植物资源与环境学报，2023，**32**(4)：33-43
Journal of Plant Resources and Environment

越南油茶种实表型性状多样性分析及其与环境因子的关系

郝丙青[1,2]，张　幸[2]，屈　艳[3]，李日凤[3]，梁国校[2]，江泽鹏[2]，蔡　娅[2]，叶　航[2,①]
（1. 中国林业科学研究院热带林业研究所，广东 广州 510520；2. 广西壮族自治区林业科学研究院 广西特色经济林培育与利用重点实验室 广西油茶良种与栽培工程技术创新中心，广西 南宁 530002；3. 广西壮族自治区国有高峰林场，广西 南宁 530002）

摘要：为了研究越南油茶(*Camellia drupifera* Lour.)分布区内种实表型性状变异特征及其与环境因子的关系，揭示越南油茶种实表型性状变异规律，对越南油茶 18 个居群的 11 个种实表型性状进行方差分析、变异分析和主成分分析，对 18 个居群进行聚类分析，并对表型性状与环境因子进行相关性分析。结果表明：除种形指数外，越南油茶 18 个居群的其余 10 个种实表型性状在居群间及居群内差异极显著($P<0.01$)；18 个居群种实表型性状的变异系数为 4.4%～68.8%，均值为 24.3%，其中，鲜籽质量、单果籽粒数和单果质量的平均变异系数较大，分别为 49.0%、42.1%和 40.2%；居群间和居群内的平均方差分量比例分别为 48.11%和 28.25%，说明居群间的多样性大于居群内。主成分分析结果显示：前 4 个主成分的累计贡献率为 80.42%，越南油茶种实表型性状的差异主要表现在单果质量、果高、果径、鲜籽质量、果形指数、种形指数和鲜出籽率上。聚类分析结果显示：18 个居群可分成 2 大组，越南油茶种实表型性状呈现出较强的地理区域特征。相关性分析结果显示：单果质量、果径、种长、种宽和种形指数与部分环境因子具有显著($P<0.05$)或极显著相关性。综上所述，越南油茶种实表型性状居群间的变异程度略高于居群内，其种实表型性状表现出较强的地理区域特征；与果实相比，越南油茶种子表型性状受环境因子影响较大。

关键词：越南油茶；种实；表型性状；多样性；变异分析；聚类分析；主成分分析

中图分类号：S794.4；Q944.59；S601.9　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1674-7895(2023)04-0033-11
DOI：10.3969/j.issn.1674-7895.2023.04.04

Diversity analysis on phenotypic traits of fruits and seeds of *Camellia drupifera* and their relationships with environmental factors

HAO Bingqing[1,2], ZHANG Xing[2], QU Yan[3], LI Rifeng[3], LIANG Guoxiao[2], JIANG Zepeng[2], CAI Ya[2], YE Hang[2,①] (1. Research Institute of Tropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Guangzhou 510520, China; 2. Guangxi Key Laboratory of Special Non-wood Forests Cultivation and Utilization, Guangxi Oil-tea Superior Species and Cultivation Innovation Center of Engineering Technology, Guangxi Forestry Research Institute, Nanning 530002, China; 3. Guangxi Gaofeng State Owned Forest Farm, Nanning 530002, China), *J. Plant Resour. & Environ.*, 2023, **32**(4): 33-43

Abstract: In order to study the variation features of phenotypic traits of fruits and seeds of *Camellia drupifera* Lour. in its distribution areas and their relationships with environmental factors, and reveal the variation laws of phenotypic traits of fruits and seeds of *C. drupifera*, variance analysis, variation analysis and principal component analysis were performed for 11 phenotypic traits of fruits and seeds of 18 populations of *C. drupifera*, cluster analysis was performed for 18 populations, and correlation analysis was performed for phenotypic traits and environmental factors. The results show that except seed shape

收稿日期：2023-03-21
基金项目：国家自然科学基金项目(31960322)；广西林科院基本科研业务费项目(林科 202302 号)
作者简介：郝丙青(1988—)，女，河南杞县人，硕士，工程师，主要从事油茶良种选育及种质资源研究。
①通信作者 E-mail：gfri_yehang@163.com
引用格式：郝丙青，张　幸，屈　艳，等. 越南油茶种实表型性状多样性分析及其与环境因子的关系[J]. 植物资源与环境学报，2023，32(4)：33-43.

index, there are extremely significant ($P<0.01$) differences in the other 10 phenotypic traits of fruits and seeds of interpopulation and intrapopulation of 18 populations of *C. drupifera*; the coefficients of variation of phenotypic traits of fruits and seeds of 18 populations are 4.4%-68.8% with a mean of 24.3%, in which, the mean coefficients of variation of fresh seed mass, seed number per fruit, and single fruit mass are relatively large, which are 49.0%, 42.1%, and 40.2% respectively; the mean variance component ratios of interpopulation and intrapopulation are 48.11% and 28.25%, respectively, indicating that the diversity of interpopulation is greater than that of intrapopulation. The principal component analysis result shows that the cumulative contribution rate of the first four principal components is 80.42%, and the differences of phenotypic traits of fruits and seeds of *C. drupifera* are mainly in single fruit mass, fruit height, fruit diameter, fresh seed mass, fruit shape index, seed shape index, and fresh seed ratio. The cluster analysis result shows that 18 populations are divided into two supergroups, and the phenotypic traits of fruits and seeds of *C. drupifera* show strong geographical regional characteristics. The correlation analysis result shows that single fruit mass, fruit diameter, seed length, seed width, and seed shape index are significantly ($P<0.05$) or extremely significantly correlated with some environmental factors. In conclusion, the variation degrees of phenotypic traits of fruits and seeds of *C. drupifera* are slightly higher of interpopulation than intrapopulation, and its phenotypic traits of fruits and seeds show strong geographical regional characteristics; compared with fruits, the phenotypic traits of seeds of *C. drupifera* are more affected by environmental factors.

Key words: *Camellia drupifera* Lour.; fruits and seeds; phenotypic traits; diversity; variation analysis; cluster analysis; principal component analysis

越南油茶(*Camellia drupifera* Lour.)隶属于山茶科(Theaceae)山茶属(*Camellia* Linn.)油茶组(Sect. *Oleifera* Chang Tax.),分布于中国广东南部、海南、广西靠近越南边界各县以及越南和老挝[1]。越南油茶是一种在中国广泛栽培的油料树种,栽培面积仅次于油茶(*C. oleifera* Abel.)中的普通油茶(中果油茶)和小果油茶。越南油茶种子含油量可达 25.0%~31.6%[2-4],因其树体高大,生长迅速,在适宜条件下实生林的产油量可达 1 125 kg·hm^{-2}(现有良种选育标准为 750.0 kg·hm^{-2}),一些优良单株的果实产量更是高达 5 730.0 kg·hm^{-2},按 60%有效面积折算,其产油量可达 1 375.2 kg·hm^{-2},表明越南油茶是一种极有潜力的油用树种[5]。

表型变异是植物在其分布区内适应不同环境的表现,是遗传因子和环境因子共同作用的结果[6-9]。越南油茶为异花授粉植物,种质资源非常丰富,不同居群或个体之间的叶、果实等器官的形态分化程度较大[10-11]。有研究表明:越南油茶叶片表型性状变异系数为 16.77%[12],种实表型性状变异系数为 28.92%[13];种实不同表型性状的变异系数差别较大,如干籽质量和鲜籽质量的变异系数在 50%以上,果形指数变异系数为 10%左右[14]。此外,研究发现越南油茶实生林的单株产油量和鲜出籽率也存在显著差异,最高分别可达 2 410.08 kg·hm^{-2}和 52.16%[15]。因此,越南油茶在分布区内的种实形态存在极为丰富的表型变异。

种质资源多样性研究是油茶良种选育的基础。目前为止,越南油茶暂无审(认)定且可推广的良种,因此,应开展越南油茶整个分布区内不同居群种实表型性状的遗传多样性研究,分析评价种实经济性状指标,挖掘其可利用价值,为越南油茶良种选育和新种质创制奠定基础。本文以越南油茶自然分布区内的 18 个居群为研究对象,测定了 11 个种实表型性状,结合相关性分析、主成分分析和聚类分析等方法研究越南油茶种实表型性状的多样性,以期为越南油茶种质资源改良利用和新种质创制提供依据。

1 材料和方法

1.1 材料

在越南油茶自然分布区内选择具有代表性的 18 个居群,基本覆盖了越南油茶的整个分布区,各居群的基本情况见表 1。其中居群的经度、纬度和海拔采用 GPS 定位仪记录,气候数据来自《中国县情大全:中南卷》[16]和文献[17]。

选择林龄 30 a 以上的越南油茶林分,在每个居群内选择株间距 50 m 以上的植株 20 株,每株从东、南、西、北 4 个方向的果枝上共收集 20 个成熟果实,立刻带回实验测量相关指标。

表 1　越南油茶 18 个居群所在地的基本情况[1)]
Table 1　Basic information of the locations of 18 populations of *Camellia drupifera* Lour.[1)]

