DOI: 10.5846/stxb201706271160
杜会聪,蒋雅婷,田敏,张莹,王彩霞.浙江省野生蜡梅花部形态变异及其与环境因子的相关性.生态学报,2018,38(16): - .
Du H C, Jiang Y T, Tian M, Zhang Y, Wang C X.Morphological variation in flowers of wild populations of *Chimonanthus praecox* in Zhejiang Province and its correlation with environment factors.Acta Ecologica Sinica,2018,38(16): - .

浙江省野生蜡梅花部形态变异及其与环境因子的相关性

杜会聪,蒋雅婷,田 敏*,张 莹,王彩霞
中国林业科学研究院亚热带林业研究所,富阳 311400

摘要:以浙江省蜡梅自然分布区的 5 个居群为研究对象,采用巢式方差分析、主成分分析、相关分析、聚类分析等多种分析方法,探究蜡梅花部的形态变异及其与环境因子相关性以及居群间和居群内的表型多样性。结果表明:蜡梅花部性状中除雄蕊长度、雌蕊数、雌蕊长度、内被片数以外,其他 12 个性状在居群间均有极显著差异。胚珠数的平均变异系数最大,花冠内径的平均变异系数最小,各性状的平均变异系数为 15.03%(10.81%—23.38%)。五尖山的表型多样性最丰富,碧东山居群最小,种群间平均表型分化系数为 44.38%(1.57%—89.62%),种群内变异大于种群间变异,种群内变异是花部变异的主要来源。主成分分析显示花冠直径、花冠内径、花筒深度和中被片长对种群变异起主要贡献作用。花部多数性状间存在显著或极显著的相关关系,生态因子中花部性状与土壤酸度相关性最大,土壤中花部性状与大量元素相关性最大,微量元素次之,中量元素最小。通过 UPGMA 聚类分析可以将 5 个种群分成两组。浙江省野生蜡梅花部形态存在丰富的变异和多样性,花部部分性状与土壤中钙、铁、铜含量和海拔有显著或极显著相关关系。

关键词:野生蜡梅;花;形态变异;环境因子;相关性

Morphological variation in flowers of wild populations of *Chimonanthus praecox* in Zhejiang Province and its correlation with environment factors

DU Huicong, JIANG Yating, TIAN Min*, ZHANG Ying, WANG Caixia
Research Institute of Subtropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Fuyang 311400, *China*

Abstract: To determine the morphological variation in flowers and its correlation with environment factors and morphological diversity among or within populations, five natural populations of *Chimonanthus praecox* in Zhejiang Province were chosen as research subjects. We investigated 16 floral phenotypic traits and used nested analysis, principal component analysis, correlation analysis, and un-weighted pair group method with arithmetic averages (UPGMA) cluster analysis to analyze the experimental results. The results showed that there were extremely significant differences among most of the floral characteristics of *Chimonanthus praecox*. The average variation coefficient of ovule number was highest, and the average variation coefficient of corolla inner diameter was smallest. The corolla inner diameter was the most stable phenotypic trait. The mean coefficient of variation (CV) of all traits was 15.03% with the range from 10.81% to 23.38%, and the average phenotypic differentiation coefficient (V_{st}) was 44.38% with the range from 1.57% (pistil number) to 89.62% (corolla diameter), phenotypic variation within a population was 55.62%. Average value of CV of the Wujianshan population was the largest and that of the Longwangkan population was the smallest. The variation within populations was greater than that among populations, which indicated that the former was the main source of the floral morphological variation. The principle

基金项目:浙江省科技厅公益技术研究农业项目(2016C32030)
收稿日期:2017-06-27; **网络出版日期**:2018-00-00
* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: tmin115@163.com

component analysis showed that corolla diameter, corolla inner diameter, flower cylinder depth, and middle perianth length contributed the most variation. Correlation analysis showed that there were significant and highly significant correlations between parts of floral traits. The soil acidity appeared to be the most prominent ecological factor influencing phenotypic traits of flowers. The results of the analysis on the correlation between floral morphological characters and environment factors indicated that none of the studied environment factors played a significant leading role to affect the variation of one single character. Different environment factors could have different influences on variation of a single character, whereas the same environmental factor showed somewhat different effects on different characters. Macroelements had greater correlation with floral traits than did microelements and mid-elements. According to UPGMA cluster analysis, five populations could be classified into two groups. The UPGMA cluster analysis showed that the morphological variation of the five natural populations of *Chimonanthus praecox* were not fully clustered in accordance with the geographical distance. It is suggested that there is rich variation and diversity of floral traits among wild *Chimonanthus praecox* populations, corolla diameter, the length of the middle perianth, and the ratio of length to width of the middle perianth had significant positive correlations with the content of copper, the ovule number had a significant positive correlation with the content of calcium, the ratio of length to width of the middle perianth had a significant positive correlation with the content of iron, and the number of inner perianth had a highly significant positive correlation with altitude of the habitat.

Key Words: wild *Chimonanthus praecox*; flower; morphological variation; environment factor; correlation

蜡梅(*Chimonanthus praecox* (L.) Link)隶属蜡梅科(Calycanthaceae)蜡梅属(*Chimonanthus*),世界上少有的真正意义上冬季开花且芳香宜人的园林观赏植物之一[1],是我国特有的传统名花。蜡梅色、香、形、韵俱佳,极具文化内涵和应用价值[2]。我国野生蜡梅资源主要分布在鄂、湘、陕、川、豫等地[3],李根有[4]等在浙江省富阳及临安的交界处发现华东地区唯一的野生蜡梅分布点,该地野生蜡梅在植物地理区系和种质资源研究等方面具有重要意义[5],但后续对其调查、开发利用较少。野生蜡梅是进行蜡梅优良品种遗传改良的重要基因资源,具有栽培蜡梅所丢失的特异遗传物质[6],然而近年来生境变化及人为采挖使蜡梅野生资源遭到严重的破坏和流失,因此,针对这一中国特有的野生花卉进行深入调查研究成为当务之急。以往对植物形态变异的大量研究中,对花部形态和环境因子相关性的报道较少[7-9]。蜡梅花部作为其重要的分类和观赏性状,对其形态变异及其与环境因子的相关性进行研究,有助于了解该物种变异原因及其进化机制[8],为分类学和引种驯化服务。本研究选取浙江省分布野生蜡梅的 5 个居群,对各居群蜡梅的 16 个花部性状的变异规律及其与环境因子的相关性进行研究,以期进一步掌握浙江省野生蜡梅的资源现状,了解其遗传变异程度及其与地理环境的关系,为合理开发野生蜡梅种质资源,选育优良品种和科学保护提供基础数据。

