

琴叶风吹楠叶片性状变异分析

李小琴,张凤良,毛常丽,杨 洵,邱彦芬,杨晓玲,吴 裕*

(云南省热带作物科学研究所,云南 景洪 666100)

摘要:对琴叶风吹楠8个家系2年生苗木叶片的14个性状进行测定,分析了家系间和家系内叶片性状遗传变异规律。结果表明,琴叶风吹楠家系间和家系内各叶片性状存在不同程度的遗传变异,家系内变异系数平均变幅为8.82%~29.94%,家系间变幅为4.75%~30.30%,其中脉左宽/叶宽、叶脉数变异程度最小,叶面积和叶基角变异程度较大;各叶片性状在家系间和家系内(除脉左宽/叶宽外)差异性均达到极显著水平,家系间的表型分化系数(43.18%)略低于家系内,家系内变异是其主要来源,说明琴叶风吹楠对生存环境的适应范围相对较窄;叶片性状各指标间存在错综复杂的关系,大多两两间达到显著或极显著相关;主成分分析结果表明,琴叶风吹楠叶片性状变异主要表现为3个综合因子,即叶片大小、叶片形状及叶片质地。

关键词:琴叶风吹楠;家系;叶片性状;遗传变异

中图分类号:S722 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-7461(2017)02-0143-07

Variation Analysis on Leaf Traits of *Horsfieldia pandurifolia*

LI Xiao-qin, ZHANG Feng-liang, MAO Chang-li, YANG Tian, QIU Yan-fen, YANG Xiao-ling, WU Yu*

(Yunnan Institute of Tropical Crops, Jinghong, Yunnan 666100, China)

Abstract: The 14 leaf traits of two-year seedlings from 8 *Horsfieldia pandurifolia* families were determined, and the genetic variations of leaf traits among different families and within the family were analyzed. The results showed that varying degrees of genetic variations existed in leaf traits among families and within the family. The average range of variation coefficient in family was from 8.82% to 29.94%, among families was from 4.75% to 30.30%. The ratio of the leaf width on the left of main vein to leaf width and leaf vein number had the minimum variation. Variations of leaf area and leaf base angle were larger. Highly significant difference of leaf traits (except for the ratio of the leaf width on the left of main vein to leaf width) existed among families and within the family. The phenotypic differentiation coefficient among families (43.18%) was slightly lower than within the family, the main source of variation came from the family which indicated that the adaptive range of the living environment for *H. pandurifolia* was relatively narrow. There were intricate relationships in leaf traits, mostly reached significant or extremely significant correlation level. Principal component analysis showed that the leaf traits variations of *H. pandurifolia* mainly were decided by three comprehensive factors, including leaf size, shape and texture.

Key words: *Horsfieldia pandurifolia*; family; leaf trait; genetic variation

植物叶片与植株生物量、植物对资源的获得、利用和利用效率的关系最为密切,能够反映植物适应

环境变化所形成的生存对策^[1-2],其中叶片性状的多样性与整个植物和生态系统的结构及功能相关^[3-4]。

收稿日期:2016-08-16 修回日期:2016-11-02

基金项目:国家自然科学基金课题“特殊油料树种琴叶风吹楠分类学位置及遗传多样性研究”(31560214);云南省院所研发专项(2015DC026)。

作者简介:李小琴,女,硕士,助理研究员,研究方向:林木遗传育种。E-mail:sclixq2011@163.com

*通信作者:吴 裕,男,硕士,研究员,研究方向:热带植物遗传育种与种质资源学。E-mail:hhyyw20030105@126.com

叶片的表型性状变异亦是植物遗传变异和环境差异的共同反映,在生理生态、森林培育、遗传育种等多个研究领域均有涉及^[5-8]。

琴叶风吹楠(*Horsfieldia pandurifolia*)是肉豆蔻科高大乔木,濒危种,属典型的热带雨林树种^[9-11],具有树干通直、材积量大、种子含油率高等特点,是不可多得的重要能源树种^[12-15]。目前,关于琴叶风吹楠的资源调查、分类、生物学特性、种子变异及萌发习性等方面的研究见一些报道^[16-17],而对琴叶风吹楠种内叶片性状变异分析尚未见报道。以采自西双版纳和普洱等地热带雨林中4个分布点的种子,以家系为单位进行播种繁殖保存,对各家系2年生苗木叶片性状进行测定,分析家系间和家系内的变异情况,以期为琴叶风吹楠的种质资源保护及开发利用提供研究基础。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于云南省热带作物科学研究所(100°40'—100°50'E,21°59'—22°01'N),海拔约550 m,年平均气温18.6℃~21.9℃,最冷月份平均气温15.6℃,最热月份平均气温25.2℃,年平均降雨量约1 200 mm,土壤为酸性红土,pH值4.5~5.5,适合琴叶风吹楠正常生长。

1.2 材料

于2014年4—6月,从西双版纳州的4个分布点按同一地段内株间距离>50 m以上的原则调查采集到8株琴叶风吹楠的成熟种子,按株行距30 cm×40 cm直接播种于云南省热带作物科学研究所苗圃地内。苗圃采用遮阴网遮阴,常规育苗管理。各家系采种母树的基本信息见表1。

