

刘春贵, 杨帆, 袁媛, 等. 基于表型性状的观赏荷花种质资源的遗传多样性[J]. 江苏农业学报, 2026, 42(4): 798-807.
doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2026.04.016

基于表型性状的观赏荷花种质资源的遗传多样性

刘春贵¹, 杨帆², 袁媛¹, 孙春青³, 曹婧³, 谢陶⁴, 李风童^{1,4}

(1. 江苏里下河地区农业科学研究所, 江苏扬州 225007; 2. 马来西亚博特拉大学热带农业与粮食安全研究所, 雪兰莪州沙登 43400; 3. 江苏丘陵地区镇江农业科学研究所, 江苏镇江 212400; 4. 扬州大学园艺园林学院, 江苏扬州 225009)

摘要: 观赏荷花资源丰富, 但育种过程中存在亲本背景不清、效率低等瓶颈。本研究对 238 份观赏荷花种质资源的 10 个数量性状和 11 个质量性状进行遗传多样性和生物统计学分析, 结果表明, 质量性状的遗传多样性指数为 7.708~7.858, 数量性状的遗传多样性指数为 7.560~7.881, 数量性状遗传多样性指数均值高于质量性状; 花被片数变异系数最大 (64.82%), 且遗传多样性指数最低 (7.560), 叶长、叶宽、叶高等叶部相关性状变异系数较小; 相关性分析结果显示, 叶部相关性状之间以及生殖器官相关性状之间分别存在显著或极显著正相关 ($P < 0.05$, $P < 0.01$), 花被片数相对独立; 通过主成分分析提取了 5 个主成分, 累积贡献率达到 61.799%, 可以将 21 个表型性状降维至长势、花发育状态、株型发育状态、叶柄被刺和花色等 5 个主成分; 聚类分析将所有资源分为 6 类, 每一类群内的种质资源分别具有相似的表型特征, 不同类群的种质资源为杂交育种提供了特异性亲本。本研究结果揭示了观赏荷花丰富的表型性状遗传多样性, 为骨干亲本筛选和突破性品种创制提供了基础。

关键词: 观赏荷花; 种质资源; 表型性状; 遗传多样性

中图分类号: S682.32 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2026)04-0798-10

Genetic diversity of ornamental lotus germplasm resources based on phenotypic traits

LIU Chungui¹, YANG Fan², YUAN Yuan¹, SUN Chunqing³, CAO Jing³, XIE Tao⁴, LI Fengtong^{1,4}

(1. Institute of Agricultural Sciences of the Lixiahe District in Jiangsu Province, Yangzhou 225007, China; 2. Institute of Tropical Agriculture and Food Security, Universiti Putra Malaysia, Serdang 43400, Malaysia; 3. Zhenjiang Institute of Agricultural Sciences in Jiangsu Hilly Areas, Zhenjiang 212400, China; 4. College of Horticulture and Landscape Architecture, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China)

Abstract: Abundant ornamental lotus germplasm resources exist, yet breeding faces bottlenecks such as unclear genetic background of parental materials and low efficiency. This study conducted genetic diversity and biostatistical analyses on 10 quantitative and 11 qualitative traits across 238 ornamental lotus germplasm resources. The results indicated that Shannon-Wiener diversity index ranged from 7.708 to 7.858 for qualitative traits and 7.560 to 7.881 for quantitative traits.

The mean Shannon-Wiener diversity index for quantitative traits was higher than that for qualitative traits. The number of tepals exhibited the highest coefficient of variation (64.82%) and the lowest Shannon-Wiener diversity index (7.560), while most leaf-related traits (e.g., leaf length, leaf width, and leaf height) showed limited variation. The correlation analysis revealed significant positive correlations among leaf-related traits or reproductive organ-related traits, while the number of tepals remained relatively independent. The first five principal components, extracted via

收稿日期: 2025-07-06

基金项目: 江苏省农业科技创新与推广补助项目 [扬农 (2025) 28 号]

作者简介: 刘春贵 (1970-), 男, 江苏高邮人, 硕士, 副研究员, 主要从事观赏植物种质资源与育种研究。(E-mail) 2426663129@qq.com

通讯作者: 李风童, (E-mail) lftchina@163.com

principal component analysis and explaining 61.799% of the cumulative variance, effectively reduced the 21 phenotypic traits into five dimensions representing: growth vigor, flower status, plant architecture, petiole spine density, and flower color. Cluster analysis grouped all resources into six distinct clusters, each sharing similar phenotypic characteristics. These clusters provided specific parental candidates for cross-breeding. This research unveils the rich phenotypic genetic diversity within ornamental lotus germplasm, offering a foundation for screening elite parents and creating breakthrough cultivars.

Key words: ornamental lotus; germplasm resources; phenotypic traits; genetic diversity

荷花为莲科(Nelumbonaceae)莲属(*Nelumbo*)多年生水生草本植物,是中国十大传统名花之一。荷花被称为活化石,其起源可以追溯到白垩纪,在中国以及日本、越南等国家不仅具有悠久的栽培历史,而且在观赏、食药、艺术、文化、宗教等方面都具有重要的价值^[1-2]。根据不同用途,荷花可以分为籽莲、藕莲和花莲,其中花莲又被称为观赏荷花,以丰富的花色、花型著称,具有较高的观赏价值。中国是亚洲莲(*Nelumbo nucifera*)的起源中心,栽培观赏荷花已有2 700年历史^[3]。传统观赏荷花的花色以粉红色为主,自20世纪60年代起,国内育种工作者对观赏荷花育种展现出极高的研究热情,尤其是在引入美洲黄莲(*Nelumbo lutea*)基因后,观赏荷花的花色得到显著改良,黄色、绿色、复色等新颖花色的观赏荷花品种陆续培育成功。经过数十年的系统选育,观赏荷花的栽培品种数量已突破1 000个,现已成为水生观赏植物中最重要的类群之一^[4-5]。