1 材料与方法

1.1 研究地区自然概况

浙江省的野生蜡梅多生于避风、气候温和且湿润的低山沟谷及山脊两侧。特殊生境及人工破坏性的砍伐,使得年代较久的蜡梅数量极少,直接影响了野生群落的自然演替。目前,主要分布在杭州富阳区胥口镇的通天飞瀑风景区(TTFP)、洞桥镇上林村龙王坎(LWK)、洞桥镇石羊村碧东山(BDS)、万市镇白石村五尖山(WJS)和临安市玲珑镇高山村方山境内(FS),其地理位置如表 1 所示。碧东山和龙王坎的蜡梅多沿陡峭的溪谷呈狭带状分布,主要分布在山坡的中部和谷底,立地环境恶劣,蜡梅为获取足够光照,向溪谷侧斜向生长。通天飞瀑、方山和碧东山为常绿阔叶林,群落树冠连续分布,呈波浪状起伏,林相相对整齐,群落高度均在 4.5—6.5 m,总郁闭度大约为 90%,局部可达 100%。伴生植物主要有:化香树(*Platycarya strobilacea* Sieb.et Zucc.)、浙江楠(*Phoebe c chekiangensis*)、枇杷(*Eriobotrya japonica*)、桂花(*Osmanthus fragrans*)、紫楠(*Phoebe sheareri*)、糙叶树(*Aphananthe aspera*)、青冈(*Cyclobalanopsis glauca*)、枳椇(*Hovenia acerba*)、络石

(*Trachelospermum jasminoides*)、野菊(*Dendranthema indicum*)等;五尖山分布区蜡梅数量较多且分布相对集中,该群落无乔木层,蜡梅是优势种,其它灌木和草本较少,郁闭度低;龙王坎分布区上层有稀疏乔木层,灌木和草本植物受其影响呈稀疏分布,林分郁闭度相对偏中,伴生植物主要有:柏木(*Cupressus funebris*)、化香树、盐肤木(*Rhus chinensis*)等。部分群落外貌有藤蔓交错的现象,藤蔓植物主要有紫藤(*Wisteria sinensis*)、三叶木通(*Akebia trifoliata*)、常春油麻藤(*Mucuna sempervirens*)等,丰富的藤蔓植物客观上对野生蜡梅的生长、演替和保护具有一定的积极意义。

表 1　各种群的地理位置与生境概况

Table 1　Location and the habitat characters of populations

居群 Population	经度 Longitude/E	纬度 Latitude/N	海拔 Altitude/m	坡度 Slope/(°)	坡向 Slope trend
龙王坎 LWK	119°37′	30°06′	124	20—40	东南
碧东山 BDS	119°34′	30°03′	155	70—80	西北
通天飞瀑 TTFP	119°37′	30°00′	124	45—60	东北
五尖山 WJS	119°35′	30°09′	351	30—40	西北
方山 FS	119°37′	30°08′	380	40—50	西南

LWK:Longwangkan; BDS:Bidongshan; TTFP:Tongtianfeipu; WJS:Wujianshan; FS:Fangshan

1.2　形态特征测定

在蜡梅盛花期,在各居群内随机选取 9—15 株生长正常、无严重缺陷和病虫害的蜡梅。为了避免采样株间的亲缘关系[10],株间距均在 30 m 以上。单株上随机采取位于向阳方向枝条中部的 5—10 朵蜡梅花,分层置于较大体积的容器运回并立即测量各指标,防止运输中挤压和花萎缩对花型和各参数的影响。统计中被片数、内被片数、雄蕊数、雌蕊数和胚珠数,测定中被片长、内被片长、中被片宽、内被片宽、花冠直径(花冠外轮直径最大值)、花冠内径(花冠内轮直径最大值)、筒深、雄蕊长和雌蕊长,计算中被片长宽比和内被片长宽比,各指标均用精度为 0.01 cm 的电子游标卡尺测定,共 16 个形态指标。

1.3　土壤养分因子测定

在每一样方内按照 S 型曲线选取取样点,挖取根系附近距地表 20 cm 左右的土壤样品,混合后自然风干、过筛备用。土壤 pH 值测定采用电位法,半微量凯氏法测定全氮含量,速效磷采用钼锑抗比色法;速效钾和 Na 离子采用火焰原子吸收法,钙(Ca)、镁(Mg)、铁(Fe)、锌(Zn)、铜(Cu)和锰(Mn)等矿质元素的测定采用原子吸收光谱法。由国家林业局经济林产品质量检验检测中心(杭州)完成。各样地土壤养分含量的测定结果见表 2。

表 2　浙江省蜡梅居群土壤养分特征

Table 2　Characteristics of soil nutrient of *Chimonanthus praecox* populations in Zhejiang Province