表1 琴叶风吹楠采种母树基本信息

Table 1 Basic information of *H. pandurifolia* seed trees

序号(家系号)	采集地点	经度	纬度	海拔/m
1(20090308)	景洪纳版河	100°37.000'	22°10.125'	800
2(20090310)	景洪纳版河	100°39.304'	22°10.063'	746
3(20090511)	勐腊勐仑	101°10.145'	21°58.794'	979
4(20100403)	澜沧寨罕大桥	99°46.956'	23°12.521'	1 000
5(20140438)	景洪纳版河	100°38.840'	22°10.189'	817
6(20140440)	勐腊勐伴	101°36.069'	21°50.830'	1 114
7(20140453)	勐腊勐仑	101°11.187'	22°00.000'	960
8(20140454)	勐腊勐仑	101°11.100'	21°58.400'	1 000

1.3 方法

于2016年5月,每个家系选择20个单株,从一级分枝中部采集健康成熟叶片,每一分枝采集5片,每株共计25片,带回实验室逐一测定每片叶子的各项性状指标(表2)。其中,叶片干重用1/10 000天

平称量,同时计算叶柄长/叶长、宽基距/叶长、脉左宽/叶宽、比叶面积、长宽比等参数。

表2 琴叶风吹楠叶片性状指标与测定标准

Table 2 Indicators and measurement standards of leaf traits in *H. pandurifolia*

叶片性状	测定标准	测量工具
叶长/cm	叶基部到叶尖的垂直距离	YMJ-D 叶面积仪
叶宽/cm	叶片最宽处	YMJ-D 叶面积仪
叶面积/cm ²	—	YMJ-D 叶面积仪
叶柄长/叶长	叶柄长与叶长比值	—
宽基距/叶长	宽基距与叶长比值	—
脉左宽/叶宽	脉左宽与叶宽比	—
叶厚/mm	5片为一组,层叠测量后取平均值	游标卡尺
叶脉数/条	到达叶边缘的左右两侧叶脉总数	—
叶尖角/(°)	叶尖处叶片边缘与叶片主脉的夹角	量角仪
叶基角/(°)	叶基部叶片边缘与叶片主脉的夹角	量角仪
比叶面积/(cm ² ·g ⁻¹)	叶面积与叶片干重的比值	—
长宽比	叶长与叶宽比值	—
宽基距/cm	叶最宽处距叶基距离	直尺
脉左宽/cm	叶最宽处左缘到主脉的距离	直尺

1.4 数据处理与统计分析

性状变异特征:统计各性状的平均值(Mean)、最小值(Min)、最大值(Max)、变异系数(CV)等,用变异系数表示表型性状的离散程度。

方差分析和表型分化系数:用SAS软件对各数量性状采用巢式设计进行方差分析,线性模型为 $Y_{ijk} = u + S_i + T_{(ij)} + e_{(ijk)}$ 。式中, Y_{ijk} 为第*i*个群体第*j*个单株第*k*个观测值; u 为总均值; S_i 为群体效应(固定); $T_{(ij)}$ 为群体内单株效应(随机); $e_{(ijk)}$ 为试验误差。表型分化系数计算公式: $V_s = \frac{\delta_{t/s}}{\delta_{t/s}^2 + \delta_s^2} \times 100\%$ 。式中, $\delta_{t/s}^2$ 为群体间方差分量, δ_s^2 为群体内方差分量, V_s 为表型分化系数^[18-19]。

运用SPSS17.0分析软件做统计分析,其中用Pearson相关系数检验叶片各性状之间的相关性及主成分分析法(Principal components)做因子分析。

2 结果与分析

2.1 叶片性状家系间及家系内变异分析

用单株均值对琴叶风吹楠8个家系叶片的14个表型性状进行了统计分析(表3)。结果表明,家系间叶片性状变化较大,其变幅为4.75%~

30.30%,表现为叶面积(30.30%)>叶柄长/叶长(24.45%)>叶基角(20.41%)>比叶面积(15.68%)>宽基距/叶长(15.34%)>叶长(14.15%)>宽基距(12.73%)>叶尖角(11.05%)>长宽比(10.81%)>脉左宽(10.71%)>叶宽(10.59%)>叶厚(9.32%)>叶脉数(8.20%)>脉左宽/叶宽(4.75%)。家系间叶面积的变异系数最大(30.30%),变幅为130.89~211.59 cm²;叶柄长/叶长(24.45%)和叶基角(20.41%)2个叶片性状变异系数也较大;脉左宽/叶宽变异系数最小(4.75%),变幅为0.49~0.50,叶片多为对称叶;叶脉数的变异程度也较小(8.20%),变幅为17.10~

20.27条;叶长和叶宽的变异程度处于中等水平,叶长是叶宽的2.13倍,叶形表现为倒卵状长椭圆形或近提琴形;叶最宽处约位于叶片从叶基到叶尖的2/3处,即叶最宽处多在叶片中部到叶片先端的位置变化;叶基角的变异比叶尖角大,基部形态丰富多变,部分叶片基部成近直角,叶基角约为叶尖角的2倍,多表现为先端渐尖,基部楔形或圆钝。

各家系内叶片性状变异系数存在一定差异,家系内均值变幅为8.82%~29.94%,且多数性状表现出家系内变异程度比家系间的要高。少数几个指标如叶面积和叶基角家系间变异程度比家系内高,且这2个性状的变异系数都较大。

表3 琴叶风吹楠家系间及家系内叶片性状离散程度分析

Table 3 Discrete degree analysis of leaf traits from different families and within the family in *H. pandurifolia*

