	-0.4120	0.2484	-0.0998	0.1484	-0.2100
种子长宽比 Ratio of seed length and width	0.0937	0.4221	0.1106	-0.1255	-0.0978	0.3299
单果重 Single fruit weight	0.2738	-0.0578	0.1646	-0.2698	-0.0615	0.0199
特征值 Eigenvalue	9.4617	3.5700	2.7246	2.4143	1.3582	1.1380
贡献率 Contribution	41.1380	15.5216	11.8460	10.4970	5.9053	4.9476
累计贡献率 Accumulated contribution	41.1380	56.6596	68.5056	79.0026	84.9079	89.8555

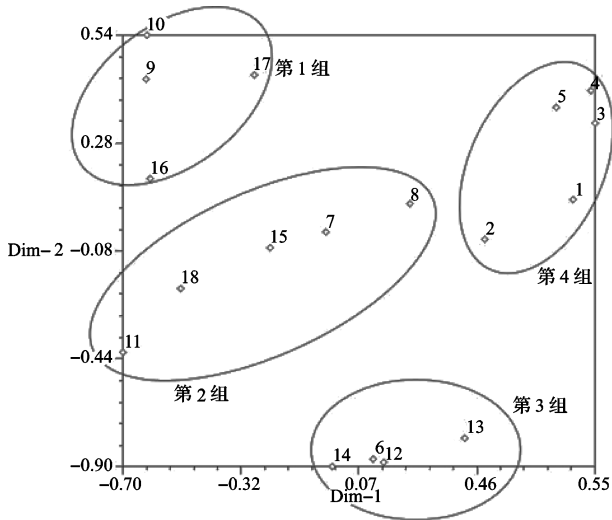


图 2 小果油茶表型性状主成分分析二维排序图

Fig. 2 The distribution of principal components in two-dimension coordinate of *Camellia meiocarpa* Hu. based on phenotypic traits

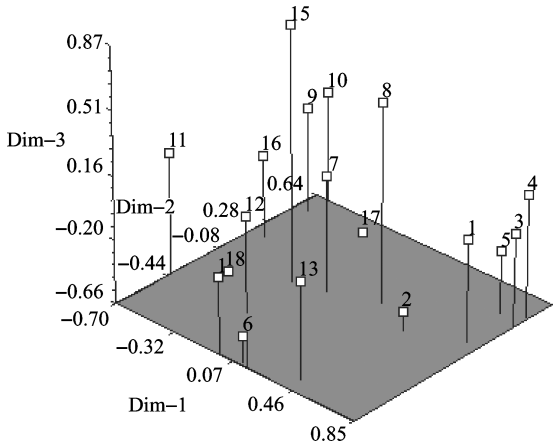


图 3 小果油茶表型性状主成分分析三维空间排序图

Fig. 3 The 3 dimensions solid plot of the principal components analysis of *Camellia meiocarpa* Hu.

居群,主要体现第 1 和第 2 主成分的综合信息,反映种实、叶及花性状的综合性状。

在 3 个主成分所构成的三维立体空间排序图

(图3)中,在第3主成分的象限上,可把第1组的P17(阳新)居群、第2组的P18(宜春)居群及第4组P2(通道)区分开来。综合比较图2、图3,除个别居群(如P18)稍有变动外,绝大多数居群在系统聚类 and 主成分聚类中保持一致。

2.6 小果油茶不同器官表型多样性指数比较

从表7可知,不同器官的表型多样性指数排序为叶(2.9147) > 种实(2.816) > 花(2.728),这一结果与变异系数不同,说明这2种反映表型性状遗传变异的指标具有不同的内涵,变异系数主要体现表型性状变异特征,而多样性指数主要反映表型性状的遗传多样性状况。不同居群之间的表型性状的多样性指数总体平均值相差不大,P3居群(龙胜)的多样性指数最大,为2.8309,而P15(仙游)则最小,为2.5797,二者相差0.2512。18个小果油茶的表型性状多样性指数的平均值为2.8196,说明小果油茶表型性状多样性程度高,变异类型丰富。

表7 18个地理居群不同器官表型性状数量性状多样性指数

Table 7 The different organ diversity index from 18 populations in quantitative characters

居群 Population	种实 Seed and fruit	花 Flower	叶 Leaf	平均 Mean
P1	2.796	2.5248	2.9104	2.7437
P2	2.806	2.6739	2.8691	2.7830
P3	2.818	2.6677	2.6756	2.7204
P4	2.791	2.7319	2.9698	2.8309
P5	2.742	2.6222	2.9594	2.7745
P6	2.743	2.6580	2.9567	2.7859
P7	2.752	2.302	2.9254	2.6598
P8	2.582	2.592	2.8826	2.6855
P9	2.701	2.550	2.8383	2.6964
P10	2.839	2.640	2.9222	2.8004
P11	2.749	2.423	2.9302	2.7007
P12	2.710	2.577	2.9557	2.7476
P13	2.543	2.643	2.9122	2.6994
P14	2.771	2.611	2.9340	2.7720
P15	2.694	2.704	2.3411	2.5797
P16	2.628	2.707	2.8581	2.7310
P17	2.691	2.730	2.8866	2.7692
P18	2.661	2.661	2.9605	2.7608
总计 Total	2.816	2.728	2.9147	2.8196