P[2)]	Long	Lat	Alt/m	Ff/d	t_{max}/℃	t_{min}/℃	t_a/℃	t_1/℃	t_T/℃	H/h	P/mm
P1	E110.088 3°	N19.088 3°	41.23	350	40.3	1.1	23.7	17.2	28.4	2 081.0	1 750.0
P2	E110.134 7°	N19.886 3°	65.62	350	40.3	1.1	23.7	17.2	28.4	2 081.0	1 750.0
P3	E110.961 8°	N22.072 2°	98.68	361	37.6	−0.2	22.8	15.1	28.5	1 922.8	1 794.4
P4	E109.538 6°	N19.209 5°	149.62	—	38.0	−6.0	22.0	16.0	26.0	2 000.0	2 400.0
P5	E111.005 0°	N22.044 9°	15.67	361	37.6	−0.2	22.8	15.1	28.5	1 922.8	1 794.4
P6	E110.961 8°	N22.072 2°	98.68	361	37.6	−0.2	22.8	15.1	28.5	1 922.8	1 794.4
P7	E106.854 7°	N22.068 6°	233.52	344	38.7	−1.2	21.3	13.2	27.6	1 614.0	1 376.0
P8	E107.998 8°	N22.004 0°	208.13	347	39.3	−2.0	21.2	12.8	27.7	1 896.1	1 217.3
P9	E108.060 6°	N22.023 9°	234.10	347	39.3	−2.0	21.2	12.8	27.7	1 896.1	1 217.3
P10	E106.847 0°	N22.067 0°	191.86	344	38.7	−1.2	21.3	13.2	27.6	1 614.0	1 376.0
P11	E109.380 1°	N24.469 8°	85.63	331	38.9	−3.4	20.3	10.1	28.6	—	1 482.0
P12	E107.978 9°	N21.978 7°	218.42	347	39.3	−2.0	21.2	12.8	27.7	1 896.1	1 217.3
P13	E106.848 0°	N22.069 0°	186.26	344	38.7	−1.2	21.3	13.2	27.6	1 614.0	1 376.0
P14	E107.127 6°	N22.055 3°	140.86	352	40.8	−2.4	22.1	14.1	28.4	1 788.6	1 171.0
P15	E110.199 3°	N22.365 2°	—	359	37.0	−2.7	21.0	13.0	28.0	1 760.6	1 942.7
P16	E106.464 0°	N21.848 6°	74.39	360	39.0	5.0	24.0	15.0	29.0	1 700.0	1 900.0
P17	E106.741 6°	N21.784 8°	287.64	360	39.0	5.0	24.0	15.0	29.0	1 700.0	1 900.0
P18	E106.779 1°	N21.799 7°	265.53	360	39.0	5.0	24.0	15.0	29.0	1 700.0	1 900.0

1) Long：经度 Longitude；Lat：纬度 Latitude；Alt：海拔 Altitude；Ff：无霜期 Frost-free period；t_{max}：极端最高温 Extreme maximum temperature；t_{min}：极端最低温 Extreme minimum temperature；t_a：年均温 Annual mean temperature；t_1：1 月均温 Mean temperature in January；t_7：7 月均温 Mean temperature in July；H：年均日照时数 Annual mean sunshine hours；P：年均降水量 Annual mean precipitation. —：数据缺失 Data missing.

2) P：居群 Population. P1：中国海南省琼海市会山镇中酒村 Zhongjiu Village，Huishan Town，Qionghai City，Hainan Province，China；P2：中国海南省澄迈县老城镇沙吉村 Shaji Village，Laocheng Town，Chengmai County，Hainan Province，China；P3：中国海南省琼中黎族苗族自治县湾岭镇细水村 Xishui Village，Wanling Town，Qiongzhong Li and Miao Autonomous County，Hainan Province，China；P4：中国广东省茂名市长坡镇大石冲村 Dashichong Village，Changpo Town，Maoming City，Guangdong Province，China；P5：中国广东省高州市林业科学研究所 Gaozhou Institute of Forestry，Gaozhou City，Guangdong Province，China；P6：中国广东省茂名市长坡镇旺沙村 Wangsha Village，Changpo Town，Maoming City，Guangdong Province，China；P7：中国广西壮族自治区凭祥市上石镇弄章屯 Nongzhang Village，Shangshi Town，Pingxiang City，Guangxi Zhuang Autonomous Region，China；P8：中国广西壮族自治区防城港市上思县叫安镇平江村 Pingjiang Village，Jiao'an Town，Shangsi County，Fangchenggang City，Guangxi Zhuang Autonomous Region，China；P9：中国广西壮族自治区防城港市上思县叫安镇三板村 Sanban Village，Jiao'an Town，Shangsi County，Fangchenggang City，Guangxi Zhuang Autonomous Region，China；P10：中国广西壮族自治区凭祥市上石镇马垌村 Madong Village，Shangshi Town，Pingxiang City，Guangxi Zhuang Autonomous Region，China；P11：中国广西壮族自治区柳州市柳北区沙塘镇 Shatang Town，Liubei District，Liuzhou City，Guangxi Zhuang Autonomous Region，China；P12：中国广西壮族自治区防城港市上思县叫安镇那荡村 Nadang Village，Jiao'an Town，Shangsi County，Fangchenggang City，Guangxi Zhuang Autonomous Region，China；P13：中国广西壮族自治区凭祥市上石镇岜存村 Bacun Village，Shangshi Town，Pingxiang City，Guangxi Zhuang Autonomous Region，China；P14：中国广西壮族自治区凭祥市夏石镇夏桐村 Xiatong Village，Xiashi Town，Pingxiang City，Guangxi Zhuang Autonomous Region，China；P15：中国广西壮族自治区玉林市陆川县官山村 Guanshan Village，Luchuan County，Yulin City，Guangxi Zhuang Autonomous Region，China；P16：越南谅山省文官县良能镇 Luong Nang Town，Van Quan County，Lang Son Province，Vietnam；P17：越南谅山省高禄县 Yen Trach 镇润泽基地 Base in Run Ze，Yen Trach Town，Cao Loc County，Lang Son Province，Vietnam；P18：越南谅山省高禄县 Yen Trach 镇烟斋基地 Base in Yan Zhai，Yen Trach Town，Cao Loc County，Lang Son Province，Vietnam.

1.2　方法

使用精度 0.01 mm 的游标卡尺测量果高、果径、果皮厚度、种长、种宽[18-19]。其中，果高为鲜果纵切面的最大长度；果径为鲜果横切面的最大长度；果皮厚度为鲜果剥开后中部的厚度；种长为种子最长处的长度；种宽为种子最宽处的长度；果形指数和种形指数的计算公式分别为果形指数＝果高/果径、种形指数＝种长/种宽。使用精度 0.01 g 的电子天平称量单果质量、鲜籽质量，统计单果籽粒数，并计算鲜出籽率，计算公式为鲜出籽率＝鲜籽质量/单果质量。

1.3　数据分析

采用 SPSS 19.0 软件计算平均值和标准差，并进行单因素方差分析、主成分分析、Pearson 相关性分析和聚类分析。同时，计算变异系数、相对极差和表型分化系数，计算公式分别为变异系数＝(标准差/平均值)×100%、相对极差＝(极差/平均值)×100%、表型分化系数＝居群间方差分量/(居群间方差分量＋居群内方差分量)。采用 Shannon-Weaver 多样性指数[20]分析不同居群种实表型性状的变异程度。将数据标准化处理后，采用系统聚类法对 18 个居群进行聚类分析。

2　结果和分析

2.1　越南油茶种实表型性状分析

种实表型性状方差分析结果(表 2)表明：除种形指数外，越南油茶居群间及居群内种实表型性状具有极显著($P<0.01$)差异。11 个种实表型性状在各居群

间的差异见表3。结果显示:越南的3个居群即越南谅山省文官县良能镇(P16)、越南谅山省高禄县 Yen Trach 镇润泽基地(P17)和越南谅山省高禄县 Yen Trach 镇烟斋基地(P18)间的11个种实表型性状(除P18的果皮厚度和鲜出籽率外)不存在极显著差异。中国广西壮族自治区凭祥市上石镇弄章屯(P7)、中国广西壮族自治区防城港市上思县叫安镇平江村(P8)、中国广西壮族自治区防城港市上思县叫安镇三板村(P9)和中国广西壮族自治区凭祥市上石镇马垌村(P10)居群间的11个种实表型性状基本上不存在极显著差异。18个居群的单果质量差异较大,为18.37~85.90 g,P10居群的单果质量最大,中国海南省澄迈县老城镇沙吉村(P2)居群的单果质量最小。18个居群的果高为29.34~49.99 mm、果径为32.66~56.73 mm。从果形指数看,P2和P9居群的果形最圆,中国广西壮族自治区凭祥市上石镇岜存村(P13)

表2 越南油茶18个居群种实表型性状方差分析
Table 2 Variance analysis on phenotypic traits of fruits and seeds of 18 populations of *Camellia drupifera* Lour.