叶片性状	变异特征	家系代号								家系内均值	家系间均值
		1	2	3	4	5	6	7	8		
叶长	均值	22.60	24.24	19.87	22.58	25.30	21.20	21.16	25.65	22.82	22.82
	变异系数	13.42	17.51	28.52	9.85	13.17	16.32	17.62	15.97	16.55	14.15
	最小值	12.79	14.97	11.75	16.28	17.32	12.44	13.83	15.75	14.39	19.87
叶宽	均值	10.50	11.23	9.81	10.54	10.75	9.91	10.99	12.27	10.75	10.75
	变异系数	11.85	14.37	16.33	11.76	11.71	13.59	11.03	11.23	12.73	10.59
	最小值	6.90	9.34	7.13	7.29	7.56	7.34	8.95	8.46	7.87	9.81
叶面积	均值	145.39	178.41	130.89	150.99	168.17	139.02	147.82	211.59	159.04	158.99
	变异系数	28.05	31.18	43.87	21.48	27.90	32.06	29.63	25.36	29.94	30.30
	最小值	97.61	103.90	104.43	102.71	105.75	107.94	123.76	113.42	107.44	130.89
叶柄长/叶长	均值	0.11	0.11	0.14	0.14	0.10	0.11	0.12	0.10	0.12	0.12
	变异系数	29.30	27.94	34.82	33.15	24.37	24.47	18.56	25.48	27.26	24.45
	最小值	0.08	0.07	0.09	0.07	0.08	0.08	0.11	0.08	0.08	0.10
宽基距/叶长	均值	0.21	0.25	0.16	0.20	0.14	0.14	0.13	0.12	0.17	0.14
	变异系数	0.58	0.61	0.75	0.55	0.55	0.59	0.66	0.65	0.62	0.62
	最小值	0.51	0.49	0.51	0.51	0.53	0.49	0.61	0.57	0.53	0.55
脉左宽/叶宽	均值	0.66	0.80	0.89	0.79	0.81	0.73	0.73	0.80	0.78	0.75
	变异系数	0.49	0.49	0.49	0.49	0.49	0.50	0.50	0.50	0.49	0.49
	最小值	0.31	0.40	0.34	0.48	0.48	0.49	0.49	0.48	0.43	0.49
叶厚	均值	0.74	0.63	0.72	0.51	0.50	0.53	0.57	0.53	0.59	0.50
	变异系数	0.31	0.26	0.29	0.37	0.29	0.29	0.31	0.30	0.30	0.30
	最小值	0.22	0.20	0.21	0.22	0.25	0.22	0.25	0.23	0.23	0.26
叶脉数	均值	0.38	0.36	0.36	0.47	0.36	0.37	0.37	0.39	0.38	0.37
	变异系数	18.62	18.07	17.94	17.10	19.18	17.88	17.97	20.27	18.38	18.38
	最小值	11.10	14.16	11.72	11.82	14.32	10.64	10.58	11.78	12.01	8.20
叶尖角	均值	12.87	11.87	12.87	11.87	11.87	13.87	11.87	13.87	12.62	17.10
	变异系数	23.15	24.00	23.15	23.15	24.15	23.00	23.15	26.00	23.72	20.27
	最小值	33.33	31.23	31.75	36.63	33.94	32.01	31.78	31.88	32.82	32.82
叶基角	均值	18.66	17.47	21.66	17.78	18.78	14.00	9.07	16.50	16.74	11.05
	最小值	19.61	14.87	14.87	23.87	19.87	19.87	24.87	19.87	19.71	31.23

续表 3

叶片 性状	变异 特征	家系代号								家系内 均值	家系间 均值
		1	2	3	4	5	6	7	8		
叶尖角	最大值	40.78	50.30	57.00	58.00	59.15	46.15	40.15	45.15	49.59	36.63
叶基角	均值	47.74	45.13	42.84	50.44	51.35	58.42	65.64	69.70	53.91	53.91
	变异系数	16.38	15.53	14.88	15.17	17.27	18.45	13.75	17.27	16.09	20.41
	最小值	28.00	29.87	25.87	21.87	31.87	35.87	46.15	44.87	33.05	34.94
	最大值	68.15	63.00	63.00	70.15	80.15	90.00	82.15	90.00	75.83	69.70
比叶面积	均值	83.39	87.46	88.03	102.93	79.13	95.94	85.24	108.31	91.30	91.34
	变异系数	23.47	17.40	34.63	12.59	14.37	18.14	19.06	28.78	21.06	15.68
	最小值	70.74	54.81	62.40	91.73	80.23	79.60	74.99	85.42	74.99	79.13
	最大值	150.31	121.30	126.43	117.48	118.74	111.20	126.59	61.133.95	125.63	108.31
长宽比	均值	2.17	2.17	2.03	2.16	2.37	2.15	1.93	2.09	2.13	2.13
	变异系数	12.51	15.39	24.34	10.91	13.39	13.82	16.40	13.22	15.00	10.81
	最小值	1.22	1.35	1.39	2.00	2.04	1.82	1.62	1.89	1.67	1.93
	最大值	2.80	3.07	3.22	2.41	2.67	2.48	2.21	2.29	2.64	2.37
宽基距	均值	13.06	14.69	13.99	12.45	14.00	12.28	13.87	16.40	13.84	13.84
	变异系数	11.64	14.61	19.72	10.93	14.20	14.73	13.06	13.19	14.01	12.73
	最小值	7.97	9.87	10.26	6.87	9.67	8.63	10.97	11.97	9.53	12.28
	最大值	17.50	21.65	24.30	16.25	20.50	17.45	18.75	22.70	19.89	16.40
脉左宽	均值	5.17	5.54	4.82	5.23	5.29	4.94	5.47	6.09	5.32	5.32
	变异系数	12.84	14.08	16.62	12.57	12.32	14.15	11.33	11.53	13.18	10.71
	最小值	3.57	3.57	3.07	3.57	3.87	3.07	4.47	4.17	3.67	4.82
	最大值	9.00	8.15	6.95	8.00	7.00	6.85	7.75	8.00	7.71	6.09