随着观赏荷花新品种创制数量的激增,其种质资源库得到极大丰富,但育种工作的瓶颈也日趋凸显,突破性新品种的选育难度不断加大,育种亲本遗传背景模糊、核心亲本储备匮乏、育种效率偏低等问题尤为突出。因此,开展观赏荷花种质资源遗传多样性评价工作已迫在眉睫。简单序列重复区间扩增多态性(ISSR)、简单序列重复(SSR)、扩增片段长度多态性(AFLP)等分子评价技术的应用在揭示物种间、品种间的亲缘关系以及遗传距离方面发挥了重要作用^[6-8]。伴随分子生物学技术的高速发展,重测序技术与高密度单核苷酸多态性(SNP)标记也在荷花种质资源评价研究中取得了较大突破^[9],为充分了解观赏荷花的遗传背景以及分子标记辅助育种技术开发提供了重要的理论依据。然而,常规杂交育种仍然是目前观赏荷花新品种选育最直接和有效的技术手段^[1],作为肉眼可见的最直观的表型性状,是种质资源遗传多样性的重要体现,仍然是育种亲本筛选和新品种选育不可或缺的重要参考。目前基

于表型性状的观赏荷花遗传多样性评价研究仍然较少,而且存在样本量偏少的问题^[10-11]。本研究选择238个观赏荷花品种作为研究材料,重点围绕表型性状进行统计分析,旨在基于表型性状阐明观赏荷花种质资源遗传多样性及各资源间的亲缘关系,为骨干亲本筛选和突破性品种创制提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试材料为238个观赏荷花品种(表1),所有品种均保存于江苏里下河地区农业科学研究所江苏省省级水生花卉种质资源圃。2024年3月,选取上口直径90 cm、底径60 cm、深度70 cm的荷花缸作为栽培容器。定植前向缸内施入200 g菜籽饼作为底肥,随后向缸内装填田园土,直至土层高度达到缸总深度的2/5,加水搅拌使土壤呈稀糊状;于缸内壁处挖1个定植穴,从每个观赏荷花品种中选取健壮且顶芽饱满的种藕进行移栽。移栽时,将种藕顶芽朝下沿缸内壁定植穴插入泥中,随即覆土掩埋种藕,确保种藕尾端翘出泥面,完成定植。出现立叶后选择氮磷钾配比为15:15:15的平衡型复合肥进行追肥,每隔15 d施1次肥。所有品种栽培管理条件保持一致。

1.2 试验方法

1.2.1 表型性状测定 参照《荷花新品种性状记载项目的制定》^[12],每个品种选择叶高、叶长、叶宽、叶柄长、叶柄粗、花高度、花冠直径、花被片数、雄蕊数和雌蕊心皮数等10个数量性状以及立叶形状、成熟叶腹面颜色、叶脐间距、叶表面光滑程度、叶柄被刺、叶姿、花色、花型、花态、雄蕊瓣化程度、雌蕊泡化程度等11个质量性状进行观察测量并登记。数量性状随机测定3次,质量性状依据《莲种质资源描述规范和数据标准》^[13]略作修改并分别进行赋值。通过取样适当性(KMO)检验和巴特利特(Bartlett)球形检验结果判断以上21个表型性状后进行主成分分析。