居群 Population	土壤养分含量 Content of nutrients/(mg/kg)										
	pH	N	P	K	Ca	Mg	Fe	Zn	Cu	Mn	Na
龙王坎 LWK	7.79	213	3.28	94.7	3504	1214	168.0	4.16	2.74	718	14.9
碧东山 BDS	7.56	369	11.70	99.4	4995	566	253.0	6.19	3.87	549	15.5
通天飞瀑 TTFP	7.68	208	6.87	97.5	8402	140	17.3	15.8	1.49	78	16.8
五尖山 WJS	8.00	92	3.57	53.7	5452	505	58.8	4.3	1.80	318	12.4
方山 FS	8.06	294	6.08	109.6	2444	681	95.2	23.7	1.84	395	18.8

1.4　数据处理

使用 Excel 2007、SPSS 20.0 和 SAS 11.5 软件包提供的有关程序进行统计分析,计算各指标的算术平均值、标准差和变异系数;通过变异系数衡量表型性状及种群的变异水平;对各性状及其与环境因子的相关性进行分析;主成分分析得出表型性状对种群变异的贡献率;最后进行 Q 型聚类(UPGMA 法)和 R 型聚类分析[11-12]。

巢式方差[13]分析蜡梅性状变异的线性模型为

$$Y_{ijk} = \mu + P_i + T_{i(j)} + e_{(ij)k},$$

式中,Y_{ijk}为第 i 群体第 j 个个体第 k 个观测值,μ 为总均值,P_i为第 i 个群体的效应值(固定),$T_{i(j)}$为第 i 个群体内的第 j 个个体的效应值(随机),$e_{(ij)k}$为试验误差。

以表型分化系数[14](V_{st})反应群体间表型分化。

$$V_{st} = (\sigma^2_{t/s})/(\sigma^2_{t/s} + \sigma^2_s) \times 100\%,$$

式中,$\sigma^2_{t/s}$为群体间方差分量,σ^2_s为群体内的方差分量。

变异系数计算公式:

$$CV(\%) = S/x \times 100\%$$

式中,CV 为变异系数;S 为标准差;x 为平均值。

2 结果与分析

2.1 蜡梅居群花部的形态特征

野生蜡梅 5 个居群 16 个花部性状变异的测定结果显示(表 3):不同的花部性状在群体间存在一定差异。花冠直径、筒深、中被片长、内被片长和雌蕊长均以碧东山居群的数值最大,其中花径、筒深、中被片长的数值极显著高于其他 4 个居群;临安方山居群的花冠直径、花冠内径、筒深、内被片长度和内被片长宽比数值最小,其中花冠直径、花冠内径和内被片长宽比的数值极显著低于其他 4 个居群;数量形状上,方山居群内被片数最多,雄蕊数、雌蕊数和胚珠数均值最小;通天飞瀑居群雌蕊数和胚珠数均值最大,中被片数和内被片数均值最小。在各居群间花冠直径的均值差异最大,碧东山均值为 25.0789 mm,临安方山的均值为 15.5073 mm;内被片个数、雄蕊长度、雌蕊数、雌蕊长度的均值在各居群间差异不显著。

2.2 蜡梅花部性状变异分析

变异系数可以反映蜡梅花部形态特征的变异程度,表 3 显示花部各性状间的变异程度各不相同,同一性状在不同居群间变异程度也不同,如筒深在不同居群间变异系数差值较大,五尖山居群的变异系数为 0.3615,而通天飞瀑居群的变异系数仅为 0.1220;同一居群不同性状变异系数也不相同,如通天飞瀑居群内胚珠数的变异系数是 0.2396,而花冠内径的变异系数仅为 0.0771,差距较大。在居群间五尖山居群变异系数均值最大为 0.1765,其他四个居群数值相近。5 个居群的 16 个花部性状中,变异系数均值从大到小依次为:胚珠数、内被片长度、筒深、雌蕊长度、雌蕊数、雄蕊长度、内被片长宽比、内被片宽度、花径、雄蕊数、中被片宽度、中被片长度、中被片长宽比、内被片数、中被片数、花冠内径(胚珠数的平均变异系数最大为 0.2338,花冠内径最小为 0.1081)。通过变异系数的分析可知, 蜡梅花部各个性状的变异程度在群体内和群体间有一定的差异,说明浙江省野生蜡梅有着丰富的形态变异。按巢式方差分析得到的各方差分量和表型分化系数可知:花部性状表型分化系数(V_{st})的变异幅度为 1.57%—89.62%,其中花冠直径、花冠内径、筒深、中被片长、中被片长宽比、内被片长、内被片长宽比、雄蕊数的表型分化系数在 50%以上,说明这些性状在群体间的变异大于群体内变异,剩余与外界环境接触较少的花部性状的群体间变异小于种群内变异。16 个性状的平均表型分化系数为 44.38%,说明蜡梅花部形态变异以群体内的变异为主。

2.3 蜡梅花部性状的主成分分析

对蜡梅花部性状的数据进行主成分分析(表 4)表明:前 3 个主成分方差累计贡献率为 88.286 %,可以代表原始性状的绝大部分信息。第一主成分方差贡献率为 49.113 %,起主导作用的性状是花冠直径、花冠内径、花筒深度、中被片长、内被片长,主要反映了花部花型。第二主成分的方差贡献率为 22.981%,起主导作用的性状是中被片数。第三主成分方差贡献率是 16.192%,起主导作用的性状是胚珠。由此说明与花大小相关的性状对变异起主要作用。

表 3　浙江省 5 个蜡梅居群花部形态指标均值、变异系数及其显著性情况

Table 3　Mean value and coefficient of variation and significance of flower characteristics of five populations of *Chimonanthus praecox* in Zhejiang Province