2.2 叶片性状变异来源及分化系数

2.2.1 叶片性状方差分析 采用巢式设计方差分析研究了琴叶风吹楠在家系间和家系内 2 个层次的差异显著性(表 4)。由表 4 可以看出,除脉左宽/叶宽在家系内和家系间差异均未达到显著水平外,其余的 13 个叶片性状在家系间和家系内差异均达到极显著水平,进一步说明琴叶风吹楠叶片形态在家系间和家系内存在广泛差异。

2.2.2 叶片性状表型分化系数 按巢式设计方差分量比组成,进一步分析出各方差分量占总变异的比例(表 5)。根据 8 个家系 14 个叶片表型性状的平均值,家系间的方差分量占总变异的 21.69%,家系内的占 23.47%,环境随机误差占 54.84%。14 个性状的表型分化系数变幅为 0.74%~72.37%,其中叶基角(72.37%)、叶面积(63.09%)、宽基距(55.90%)、宽基距/叶长(51.47%)和比叶面积

表 4 琴叶风吹楠叶片性状方差分析

Table 4 Variance analysis of leaf traits in *H. pandurifolia*

性状	均方 <i>Ms</i>			F 值		
	家系间	家系内	随机误差	家系间	家系内	
叶长	872.009	69.479	9.090	12.550**	7.640**	
叶宽	121.755	7.813	1.270	15.580**	6.150**	
叶面积	97 423.000	7 058.325	1 278.035	14.530**	5.240**	
叶柄长/叶长	0.043	0.006	0.001	6.850**	9.120**	
宽基距/叶长	0.919	0.053	0.013	17.220**	4.250**	
脉左宽/叶宽	0.002	0.002	0.001	1.030	1.280	
叶厚	0.210	0.004	0.000	54.560**	9.050**	
叶脉数	203.251	15.516	3.836	13.100**	4.050**	
叶尖角	684.759	107.626	23.379	6.360**	4.600**	
叶基角	18 656.000	395.141	46.589	47.210**	8.480**	
比叶面积	20 372.000	1 283.701	348.690	15.870**	3.680**	
长宽比	2.012	0.421	0.067	5.013**	5.831**	
宽基距	364.420	16.433	2.688	22.180**	6.110**	
脉左宽	31.185	1.936	0.328	16.110**	5.900**	

注: ** 表示在 $\alpha=0.01$ 水平上差异显著; 家系间自由度 $df=7$, 家系内 $df=152$, 误差 $df=3 840$ 。

(50.52%)等5个指标家系间表型分化系数大于家系内,但14个叶片性状的家系间平均表型分化系数为43.18%,即有56.82%的琴叶风吹楠叶片性状是由家系内变异引起的,故家系内变异为琴叶风吹楠的叶片性状的主要来源。

结合家系间总体变异程度来看,家系间各叶片

性状总体变异系数与表型分化系数有一定的联系,除叶柄长/叶长、叶脉数等少数几个指标外,琴叶风吹楠大部分叶片性状都表现为家系间表型分化系数大的相应地变异系数也较大,其中叶基角、叶面积等指标家系间表型分化系数较大对应的变异系数也很大。

表5 琴叶风吹楠叶片性状表型分化系数

Table 5 Phenotypic differentiation coefficient of leaf traits in *H. pandurifolia*

性状	方差分量			方差分量百分比/%			表型分化系数/%
	群体间	群体内	随机误差	群体间	群体内	随机误差	
叶长	4.013	6.039	9.090	20.963	31.549	47.488	39.92
叶宽	0.570	0.654	1.270	22.843	26.240	50.919	46.54
叶面积	943.109	577.425	1 362.176	33.416	19.546	47.038	63.09
叶柄/叶长	0.000	0.001	0.001	12.830	39.072	48.098	24.72
宽基距/叶长	0.004	0.004	0.013	20.652	19.473	59.875	51.47
脉左宽/叶宽	0.000	0.000	0.001	0.020	2.680	97.300	0.74
叶厚	0.001	0.001	0.000	28.105	30.645	41.250	47.84
叶脉数	0.939	1.168	3.836	15.797	19.657	64.547	44.56
叶尖角	2.886	8.425	23.379	8.319	24.286	67.395	25.51
叶基角	91.303	34.855	46.589	52.854	20.177	26.970	72.37
比叶面积	95.443	93.501	348.690	17.753	17.391	64.856	50.52
长宽比	0.015	0.030	0.067	17.076	28.866	54.058	33.72
宽基距	1.740	1.375	2.688	29.986	23.659	46.325	55.90
脉左宽	0.146	0.161	0.328	23.037	25.325	51.639	47.63
均值	—	—	—	21.689	23.469	54.840	43.18