表 1 本试验所用观赏荷花品种

Table 1 Ornamental lotus cultivars used in this experiment

编号	品种	编号	品种	编号	品种	编号	品种
1	姬妃莲	61	霓裳曲	121	银叶千红	181	香山莲
2	点绛唇	62	微山红莲	122	月华	182	小碧莲
3	红千叶	63	红碗	123	百媚莲	183	碧台晨曦
4	小玉楼	64	粉楼春	124	状元红	184	广寒宫
5	点额状	65	天娇	125	锦袍红	185	白洋淀白莲
6	醉半醺	66	粉红莲	126	文君拂红	186	玉碗
7	龙飞	67	千瓣莲	127	葵花向阳	187	白衣战士
8	天高云淡	68	红盏托珠	128	睡美人	188	黔灵白荷
9	丽霞	69	秋水长天	129	贵妃莲	189	东湖白莲
10	采莲曲	70	粉碗莲	130	宝石花	190	一丈青
11	建乡壮士	71	玫园秀色	131	桃园春色	191	荆州莲
12	桃粉杯	72	娇容碗莲	132	东湖夕照	192	曲光
13	相见欢	73	玄武红莲	133	绍兴红莲	193	玉蝶托翠
14	荆枝 1 号	74	碧血丹心	134	案头春	194	白雪公主
15	霞光染指	75	洪湖红莲	135	东湖春晓	195	广陵红
16	佛见笑	76	僧帽莲	136	火炬	196	云腾霞蔚
17	粉层托翠	77	明珠	137	红牡丹	197	翠云
18	玛瑙红	78	小寿星	138	娇娘	198	菊莲
19	万千山芙蓉	79	春不老	139	积翠	199	小菊
20	友谊红 3 号	80	华灯初上	140	醉云	200	宜良莲 1 号
21	小碧台	81	蟹爪莲	141	富贵莲	201	翠湖龙池莲
22	寿星桃	82	东湖红莲	142	杏花春雨	202	玉玲珑
23	天锦	83	粉娃娃莲	143	娃娃莲	203	鸳鸯锦
24	红万万	84	青菱红莲	144	许昌娃娃莲	204	樱莲
25	白云碗莲	85	剑舞	145	赛锦	205	佛手观音
26	大丰	86	爱莲红	146	溢彩	206	思想
27	墨荷	87	一天四海	147	丹鹤	207	玉佛手
28	含笑	88	国庆红	148	大酒锦	208	双喜
29	小醉仙	89	杏黄	149	流云	209	彩云飞渡
30	西湖红莲	90	红霞满天	150	白雪公主	210	梔子碗莲
31	千瓣莲	91	淮海红莲	151	株洲红莲	211	婵娟
32	粉霞	92	红雨	152	光芒万丈	212	夜明珠
33	田园牧歌	93	武汉花莲	153	紫玉莲	213	晓风凉月
34	佛手莲	94	圣火	154	小舞妃	214	舞妃莲
35	太空莲 3 号	95	名流	155	大师莲	215	雨花
36	艳新装	96	粉楼台	156	秣陵秋色	216	一丈粉
37	绯红	97	小金凤	157	红唇	217	玫红重瓣
38	粉松球	98	红领巾	158	晨曦	218	风暴
39	笑靥	99	桃花雷雨	159	玉羽	219	芙蓉秋色
40	婴儿红	100	童羞面	160	黄舞妃	220	绿之星
41	秋月	101	孙文莲	161	喜洋洋	221	卓越
42	红台莲	102	荆枝 1 号	162	秋翠	222	摇华
43	玉楼人醉	103	粉霞	163	金凤展翅	223	如意观音
44	玉蝶佛翠	104	娇容三变	164	西施浣纱	224	牡丹
45	友谊红 2 号	105	微雨	165	友谊牡丹莲	225	笛女
46	统帅	106	红日东升	166	莺莺	226	小白球
47	红映珠莲	107	朝云	167	金凤出巢	227	红楼梦
48	祝福	108	落霞映雪	168	枇杷橙	228	翠柳
49	扬州碗莲	109	鼓浪小红	169	官娘玉脚	229	素雅
50	胭脂露	110	一点红	170	金太阳	230	舞女
51	红蜻蜓	111	红娃娃莲	171	希望	231	小桃红
52	钗头凤	112	粉玲珑	172	白君子莲	232	银合欢
53	玛瑙红	113	重瓣八一莲	173	白天鹅	233	心手相连
54	小佛手	114	露半唇	174	白万万	234	惊艳
55	红晕碟影	115	东方明珠	175	貂蝉揽鬓	235	粉桃
56	伯里夫人	116	舒广袖	176	水晶白	236	喜相逢
57	娇容醉杯	117	绿房含珠	177	白芍药莲	237	勇士
58	红湘莲	118	嵯县粉莲	178	奔月	238	牡丹仙子
59	千堆锦	119	羊城碗莲	179	小羚羊		
60	飞菊	120	丹绣球	180	天山碧台		

1.2.2 数据处理 采用 Microsoft Excel 2019 软件对数据进行整理,计算各性状的平均值、标准差及变异系数;遗传多样性指数采用 Shannon-Wiener 多样性指数 (H') 进行计算,具体计算方法参照魏晓羽等^[14]的方法;利用 SPSS 22.0 统计软件开展主成分分析与相关性分析,并通过邓肯氏新复极差法检验各组数据均值的差异显著性 ($P < 0.05$ 表示差异达显著水平, $P < 0.01$ 表示差异达极显著水平);借助 Origin 2021 软件完成聚类分析及可视化绘图。

2 结果与分析

2.1 观赏荷花种质资源质量性状的遗传多样性

对 238 份观赏荷花资源的 11 个质量性状进行

表 2 观赏荷花种质资源质量性状的遗传多样性及其频率分布

Table 2 Genetic diversity and frequency distribution of qualitative traits in ornamental lotus germplasm resources

性状	遗传多样性指数 (H')	频率分布 (%)					
		1	2	3	4	5	6
立叶形状	7.844	20	76	4			
成熟叶腹面颜色	7.814	49	51				
叶脐间距	7.858	18	82				
叶表面光滑程度	7.771	37	39	24			
叶柄被刺	7.819	10	50	33	8		
叶姿	7.819	32	64	4			
花色	7.776	20	3	59	12	5	
花型	7.730	42	8	50			
花态	7.810	4	13	53	8	18	4
雄蕊瓣化程度	7.781	54	41	5			
雌蕊泡化程度	7.708	79	7	12			

立叶形状编码 1、2、3 分别对应近圆形、椭圆形、长椭圆形;成熟叶腹面颜色编码 1、2 分别对应墨绿色、绿色;叶脐间距编码 1、2 分别对应较近、狭窄;叶表面光滑程度编码 1、2、3 分别对应光滑、略粗糙、粗糙;叶柄被刺编码 1、2、3、4 分别对应无刺、稀少刺、少刺、多刺;叶姿编码 1、2、3 分别对应漏斗形、浅凹形、平展形;花色编码 1、2、3、4、5 分别对应白色系、黄色系、粉红色系、红色系、复色系;花型编码 1、2、3 分别对应单瓣型、半重瓣型、重瓣型;花态编码 1、2、3、4、5、6 分别对应接近不展开、杯状、碗状、飞舞状、碟状、叠球状;雄蕊瓣化程度编码 1、2、3 分别对应正常、少瓣化、多瓣化;雌蕊泡化程度编码 1、2、3 分别对应无泡化、部分泡化、全泡化。频率分布值分别表示在 11 个质量性状各赋值条件出现的样本数占总样本数的百分比。