表型性状 Phenotypic trait	均方 Mean square			F值[1] F value[1]	
	居群间 Interpopulation	居群内 Intrapopulation	观测误差 Random error	居群间 Interpopulation	居群内 Intrapopulation
单果质量 Single fruit mass	103 381.908	7 652.105	342.897	22.316 **	11.789 **
果高 Fruit height	9 565.373	519.089	23.463	22.124 **	16.081 **
果径 Fruit diameter	11 809.312	552.303	28.903	19.109 **	18.677 **
果形指数 Fruit shape index	0.222	0.089	0.003	28.516 **	2.166 **
果皮厚度 Pericarp thickness	560.156	36.391	2.888	12.602 **	13.494 **
单果籽粒数 Seed number per fruit	634.058	76.932	7.770	9.902 **	7.246 **
鲜籽质量 Fresh seed mass	6 017.627	673.085	37.707	17.850 **	7.813 **
鲜出籽率 Fresh seed ratio	0.325	0.139	0.101	1.386 **	2.240 **
种长 Seed length	17 336.451	76.675	5.896	13.004 **	198.675 **
种宽 Seed width	2 920.079	1 866.729	2 044.916	0.913 **	1.565 **
种形指数 Seed shape index	0.002	0.014	0.014	1.015	0.179

[1] ** : $P<0.01$.

表3 越南油茶18个居群种实表型性状的比较 ($\bar{X}\pm SD$)[1]
Table 3 Comparison on phenotypic traits of fruits and seeds of 18 populations of *Camellia drupifera* Lour. ($\bar{X}\pm SD$)[1]

居群 Population	单果质量/g Single fruit mass	果高/mm Fruit height	果径/mm Fruit diameter	果形指数 Fruit shape index	果皮厚度/mm Pericarp thickness	单果籽粒数 Seed number per fruit
P1	30.68±16.92B	39.19±6.73C	36.73±7.26B	1.08±0.08E	5.20±0.97BC	3.2±2.1A
P2	18.37±8.87A	30.72±4.52A	32.66±5.62A	0.95±0.11D	3.81±1.05A	4.0±2.0AB
P3	44.80±23.44CD	41.03±7.61CD	44.26±7.87D	0.93±0.08BCD	6.03±1.69C	7.4±3.3CD
P4	34.87±16.46BC	36.05±5.85B	40.63±6.95C	0.89±0.10BC	5.16±1.27BC	5.0±2.5B
P5	75.90±16.29FG	45.71±3.37EF	56.73±4.06H	0.81±0.07A	7.57±0.98DEF	9.2±3.9D
P6	76.33±26.22FG	49.77±7.38G	54.15±6.99GH	0.92±0.11BCD	9.09±1.81H	7.6±3.1CD
P7	77.45±31.87FG	49.56±7.43G	53.89±7.79GH	0.92±0.06BCD	8.09±2.48EFG	7.2±3.0CD
P8	74.81±30.65FG	47.57±6.83FG	52.14±7.32FG	0.92±0.08BCD	7.52±1.68DEF	8.9±3.7D
P9	74.86±30.50FG	49.18±7.14G	52.10±7.83FG	0.95±0.08CD	7.41±1.80EF	8.7±4.6D
P10	85.90±41.75G	49.99±8.27G	55.79±9.86GH	0.90±0.07BCD	7.35±2.00EF	8.8±3.5D
P11	18.68±6.81A	29.34±3.91A	33.46±4.38A	0.88±0.06B	4.61±1.31B	7.5±3.5CD
P12	56.32±28.47DE	42.89±6.99DE	46.94±8.30DE	0.92±0.08BCD	7.29±2.03EF	7.1±3.3CD
P13	76.46±29.48FG	43.96±6.80DEF	55.70±7.14GH	0.79±0.07A	7.39±1.14EF	8.9±3.3D
P14	57.29±26.30DE	43.32±7.78DE	48.23±7.63EF	0.90±0.09BCD	8.09±1.91EFG	8.3±4.2CD
P15	63.66±25.15EF	44.81±6.77DEF	49.84±6.82EF	0.90±0.07BCD	6.99±1.99E	6.6±2.1C
P16	58.54±20.43DE	44.50±7.00DEF	47.70±6.01E	0.93±0.09BCD	8.43±2.05FGH	7.7±2.8CD
P17	59.57±12.27DE	44.00±3.08DEF	48.60±3.57EF	0.91±0.04BCD	8.89±2.35GH	8.6±1.2CD
P18	58.48±15.21DE	44.54±4.10DEF	48.29±5.09EF	0.93±0.08BCD	5.67±1.26C	7.5±1.9CD
均值 Mean	59.04±34.06	43.55±9.43	47.77±10.31	0.92±0.09	6.96±2.35	7.2±3.7

续表 3　Table 3 (Continued)

居群 Population	鲜籽质量/g Fresh seed mass	鲜出籽率 Fresh seed ratio	种长/mm Seed length	种宽/mm Seed width	种形指数 Seed shape index
P1	8.55±5.88AB	0.26±0.05BCD	21.34±3.55CDE	22.59±3.25D	0.95±0.12A
P2	6.32±3.69A	0.34±0.09F	17.52±2.64B	17.35±2.68B	1.01±0.08B
P3	11.98±7.43BCD	0.26±0.08BCD	19.88±4.00C	19.47±4.22C	1.03±0.11B
P4	11.11±5.95BC	0.31±0.06EF	20.18±3.28C	19.83±3.06C	1.02±0.12B
P5	21.24±9.09GH	0.28±0.07CD	22.54±1.42DEF	22.50±1.66D	1.01±0.10B
P6	14.95±7.17CDE	0.19±0.05A	21.14±3.32CD	20.90±3.30C	1.02±0.10B
P7	18.47±8.89EFG	0.24±0.07BC	22.21±2.94DEF	22.11±2.93D	1.02±0.20B
P8	20.08±10.14FG	0.26±0.06BCD	—	—	—
P9	19.24±9.92EFG	0.25±0.07BCD	—	—	—
P10	24.63±12.52H	0.29±0.06DE	23.46±3.35F	23.28±3.29D	1.01±0.11B
P11	5.02±2.36A	0.27±0.08CD	14.87±1.97A	14.81±1.98A	1.01±0.09B
P12	12.98±8.68CD	0.22±0.07B	20.39±3.51C	20.48±3.13C	1.00±0.14B
P13	22.85±12.40GH	0.29±0.07DE	23.03±3.65EF	22.70±3.62D	1.02±0.08B
P14	13.08±7.18CD	0.23±0.07B	19.63±3.34C	19.42±3.34C	1.02±0.11B
P15	16.24±6.13DEF	0.26±0.05BCD	—	—	—
P16	16.10±6.27DEF	0.28±0.06CD	—	—	—
P17	16.30±3.16DEF	0.28±0.04CD	—	—	—
P18	19.21±5.57EFG	0.33±0.07F	—	—	—
均值 Mean	15.15±9.67	0.26±0.08	20.44±3.70	20.45±3.04	1.01±0.11

[1)] P1：中国海南省琼海市会山镇中酒村 Zhongjiu Village, Huishan Town, Qionghai City, Hainan Province, China；P2：中国海南省澄迈县老城镇沙吉村 Shaji Village, Laocheng Town, Chengmai County, Hainan Province, China；P3：中国海南省琼中黎族苗族自治县湾岭镇细水村 Xishui Village, Wanling Town, Qiongzhong Li and Miao Autonomous County, Hainan Province, China；P4：中国广东省茂名市长坡镇大石冲村 Dashichong Village, Changpo Town, Maoming City, Guangdong Province, China；P5：中国广东省高州市林业科学研究所 Gaozhou Institute of Forestry, Gaozhou City, Guangdong Province, China；P6：中国广东省茂名市长坡镇旺沙村 Wangsha Village, Changpo Town, Maoming City, Guangdong Province, China；P7：中国广西壮族自治区凭祥市上石镇弄章屯 Nongzhang Village, Shangshi Town, Pingxiang City, Guangxi Zhuang Autonomous Region, China；P8：中国广西壮族自治区防城港市上思县叫安镇平江村 Pingjiang Village, Jiao'an Town, Shangsi County, Fangchenggang City, Guangxi Zhuang Autonomous Region, China；P9：中国广西壮族自治区防城港市上思县叫安镇三板村 Sanban Village, Jiao'an Town, Shangsi County, Fangchenggang City, Guangxi Zhuang Autonomous Region, China；P10：中国广西壮族自治区凭祥市上石镇马垌村 Madong Village, Shangshi Town, Pingxiang City, Guangxi Zhuang Autonomous Region, China；P11：中国广西壮族自治区柳州市柳北区沙塘镇 Shatang Town, Liubei District, Liuzhou City, Guangxi Zhuang Autonomous Region, China；P12：中国广西壮族自治区防城港市上思县叫安镇那荡村 Nadang Village, Jiao'an Town, Shangsi County, Fangchenggang City, Guangxi Zhuang Autonomous Region, China；P13：中国广西壮族自治区凭祥市上石镇岜存村 Bacun Village, Shangshi Town, Pingxiang City, Guangxi Zhuang Autonomous Region, China；P14：中国广西壮族自治区凭祥市夏石镇夏桐村 Xiatong Village, Xiashi Town, Pingxiang City, Guangxi Zhuang Autonomous Region, China；P15：中国广西壮族自治区玉林市陆川县官山村 Guanshan Village, Luchuan County, Yulin City, Guangxi Zhuang Autonomous Region, China；P16：越南谅山省文官县良能镇 Luong Nang Town, Van Quan County, Lang Son Province, Vietnam；P17：越南谅山省高禄县 Yen Trach 镇润泽基地 Base in Run Ze, Yen Trach Town, Cao Loc County, Lang Son Province, Vietnam；P18：越南谅山省高禄县 Yen Trach 镇烟斋基地 Base in Yan Zhai, Yen Trach Town, Cao Loc County, Lang Son Province, Vietnam. 同列中不同大写字母表示同一表型性状在不同居群间差异极显著($P<0.01$) Different uppercases in the same column indicate the extremely significant ($P<0.01$) differences between different populations of the same phenotypic trait. —：数据缺失 Data missing.