2.3 叶片性状相关性分析

由表6可以看出,决定叶片大小的叶长、叶宽及叶面积3个指标两两呈极显著正相关;叶长、叶宽、宽基距和脉左宽等4个指标间呈两两极显著正相关,且这些指标与叶尖角及叶基角大多呈显著相关或极显著相关,这一系列指标大致决定了叶片的形状;叶厚与大多数指标间相关性不显著,仅与叶尖角、叶基角、比叶面积、宽基距等显著相关,其中,比叶面积与叶厚成负相关,一般较厚的叶片其比叶面

积通常小一些,这与前人研究结果相一致^[2,20],叶厚与这些指标共同决定了叶片的质地。

2.4 叶片性状主成分分析

为了避免信息的大量重叠,由于叶尖角和叶基角可以通过叶长、叶宽、宽基距、脉左宽等指标综合反映出。另外,测量脉左宽是为了衡量叶的对称性,用脉左宽/叶宽表示,测量宽基距是为了衡量叶的最宽处所处的位置,用宽基距/叶长表示。因此,对叶片性状做主成分分析时采用除叶尖角、叶基角、宽基

表6 琴叶风吹楠叶片各性状相关性分析

Table 6 Correlation analysis of each character of leaf traits in *H. pandurifolia*

性状	叶长	叶宽	叶面积	叶柄长 /叶长	宽基距 /叶长	脉左宽 /叶宽	叶厚	叶脉数	叶尖角	叶基角	比叶面积	长宽比	宽基距
叶宽	0.659**												
叶面积	0.871**	0.858**											
叶柄长/叶长	-0.455**	-0.192*	-0.240**										
宽基距/叶长	-0.573**	-0.125	-0.353**	-0.228**									
脉左宽/叶宽	-0.125	-0.091	-0.125	0.136	0.104								
叶厚	-0.022	-0.036	-0.059	0.182*	-0.250**	0.062							
叶脉数	0.405**	0.395**	0.403**	-0.236**	0.070	0.051	-0.089						
叶尖角	0.120	0.242**	0.249**	0.288**	-0.359**	0.034	0.309**	-0.018					
叶基角	0.127	0.410**	0.255**	-0.303**	-0.007	0.158*	0.125	0.298**	0.010				
比叶面积	0.166*	0.234**	0.278**	-0.047	-0.037	0.024	-0.152*	0.015	0.029	0.310**			
长宽比	0.669**	-0.113	0.296**	-0.432**	-0.639**	-0.056	0.004	0.143	-0.075	-0.231**	-0.004		
宽基距	0.571**	0.634**	0.629**	-0.367**	0.331**	-0.021	-0.249**	0.528**	-0.230**	0.171*	0.165*	0.130	
脉左宽	0.628**	0.972**	0.821**	-0.171*	-0.105	0.137	-0.027	0.397**	0.246**	0.441**	0.238**	-0.121	0.626**

注: ** 表示在 $\alpha=0.01$ 水平上相关性显著, * 表示在 $\alpha=0.05$ 水平上相关性显著。

距和脉左宽等之外的其余 10 个叶片性状进行统计分析(表 7)。结果表明,第 1、2、3 个主成分累计贡献率达到 85.507%。根据各指标的特征向量可知,第 1 主成分中叶长、叶宽及叶面积等 3 个变量的系数较大,第 1 主成分是叶片大小的综合体现,且叶长的系数最大,叶片的大小受叶长影响最大;第 2 主成分中宽基距/叶长、脉左宽/叶宽及长宽比等 3 个变量的系数较大,这 3 个指标大致反映了叶片的形状,具体体现在叶的对称性、叶最宽处所处的位置及叶片形状变化的趋势;第 3 主成分中叶厚和比叶面积等 2 个变量的系数较大,这 2 个指标综合反映了叶片的质地。

表 7 琴叶风吹楠叶片性状主成分分析

Table 7 The principal component analysis of leaf traits in *H. pandurifolia*

项目	特征向量		
	第 1 主成分	第 2 主成分	第 3 主成分
特征根	3.523	2.039	1.670
贡献率/%	35.225	29.955	20.327
累计贡献率/%	35.225	65.180	85.507
叶长 X_1	0.976	-0.065	0.038
叶宽 X_2	0.703	0.605	0.139
叶面积 X_3	0.889	0.322	0.124
叶柄长/叶长 X_4	-0.529	0.213	0.445
宽基距/叶长 X_5	-0.375	0.632	-0.272
脉左宽/叶宽 X_6	-0.026	0.899	0.180
叶厚 X_7	-0.027	-0.229	0.777
叶脉数 X_8	0.475	0.398	-0.274
比叶面积 X_9	0.245	0.244	0.730
长宽比 X_{10}	0.598	-0.689	-0.136

3 结论与讨论

形态表型性状受遗传组成和生态环境等两方面的影响,是生物适应其生存环境的表现形式^[21],表型性状变异在植物适应策略和进化上有重要意义^[22]。植物群体中保持较大的变异蓄积对群体是有利的,群体内多种基因型所对应的表型范围很广,从而使群体在整体上适应可能遇到的不同的环境条件^[23]。在植物体表型性状中,叶片性状与植物的营养、生理以及生态因子等密切相关,前人对植物叶片性状的变异情况也做了大量的研究。杭夏子^[24]等分析了 5 种华南常用园林灌木的叶片特征,表明其所选叶片特征对环境变化均有一定的响应,且不同树种上有明显的差异;杨自湘^[25]等用 16 个叶片性状指标证实了杨树长枝的叶片形态特征在单株内比较稳定,可以区分株间差异;何承忠^[26]等用 6 个叶片性状证实了采集于不同地区的 52 株滇杨优树无