2.2 观赏荷花数量性状的遗传多样性

由表 3 可知,238 份观赏荷花种质资源的 10 个数量性状的 H' 为 7.560~7.881,其中叶长遗传多样性指数最大,表明其遗传多样性最丰富,其次是叶宽、叶高、叶柄长和花冠直径,花被片数的遗传多样性指数最小。10 个数量性状的变异系数为 13.93%~64.82%,雄蕊数的变异系数超过了 30%,叶柄长、叶柄粗、花高度、花冠直径、雌蕊心皮数等性状的变异系数均超过 20%,花被片数变异系数最大,为 64.82%,说明各资源之间大多数数量性状的遗传变异较大,花被片数的变异程度最高。

遗传多样性和频率分析,结果如表 2 所示,11 个质量性状的遗传多样性指数 (H') 为 7.708~7.858,其中叶脐间距、立叶形状、叶柄被刺和叶姿的 H' 相对较高,雌蕊泡化程度、花型、叶表面光滑程度和花色的 H' 相对较低。

根据质量性状的频率分布可知,238 份观赏荷花资源中立叶形状以椭圆形为主;成熟叶腹面颜色墨绿色与绿色比例接近 1:1;叶脐间距以狭窄为主;叶柄被刺以稀少刺为主;叶姿以浅凹形为主;花色以粉红色为主;花型以重瓣为主,单瓣次之;花态以碗状为主;雄蕊瓣化程度以正常为主,其次为少瓣化;雌蕊泡化程度以无泡化为主。

2.3 观赏荷花数量性状的相关性

对 238 份观赏荷花资源的 10 个数量性状进行相关性分析,结果如表 4 所示,多数性状之间存在显著或极显著的相关性 ($P < 0.05$ 、 $P < 0.01$),除花被片数外,其余 9 个性状之间均存在正相关,相关系数较高的有叶高与叶长、叶宽、叶柄长、叶柄粗之间,叶长与叶宽、叶柄长、叶柄粗之间,花高度和花冠直径、雌蕊心皮数之间,花冠直径与雌蕊心皮数之间,雄蕊数与雌蕊心皮数之间,相关系数均超过 0.500,说明叶长等叶部相关性状之间以及生殖器官相关性状之间分别存在较强的正向连锁遗传关系。花被片数与其

他性状之间多呈负相关,且与花高度、花冠直径、雄蕊数、雌蕊心皮数 4 个性状的负相关性达到显著或极显著水平 ($P < 0.05$ 、 $P < 0.01$),但是相关系数较小,表明花被片数在遗传表现上相对独立。

表 3 观赏荷花种质资源数量性状的遗传多样性

Table 3 Genetic diversity of quantitative traits in ornamental lotus germplasm resources

性状	最大值	最小值	平均值±标准差	性状	变异系数(%)	遗传多样性指数(H')
叶高(cm)	156.57	37.83	116.30±21.52	叶高	18.51	7.868
叶长(cm)	54.53	25.30	39.49±5.50	叶长	13.93	7.881
叶宽(cm)	47.07	18.57	31.46±5.51	叶宽	17.52	7.873
叶柄长(cm)	144.03	19.33	99.39±20.09	叶柄长	20.21	7.862
叶柄粗(cm)	12.00	2.53	8.40±1.75	叶柄粗	20.84	7.859
花高度(cm)	148.73	36.73	91.51±20.17	花高度	22.04	7.859
花冠直径(cm)	30.03	9.60	15.90±3.49	花冠直径	21.94	7.861
花被片数(片)	137.33	13.00	58.93±38.20	花被片数	64.82	7.560
雄蕊数(个)	321.33	27.67	148.09±48.08	雄蕊数	32.46	7.814
雌蕊心皮数(个)	21.67	4.67	11.18±3.03	雌蕊心皮数	27.11	7.843

表 4 观赏荷花 10 个数量性状的相关性分析结果

Table 4 Correlation analysis of 10 quantitative traits in ornamental lotus

性状	叶高	叶长	叶宽	叶柄长	叶柄粗	花高度	花冠直径	花被片数	雄蕊数	雌蕊心皮数
叶高	1.000									
叶长	0.643**	1.000								
叶宽	0.563**	0.880**	1.000							
叶柄长	0.891**	0.571**	0.490**	1.000						
叶柄粗	0.550**	0.545**	0.464**	0.501**	1.000					
花高度	0.412**	0.263**	0.245**	0.379**	0.117	1.000				
花冠直径	0.226**	0.283**	0.265**	0.189**	0.203**	0.574**	1.000			
花被片数	-0.014	-0.078	-0.115	0.004	-0.032	-0.148*	-0.317**	1.000		
雄蕊数	0.158*	0.260**	0.318**	0.120	0.219**	0.396**	0.449**	-0.391**	1.000	
雌蕊心皮数	0.209**	0.314**	0.329**	0.180**	0.170**	0.513**	0.563**	-0.251**	0.682**	1.000

*表示相关性达 0.05 显著水平; **表示相关性达 0.01 极显著水平。

2.4 观赏荷花表型性状的主成分分析

对观赏荷花 21 个表型性状的 KMO 检验和 Bartlett 球形检验结果(表 5)显示,KMO 度量值为 0.752, Bartlett 球形检验的显著性概率值为 0,表明可以对 238 份观赏荷花种质资源的 21 个表型性状进行主成分分析。