居群的果形最长。18 个居群的果皮厚度为 3.81～9.09 mm，中国广东省茂名市长坡镇旺沙村(P6)居群的果皮最厚、P2 居群的果皮最薄。18 个居群的单果籽粒数为 3.2～9.2，中国广东省高州市林业科学研究所(P5)居群最多、中国海南省琼海市会山镇中酒村(P1)居群最少。18 个居群的鲜籽质量为 5.02～24.63 g，P10 居群最大、中国广西壮族自治区柳州市柳北区沙塘镇(P11)居群最小。18 个居群的鲜出籽率为 0.19～0.34，P2 居群最高、P6 居群最低。12 个居群的种长为 14.87～23.46 mm、种宽为 14.81～23.28 mm，均为 P10 居群最大、P11 居群最小。从种形指数看，12 个居群间差异不大，均接近圆形。

2.2　越南油茶种实表型性状变异分析

结果(表 4)显示：越南油茶 18 个居群的 11 个种实表型性状的变异系数为 4.4%～68.8%，均值为 24.3%，其中，中国海南省琼海市会山镇中酒村(P1)居群鲜籽质量的变异系数最大、越南谅山省高禄县 Yen Trach 镇润泽基地(P17)居群果形指数的变异系数最小。各表型性状的平均变异系数具有一定差异，其中，鲜籽质量、单果籽粒数和单果质量的平均变异系数较大，分别为 49.0%、42.1% 和 40.2%，说明这 3 个表型性状的变异程度较高，稳定性较差；果形指数的平均变异系数最小(8.6%)，说明该表型性状变异程度低，稳定性好。各居群的表型性状平均变异系

表4 越南油茶18个居群种实表型性状的变异系数
Table 4 Coefficients of variation of phenotypic traits of fruits and seeds of 18 populations of *Camellia drupifera* Lour.

P[1)]	各表型性状的变异系数/%[2)] Coefficient of variation of each phenotypic trait[2)]											均值 Mean
	*m*1	*h*	*D*	I1	*d*	*n*	*m*2	R	*l*	*b*	I2	
P1	55.1(231.1)	17.2(60.8)	19.8(78.9)	7.4(35.3)	18.7(83.4)	67.3(283.1)	68.8(285.6)	19.2(76.9)	16.6(66.7)	15.2(65.7)	12.6(50.5)	28.9(119.8)
P2	48.3(265.2)	15.5(78.1)	17.2(93.6)	11.6(80.0)	27.6(171.1)	49.8(274.0)	58.4(352.7)	26.5(155.7)	15.1(83.3)	15.4(90.9)	7.8(39.2)	26.7(153.1)
P3	52.3(310.1)	18.5(99.7)	17.8(94.1)	8.6(42.0)	28.0(135.4)	44.8(258.2)	62.0(300.2)	30.8(168.5)	20.1(122.2)	21.7(145.6)	10.7(110.7)	28.7(162.4)
P4	47.2(293.0)	16.2(84.8)	17.1(95.7)	11.2(61.5)	24.6(220.0)	49.3(319.4)	53.6(354.0)	19.4(108.0)	16.3(194.5)	15.4(88.8)	11.8(274.5)	25.6(190.4)
P5	21.5(73.7)	7.4(19.2)	7.3(23.4)	8.6(29.7)	12.9(36.3)	42.0(119.3)	42.8(133.2)	25.0(76.2)	6.3(18.2)	7.4(23.6)	9.9(31.7)	17.4(53.1)
P6	34.4(194.0)	14.8(95.0)	12.9(80.6)	12.0(69.3)	19.9(128.6)	41.1(222.5)	48.0(247.8)	26.3(167.8)	15.7(90.9)	15.8(81.0)	9.8(70.6)	22.8(131.6)
P7	41.1(200.4)	15.0(81.8)	14.5(75.1)	6.5(43.4)	30.7(169.3)	42.2(195.6)	48.1(252.4)	29.2(144.4)	13.2(69.8)	13.3(75.0)	19.6(402.0)	24.9(155.4)
P8	41.0(208.2)	14.4(66.7)	14.0(71.2)	8.7(67.4)	22.3(138.7)	41.8(203.1)	50.5(245.9)	23.1(140.7)	—	—	—	27.0(142.7)
P9	40.7(232.5)	14.5(84.9)	15.0(86.8)	8.4(51.7)	24.0(126.4)	52.5(287.4)	51.6(337.1)	28.0(167.4)	—	—	—	29.3(171.8)
P10	48.6(264.8)	16.5(84.8)	17.7(93.2)	7.7(45.5)	27.2(165.6)	39.8(182.9)	50.8(231.8)	20.7(112.2)	14.3(92.4)	14.1(85.7)	10.9(121.8)	24.4(134.6)
P11	36.5(142.2)	13.3(61.4)	13.1(49.4)	6.8(42.1)	28.4(98.2)	47.5(20.1)	47.0(245.5)	29.6(150.0)	13.2(52.9)	13.4(52.5)	8.9(40.6)	23.4(86.8)
P12	50.6(328.5)	16.3(87.4)	17.7(97.5)	8.7(67.4)	27.8(204.0)	47.3(240.8)	66.9(444.1)	31.8(201.6)	17.2(102.3)	15.4(79.6)	14.0(136.0)	28.5(180.8)
P13	38.6(156.0)	15.5(63.4)	12.8(52.2)	8.9(35.5)	15.4(67.8)	37.7(158.0)	54.3(233.5)	24.1(139.2)	15.8(72.6)	16.0(73.9)	7.8(39.2)	22.4(99.2)
P14	46.0(268.0)	18.0(105.0)	15.8(86.0)	10.0(124.8)	23.6(152.8)	49.9(263.9)	54.9(368.0)	30.4(190.0)	17.0(130.0)	17.2(101.4)	10.8(91.2)	26.7(171.0)
P15	39.5(143.1)	15.1(58.4)	13.7(55.8)	7.7(32.2)	28.5(106.1)	31.4(136.8)	37.7(150.8)	19.2(99.6)	—	—	—	24.1(97.9)
P16	34.9(158.4)	15.7(84.2)	12.6(55.7)	9.7(55.7)	24.3(107.2)	35.8(172.3)	38.9(169.7)	21.4(90.3)	—	—	—	24.1(111.7)
P17	20.6(77.3)	7.0(24.4)	7.3(29.2)	4.4(16.5)	26.4(118.7)	13.5(56.1)	19.4(75.0)	14.3(50.8)	—	—	—	14.1(56.0)
P18	26.0(98.7)	9.2(30.2)	10.5(47.4)	8.6(35.6)	22.2(81.1)	24.8(85.4)	29.0(91.0)	21.2(78.0)	—	—	—	18.9(68.4)
M	40.2(202.5)	14.4(70.8)	14.3(70.3)	8.6(51.9)	24.1(128.4)	42.1(203.3)	49.0(251.0)	24.5(128.7)	15.0(80.3)	15.0(80.3)	11.2(120.3)	24.3(127.0)