种群 Population	指标 Parameter																
	CD/mm	ID/mm	FD/mm	MN	ML/mm	MW/mm	ML/MW	IN	IL/mm	IW/mm	IL/IW	SN	SL/mm	PN	PL/mm	ON	Mean
FS	15.5073	5.7847	12.8011	6.7111	12.8329	4.0942	3.1602	6.9556	6.0758	3.8269	1.5911	4.8889	3.2771	7.9333	1.8524	4.9111	
CV	0.1411	0.1003	0.1671	0.1573	0.1229	0.1272	0.1273	0.1037	0.1614	0.1195	0.1257	0.1870	0.1420	0.1629	0.1822	0.2541	0.1488
	dD	dC	bB	bcB	bcBC	bcAB	cCD	aA	dC	bcAB	cC	dC	abA	bA	aA	cB	
BDS	25.0789	7.4962	16.2802	6.6889	16.3609	4.2853	3.8443	6.7333	8.1102	3.8760	2.0900	5.6000	3.3482	8.5333	1.9724	5.8667	
CV	0.0880	0.1079	0.1473	0.0760	0.1446	0.1505	0.1073	0.1343	0.2144	0.1364	0.1608	0.1271	0.1347	0.1495	0.1832	0.1888	0.1407
	aA	abA	aA	bcB	aA	abA	aA	aA	aA	bAB	aA	abAB	aA	aA	aA	abA	
LWK	20.2304	7.5460	13.6369	7.0444	13.4551	3.8896	3.5237	6.7111	7.3160	4.1316	1.7799	5.6889	3.1073	8.4667	1.8264	5.4667	
CV	0.1440	0.1079	0.1350	0.1195	0.0941	0.1493	0.1474	0.1071	0.1652	0.1392	0.1349	0.1274	0.1853	0.1400	0.1495	0.2168	0.1414
	bB	aA	bB	abAB	bB	cBC	bB	aA	bcAB	aA	bB	abA	bA	abA	aA	bcAB	
TTFP	17.5033	7.1887	13.6696	6.5556	13.0664	4.3589	3.0303	6.7111	6.7689	3.6662	1.8613	5.3333	3.3502	8.6444	1.8982	6.1778	
CV	0.1503	0.0771	0.1220	0.1308	0.1073	0.1156	0.1428	0.1494	0.1892	0.1750	0.1469	0.1046	0.1286	0.1583	0.1638	0.2396	0.1438
	cC	bA	bB	cB	bBC	abA	cD	aA	cBC	bcB	bB	bcAB	aA	aA	aA	aA	
WJS	18.1293	6.4273	13.1680	7.3556	12.2356	3.5944	3.3991	6.8667	7.5996	3.5993	2.1124	5.2000	3.0813	8.6000	1.8993	5.9556	
CV	0.1716	0.1475	0.3615	0.1078	0.1919	0.1216	0.1323	0.1393	0.2145	0.1465	0.1660	0.1189	0.1710	0.1539	0.2107	0.2695	0.1765
	cC	cB	bB	aA	cC	dC	bBC	aA	abBC	cB	aA	cBC	bA	aA	aA	abA	
Mean	19.2899	6.8886	13.9112	6.8711	13.5902	4.0445	3.3915	6.7956	7.1741	3.8200	1.8870	5.3422	3.2328	8.4356	1.8898	5.6756	
CV Mean	0.1390	0.1081	0.1866	0.1183	0.1322	0.1329	0.1314	0.1268	0.1889	0.1433	0.1469	0.1330	0.1523	0.1529	0.1779	0.2338	0.1503
MS_t	598.99	26.13	84.71	4.76	116.75	4.34	4.58	0.55	27.54	1.94	2.15	4.64	0.76	3.75	0.14	11.20	
MS_e	7.13	0.59	4.50	0.71	3.52	0.30	0.20	0.77	2.00	0.31	0.08	0.53	0.25	1.71	0.12	1.84	
$\sigma^2_{t/s}$	2.6903	0.1161	0.3646	0.0184	0.5147	0.0184	0.0199	0.001	0.1161	0.0074	0.0094	0.0187	0.0023	0.0093	0.0001	0.0425	
σ^2_s	0.3113	0.0231	0.2948	0.0399	0.4111	0.0264	0.0096	0.0124	0.0601	0.0191	0.0021	0.0168	0.0153	0.0885	0.0061	0.1203	
V_{st}	89.62	83.43	55.29	31.57	55.60	41.01	67.41	7.45	65.88	27.97	81.87	52.68	13.22	9.48	1.57	26.11	44.38

不同小写字母表示差异显著($P<0.05$),不同大写字母表示差异极显著($P<0.01$)。CD:花冠直径 Corolla diameter; ID:花冠内径 Corolla inner diameter; FD:花筒深度 Flower cylinder depth ; MN:中被片数 Middle-perianth number; ML:中被片长度 Middle-perianth length; MW:中被片宽 Middle-perianth width; ML/MW:种子长宽比 Middle-perianth length/width; IN:内被片数 Inner-perianth number; IL:内被片长度 Inner-perianth length; IW:内被片宽度 Inner-perianth width; IL/IW:内被片长宽比 Inner-perianth length/width; SN:雄蕊数 Stamen number; Sl:雄蕊长 Stamen Length; PN:雌蕊数 Pistil number; PL:雌蕊长 Pistil Length; ON:胚珠数 Ovule number; MS_t:居群间均方 Mean square among populations; MS_e:居群内均方 Mean square within populations;$\sigma^2_{t/s}$:群体间方差分量 Variance component among populations;σ^2_s群体内的方差分量 Variance component within population;V_{st}表型分化系数 Differentitation coefficient of phenotypic traits。下同 The same below

http://www.ecologica.cn

2.4 相关性分析

2.4.1 花部性状间的相关性分析

植物在生长过程中各个形态特征间存在一定联系，相关性分析可以反映各性状间的影响关系。对 5 个种群 16 个性状相关性分析结果表明(表 5)：野生蜡梅花部各性状间呈一定的相关性，如中被片长与除中被片数和内被片数以外的其它性状均呈极显著相关关系，相关个数最多；