表 5 KMO 检验和 Bartlett 球形检验结果

Table 5 KMO test and Bartlett's sphericity test results

KMO 度量值	Bartlett 球形检验		
	近似卡方(χ^2)	自由度	显著性概率
0.752	2 343.572	210	0

主成分分析结果能够清楚地了解各性状对于观赏荷花表型性状多样性的贡献,通过降维把多指标转换为少数几个综合指标。根据特征值和贡献率选择主成分,以特征值大于 1.000 为标准提取主成分^[15]。由主成分碎石图(图 1)可知,前 5 个主成分的特征值 > 1.000,累积贡献率为 61.799%(表 6),包含了全部指标的大部分信息,表明这 5 个主成分能代表 21 个表型性状所代表的大多数遗传信息。由表 6、表 7 可知,第 1 主成分的特征值为 4.740,方差贡献率为 22.573%,特征向量绝对值 > 0.500 的有叶高、叶长、叶宽、叶柄长、叶柄粗、花高度、花冠直径、雄蕊数、雌蕊心皮

数和雌蕊泡化程度,基本反映了观赏荷花的长势情况;第2主成分的特征值为2.963,方差贡献率为14.110%,特征向量绝对值 >0.500 的有花被片数、花型和雄蕊瓣化程度,基本反映了观赏荷花的花发育状态;第3主成分的特征值为2.107,方差贡献率为10.034%,特征向量绝对值 >0.500 的有花高度、立叶形状、叶脐间距、叶姿,基本反映了观赏荷花的株型发育状态;第4主成分的特征值为1.941,方差贡献率为9.242%,特征向量绝对值 >0.500 的仅有叶柄被刺;第5主成分特征值1.227,方差贡献率5.842%,特征向量绝对值 >0.500 的仅有花色,其次为立叶形状和花态,其他性状特征向量值较小。因此,根据贡献率、特征值和特征向量大小的主成分分析,本研究所选的21个性状中,叶高、叶长、叶宽、叶柄长、叶柄粗、花高度、花冠直径、雄蕊数、雌蕊心皮数、雌蕊泡化程度、花被片数、花型、雄蕊瓣化程度、立叶形状、叶脐间距、叶姿、叶柄被刺、花色等18个性状均具有较好的代表性,基本反映了观赏荷花资源的表型性状差异。

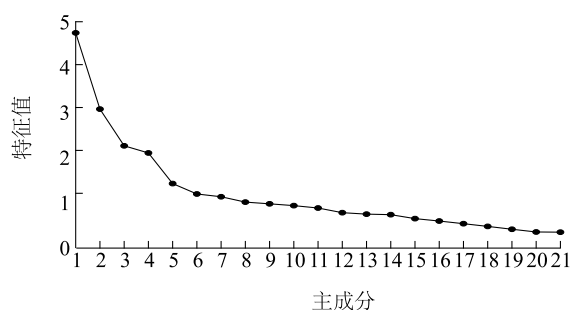


图1 主成分碎石图

Fig.1 Scree plot of principal components

2.5 基于数量性状的观赏荷花聚类分析

为避免同时利用质量性状和数量性状进行聚类分析对不同特性的观赏荷花种质资源分类造成干扰,本研究重点基于10个数量性状对238份观赏荷花种质资源进行聚类分析,探究种质资源间的亲缘关系。在欧氏距离120处可以将所有资源划分为6个类群(图2)。第I类群有2个品种,分别是大洒锦和桃花雷雨,表现为较多的雄蕊数、雌蕊心皮数以及较粗的叶柄,雄蕊数均大于270,雌蕊心皮数大于16;第II类群有7个品种,是以粉层托翠、小佛手、微雨、月华、睡美人、富贵莲及秋翠

为代表的有限生长类型,表现为株型较为矮小、叶长、叶宽以及花冠直径较小;第III类群包含5个品种,主要是以佛手莲、艳新装、华灯初上、贵妃莲及一丈青为代表,主要特点为雄蕊数较多(208~242)、雌蕊心皮数较多(11~16);第IV类群包含龙飞、桃粉杯、红湘莲等18份资源,主要表现为矮生重瓣型,特点是花的高度偏矮、花被片数较多、雄蕊数和雌蕊心皮数均偏少;第V类群以红千叶、醉半醺、丽霞等为代表的103份资源,中等生长类型,性状表现适中;第VI类群以姬妃莲、点额状、天高云淡等为代表的103份资源,高大生长类型,性状表现中等偏上,多为传统单瓣型品种,主要具备植株较高、花型较大、花被片数偏少且雌蕊和雄蕊数量较多等特点。

表6 观赏荷花种质资源表型性状的主成分提取

Table 6 Principal component extraction of phenotypic traits in ornamental lotus germplasm resources

提取的主成分	特征值	方差贡献率 (%)	累积贡献率 (%)
主成分1	4.740	22.573	22.573
主成分2	2.963	14.110	36.682
主成分3	2.107	10.034	46.716
主成分4	1.941	9.242	55.958
主成分5	1.227	5.842	61.799
主成分6	0.984	4.686	66.485
主成分7	0.919	4.378	70.863
主成分8	0.795	3.784	74.648
主成分9	0.755	3.593	78.241
主成分10	0.713	3.393	81.634
主成分11	0.657	3.128	84.762
主成分12	0.548	2.609	87.371
主成分13	0.514	2.449	89.820
主成分14	0.502	2.389	92.209
主成分15	0.409	1.950	94.159
主成分16	0.353	1.683	95.842
主成分17	0.291	1.388	97.229
主成分18	0.228	1.087	98.316
主成分19	0.162	0.770	99.087
主成分20	0.098	0.468	99.555
主成分21	0.093	0.445	100.000