1) P：居群 Population. P1：中国海南省琼海市会山镇中酒村 Zhongjiu Village, Huishan Town, Qionghai City, Hainan Province, China；P2：中国海南省澄迈县老城镇沙吉村 Shaji Village, Laocheng Town, Chengmai County, Hainan Province, China；P3：中国海南省琼中黎族苗族自治县湾岭镇细水村 Xishui Village, Wanling Town, Qiongzhong Li and Miao Autonomous County, Hainan Province, China；P4：中国广东省茂名市长坡镇大石冲村 Dashichong Village, Changpo Town, Maoming City, Guangdong Province, China；P5：中国广东省高州市林业科学研究所 Gaozhou Institute of Forestry, Gaozhou City, Guangdong Province, China；P6：中国广东省茂名市长坡镇旺沙村 Wangsha Village, Changpo Town, Maoming City, Guangdong Province, China；P7：中国广西壮族自治区凭祥市上石镇弄章屯 Nongzhang Village, Shangshi Town, Pingxiang City, Guangxi Zhuang Autonomous Region, China；P8：中国广西壮族自治区防城港市上思县叫安镇平江村 Pingjiang Village, Jiao'an Town, Shangsi County, Fangchenggang City, Guangxi Zhuang Autonomous Region, China；P9：中国广西壮族自治区防城港市上思县叫安镇三板村 Sanban Village, Jiao'an Town, Shangsi County, Fangchenggang City, Guangxi Zhuang Autonomous Region, China；P10：中国广西壮族自治区凭祥市上石镇马垌村 Madong Village, Shangshi Town, Pingxiang City, Guangxi Zhuang Autonomous Region, China；P11：中国广西壮族自治区柳州市柳北区沙塘镇 Shatang Town, Liubei District, Liuzhou City, Guangxi Zhuang Autonomous Region, China；P12：中国广西壮族自治区防城港市上思县叫安镇那荡村 Nadang Village, Jiao'an Town, Shangsi County, Fangchenggang City, Guangxi Zhuang Autonomous Region, China；P13：中国广西壮族自治区凭祥市上石镇岜存村 Bacun Village, Shangshi Town, Pingxiang City, Guangxi Zhuang Autonomous Region, China；P14：中国广西壮族自治区凭祥市夏石镇夏桐村 Xiatong Village, Xiashi Town, Pingxiang City, Guangxi Zhuang Autonomous Region, China；P15：中国广西壮族自治区玉林市陆川县官山村 Guanshan Village, Luchuan County, Yulin City, Guangxi Zhuang Autonomous Region, China；P16：越南谅山省文官县良能镇 Luong Nang Town, Van Quan County, Lang Son Province, Vietnam；P17：越南谅山省高禄县 Yen Trach 镇润泽基地 Base in Run Ze, Yen Trach Town, Cao Loc County, Lang Son Province, Vietnam；P18：越南谅山省高禄县 Yen Trach 镇烟斋基地 Base in Yan Zhai, Yen Trach Town, Cao Loc County, Lang Son Province, Vietnam. M：均值 Mean.

2) *m*1：单果质量 Single fruit mass；*h*：果高 Fruit height；*D*：果径 Fruit diameter；I1：果形指数 Fruit shape index；*d*：果皮厚度 Pericarp thickness；*n*：单果籽粒数 Seed number per fruit；*m*2：鲜籽质量 Fresh seed mass；R：鲜出籽率 Fresh seed ratio；*l*：种长 Seed length；*b*：种宽 Seed width；I2：种形指数 Seed shape index. 括号内数字为相对极差(%) The figures in brackets are relative ranges. —：数据缺失 Data missing.

数为14.1%~29.3%，中国广西壮族自治区防城港市上思县叫安镇三极村(P9)居群最大、P17居群最小；多数居群的表型性状平均变异系数大于20.0%。

越南油茶18个居群种实表型性状的相对极差为16.5%~444.1%，均值为127.0%，其中，中国广西壮族自治区防城港市上思县叫安镇那荡村(P12)居群鲜籽质量的相对极差最大、P17居群果形指数的相对极差最小。各表型性状的平均相对极差为51.9%~251.0%，鲜籽质量最大、果形指数最小。各居群的表型性状平均相对极差为53.1%~190.4%，中国广东省茂名市长坡镇大石冲村(P4)居群最大、中国广东省高州市林业科学研究所(P5)居群最小。

2.3 越南油茶种实表型性状的表型分化和多样性指数分析

结果(表5)显示：越南油茶11个种实表型性状的居群间平均方差分量比例(35.82%)大于居群内平均方差分量比例(22.88%)，平均表型分化系数为0.57，说明越南油茶居群间多样性大于居群内。各表型性状的表型分化系数为0.33~0.89，种长最大、鲜出籽率最小。种长、果径、种形指数、单果质量、果高、鲜籽质量、果皮厚度和种宽的表型分化系数大于0.5，表明这些性状的表型分化表现为居群间大于居群内，而单果籽粒数、果形指数、鲜出籽率的表型分化系数小于0.5，表明这3个性状的表型分化表现为居群间

小于居群内。

Shannon-Weaver 多样性指数（H'）分析结果（表 6）表明：越南油茶 18 个居群种实表型性状的 H' 值为 0.47~2.16，均值为 1.69，其中，中国广东省茂名市长坡镇旺沙村（P6）居群果形指数的 H' 值最大、中国广西壮族自治区柳州市柳北区沙塘镇（P11）居群单果质量的 H' 值最小。各表型性状的平均 H' 值为 1.49~1.85，从大到小依次为种长和种宽、种形指数、果形指数、鲜出籽率、单果籽粒数、果高和果径、果皮厚度、鲜籽质量、单果质量。各居群的平均 H' 值为 1.11~1.91，其中，中国广西壮族自治区防城港市上思县叫安镇三板村（P9）和中国广西壮族自治区凭祥市上石镇马垌村（P10）居群最大、越南谅山省高禄县 Yen Trach 镇润泽基地（P17）居群最小。

2.4　越南油茶种实表型性状的主成分分析

主成分分析结果（表 7）表明：前 4 个主成分的特征值均大于 1，累计贡献率为 80.42%，说明越南油茶 11 个种实表型性状的大部分信息可以用这 4 个主成分提取。第 1 主成分的贡献率为 48.49%，单果质量、果高、果径和鲜籽质量的特征向量绝对值较高；第 2 主成分的贡献率为 12.79%，果形指数的特征向量绝对值最高；第 3 主成分的贡献率为 10.59%，种形指数的特征向量绝对值较高；第 4 主成分的贡献率为 8.55%，鲜出籽率的特征向量绝对值最高。因此，越南油茶种实表型性状的差异主要表现在单果质量、果高、果径、鲜籽质量、果形指数、种形指数和鲜出籽率。

表 5　越南油茶 18 个居群种实表型性状方差分量及表型分化系数
Table 5　Variance components and phenotypic differentiation coefficients of phenotypic traits of fruits and seeds of 18 populations of *Camellia drupifera* Lour.

表型性状[1)] Phenotypic trait[1)]	方差分量 Variance component			方差分量比例/% Variance component ratio			表型分化系数 Phenotypic differentiation coefficient
	居群间 Interpopulation	居群内 Intrapopulation	随机误差 Random error	居群间 Interpopulation	居群内 Intrapopulation	随机误差 Random error	
*m*1	686.444	430.043	343.223	47.03	29.46	23.51	0.61
h	44.040	29.618	23.478	45.34	30.49	24.17	0.60
D	81.134	29.525	28.925	58.13	21.15	20.72	0.73
I1	0.003	0.005	0.003	27.27	45.45	27.27	0.38
d	2.284	1.850	2.887	32.53	26.35	41.12	0.55
n	3.826	3.920	7.771	24.66	25.26	50.08	0.49
*m*2	51.449	38.756	37.742	40.21	30.29	29.50	0.57
R	0.001	0.002	0.101	0.96	1.92	97.12	0.33
l	53.656	6.591	7.337	79.39	9.75	10.86	0.89
b	6.743	5.532	5.262	38.45	31.54	30.00	0.55
I2	0.000	0.000	0.015	0.00	0.00	100.00	—
M	84.507	49.622	41.522	35.82	22.88	41.30	0.57

[1)] *m*1：单果质量 Single fruit mass；*h*：果高 Fruit height；*D*：果径 Fruit diameter；I1：果形指数 Fruit shape index；*d*：果皮厚度 Pericarp thickness；*n*：单果籽粒数 Seed number per fruit；*m*2：鲜籽质量 Fresh seed mass；R：鲜出籽率 Fresh seed ratio；*l*：种长 Seed length；*b*：种宽 Seed width；I2：种形指数 Seed shape index. M：均值 Mean. —：无数据 No datum.

表 6　越南油茶 18 个居群种实表型性状的 Shannon-Weaver 多样性指数
Table 6　Shannon-Weaver diversity indexes of phenotypic traits of fruits and seeds of 18 populations of *Camellia drupifera* Lour.