内被片数与胚珠数有显著相关关系，与其它性状均无显著关系，相关个数最少。性状内部花冠直径、花冠内径、筒深、中被片长、中被片宽和内被片长这 6 个花外部性状间相互存在显著相关关系，其中花冠直径和中被片长度极显著相关(0.603)，说明这 6 个性状间相互影响较大。数量性状中雄蕊数、雌蕊数、胚珠数三者相互间为极显著相关，中被片数和内被片数没有与任何性状呈极显著相关关系。

2.4.2 花部性状与地理-土壤因子间的相关性分析

对蜡梅 16 个花部性状的均值与居群的地理-土壤养分因子进行相关性分析，结果(表 6)表明：铜含量与花冠直径、中被片数和中被片长宽比呈显著正相关，相关系数分别为 0.937、0.918 和 0.941；铁含量与中被片长宽比呈显著正相关($r = 0.915$)。钙含量与胚珠数呈显著正相关($r = 0.907$)。海拔与内被片数极显著正相关

表 4 蜡梅天然种群的主成分分析

Table 4 Principal component analysis of populations in *Chimonanthus praecox*

性状 Traits	第一主成分 First principal component	第二主成分 Second principal component	第三主成分 Third principal component
CD	0.944	−0.024	−0.219
ID	0.856	−0.004	−0.237
FD	0.913	−0.288	−0.032
MN	−0.104	0.977	−0.104
ML	0.814	−0.428	−0.199
MW	0.295	−0.928	0.135
ML/MW	0.757	0.196	−0.396
IN	−0.777	0.060	0.111
IL	0.879	0.427	0.007
IW	0.197	−0.123	−0.965
IL/IW	0.716	0.482	0.454
SN	0.840	0.149	−0.396
SL	0.235	−0.916	0.323
PN	0.700	0.410	0.389
PL	0.704	−0.191	0.537
ON	0.627	0.241	0.640
特征值 Eigen value	7.858	3.677	2.591
贡献率 Proportion/%	49.113	22.981	16.192
累计贡献率 Cumulative/%	49.113	72.094	88.286

表 5 野生蜡梅花部性状相关性分析

Table 5 Correlation analysis among flower traits of will *Chimonanthus praecox*

性状 Trait	相关系数 Correlation coefficient															
	CD	ID	FD	MN	ML	MW	ML/MW	IN	IL	IW	IL/IW	SN	SL	PN	PL	ON
CD																
ID	0.550**															
FD	0.519**	0.330**														
MN	0.045	0.076	−0.056													
ML	0.603**	0.369**	0.601**	−0.012												
MW	0.225**	0.222**	0.402**	−0.076	0.525**											
ML/MW	0.426**	0.203**	0.257**	0.050	0.566**	−0.393**										
IN	−0.016	−0.121	−0.024	0.052	0.005	0.050	−0.038									
IL	0.330**	0.253**	0.355**	0.102	0.412**	0.134*	0.305**	−0.034								
IW	0.117	0.167*	0.231**	−0.043	0.273**	0.221**	0.101	0.007	0.542**							
IL/IW	0.282**	0.145*	0.213**	0.133*	0.247**	−0.03	0.267**	−0.064	0.727**	−0.169*						
SN	0.251**	0.362**	0.081	0.227**	0.257**	0.171*	0.103	0.044	0.219**	0.196**	0.095					
SL	0.144*	0.038	0.171*	−0.066	0.285**	0.355**	−0.034	0.061	0.137*	0.107	0.088	0.057				
PN	0.197**	0.131*	0.299**	0.167*	0.311**	0.197**	0.129	0.119	0.067	−0.104	0.162*	0.215**	0.104			
PL	0.253**	0.154*	0.321**	−0.054	0.326**	0.273**	0.078	−0.028	0.208**	0.145*	0.122	−0.048	0.258**	0.168*		
ON	0.117	0.176**	0.127	0.219**	0.190**	0.161*	0.048	0.140*	0.132*	−0.088	0.200**	0.179**	0.029	0.271**	0.112	

*：$\alpha = 0.05$ 水平上显著；**：$\alpha = 0.01$ 水平上显著

(r=0.978),与中被片数呈正相关,与其它性状均为负相关关系,不显著;中被片宽、内被片数、内被片宽与经度呈正相关,中被片数、中被片长宽比、内被片数和内被片宽与纬度呈正相关;其它性状与经纬度呈负相关关系,均不显著。多数性状与土壤养分因子正相关,少数为负相关。计算大量元素、中量元素和微量元素与花性状的相关系数均值分别为 0.422、0.327、0.413,由此说明大量元素与花部性状变异程度的相关性最大,微量元素次之,中量元素最弱。各环境因子对蜡梅花部表型性状的影响程度有一定差异,按照相关系数均值从大到小依次为土壤 pH 值、锌含量、磷含量、钠含量、经度、氮含量、纬度、铁含量、海拔、锰含量、钾含量、镁含量、铜含量、钙含量。

表 6　蜡梅花部性状与地理土壤因子的相关系数

Table 6　Correlation coefficients between phenotypic traits of *Chimonanthus praecox* populations and geographical-soil nutrient factors