特征值为各主成分的方差贡献强度,方差贡献率为单个主成分解释的变异比例,累积贡献率为前n个主成分解释的总变异比例。

表 7 观赏荷花种质资源的 21 个表型性状主成分分析

Table 7 Principal component analysis of 21 phenotypic traits in ornamental lotus germplasm resources

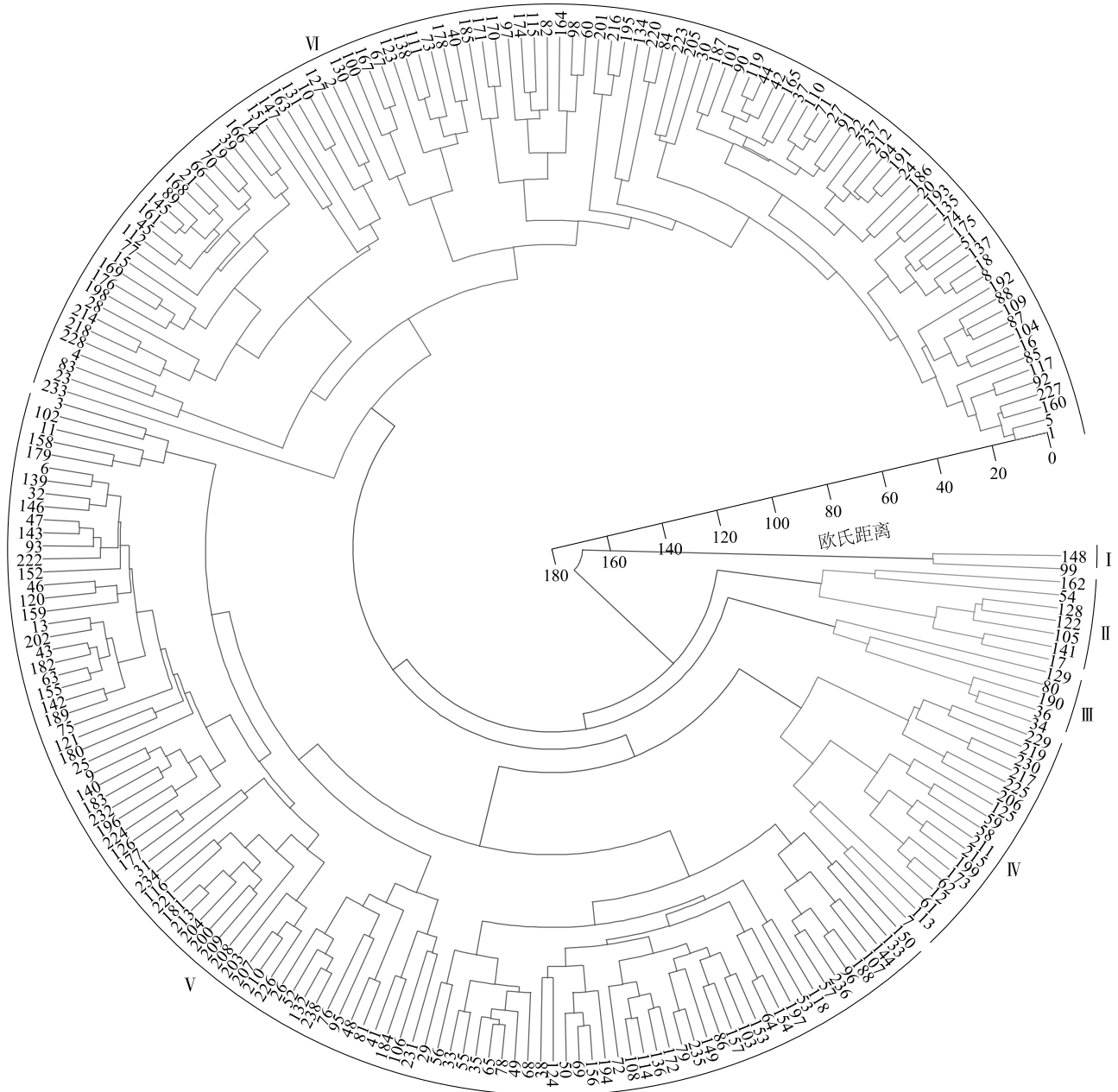
性状	主成分特征向量				
	第 1 主成分	第 2 主成分	第 3 主成分	第 4 主成分	第 5 主成分
叶高	0.701	0.487	-0.064	-0.306	0.013
叶长	0.746	0.386	0.153	-0.096	-0.174
叶宽	0.713	0.322	0.112	-0.069	-0.245
叶柄长	0.653	0.473	-0.077	-0.324	0.029
叶柄粗	0.568	0.396	0.290	-0.094	0.078
花高度	0.605	-0.054	-0.535	0.083	0.190
花冠直径	0.618	-0.190	-0.252	0.354	0.165
花被片数	-0.416	0.713	-0.171	0.183	0.029
雄蕊数	0.619	-0.315	0.012	0.407	0.015
雌蕊心皮数	0.651	-0.227	-0.208	0.434	0.060
立叶形状	-0.033	-0.042	0.594	0.086	0.451
成熟叶腹面颜色	0.087	0.158	0.437	-0.327	0.332
叶脐间距	0.178	0.104	0.589	0.062	0.031
叶表面光滑程度	0.312	0.141	0.205	0.456	-0.264
叶柄被刺	-0.019	-0.145	0.462	0.676	-0.230
叶姿	-0.046	0.093	0.543	0.143	0.153
花色	-0.008	-0.076	-0.115	0.051	0.688
花型	-0.409	0.746	-0.167	0.273	0.006
花态	0.054	0.421	-0.245	0.457	0.352
雄蕊瓣化程度	-0.308	0.671	0.001	0.325	0.014
雌蕊泡化程度	-0.551	0.345	-0.117	0.074	-0.065