居群[1)] Population[1)]	各表型性状的 Shannon-Weaver 多样性指数[2)] Shannon-Weaver diversity index of each phenotypic trait[2)]											均值 Mean
	*m*1	*h*	*D*	I1	*d*	*n*	*m*2	R	*l*	*b*	I2	
P1	1.21	1.60	1.47	1.44	1.25	1.41	1.39	1.45	1.91	1.84	1.67	1.51
P2	0.77	1.41	1.15	2.11	1.35	1.29	1.06	1.93	1.74	1.76	1.69	1.48
P3	1.61	1.86	1.84	1.88	1.75	1.86	1.41	2.09	2.05	2.09	1.79	1.84
P4	1.33	1.65	1.68	2.10	1.50	1.60	1.56	1.78	1.91	1.92	1.61	1.69
P5	0.96	0.73	1.27	1.43	0.64	1.89	1.27	1.52	1.31	1.21	1.52	1.25
P6	1.77	1.77	1.68	2.16	1.78	1.88	1.75	1.61	1.98	2.00	1.95	1.85
P7	1.88	1.81	1.82	1.65	2.01	1.81	1.85	1.95	1.87	1.87	2.02	1.87
P8	1.84	1.78	1.79	1.86	1.78	2.00	1.91	1.84	—	—	—	1.85
P9	1.88	1.77	1.83	1.96	1.86	2.09	1.87	2.01	—	—	—	1.91
P10	1.99	1.92	1.97	1.76	1.84	1.99	1.98	1.84	1.91	1.91	1.87	1.91

续表6 Table 6 (Continued)

居群[1)] Population[1)]	各表型性状的 Shannon-Weaver 多样性指数[2)] Shannon-Weaver diversity index of each phenotypic trait[2)]											均值 Mean
	*m*1	*h*	*D*	I1	*d*	*n*	*m*2	R	*l*	*b*	I2	
P11	0.47	1.20	1.06	1.67	1.33	1.86	0.76	1.95	1.38	1.48	1.80	1.36
P12	1.78	1.80	1.88	1.93	1.83	1.93	1.75	1.90	2.03	1.96	2.08	1.90
P13	1.86	1.88	1.84	1.90	1.58	2.02	1.95	1.88	2.10	2.08	1.77	1.90
P14	1.74	1.92	1.82	1.96	1.81	2.05	1.73	1.99	1.98	2.02	1.92	1.90
P15	1.74	1.72	1.62	1.74	1.79	1.41	1.63	1.67	—	—	—	1.67
P16	1.50	1.63	1.64	1.88	1.72	1.54	1.54	1.71	—	—	—	1.65
P17	1.14	1.11	0.94	1.14	1.42	0.69	1.07	1.39	—	—	—	1.11
P18	1.36	1.26	1.45	1.81	1.40	1.01	1.47	1.66	—	—	—	1.43
均值 Mean	1.49	1.60	1.60	1.80	1.59	1.69	1.55	1.79	1.85	1.85	1.81	1.69

1) P1：中国海南省琼海市会山镇中酒村 Zhongjiu Village, Huishan Town, Qionghai City, Hainan Province, China；P2：中国海南省澄迈县老城镇沙吉村 Shaji Village, Laocheng Town, Chengmai County, Hainan Province, China；P3：中国海南省琼中黎族苗族自治县湾岭镇细水村 Xishui Village, Wanling Town, Qiongzhong Li and Miao Autonomous County, Hainan Province, China；P4：中国广东省茂名市长坡镇大石冲村 Dashichong Village, Changpo Town, Maoming City, Guangdong Province, China；P5：中国广东省高州市林业科学研究所 Gaozhou Institute of Forestry, Gaozhou City, Guangdong Province, China；P6：中国广东省茂名市长坡镇旺沙村 Wangsha Village, Changpo Town, Maoming City, Guangdong Province, China；P7：中国广西壮族自治区凭祥市上石镇弄章屯 Nongzhang Village, Shangshi Town, Pingxiang City, Guangxi Zhuang Autonomous Region, China；P8：中国广西壮族自治区防城港市上思县叫安镇平江村 Pingjiang Village, Jiao'an Town, Shangsi County, Fangchenggang City, Guangxi Zhuang Autonomous Region, China；P9：中国广西壮族自治区防城港市上思县叫安镇三板村 Sanban Village, Jiao'an Town, Shangsi County, Fangchenggang City, Guangxi Zhuang Autonomous Region, China；P10：中国广西壮族自治区凭祥市上石镇马垌村 Madong Village, Shangshi Town, Pingxiang City, Guangxi Zhuang Autonomous Region, China；P11：中国广西壮族自治区柳州市柳北区沙塘镇 Shatang Town, Liubei District, Liuzhou City, Guangxi Zhuang Autonomous Region, China；P12：中国广西壮族自治区防城港市上思县叫安镇那荡村 Nadang Village, Jiao'an Town, Shangsi County, Fangchenggang City, Guangxi Zhuang Autonomous Region, China；P13：中国广西壮族自治区凭祥市上石镇岜存村 Bacun Village, Shangshi Town, Pingxiang City, Guangxi Zhuang Autonomous Region, China；P14：中国广西壮族自治区凭祥市夏石镇夏桐村 Xiatong Village, Xiashi Town, Pingxiang City, Guangxi Zhuang Autonomous Region, China；P15：中国广西壮族自治区玉林市陆川县官山村 Guanshan Village, Luchuan County, Yulin City, Guangxi Zhuang Autonomous Region, China；P16：越南谅山省文官县良能镇 Luong Nang Town, Van Quan County, Lang Son Province, Vietnam；P17：越南谅山省高禄县 Yen Trach 镇润泽基地 Base in Run Ze, Yen Trach Town, Cao Loc County, Lang Son Province, Vietnam；P18：越南谅山省高禄县 Yen Trach 镇烟斋基地 Base in Yan Zhai, Yen Trach Town, Cao Loc County, Lang Son Province, Vietnam.

2) *m*1：单果质量 Single fruit mass；*h*：果高 Fruit height；*D*：果径 Fruit diameter；I1：果形指数 Fruit shape index；*d*：果皮厚度 Pericarp thickness；*n*：单果籽粒数 Seed number per fruit；*m*2：鲜籽质量 Fresh seed mass；R：鲜出籽率 Fresh seed ratio；*l*：种长 Seed length；*b*：种宽 Seed width；I2：种形指数 Seed shape index. —：数据缺失 Missing data.

表7 越南油茶18个居群种实表型性状的主成分分析
Table 7 Principal component analysis on phenotypic traits of fruits and seeds of 18 populations of *Camellia drupifera* Lour.

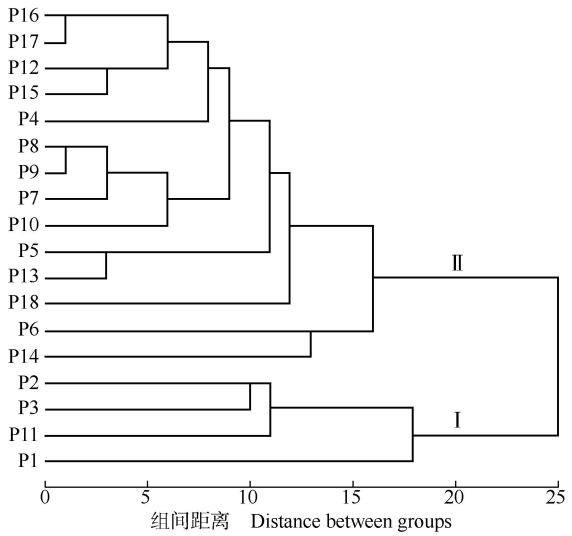
主成分 Principal component	各指标的特征向量[1)] Eigenvector of each index[1)]											特征值 Eigenvalue	贡献率/% Contribution rate	累计贡献率/% Cumulative contribution rate
	*m*1	*h*	*D*	I1	*d*	*n*	*m*2	R	*l*	*b*	I2			
1	0.959	0.925	0.968	−0.152	0.644	0.610	0.886	−0.059	0.705	0.724	0.035	5.334	48.49	48.49
2	−0.100	0.125	−0.153	0.655	−0.121	−0.593	−0.059	0.014	0.554	0.444	0.232	1.407	12.79	61.28
3	−0.019	−0.076	0.005	−0.192	0.084	0.100	−0.061	−0.375	0.264	−0.339	0.903	1.200	10.59	71.87
4	−0.033	−0.144	−0.001	−0.327	−0.415	0.043	0.219	0.765	0.175	0.104	0.272	1.050	8.55	80.42

1) *m*1：单果质量 Single fruit mass；*h*：果高 Fruit height；*D*：果径 Fruit diameter；I1：果形指数 Fruit shape index；*d*：果皮厚度 Pericarp thickness；*n*：单果籽粒数 Seed number per fruit；*m*2：鲜籽质量 Fresh seed mass；R：鲜出籽率 Fresh seed ratio；*l*：种长 Seed length；*b*：种宽 Seed width；I2：种形指数 Seed shape index.