2.7 小果油茶表型性状与生态地理因子的相关分析

已有研究表明小果油茶种实表型性状与生态地理因子存在一定的相关关系<sup>[21]</sup>,本研究以花和叶为研究对象,对其与生态地理因子进行相关分析。

从表8可以看出,花径、花冠冠幅与无霜期呈显著或极显著负相关,花径与7月份降雨量呈极显著或显著负相关,说明随着无霜期的变长,花径、花冠冠幅均呈变小的趋势,而随7月份降雨量的增加,花径则随之减小。花高及花瓣数与全年日照时数呈显著负相关,表明花高和花瓣数随着全年日照时数的增加而减小。花瓣数与经度呈极显著负相关,与7月份降雨量极显著正相关,显示了花瓣数随着经度的增加而减小,随着7月份降雨量增加而增大。综上所述,影响小果油茶花表型性状变异的主要生态因子为无霜期、经度、7月份降雨量及全年日照时数,而5个花表型性状均与生态地理因子有着一定的相关关系。

叶片的大小、叶柄长及叶厚均是对环境适应的体现<sup>[27]</sup>。将小果油茶叶片表型性状与地理生态因子进行相关性分析表明(表8),叶面积、叶周长、叶长及叶宽均与无霜期、7月份降雨量及8月份降雨量呈显著或极显著负相关;叶性状系数与全年日照时数呈显著负相关;小果油茶的叶宽长比及叶厚度均与生态因子不相关,这与刘全宏等<sup>[28]</sup>对太白红杉(*Larix chinensis*)的研究结果相异。结果表明影响小果油茶叶表型性状变异的生态因子以无霜期、7月份降雨量、8月份降雨量及全年日照时数为主,而与生态因子相关的主要表型性状为叶面积、叶周长、叶长、叶宽及叶性状系数。

3 讨论

植物表型性状是各种外部形态特征的组合体,也是遗传变异的表型特征,而对于缺少前期研究基础的物种,通过对其表型性状遗传多样性的分析研究,即可快速深入地了解其遗传变异状况<sup>[29]</sup>。地理阻隔和生殖隔离对某些表型性状的变异有着明显的影响<sup>[30]</sup>,表型性状变异则在一定程度上反映了遗传丰富性程度,具有适应及进化上的意义<sup>[4,31-32]</sup>。

综合小果油茶的叶、花及种实3种器官表型性状可知,三者的变异类型都相当丰富,遗传多样性水平高,表现为其平均变异系数和极差分别大于0.2和0.48,平均多样性指数均大于2.7,18个居群表型多样性指数均大于2.5。

表 8 小果油茶表型性状与地理生态因子的相关性

Table 8 Correlation coefficients between phenotypic traits and ecological factor of *Camellia meiocarpa* Hu.

性状 Traits	经度 Longitude	纬度 Latitude	海拔 Elevation	无霜期 Nonfrost period	全年日照时数 Annual sunshine hours	7 月降雨量 Rainfall in July	8 月降雨量 Rainfall in August
花径 Flower diameter	0.30	0.33	-0.09	-0.52 *	0.18	-0.60 **	-0.38
花高 Spend height	-0.44	0.20	0.19	-0.20	-0.47 *	-0.06	-0.20
花柱长 Styles length	0.32	0.31	-0.03	-0.60 **	0.15	-0.49 *	-0.26
花冠冠幅 Corolla canopy width	-0.11	0.32	0.06	-0.46 *	-0.17	-0.35	-0.38
花瓣数 Petal count	-0.61 **	0.01	-0.17	0.24	-0.54 *	0.68 **	0.34
叶面积 Leaf area	0.20	0.37	0.02	-0.55 *	0.22	-0.57 *	-0.56 *
叶周长 Leaf perimete	0.32	0.26	0.03	-0.67 **	0.40	-0.61 **	-0.64 **
叶长 Leaf length	0.19	0.46	-0.07	-0.55 *	0.23	-0.59 **	-0.58 **
叶宽 Leaf width	0.35	0.37	-0.10	-0.56 *	0.32	-0.57 *	-0.61 **
叶宽长比 Ratio of leaf width and length	0.10	0	0.08	-0.19	0.05	-0.08	-0.17
叶性状系数 Coefficient of leaf form	-0.46	-0.48	0.42	-0.10	-0.53 *	0.33	0.10
叶柄长 Petiolar length	-0.01	0.43	-0.22	-0.40	-0.02	-0.20	0.07
叶厚 Leaf thickness	0.27	0.34	-0.20	-0.39	0.34	-0.20	-0.06