性系苗期存在不同程度的遗传变异;张春霞^[27]等对欧洲黑杨与川杨和滇杨的杂交子代苗期叶片性状研究发现子代叶片性状处于 2 个亲本叶片性状之间。对于缺少研究基础的物种,通过对其表型性状遗传差异的研究,能够快速揭示该物种的遗传多样性问题。

本研究结果表明,琴叶风吹楠叶片性状在家系间和家系内均存在显著差异(脉左宽/叶宽除外)。14 个叶片性状家系内变异系数平均变幅为 8.82%~29.94%,家系间变幅为 4.75%~30.30%,家系内和家系间均存在丰富的叶片表型性状变异。其中,叶面积和叶基角变异程度都比较大,受外界环境影响更为明显,而脉左宽/叶宽、叶脉数等变异程度最小,从形态上也能看出属于典型的对称叶、叶脉分布均匀,具有较高的稳定性。居群间的变异能够反映地里与生殖隔离上的差异,同时也是种内多样性的重要组成部分,其值大小在一定程度上反映该生物对不同环境的适应程度,值越大则适应环境的能力越强^[28],琴叶风吹楠叶片性状的表型分化程度家系间(43.18%)略低于家系内(56.82%),家系内变异是其主要来源,琴叶风吹楠对生存环境的适应范围相对来说窄一些,这印证了该树种自然分布区范围窄这一事实。因此,对于大多数叶片性状而言,进行单株选择培育无性系是比较有效的途径,但对于叶基角和叶面积等少数几个指标,家系间的表型分化系较大。在家系选择的基础上进行单株选择效果更好,具体到不同的群体变异情况,需进一步研究分析。

琴叶风吹楠叶片性状各指标间存在着错综复杂的相关性,其中,决定叶片大小的叶长、叶宽及叶面积等指标两两呈极显著正相关;决定叶片形状的叶长、叶宽、宽基距、脉左宽、叶尖角及叶基角等指标间大多两两显著相关;比叶面积与叶厚成负相关;结合主成分分析结果,大致可以把琴叶风吹楠叶片性状分成 3 大类,即叶片大小、叶片形状和叶片质地。

研究种内表型变异模式对种间及种内分类鉴定、生物多样性保护、种质资源收集与利用、遗传育种等有重要作用^[29~33]。琴叶风吹楠属于濒危树种,种质资源还未得及收集和保存,就遭到了严重的破坏。前期一些研究表明,虽然琴叶风吹楠种群数量很小,但是种内依然蕴藏着丰富的遗传变异^[29,34~35],本文所做的叶片性状变异也印证了这一观点。因此,很有必要对其进行加大收集保存力度,从多角度入手研究其遗传多样性的丰富度,为其种内遗传多样性的保护及优良基因型的挖掘利用奠定基础。

参考文献:

- [1] VENDRAMINI F, DÍAZ S, GURVICH D E, et al. Leaf traits as indicators of resource-use strategy in floras with succulent species[J]. *New Phytologist*, 2002, 154(1): 147-157.
- [2] VORONIN P Y, IVANOVA L A, RONZHINA D A, et al. Structural and functional changes in the leaves of plants from steppe communities as affected by aridization of the eurasian climate[J]. *Russian Journal of Plant Physiology*, 2003, 50(5): 604-611.
- [3] 张林,罗天祥.植物叶寿命及其相关叶性状的生态学研究进展[J].*植物生态学报*,2004,28(6):844-852.
ZHANG L, LUO T X. Advances in ecological studies on leaf lifespan and associated leaf traits[J]. *Acta Phytoecology Sin.*, 2004, 28 (6): 844-852. (in Chinese)
- [4] 王英姿,洪伟,吴承祯,等.灵石山米槠林优势种群不同叶龄叶属性的研究[J].*福建林学院学报*,2009,29(3):203-209.
WANG Y Z, HONG W, WU C Z, et al. Research on leaf traits for different age leaves of dominant species in *Casstanopsis carlessi* forests in Lingshishan National Forest Park[J]. *J. Fujian Coll. of For.*, 2009, 29(3): 203-209. (in Chinese)
- [5] 吴文龙,李永荣,方亮,等.薄壳山核桃果实时性状的遗传变异与相关性研究[J].*经济林研究*,2010,28(3):25-30.
- [6] 李永荣,刘永芝,翟敏,等.薄壳山核桃品种果实时性状变异及选择改良研究[J].*江苏林业科技*,2011,38(3):6-11.
- [7] 伊华林,荣融.柑橘体细胞杂种有性后代叶形态遗传变异研究[J].*果树学报*,2006,23(2):169-172.
- [8] 张斌斌,俞明亮,许建兰,等.窄叶桃与普通叶片桃杂交子代(F_1)光合特性评价及单株选优[J].*西北农业学报*,2011,20(7):138-142.
ZHANG B B, YU M L, XU J L, et al. Study on photosynthetic characteristics in leaves and individual-plant selection from filial generation (F_1) of willow-leaf peach and standard-leaf peach [J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2011, 20(7): 138-142. (in Chinese)
- [9] 中国植物志编辑委员会.中国植物志·第20卷[M].北京:科学出版社,1979;194-205.
- [10] 云南植物研究所.云南植物志·第1卷[M].北京:科学出版社,1977;8-13.
- [11] 傅立国.中国珍稀濒危植物[M].上海:上海教育出版社,1989.
- [12] 许玉兰,吴裕,张夸云,等.珍稀油料树种琴叶风吹楠种子含油量及脂肪酸成分分析[J].*贵州农业科学*,2010,38(7):163-166.
- [13] 许玉兰,吴裕,雷然,等.云南热带油料植物琴叶风吹楠种仁含油率的变异分析[J].*种子*,2011,30(1):5-7.
XU Y L, WU Y, LEI R, et al. Analysis on seed oil content variation of Yunnan tropical oil plants *Horsfieldia pandurifolia* [J]. *Seed*, 2011, 30(1): 5-7. (in Chinese)
- [14] 吴裕,杨晓玲,段安安.琴叶风吹楠生物学特征观察[J].*热带农业科技*,2006,29(3):18-19,34.
- [15] 杨晓玲,许玉兰,段安安,等.油料植物琴叶风吹楠种子萌发观察[J].*热带农业科技*,2009,32(4):30-32.
- [16] 叶脉.中国肉豆蔻科植物分类研究[D].广州:华南农业大学,2004.
- [17] 吴裕,段安安,田耀华,等.云南野生珍稀油料树种琴叶风吹楠资源调查[J].*广西植物*,2011,31(2):217-221.
WU Y, DUAN A A, TIAN Y H, et al. Investigation of wild resource of a rare oil tree *Horsfieldia pandurifolia* in Yunnan[J]. *Guihaia*, 2011, 31(2): 217-221. (in Chinese)
- [18] 陈小勇.黄山青冈种子形态变异的初步研究[J].*种子*,1994(5):16-19.
CHEN X Y. A Preliminary Study on the morphological variation of seeds of *Cyclobalanopsis glauca* populations of Huangshan [J]. *Seed*, 1994 (5): 16-19. (in Chinese)
- [19] 操国兴,钟章成,谢德体,等.缙云山川鄂连蕊茶种子形态变异的初步研究[J].*西南农业大学学报*,2003,25(2):105-107.
CAO G X, ZHONG Z C, XIE D T, et al. A preliminary study on the morphological variation of seeds of *Camellia rosthorniana* populations in MT. Jinyun[J]. *Journal of Southwest Agricultural University*, 2003, 25(2): 105-107. (in Chinese)
- [20] MEZIANE D, SHIPLEY B. Interacting determinants of specific leaf area in 22 herbaceous species: effects of irradiance and nutrient availability[J]. *Plant Cell & Environment*, 1999, 22(5):447-459.
- [21] 杨继.植物种内形态变异的机制及其研究方法[J].*武汉植物学研究*,1991,9(2):185-195.
YANG J. Infraspecific variation in plant and the exploring methods[J]. *Journal of Wuhan Botanical Research*, 1991, 9 (2): 185-195. (in Chinese)
- [22] WITKOWSKI E T F, LAMONT B B. Leaf specific mass confounds leaf density and thickness[J]. *Oecologia*, 1991, 88(4): 486-493.
- [23] WRIGHT I J, REICH P B, CORNELISSEN J H C, et al. Assessing the generality of global leaf trait relationships[J]. *New Phytologist*, 2005, 166(2):485-496.
- [24] 杭夏子,翁殊斐,袁喆.华南5种园林灌木叶性状特征及其对环境响应的研究[J].*西北林学院学报*,2014,29(2):243-247.
HANG X Z, WENG S F, YUAN Z. Relationships between Leaf traits of 5 plantscape shrubs and their responses to the environment in Southern China[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2014, 29(2): 243-247. (in Chinese)
- [25] 徐红,韩玉兰,杨自湘,等.用叶片特征区别不同产地不同单株青杨的研究[J].*林业实用技术*,1995(2):17-18.
- [26] 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.
HE C Z, ZHANG Y, DUAN A A, et al. Variation analysis on leaf traits in seedling duration of *Populus yunnanensis* plus tree clones[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2009, 24(6): 28-32. (in Chinese)
- [27] 张春霞,樊军锋,高建社.欧洲黑杨分别与川杨和滇杨杂交及其 F_1 代苗期性状[J].*中南林业科技大学学报*,2007,27(3):37-40.
ZHANG C X, FAN J F, GAO J S. A hybridization study between *Populus nigra* and *P. szechuanica*, *P. yunnanensis* and the seedling traits of the hybrids[J]. *Journal of Central South University of Forestry and Technology*, 2007, 27 (3): 37-40. (in Chinese)

(下转第169页)