3 讨论

3.1 观赏荷花种质资源表型性状的遗传多样性

植物表型性状多样性受遗传与环境因素的综合调控,深入开展植物表型性状遗传多样性研究,是种质资源鉴定、保护及评价利用的重要基础,对挖掘骨干亲本、综合评价性状改良潜力、推动作物遗传育种创新具有关键作用^[16-17]。本研究对 238 份观赏荷花种质资源的表型性状进行遗传多样性分析,结果显示,11 个质量性状和 10 个数量性状的遗传多样性指数均高于 7.000,表明供试种质资源的遗传背景丰富,238 份品种间存在极高的遗传多样性,其亚类分布趋于均衡,性状构成复杂且遗传背景稳定。质量性状遗传多样性指数的平均值低于数量性状,该结果与张斌斌等^[18]、李沛等^[19]的研究结果一致。10

个数量性状的变异系数介于 13.93%~64.82%,其中花被片数的变异系数最大(64.82%),其变幅为 13.00 片至 137.33 片,这表明花被片数在供试种质间存在广泛表型变异,该特点与原鑫等^[10]的研究结果相符。花型作为与花被片数紧密关联的质量性状,其遗传多样性指数在 11 个质量性状中也处于较低水平(7.730),说明花型的遗传变异相对保守,暗示通过定向改良花被片数来实现花型创新具有潜在可行性。数量性状中变异系数最小的为叶长(13.93%),其次为叶宽(17.52%)和叶高(18.51%),这与徐君等^[20]、原鑫等^[10]的研究结果相似。表明叶部 3 个性状在群体水平的表型差异较小,种质间同质化程度较高,结合遗传特性分析,推测此类性状受多基因协同调控,且对环境胁迫的敏感性较低,不易产生较大的表型突变。



1~238 见表 1。

图 2 238 份观赏荷花种质资源聚类图

Fig.2 Cluster dendrogram of 238 ornamental lotus germplasm resources

3.2 观赏荷花种质资源表型性状综合评价结果

相关性和主成分分析是种质资源综合评价的重要方法,已在多种作物上得以应用^[21-23],有利于提高育种水平和多目标育种的亲本选配效果^[24-25]。本研究对参试观赏荷花种质资源的 10 个数量性状进行相关性分析,对 21 个表型性状进行主成分分析。结果显示,在相关性分析中,叶长等大多数叶部性状之间以及花器官大多数生殖性状之间分别存在

显著或极显著的相关性,表明许多性状之间存在紧密的连锁遗传关系,这为后续通过 1 个目标性状改良实现观赏荷花的多目标育种提供了重要参考;花被片数与其余性状之间相关性较小,再次表明花被片数可以作为独立的目标性状进行定向育种改良;在主成分分析中,以特征值大于 1.000 为标准提取主成分,前 5 个主成分累计贡献率为 61.799%,21 个表型性状可以降维至长势、花发育状态、株型发育

状态、叶柄被刺和花色等5个主成分,代表了观赏荷花种质资源的大多数遗传信息,为后续观赏荷花表型性状的综合改良提供了参考依据。

3.3 基于表型性状的观赏荷花种质资源分类

利用表型性状开展聚类分析,可有效揭示种质资源间亲缘关系的远近,明确不同类群资源的表型性状的特征特性,对育种者挖掘亲本组合潜力、指导杂交亲本定向选择具有重要意义,该方法已在种质资源遗传多样性评价中广泛应用^[26-28]。本研究基于表型性状的聚类分析结果表明,238份观赏荷花种质资源可划分为6个类群,不同类群种质具有差异化表型特征,而同群种质的表型特征则表现出较高一致性。其中,第Ⅰ类群种质的雄蕊数和雌蕊心皮数较多,可作为育性优良、结实率较高的杂交亲本;第Ⅱ类群以矮生表型为显著特征,为碗莲品种的定向培育提供了关键种质资源;第Ⅳ类群兼具矮生与重瓣特性,是矮生重瓣型荷花育种的重要亲本材料;第Ⅵ类群种质植株高大,可用于高大型观赏荷花新品种的选育;其余类群(Ⅲ、Ⅴ类群)的表型特征及育种价值有待进一步挖掘。

此外,聚类分析清晰揭示了238份观赏荷花种质资源的遗传亲缘关系。在杂交育种实践中,选择不同类群间遗传距离较远的种质进行杂交,往往能够创制出遗传变异丰富且具有超亲优势的杂交后代。综上,本研究的聚类分析结果为后续目标性状筛选及骨干亲本遴选提供了理论支撑,有助于育种者优化杂交组合配置,提升观赏荷花特异性状改良效率及优良新品种培育的成功率。

4 结论

本研究发现,观赏荷花种质资源遗传多样性丰富,花型的遗传变异相对保守;叶部相关性状之间以及生殖器官相关性状之间分别存在显著或极显著的相关性,可实现观赏荷花的多目标育种;21个表型性状可以降低至5个主成分,为观赏荷花表型性状的综合改良提供了依据;聚类分析将238份观赏荷花种质资源划分6个亚群,亚群内的种质资源的特征特性相似,有利于育种者根据不同亚群的表型特征选择合适的亲本用于品种创制。本研究结果为观赏荷花种质资源评价、品种分类及优异杂交亲本选配提供了理论参考,对于提高观赏荷花育种效率,推动突破性品种创制具有积极意义。