性状 Trait	相关系数 Correlation coefficient													
	pH	N	P	K	Ca	Mg	Fe	Zn	Cu	Mn	Na	海拔 Altitude	经度 Longitude	纬度 Latitude
CD	−0.779	0.491	0.634	0.042	0.049	0.177	0.854	−0.661	0.937 *	0.525	−0.341	−0.564	−0.792	−0.238
ID	−0.883	0.188	0.287	0.093	0.383	0.168	0.482	−0.644	0.587	0.334	−0.307	−0.947	−0.219	−0.581
FD	−0.841	0.649	0.845	0.205	0.167	−0.074	0.780	−0.419	0.878	0.309	−0.116	−0.541	−0.775	−0.419
MN	0.492	−0.730	−0.673	−0.855	−0.238	0.392	−0.076	−0.629	−0.098	0.288	−0.827	0.382	−0.176	0.772
ML	−0.786	0.802	0.866	0.401	−0.019	0.052	0.860	−0.280	0.918 *	0.420	0.072	−0.504	−0.719	−0.382
MW	−0.653	0.733	0.750	0.791	0.344	−0.416	0.160	0.468	0.214	−0.260	0.701	−0.518	0.062	−0.853
ML/MW	−0.465	0.397	0.431	−0.096	−0.289	0.429	0.915 *	−0.709	0.941 *	0.736	−0.443	−0.266	−0.862	0.170
IN	0.877	−0.108	−0.240	−0.111	−0.537	−0.027	−0.291	0.534	−0.410	−0.146	0.237	0.978 **	0.048	0.707
IL	0.572	0.021	0.327	0.453	0.198	0.092	0.596	0.896	0.708	0.378	0.751	0.388	0.798	0.015
IW	−0.230	0.427	−0.045	0.501	−0.588	0.873	0.664	−0.221	0.567	0.872	0.163	−0.438	0.025	0.051
IL/IW	−0.414	−0.215	0.287	−0.675	0.468	−0.312	0.222	−0.744	0.372	−0.058	−0.794	−0.164	−0.728	−0.033
SN	−0.777	0.155	0.189	0.009	0.186	0.371	0.599	−0.764	0.677	0.534	−0.420	−0.855	−0.309	−0.364
SL	−0.540	0.728	0.833	0.689	0.343	−0.579	0.112	0.541	0.171	−0.385	0.685	−0.293	−0.074	−0.747
PN	−0.601	−0.388	0.054	−0.530	0.772	−0.304	−0.042	−0.718	0.130	−0.192	−0.701	−0.599	−0.221	−0.426
PL	−0.596	0.373	0.825	−0.112	0.443	−0.574	0.356	−0.240	0.496	−0.209	−0.197	−0.170	−0.779	−0.355
ON	−0.586	−0.332	0.199	−0.478	0.907 *	−0.587	−0.184	−0.503	0.006	−0.454	−0.554	−0.496	−0.209	−0.536
平均值 Mean	0.576	0.421	0.468	0.378	0.314	0.339	0.392	0.505	0.332	0.381	0.457	0.386	0.425	0.416

2.5　聚类分析

基于 16 项花的性状特征值对 5 个天然居群进行聚类分析,结果(图 1)显示:在欧氏距离临近 10 处可以把 5 个居群可以分为 2 组。通天飞瀑居群与五尖山居群在最短截取处聚类,然后分别再与龙王坎居群和临安方山居群形成第一大组,第二组碧东山居群单独一组,其中通天飞瀑、五尖山居群遗传距离较小说明两者间的分化程度最小,龙王坎居群与方山和通天飞瀑居群、五尖山居群遗传距离相近,而碧东山与其他居群遗传距离最远,分化程度最大。

对蜡梅花部性状的 R 型聚类分析可知(图 2),在遗传距离临近 15 的位置可以将蜡梅花部性状分为两大类。第一类为花冠直径、筒深、中被片长,包括了花外部形态相关的 3 大性状;第二类为除去上述三个性状的所有性状。在遗传距离 5—10 中间的位置则可以将蜡梅花部形状分为 4 大类,上述第一类分为 A、B 两类,A 类包括中被片长、筒深,两者决定着蜡梅的花瓣的伸展角度,能体现其花型;花冠直径为一类为 B 类,花冠直径也是蜡梅分类标准中特别重要的一个性状。上述第二类分为 C、D 两类,C 类主要为花部营养性状,其中包含中被片宽、内被片宽、中被片长宽比、内被片长宽比、雄蕊长、雌蕊长;D 类主要为花部相关的数量性状,其中

包括花冠内径、内被片长、中被片数、内被片数、雄蕊数、雌蕊数、胚珠数。

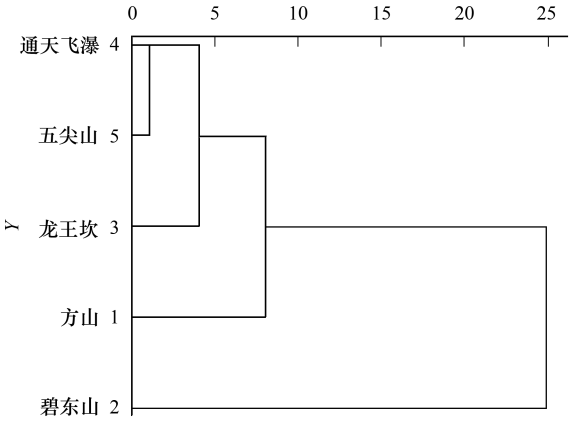

图 1 基于花部性状分析结果的 5 个蜡梅居群 UPGMA 聚类图

Fig.1 UPGMA clustering dendrogram of five populations of *Chimonanthus praecox* based on traits analysis of flower

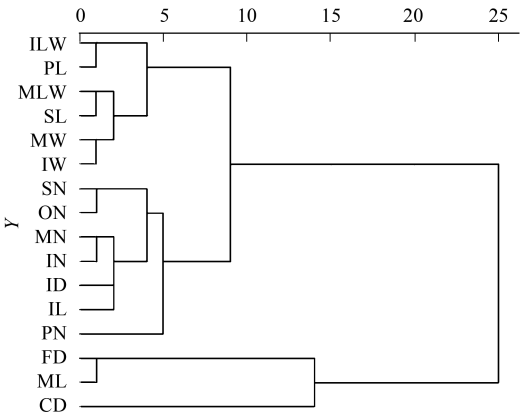

图 2 蜡梅花部形态特征性状 *R* 型聚类分析图

Fig. 2 The dendrogram of R cluster analysis of *Chimonanthus praecox* floral characteristics