不少研究表明,花结构性状受到很强的遗传控制,其稳定性较强<sup>[33-34]</sup>。但本研究与这些结果相异,巢式方差分析结果表明,花的表型分化系数高于种实和叶,高达 65.274%,说明小果油茶的花性状受环境的影响非常大,而受遗传控制相对较弱。小果油茶 3 种器官的平均表型分化系数均大 50%,说明小果油茶随环境的变化而表现出较强的表型可塑性。而表型可塑性使其有着更广生态幅及更强适应性,以致能够渗透到广大的区域和占据异质化生境<sup>[35-36]</sup>。

小果油茶叶、花及种实形状大小存在着密切的相关关系,果皮厚度随花、叶及种实增大而增厚,而出子率则随花、叶及种实增大而减小。因而可以从中选出重要及关键的表型性状,今后可将其作为测定的主要依据,以提高表型性状测定效率和准确率。

不少研究结果表明,植物的表型变异与其地理生态因子显著有关<sup>[37-43]</sup>,本试验结果表明小果油茶表型性状与生态地理因子也有一定的相关关系,且不同性状受地理生态因子影响也不同,花的 5 个性状均与地理生态因子有一定相关关系,受地理环境因子影响最大,而种实和叶也有一些性状指标和地理生态因子相关。

利用 23 个表型性状的平均值,对小果油茶的 18 个不同地理居群进行聚类分析,在欧氏平均距离 6.26 处,可以很明显地将 18 个居群分为 4 个类群,

呈现出较强的地理区域特征,福建中部的 3 个居群闽清、清流及仙游划为一个大类;浦城、建宁、黎川及宁化划为一个亚类,它们都位于闽赣交界及武夷山脉边缘;而地理位置相近的西南 5 个居群,也是划分在一个亚群内;平江和宜春同为一个亚居群,它们地理位置也相近,这些结果与种实性状聚类结果完全一样,说明小果油茶种实性状是表型性状中最稳定也是最重要的分类性状。从系统聚类图和主成分排序图比较来看,除个别居群(如 P18)稍有变动外,绝大多数居群在 2 种聚类方式的结果一致,说明二者均能较好地地区分小果油茶不同居群的亲缘关系。这些研究结果为小果油茶的种质资源收集和良种选育打下了良好的前期基础。

参考文献

[1] 庄瑞林. 中国油茶[M]. 北京:中国林业出版社,2008:66-67

[2] 姚小华. 油茶高效实用栽培技术[M]. 北京:科学出版社,2010:3-4

[3] 马克平. 试论生物多样性概念[J]. 生物多样性,1993,1(1):220-221

[4] Bacilieri B R, Ducousso A, Kremer A. Genetic, morphological, ecological and phonological differentiation between *Quercus petraea* (Matt.) Liebl. And *Quercus robur* L in a mixed stand of northwest of France[J]. Silvae Genetica,1995,44(1):1-10

[5] Casas A, Caballero J, Valiente-Banuet A, et al. Morphological variation and the process of domestication of *Stenocereus stellatus* (Cactaceae) in Central Mexico[J]. American Journal Botany, 1999,86(4):522-533