- CHEN X X, SHAO X L, HE S L. Effect of different light quality ratios of LED on growth of *Spathiphyllum* plantlets *in vitro* [J]. Northern Horticulture, 2015(6): 86-89. (in Chinese)
- [7] KOZAI T, KUBOT A C, JEONG B R. Environmental control or the large-scale production of plants through *in vitro* techniques [J]. Plant Cell Tiss Org Cult, 1997, 51: 49-56.
- [8] 李华英,林长春,廉美兰,等.温度及昼夜温差对马铃薯脱毒苗生长的影响[J].延边大学农学学报,2007,29(4):249-252.
- LI H Y, LIN C C, LIAN M L, et al. Effect of temperature and DIF on growth of virus-free potato [J]. Journal of Agricultural Science Yanbian University, 2007, 29 (4): 249-252. (in Chinese)
- [9] 张荣锐,方志伟.不同夜间温度对小麦旗叶光合作用和单株产量的影响[J].作物学报,1994,20(6):710-715.
- ZHANG R X, FANG Z W. Influence of different nighttime temperatures on the photosynthesis of the flag leaf and yield in wheat [J]. Acta Agronomica Sinica, 1994, 20 (6): 710-715. (in Chinese)
- [10] 张继谢.植物生理学[M].北京:高等教育出版社,2006:114-181.
- [11] 孙存华.昼夜变温对小麦幼苗生长的影响[J].植物生理学通讯,1994,30(3):192-194.
- SUN C H. Effect of diurnal temperature variation on growth of wheat [J]. Plant Physiology Journal, 1994, 30(3): 192-194. (in Chinese)
- [12] 许纪发.周期性变温对番茄生长量的分析[J].北方园艺,2004 (3):30.
- [13] 杨再强,王学林,彭晓丹,等.人工环境昼夜温差对番茄营养物
- 质和干物质分配的影响[J].农业工程学报,2014,30(5):138-147.
- YANG Z Q, WANG X L, PENG X D, et al. Effect of difference between day and night temperature on nutrients and dry mass partitioning of tomato in climate chamber [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(5): 138-147. (in Chinese)
- [14] 余泽宁.龙眼叶片膜脂脂肪酸组分与龙眼耐寒性的关系[J].亚热带植物科学,2003,32(2):15-17.
- YU Z N. Cold tolerance of longan in relation to membrane fatty acid composition in leaves [J]. Subtropical Plant Science, 2003, 32(2): 15-17. (in Chinese)
- [15] 王洪春,汤章城,苏维埃,等.水稻干胚膜脂脂肪酸组分差异性分析[J].植物生理学报,1980,6(3):227-236.
- WANG H C, TANG Z C, SU W A, et al. Analysis of difference in fatty acid composition of membrane lipids of dry rice embryo [J]. Acta Phytophysiologia Sinica, 1980, 6 (3): 227-236. (in Chinese)
- [16] 王永健,张海英,张峰,等.低温弱光对不同黄瓜品种幼苗光合作用的影响[J].园艺学报,2001,28(3):230-234.
- WANG Y J, ZHANG H Y, ZHANG F, et al. Effects of low temperature and low light intensity stress on photosynthesis in seedlings of different cucumber varieties [J]. Acta Horticulturae Sinica, 2001, 28(3): 230-234. (in Chinese)
- [17] 孙治强,张强,张惠梅.低温弱光对番茄叶绿素含量变化的影响[J].华北农学报,2005,20(1):82-85.
- [18] 黄治远.龙眼耐寒性与叶片可溶性糖含量的关系[J].中国南方果树,2005,34(2):32-34.

(上接第 149 页)

- [28] 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.
- [29] 吴裕,许玉兰,田耀华,等.珍稀油料树种琴叶风吹楠果实和种子形态变异[J].植物研究,2011,31(1):4-8.
- WU Y, XU Y L, TIAN Y H, et al. Morphological variations of fruits and seeds in rare oil tree *Horsfieldia pandurifolia* Hu [J]. Bulletin of Botanical Research, 2011, 31(1): 4-8. (in Chinese)
- [30] 吴裕,毛常丽,张凤良,等.琴叶风吹楠(肉豆蔻科)分类学位置再研究[J].植物研究,2015 (5):652-659.
- WU Y, MAO C L, ZHANG F L, et al. Taxonomic position of *Horsfieldia pandurifolia* Hu (Myristicaceae) [J]. Bulletin of Botanical Research, 2015(5):652-659. (in Chinese)
- [31] 金志明,金晓红.利用长白松种翅形态改变改正搜集圃内错植植株的报告[J].吉林林业科技,1990(3):1-7.
- [32] 魏淑红,彭正松.半夏种内各变异类型主要形态学性状比较研究[J].现代中药研究与实践,2007,22(3):7-9.
- WEI S H, PENG Z S. Comparative study on morphological characters of variation types in species of *Pinellia ternata* [J]. Research and Practice on Chinese Medicines, 2007, 22 (3): 7-9. (in Chinese)
- [33] 唐青青,黄永涛,丁易,等.亚热带常绿落叶阔叶混交林植物功能性状的种间和种内变异[J].生物多样性,2016,24(3):262-270.
- TANG Q Q, HUANG Y T, DING Y, et al. Interspecific and intraspecific variation in functional traits of subtropical evergreen and deciduous broad-leaved mixed forests [J]. Biodiversity Science, 2016, 24(3): 262-270. (in Chinese)
- [34] 吴裕,段安安,许玉兰,等.珍稀油料树种琴叶风吹楠苗木性状变异分析[J].西北林学院学报,2011,26(3):88-92.
- WU Y, DUAN A A, XU Y L, et al. Variation analysis on growth traits in seedlings of a rare oil tree species *Horsfieldia pandurifolia* [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2011, 26(3):88-92. (in Chinese)
- [35] 许玉兰,吴裕,易小泉,等.珍稀油料植物琴叶风吹楠种子性状及含油率的变异分析[J].安徽农业科学,2011,39(6):3426-3428.
- XU Y L, WU Y, YI X Q, et al. Variation analysis on the seed traits and seed oil content of rare oil tree *Horsfieldia pandurifolia* in Yunnan [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2011, 39(6):3426-3428. (in Chinese)