3 结论与讨论

3.1 蜡梅花部形态变异的多样性

表型性状是植物基因型和所处生态环境的综合体现[15]。对蜡梅 5 个居群花部性状多样性研究结果表明:碧东山居群的蜡梅花冠直径和中被片长的均值分别为 25.0789 mm 和 16.3609 mm,显著大于国内其他野生居群[16-18]花冠直径和中被片长度的数值(花径和中被片最大均值分别为 17.996 mm 和 14.056 mm[17])。由此说明浙江省野生蜡梅是优良的种质资源;各个居群内不同性状的变异系数存在较大的差异,变异范围是 7.60%—36.15%,平均变异系数为 15.03%,高于扇脉杓兰(*Cypripedium japonicum*)[19](CV = 11.143 %)表型性状的平均变异系数,说明蜡梅存在丰富的遗传变异。野生蜡梅种群间平均表型分化系数为 44.38%,高于玫瑰(*Rosa rugosa*)[20](29.52%),低于张彩霞[21]等分析蜡梅群体 8 个性状的平均表型分化系数,这表明蜡梅天然群体间花部表型分化系数较大,可能存在较高的群体内自交率,调研中也发现授粉昆虫较少,这与蜡梅开花物候和生境海拔有关。与张彩霞等分析结果的差异可能是选取性状不同所导致。蜡梅居群花部形态变异以居群内为主,对于一个物种遗传结构来讲,植物本身的繁殖方式起决定作用[22]。Hamrick 等[23]也指出,异花授粉物种的遗传变异主要发生在居群内,而自花授粉则相反。

3.2 野生蜡梅花部形态变异与环境因子关系

各环境因子与花性状的相关系数的均值中 pH 的均值最大,土壤酸碱度是土壤中化学性质的综合反映,土壤中各营养元素的转化、释放,镁、铁、钙等微量元素的有效性,有机质的合成与分解以及微生物的活动都与土壤酸碱度有关[24],且由土壤中养分因子和各性状的相关性可知,对性状形成绝对的支配作用需要多个养分因子甚至所有环境因子的综合作用,土壤酸度与其他单独的养分因子相比,综合性更强,因此对花部性状影响较大。花部性状与土壤中大量元素氮、磷、钾含量相关性最大,微量元素次之,中量元素最小,氮、磷、钾作为大量元素是植物体内如核酸、蛋白质、叶绿素等重要化合物的组成成分,也是土壤易缺乏的元素,能直接或者间接影响植物的生长发育和代谢;蜡梅花部的部分性状与土壤中的钙、铁和铜含量以及海拔有显著相关性,由此说明这 4 个因子的差异是形成蜡梅花性状多样性的原因之一,李根有[5]在调研中也认为蜡梅属于喜钙树种。蜡梅花部各性状与环境-土壤养分因子的 224 对相关性组合中仅有 6 组显示有显著相关性,而茶条槭(*Acer ginnala*)[25]17 个表型性状与土壤中养分因子及地理坐标间有 21 组具有显著的正负相关性。蜡梅各居群土壤中氮和钾含量均值为 235.17 mg/kg 和 90.98 mg/kg,均低于茶条槭(分别是 388.08 mg/kg 和 113.8 mg/kg)

和扇脉杓兰[19](分别是 524.33 mg/kg 和 178.00 mg/kg)。浙江省野生蜡梅各居群生境的土壤类型多为黑色石灰土,部分蜡梅生活在河谷两侧陡坡甚至极薄的土层或石缝间,陡坡坡度在 50°—80°较多,生存环境恶劣,土壤贫瘠。物种间的差异可能是土壤肥力、环境的异质性或者植物本身营养成分需求差异导致,当土壤满足植物生长所必需的营养成分时,物种各性状之间的差异较小。邓洪平[26]、李珊[9]、窦全丽[7]等分别进行了四川大头茶(*Gordonia acuminata*)、云南金钱槭(*Dipteronia dyeriana*)、缙云卫矛(*Euonymus chloranthoides*)等种实的表性性状与土壤因子的相关性研究,证明了土壤因子对种实性状变异有一定的影响。环境因子包括很多内容,例如土壤厚度、透光率和其他未测元素含量等,本研究只调查了 14 个相关因子,这也是本研究的不足。

3.3　野生蜡梅保护策略以及待解决问题

蜡梅花颜色独特、芳香秀美,可提炼香精、入茶食用[27],且蜡梅在杭州栽培历史悠久[28],是城市园林绿化中应用较多的树种之一。作为华东唯一的野生蜡梅分布点,本地各居群遗传多样性水平较高,是蜡梅育种的重要基因资源。在野外调查发现该群落中的多数蜡梅正在经受病虫害困扰,存在大量腐烂枯枝,严重影响蜡梅的着花座果。群落生境条件差,且种子萌发困难,5 个居群中仅在方山居群发现一些实生苗。实生苗最高在 50 cm 左右,多数小实生苗受人为干扰和环境影响不能存活,对群落的稳定性有很大影响。针对当前情况,建议采取以下保护策略,第一,对经受病虫害及生长势衰弱的蜡梅进行调查研究,找出原因进行治疗并修剪腐烂枯枝。对群落的演替进行一定的人为干涉,适当的疏伐,促进野生蜡梅的更新。第二,对蜡梅群落进行定期普查,蜡梅群落结构复杂,伴生种类繁多,结合蜡梅本身的适应性和人为干扰,建议至少 2—3 年对野生蜡梅资源进行普查,对其生长环境、生长势、保护现状进行监测。第三,建议在杭州富阳就近建立野生蜡梅基因库,保证其遗传多样性的原始性,制定有序的开发利用方案,有效保护和合理利用野生资源。

在调研中发现五尖山、龙王坎居群野生蜡梅开花量较大,但座果率极低甚至不到 5%,远不及栽培蜡梅(70%左右),野生蜡梅开花物候较栽培蜡梅晚 1 个月左右正处冬季较冷的时段,且生境海拔高、土壤养分贫瘠,冬季温度低缺乏授粉昆虫或其他原因,致使蜡梅花部变异退化所致,具体原因将会进一步进行研究。在方山居群调研中发现了单株全部雄蕊瓣化的蜡梅花,无前一年遗留的果实。另有单株花型奇特,盛花期花冠口呈闭合或略开不到 5 mm 左右的小口如花苞状花型的蜡梅,这两种特殊蜡梅在浙江其他居群或蜡梅相关报道中均未出现,有待进一步观察研究。

参考文献(References):

[1] 明军, 明刘斌. 蜡梅科植物种质资源研究进展. 北京林业大学学报, 2004, 26(S1): 128-135.