[6] 葛颂,洪德元. 生物多样性研究理论和方法[M]. 北京:科学出版社,1994:3-5



- [7] 葛颂,洪德元. 濒危物种裂叶沙参及其近缘广布种泡沙参的遗传多样性研究[J]. 遗传学报,1999,26(4):410-417
- [8] 曲波,朱明星,陈旭辉,等. 22 种禾本科植物叶片泡状细胞形态特征的初步研究[J]. 西北植物学报,2010,30(8):1595-1601
- [9] 葛颂,洪德元. 泡沙参复合体(桔梗科)的物种生物学研究 I. 表型的可塑性[J]. 植物分类学报,1994,32(6):489-503
- [10] Maughan P J, Saghai M A, Buss G R. Microsatellite and amplified sequence length polymorphisms in cultivated and wild soybean[J]. Genome,1999,38(4):715-723
- [11] 刘萌娟,李鸣雷,石引刚,等. 陕西大豆初选核心种质的代表性分析[J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版,2006,34(9):135-140
- [12] 杨生超,徐绍忠,文国松,等. 灯盏花种质资源居群表型多样性研究[J]. 西北植物学报,2008,28(8):1573-1579
- [13] 葛颂,王明麻,陈岳武. 用同工酶研究马尾松居群的遗传结构[J]. 林业科学,1988,24(4):399-409
- [14] 李长喜. 林木天然居群表型变异研究概述[J]. 林业科学研究,1988,1(6):657-664
- [15] 郭平毅. 生物统计学[M]. 北京:中国林业出版社,2006:13-14
- [16] 李斌,顾万春,卢宝明. 白皮松天然居群种实性状表型多样性研究[J]. 生物多样性研究,2002,10(2):181-188
- [17] 辜云杰,罗建勋,吴远伟,等. 川西云杉天然种群表型多样性[J]. 植物生态学报,2009,33(2):291-301
- [18] 罗建勋,顾万春. 云杉天然居群表型多样性研究[J]. 林业科学,2005,41(2):66-73
- [19] 沙守峰,伊凯,刘志,等. 苹果杂种树叶片在预选中的应用研究[J]. 北方果树,2004(3):4-5
- [20] 王昆,刘凤之,赵进春. 苹果种质资源部分表型多样性研究[J]. 北方果树,2008(5):20-25
- [21] 黄勇,姚小华,王开良,等. 小果油茶种实表型性状遗传多样性研究[J]. 安徽农业大学学报,2011,38(5):698-707
- [22] Peakall R, Smouse P E. GENALEX 6: genetic analysis in Excel. Population genetic software for teaching and research[J]. Molecular Ecology Notes,2006,6:288-295
- [23] 陈华豪,丁思统,蔡贤如,等. 林业应用数理统计[M]. 大连:大连海运学院出版社,1992:23-25
- [24] 张德全,杨永平. 几种常用分子标记遗传多样性参数的统计分析[J]. 云南植物研究,2008,30(2):159-167
- [25] 黄少伟,谢维辉. 实用 SAS 编程与林业实验数据分析[M]. 广州:华南理工大学出版社,2001:11-16
- [26] Quenum F J B, Yan Q C, Gong Q J, et al. Phenotypic variation and relationships among sesame (*Sesamum indicum* L.) sub-core collections[J]. J Zhejiang University: Agric & Life Sci,2004,30(1):10-16
- [27] 王勋陵,王静. 植物的形态结构与环境[M]. 兰州:兰州大学出版社,1989:27-138
- [28] 刘全宏,王孝安,田先华,等. 太白红杉(*Larix chinensis*)叶的形态解剖学特征与环境因子的关系[J]. 西北植物学报,2001,21(5):885-893
- [29] 何承忠,张晏,段安安,等. 滇杨优树无性系苗期叶片性状变异分析[J]. 西北林学院学报,2009,24(6):28-32
- [30] 农月香,蒋运生,韦霄. 东兴金花茶表型变异研究[J]. 热带亚热带植物学,2010,18(4):372-378
- [31] 黄双全,郭友好,陈家宽. 渐危植物鹅掌楸的授粉率及花粉管生长[J]. 植物分类学报,1998,36(4):310-316
- [32] 黄双全,郭友好,吴艳,等. 鹅掌楸的花部数量变异与结实率[J]. 植物学报,1998,40(1):22-27
- [33] Stebbins G L. Variation and evolution in plants[M]. New York, Columbia Univ Press;1950
- [34] Rocas G, Barros C F, Scarano F R. Leaf anatomy plasticity of *Alchornea triplinervia* (Euphorbiaceae) under distinct light regimes in a Brazilian montane Atlantic rain forest[J]. Trees,1997,11:469-473
- [35] Sultan S E, Bazzaz F A. Phenotypic plasticity in *Polygonum persicaria*. III. The evolution of ecological breath for nutrient environment[J]. Evolution,1993,47(4):1050-1071
- [36] Sultan S E. Phenotypic plasticity and plant adaptation[J]. Acta Botanica Neerlandica,1995,44:363-383
- [37] Barzdajn W. An assessment of diagnostic value of morphological traits of Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) cones for discrimination of spruce provenances[J]. Sylwan,1996,140(9):61-75
- [38] Li P, Beaulieu J, Bousquet, et al. Genetic structure and patterns of genetic variation among populations in eastern white spruce (*Picea glauca*) [J]. Canadian Journal of Forest Research,1997,27(2):189-198
- [39] 曾杰,郑海水,甘四明,等. 广西西南桦天然居群的表型变异[J]. 林业科学,2005,41(2):59-65
- [40] 王海英,徐庆,冀春雷,等. 川西变叶海棠的表型变异[J]. 东北林业大学学报,2010,38(5):49-50
- [41] 吴远伟,罗建勋,胡庭兴,等. 川西云杉天然林分布特点和种内居群分化的初步研究[J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版,2008,36(9):81-86
- [42] 郑健,郑勇奇,宗亦尘,等. 花椒树天然群体种实多样性研究[J]. 植物遗传资源学报,2009,10(3):385-391
- [43] 曾淇,李明芳,郑学勤. 基于 SSR 标记的荔枝种质遗传多样性分析[J]. 植物遗传资源学报,2010,11(3):298-304