参考文献:

- [1] ZHOU P, JIN Q, QIAN P, et al. Genetic resources of lotus (*Nelumbo*) and their improvement[J]. *Ornamental Plant Research*, 2022, 2(1): 1-17.
- [2] LI Y, SVETLANA P, YAO J X, et al. A review on the taxonomic, evolutionary and phylogeographic studies of the lotus plant (*Nelumbonaceae: Nelumbo*) [J]. *Acta Geologica Sinica-English Edition*, 2014, 88(4): 1252-1261.
- [3] GUO H B. Cultivation of lotus (*Nelumbo nucifera* Gaertn. ssp. *nucifera*) and its utilization in China [J]. *Genetic Resources and Crop Evolution*, 2009, 56(3): 323-330.
- [4] 刘正位,匡晶,朱红莲,等. 莲属植物资源和育种研究进展[J]. *园艺学报*, 2020, 47(9): 1845-1858.
- [5] 钟琳珊,林发壮,姚凤琴,等. 56个荷花品种引种评价及遗传多样性分析[J]. *南方农业学报*, 2024, 55(7): 2080-2089.
- [6] LI Z, LIU X Q, GITURU R W, et al. Genetic diversity and classification of *Nelumbo* germplasm of different origins by RAPD and ISSR analysis [J]. *Scientia Horticulturae*, 2010, 125(4): 724-732.
- [7] YANG M, LIU F, HAN Y, et al. Genetic diversity and structure in populations of *Nelumbo* from America, Thailand and China: implications for conservation and breeding [J]. *Aquatic Botany*, 2013, 107: 1-7.
- [8] FU J, XIANG Q Y, ZENG X B, et al. Assessment of the genetic diversity and population structure of lotus cultivars grown in China by amplified fragment length polymorphism [J]. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 2011, 136(5): 339-349.
- [9] LIU Z W, ZHU H L, ZHOU J H, et al. Resequencing of 296 cultivated and wild lotus accessions unravels its evolution and breeding history [J]. *The Plant Journal: for Cell and Molecular Biology*, 2020, 104(6): 1673-1684.
- [10] 原鑫,李文玲,刘召强,等. 荷花品种表型性状遗传多样性分析[J]. *江苏农业科学*, 2020, 48(16): 188-193.
- [11] 吴芳芳,原鑫,苏少文,等. 荷花品种的花器官表型性状及花色多样性分析[J]. *河南农业大学学报*, 2020, 54(1): 24-29, 37.
- [12] 王其超,张行言. 荷花新品种性状记载项目的制定[J]. *中国园林*, 2012, 28(1): 74-77.
- [13] 柯卫东,李峰. 莲种质资源描述规范和数据标准[M]. 北京: 中国农业出版社, 2005.
- [14] 魏晓羽,刘红,瞿辉,等. 158份春兰种质资源的表型多样性分析[J]. *植物遗传资源学报*, 2022, 23(2): 398-411.
- [15] 王晓静,梁燕,徐加新,等. 番茄品质性状的多元统计分析[J]. *西北农业学报*, 2010, 19(9): 103-108.
- [16] 魏仕伟,杨华,张前荣,等. 基于表型性状的叶用莴苣资源多样性分析[J]. *植物遗传资源学报*, 2016, 17(5): 871-876.
- [17] 李玉珊,肖菁,马越,等. 169份番茄种质资源表型性状遗传多样性分析及综合评价[J]. *中国农业科学*, 2024, 57(18):

- 3671-3687.
- [18] 张斌斌,蔡志翔,沈志军,等. 观赏桃种质资源表型性状多样性评价[J]. 中国农业科学,2021,54(11):2406-2420.
- [19] 李 沛,何治霖,谈月霞,等. 基于重测序数据与表型性状的宽皮柑橘遗传多样性分析与优异种质筛选[J]. 中国农业科学,2024,57(23):4761-4795.
- [20] 徐 君,李 欣,江 君,等. 基于表型和 ISSR 标记的小株型荷花遗传多样性分析[J]. 江苏农业科学,2019,47(19):137-141.
- [21] 王秀秀,邢爱双,杨 茹,等. 陆地棉种质资源表型性状综合评价[J]. 中国农业科学,2022,55(6):1082-1094.
- [22] 谢雪果,彭晓云,李云驹,等. 115 份设施番茄表型性状遗传多样性分析[J]. 江苏农业学报,2024,40(8):1361-1370.
- [23] 唐桂梅,李卫东,周宇霞,等. 基于表型性状分析蕙兰种质资源遗传多样性[J]. 中国农业科学,2025,58(2):339-354.
- [24] 孙东雷,卞能飞,陈志德,等. 花生种质资源表型性状的综合评价及指标筛选[J]. 植物遗传资源学报,2018,19(5):865-874.
- [25] 赵陆滢,许俊强,许 彬,等. 236 份黄瓜种质资源农艺性状的遗传多样性分析及优异种质筛选[J]. 南方农业学报,2021,52(1):145-154.
- [26] 赵天荣,蔡建岗. 主成分和聚类分析在蟹爪兰资源评价及育种中的应用[J]. 浙江农业学报,2014,26(2):319-324.
- [27] 田 宏,党志强,张鹤山,等. 31 份狼尾草种质资源的表型性状多样性分析和观赏性综合评价[J]. 江苏农业学报,2025,41(7):1270-1279.
- [28] 杨 涛,黄雅婕,李生梅,等. 海岛棉种质资源表型性状的遗传多样性分析及综合评价[J]. 中国农业科学,2021,54(12):2499-2509.

(责任编辑:黄克玲)