[2] 代树刚, 张发君, 李威. 我国蜡梅产业开发的思考. 北京林业大学学报, 2007, 29(S1): 150-153.

[3] 宋兴荣, 袁蒲英, 熊昌发. 四川省万源市野生腊梅资源调查研究. 植物遗传资源学报, 2015, 16(2): 231-237.

[4] 李根有, 楼炉焕, 金水虎, 陈征海, 刘安兴, 孙孟军. 浙江省野生蜡梅群落及其区系. 浙江林学院学报, 2002, 19(2): 127-132.

[5] 李根有, 金水虎, 楼炉焕, 陈征海, 孙孟军. 浙江省野生蜡梅数量及群落学研究. 北京林业大学学报, 2003, 25(6): 30-33.

[6] 伍碧华, 徐恒伟, 明军, 熊昌发, 张发君, 胡世英, 彭建国. 四川大巴山野生蜡梅资源现状与保护利用. 中国野生植物资源, 2009, 28(5): 33-36.

[7] 窦全丽, 何平, 肖宜安, 李玉泉, 谢大军. 濒危植物缙云卫矛果实、种子形态分化研究. 广西植物, 2005, 25(3): 219-225.

[8] 张文标, 金则新. 夏蜡梅果实和种子形态变异及其与环境因子相关性. 浙江大学学报: 理学版, 2007, 34(6): 689-695.

[9] 李珊, 蔡宇良, 徐莉, 赵桂仿. 云南金钱槭果实、种子形态分化研究. 云南植物研究, 2003, 25(5): 589-595.

[10] 庞广昌, 姜冬梅. 群体遗传多样性和数据分析. 林业科学, 1995, 31(6): 543-550.

[11] 刁松锋, 邵文豪, 姜景民, 董汝湘, 孙洪刚. 基于种实性状的无患子天然群体表型多样性研究. 生态学报, 2014, 34(6): 1451-1460.

[12] 孙玉玲, 李庆梅, 杨敬元, 谢宗强. 秦岭冷杉球果与种子的形态变异. 生态学报, 2005, 25(1): 176-181.

[13] 李萍萍, 孟衡玲, 陈军文, 孟珍贵, 李龙根, 杨生超. 云南岩陀及其近缘种质资源群体表型多样性. 生态学报, 2012, 32(24): 7747-7756.

[14] 葛颂, 王明庶, 陈岳武. 用同工酶研究马尾松群体的遗传结构. 林业科学, 1988, 24(4): 399-409.

[15] 杨继. 植物种内形态变异的机制及其研究方法. 武汉植物学研究, 1991, 9(2): 185-195.

[16] 陈香波, 叶文国, 田旗, 张启翔. 夏蜡梅天然群体表型变异及分布特征. 北京林业大学学报, 2010, 32(2): 133-140.

[17] 赵冰, 张启翔. 中国蜡梅种质资源花性状的变异分析. 园艺学报, 2008, 35(3): 383-388.

[18] 赵冰, 张启翔. 蜡梅种质资源表型多样性. 东北林业大学学报, 2007, 35(5): 10-13, 35-35.
[19] 李全健, 王彩霞, 田敏, 李翠新. 浙江扇脉杓兰野生居群的表型性状变异及其与地理——土壤养分因子的相关性. 植物资源与环境学报, 2012, 21(2): 45-52.
[20] 童冉, 吴小龙, 姜丽娜, 司倩倩, 臧德奎. 野生玫瑰种群表型变异. 生态学报, 2017, 37(11): 3706-3715.
[21] 张彩霞, 左丹丹, 赵海涛, 邓敏, 熊昌发, 刘春, 袁素霞, 明军. 蜡梅天然群体表型多样性分析. 西南林业大学学报, 2011, 31(5): 19-23.
[22] 陆景伟, 王赞, 严欢, 裴玉红, 高洪文. 内蒙古中部地区小叶锦鸡儿天然居群表型多样性分析. 植物遗传资源学报, 2009, 10(1): 77-80.
[23] Hamrick J L, Godt M J W.Conservation genetics of endemic plant species//Avise JC, Hamrick JL, eds.Conservation Genetics. New York: Oxford University Press,1996:281-304.
[24] 孙凡, 钟章成. 四川大头茶繁殖分配及其环境适应性的关联度研究. 植物生态学报, 1997, 21(1): 44-52.
[25] 王丹, 庞春华, 高亚卉, 郝晓杰, 王祎玲. 茶条槭不同海拔种群的表型多样性. 云南植物研究, 2010, 32(2): 117-125.
[26] 邓洪平, 何平, 钟章成. 不同地理种源及演替群落的四川大头茶居群种子形态分化研究. 西南师范大学学报: 自然科学版, 1999, 24(2): 207-213.
[27] 卢毅军, 胡中, 应求是, 钱江波, 江燕. 杭州市蜡梅品种资源调查与分类. 北京林业大学学报, 2010, 32(S2): 151-156.
[28] 芦建国, 任勤红. 杭州蜡梅品种资源调查分类及园林应用. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2011, 35(4): 139-142.