2.5 越南油茶不同居群的聚类分析

基于越南油茶种实表型性状，对18个居群进行聚类分析，结果见图1。结果显示：18个居群可分成2大组，其中，中国海南省琼海市会山镇中酒村(P1)、中国海南省澄迈县老城镇沙吉村(P2)、中国海南省琼中黎族苗族自治县湾岭镇细水村(P3)和中国广西壮族自治区柳州市柳北区沙塘镇(P11)居群聚为Ⅰ组，其余居群聚为Ⅱ组。越南油茶基于种实表型性状的聚类呈现出较强的地理区域特征，中国海南的3个居群聚在一起；中国广西壮族自治区凭祥市上石镇弄章屯(P7)、中国广西壮族自治区防城港市上思县叫安镇平江村(P8)、中国广西壮族自治区防城港市上思县叫安镇三板村(P9)、中国广西壮族自治区凭祥市上石镇马垌村(P10)、P11、中国广西壮族自治区凭祥市上石镇岜存村(P13)、中国广西壮族自治区凭祥市夏石镇夏桐村(P14)居群与广东的3个居

群聚在一起，表明这几个居群的越南油茶呈现交叉分布特性；中国广西壮族自治区防城港市上思县叫安镇



P1：中国海南省琼海市会山镇中酒村 Zhongjiu Village，Huishan Town，Qionghai City，Hainan Province，China；P2：中国海南省澄迈县老城镇沙吉村 Shaji Village，Laocheng Town，Chengmai County，Hainan Province，China；P3：中国海南省琼中黎族苗族自治县湾岭镇细水村 Xishui Village，Wanling Town，Qiongzhong Li and Miao Autonomous County，Hainan Province，China；P4：中国广东省茂名市长坡镇大石冲村 Dashichong Village，Changpo Town，Maoming City，Guangdong Province，China；P5：中国广东省高州市林业科学研究所 Gaozhou Institute of Forestry，Gaozhou City，Guangdong Province，China；P6：中国广东省茂名市长坡镇旺沙村 Wangsha Village，Changpo Town，Maoming City，Guangdong Province，China；P7：中国广西壮族自治区凭祥市上石镇弄章屯 Nongzhang Village，Shangshi Town，Pingxiang City，Guangxi Zhuang Autonomous Region，China；P8：中国广西壮族自治区防城港市上思县叫安镇平江村 Pingjiang Village，Jiao'an Town，Shangsi County，Fangchenggang City，Guangxi Zhuang Autonomous Region，China；P9：中国广西壮族自治区防城港市上思县叫安镇三板村 Sanban Village，Jiao'an Town，Shangsi County，Fangchenggang City，Guangxi Zhuang Autonomous Region，China；P10：中国广西壮族自治区凭祥市上石镇马垌村 Madong Village，Shangshi Town，Pingxiang City，Guangxi Zhuang Autonomous Region，China；P11：中国广西壮族自治区柳州市柳北区沙塘镇 Shatang Town，Liubei District，Liuzhou City，Guangxi Zhuang Autonomous Region，China；P12：中国广西壮族自治区防城港市上思县叫安镇那荡村 Nadang Village，Jiao'an Town，Shangsi County，Fangchenggang City，Guangxi Zhuang Autonomous Region，China；P13：中国广西壮族自治区凭祥市上石镇岜存村 Bacun Village，Shangshi Town，Pingxiang City，Guangxi Zhuang Autonomous Region，China；P14：中国广西壮族自治区凭祥市夏石镇夏桐村 Xiatong Village，Xiashi Town，Pingxiang City，Guangxi Zhuang Autonomous Region，China；P15：中国广西壮族自治区玉林市陆川县官山村 Guanshan Village，Luchuan County，Yulin City，Guangxi Zhuang Autonomous Region，China；P16：越南谅山省文官县良能镇 Luong Nang Town，Van Quan County，Lang Son Province，Vietnam；P17：越南谅山省高禄县 Yen Trach 镇润泽基地 Base in Run Ze，Yen Trach Town，Cao Loc County，Lang Son Province，Vietnam；P18：越南谅山省高禄县 Yen Trach 镇烟斋基地 Base in Yan Zhai，Yen Trach Town，Cao Loc County，Lang Son Province，Vietnam.

图 1　基于种实表型性状的越南油茶 18 个居群聚类图

Fig. 1　Dendrogram of 18 populations of *Camellia drupifera* Lour. based on phenotypic traits of fruits and seeds

那荡村（P12）、中国广西壮族自治区玉林市陆川县官山村（P15）居群与越南谅山省文官县良能镇（P16）、越南谅山省高禄县 Yen Trach 镇润泽基地（P17）居群也呈现交叉分布特性。

2.6　越南油茶种实表型性状与环境因子的相关性分析

结果（表 8）显示：越南油茶单果质量与经度呈显著（$P<0.05$）负相关；果径与经度呈极显著正相关，与 1 月均温呈显著负相关；种长与经度呈极显著正相关，与无霜期呈显著正相关，与年均温呈显著负相关，

表 8　越南油茶 18 个居群种实表型性状与环境因子的相关性

Table 8　Correlations between phenotypic traits of fruits and seeds of 18 populations of *Camellia drupifera* Lour. and environmental factors

表型性状[1)] Phenotypic trait[1)]	相关系数[2)] Correlation coefficient[2)]					
	Long	Lat	Alt	Ff	t_{max}	t_{min}
*m*1	−0.50 *	0.08	−0.04	0.12	0.44	0.27
h	0.34	−0.38	0.29	0.32	−0.19	0.20
D	0.72 **	−0.42	0.40	0.34	−0.25	0.05
I1	0.23	−0.44	0.41	0.22	−0.30	0.16
d	−0.46	−0.03	0.00	−0.33	0.16	0.22
n	−0.12	−0.37	0.45	0.09	−0.23	0.18
*m*2	0.03	0.01	0.21	0.17	−0.38	0.25
R	−0.10	−0.17	−0.05	−0.19	0.32	−0.24
l	1.00 **	−0.19	0.11	0.48 *	−0.27	−0.06
b	−0.19	1.00 **	−0.73 **	−0.12	−0.41	−0.31
I2	0.19	−0.71 **	1.00 **	0.00	0.07	0.09

表型性状[1)] Phenotypic trait[1)]	相关系数[2)] Correlation coefficient[2)]				
	t_a	t_1	t_7	H	P
*m*1	0.37	0.41	0.16	0.28	0.05
h	−0.02	−0.19	0.15	0.19	−0.27
D	−0.31	−0.58 *	0.14	−0.23	−0.45
I1	−0.12	−0.20	−0.09	0.26	−0.24
d	0.37	0.40	−0.07	0.07	0.44
n	−0.02	0.09	−0.27	0.40	−0.14
*m*2	0.10	0.09	0.02	0.26	0.01
R	−0.12	−0.06	−0.16	−0.11	−0.05
l	−0.50 *	−0.85 **	0.34	−0.71 **	−0.45
b	0.04	0.30	−0.02	0.14	0.39
I2	−0.22	−0.36	−0.19	0.01	−0.28

1) *m*1：单果质量 Single fruit mass；*h*：果高 Fruit height；*D*：果径 Fruit diameter；I1：果形指数 Fruit shape index；*d*：果皮厚度 Pericarp thickness；*n*：单果籽粒数 Seed number per fruit；*m*2：鲜籽质量 Fresh seed mass；R：鲜出籽率 Fresh seed ratio；*l*：种长 Seed length；*b*：种宽 Seed width；I2：种形指数 Seed shape index.

2) Long：经度 Longitude；Lat：纬度 Latitude；Alt：海拔 Altitude；Ff：无霜期 Frost-free period；t_{max}：极端最高温 Extreme maximum temperature；t_{min}：极端最低温 Extreme minimum temperature；t_a：年均温 Annual mean temperature；t_1：1 月均温 Mean temperature in January；t_7：7 月均温 Mean temperature in July；H：年均日照时数 Annual mean sunshine hours；P：年均降水量 Annual mean precipitation. *：$P<0.05$；**：$P<0.01$.

与1月均温和年日照时数呈极显著负相关;种宽与纬度呈极显著正相关,与海拔呈极显著负相关;种形指数与纬度呈极显著负相关,与海拔呈极显著正相关。总体来看,与果实相比,种子表型性状与环境因子的相关性更为明显。

3 讨论和结论

3.1 越南油茶种实表型性状的变异特征

本研究中越南油茶18个居群11个种实表型性状的平均变异系数为24.3%,表明越南油茶种实表型性状变异较为丰富。其中,鲜籽质量、单果籽粒数和单果质量的平均变异系数较大,分别为49.0%、42.1%和40.2%,果形指数的平均变异系数最小,仅为8.6%,与贵州小果油茶[21]、浙江红花油茶(*Camellia chekiangoleosa* Hu)[22-23]的变异规律一致。此外,不同居群内不同表型性状的变异系数有一定差异,说明各个居群所在地区的环境异质性导致了表型性状变异的差异。比较发现,越南油茶种实表型性状平均变异系数介于浙江红花油茶(24.4%)[23]、腾冲红花油茶(*Camellia reticulata* f. *simplex* Sealy)(24.8%)[24]、油茶(18.8%~41.0%)[12,25-28]和广宁红花油茶(*Camellia semiserrata* Chi)(18.8%)[29]之间,表明越南油茶种实表型性状变异程度在不同种油茶中处于中等水平。

本研究发现,除种形指数外,越南油茶其余10个种实表型性状无论在居群内还是居群间均存在极显著($P<0.01$)差异,这与小果油茶[25]、野生玫瑰(*Rosa rugosa* Thunb.)[30]、棱果花〔*Barthea barthei* (Hance ex Bentham) Krass.〕[31]、花楸树〔*Sorbus pohuashanensis* (Hance) Hedl.〕[32]和云杉(*Picea asperata* Mast.)[33]的种源变异研究结果类似。

3.2 越南油茶居群种实表型性状的变异来源

越南油茶居群间变异略高于居群内,这与小果油茶的研究结果一致[25]。居群间变异大,表明越南油茶适应的环境范围比较广。二十世纪六十至七十年代期间,越南油茶被作为主要经济作物进行种植,到二十世纪八十至九十年代,越南油茶经济效益不高,被大面积砍伐,种植面积急剧下降,这有可能是越南油茶居群内多样性降低的原因[34]。本研究中,中国广西崇左市、凭祥市、防城港市上思县、玉林市陆川县以及广东高州市、茂名市等地越南油茶大面积分布,其余居群分布较为分散且面积较少,居群间的地理距离较大,主要靠飞行能力弱的昆虫进行传粉或传播种子,不利于居群间的基因交流,由此推断空间隔离是造成居群间表型分化的一个重要原因。其次,越南油茶主要分布在中国广东南部、海南、广西靠近越南边界各县以及越南和老挝[1],其中中国海南的地理位置较特殊,造成了地理和生殖隔离上的变异,以致中国海南与广东、广西等地区居群间基因交流受阻,在一定程度上加剧了种群间的表型变异。植物在居群间保持较大的变异往往具有适应和进化上的意义,因此,越南油茶居群间较大的表型变异可以为遗传变异提供重要的研究线索。在聚类分析中也验证了这一事实,中国海南3个居群的越南油茶与中国广西壮族自治区柳州市柳北区沙塘镇(P11)居群的越南油茶聚为一大类,其余14个居群聚为另一大类,进而形成了一个能够适应当地环境的特有居群。基因组标记和叶绿体基因组标记信息明确了海南地区的油茶资源为越南油茶的特殊生态类型或变种,岛屿效应导致海南地区越南油茶居群谱系分化明显[35-36]。因此,越南油茶居群的复杂性及其适应环境压的广泛程度,是不同环境选择的结果,亦是居群分化的源泉。此外,由于部分居群种子籽粒出现空壳、种仁霉烂现象等原因,造成6个居群的种长、种宽和种形指数数据缺失,这对本研究结果具有一定影响,尽管在聚类分析时采用8个种实表型性状的平均值(种长、种宽及种形指数除外),不会影响居群的整体聚类,但可能会降低个别居群聚类的精准程度。

3.3 影响越南油茶种实表型变异的环境因子

形态特征的变异往往具有适应意义,居群内多种基因型所对应的表型范围很大,从而使居群总体上适应可能遇到的大多数环境情况[37]。本研究发现,越南油茶的单果质量主要受经度影响,随着经度增加,单果质量逐渐降低;种宽主要受纬度和海拔的影响,纬度越高,海拔越低,种宽越大;种形指数与种宽的表现相反;种长的影响因子较多,包括经度、无霜期、年均温、1月均温和年均日照时数,年均温越高,全年日照时间越长,种长越小。总体而言,与果实相比,越南油茶种子表型性状受环境因子影响较大。

3.4 结论

越南油茶种实表型性状(除种形指数外)在居群间和居群内均存在显著差异,且居群间变异略高于居群内,其差异主要表现在单果质量、果高、果径、鲜籽质量、果形指数、种形指数和鲜出籽率。越南油茶种

实表型性状呈现出较强的地理区域特征，此外，与果实相比，种子表型性状受环境因子的影响较大。

参考文献：

[1] 高继银，CLIFFORD R P，杜跃强. 山茶属植物主要原种彩色图集[M]. 杭州：浙江科学技术出版社，2005：175-176.

[2] 杜艳军，周开兵. 越南油茶优良实生单株的筛选[J]. 热带作物学报，2023，44(5)：922-930.

[3] 王珮璇，陈　静，郭钰柬，等. 越南油茶实生优株选择与产区初步评价[J]. 经济林研究，2021，39(4)：246-255.

[4] 韦靖杰，潘晓芳，覃　镇，等. 陆川油茶现蕾期至谢花期主要器官中内源激素的变化规律[J]. 经济林研究，2001，39(2)：123-131.

[5] 戴艳花. 陆川油茶子代叶片及果实表型性状差异初步研究[D]. 南宁：广西大学，2020：1.

[6] 李　斌，顾万春，卢宝明. 白皮松天然群体种实性状表型多样性研究[J]. 生物多样性，2002，10(2)：181-188.

[7] 孟益德，杜红岩，王　璐，等. 杜仲种质资源叶片表型性状多样性分析[J]. 林业科学研究，2022，35(5)：103-112.

[8] 钟声远，罗宇婷，赵　勇，等. 切菊花品种资源表型多样性分析[J]. 植物资源与环境学报，2021，30(5)：22-33.

[9] 刘青青，李雄杰，马亚琼，等. 青海野生中国沙棘资源表型性状多样性分析[J]. 植物遗传资源学报，2023，24(4)：1057-1064.

[10] HAO B Q，LIAO H Z，XIA Y Y，et al. BSR and full-length transcriptome approaches identified candidate genes for high seed ratio in *Camellia vietnamensis*[J]. Current Issues in Molecular Biology，2023，45：311-326.

[11] 张应中，徐煲铧，王明怀，等. 高州油茶果实生长性状与品质的动态变化规律[J]. 林业与环境科学，2020，36(1)：47-52.

[12] 张　鹏，杨　颖，奚如春，等. 高州油茶种群叶片性状变异分析[J]. 林业与环境科学，2018，34(5)：13-19.

[13] 戚嘉敏，张　鹏，奚如春，等. 高州油茶果实性状的遗传变异特征[J]. 中南林业科技大学学报，2018，38(4)：108-113.

[14] 戚嘉敏. 高州油茶果实生长发育及主要经济性状特征[D]. 广州：华南农业大学，2018：26.

[15] 叶　航，郭　飞，黄彩丽，等. 陆川油茶种质资源评价与优良单株筛选[J]. 广西林业科学，2014，43(1)：1-4.

[16] 中华人民共和国民政部，中华人民共和国建设部. 中国县情大全：中南卷[M]. 北京：中国社会出版社，1992：1276-1759.

[17] 吕荣华，高国庆，李丹婷，等. 越南农业生产概况[J]. 南方农业学报，2011，42(5)：562-565.

[18] 周　龙. 野生樱桃李群落特征及种质资源遗传多样性研究[D]. 乌鲁木齐：新疆农业大学，2011：40.

[19] 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.

[20] 黄　勇，谢一青，李志真，等. 小果油茶表型多样性分析[J]. 植物遗传资源学报，2014，15(2)：270-278.

[21] 朱亚艳，姚　渊，徐嘉娟，等. 贵州小果油茶种实表型性状多样性分析[J]. 贵州农业科学，2016，44(11)：125-129.

[22] 刘子雷，杨水平，姚小华，等. 浙江红花油茶果实形态变异研究[J]. 林业科学研究，2007，20(2)：263-266.

[23] 周文才，王仲伟，董　乐，等. 浙江红花油茶种实性状多样性分析[J]. 南京林业大学学报(自然科学版)，2021，45(2)：51-59.

[24] 靳高中，任华东，姚小华，等. 滇西腾冲红花油茶天然居群种实表型性状变异分析[J]. 南京林业大学学报(自然科学版)，2013，37(6)：53-58.

[25] 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.

[26] 程　离，夏建梅，胡冬南，等. 河南新县野生油茶群体表型变异特征研究[J]. 河南农业大学学报，2020，54(1)：52-58.

[27] 林伟才. 普通油茶无性系表型性状的变异分析及选择[D]. 福州：福建农林大学，2020：15.

[28] 徐嘉娟，朱亚艳，王　港. 望谟红球油茶种实表型变异分析[J]. 种子，2018，37(5)：49-53.

[29] 丁晓纲，张应中，陈清凤，等. 广宁红花油茶果实性状的遗传变异规律[J]. 经济林研究，2012，30(2)：23-27.

[30] 童　冉，吴小龙，姜丽娜，等. 野生玫瑰种群表型变异[J]. 生态学报，2017，37(11)：3706-3715.

[31] 徐　斌，易礼江，林子湛，等. 我国棱果花天然主要分布区叶片多样性分析[J]. 热带亚热带植物学报，2023，31(2)：173-180.

[32] 郑　健，郑勇奇，宗亦尘，等. 花楸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.

[33] 罗建勋，顾万春. 云杉天然群体表型多样性研究[J]. 林业科学，2005，41(2)：66-73.

[34] 王珮璇. 海南省不同油茶产区和树龄对越南油茶经济性状的影响[D]. 海口：海南大学，2022：9.

[35] QI H S，SUN X X，YAN W P，et al. Genetic relationships and low diversity among the tea-oil *Camellia* species in Sect. *Oleifera*，a bulk woody oil crop in China[J]. Frontiers in Plant Science，2022，13：996731.

[36] QI H S，SUN X X，WANG C M，et al. Geographic isolation causes low genetic diversity and significant pedigree differentiation in populations of *Camellia drupifera*，a woody oil plant native to China[J]. Industrial Crops and Products，2023，192：116026.

[37] 竺利波，顾万春，李　斌. 紫荆群体表型性状多样性研究[J]. 中国农学通报，2007，23(3)：138-145.

(责任编辑：吴芯夷)