

孙 燕,冯筱涵,仝伯强,等. 67份牡丹种质资源表型多样性分析及综合评价[J]. 江苏农业科学,2023,51(15):130-140.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2023.15.019

67份牡丹种质资源表型多样性分析及综合评价

孙 燕¹,冯筱涵¹,仝伯强²,关凌珊^{2,3},刘金石^{2,4},穆艳娟²,孙 涛²,鲁仪增²,
刘 涛²,刘 鹏²,刘瑞杰⁵,程丹丹⁶,于春风⁷,高德民¹

[1. 山东中医药大学药学院,山东济南 250355; 2. 山东省林草种质资源中心,山东济南 250102; 3. 山东农业大学林学院,山东泰安 271018;
4. 北京农学院园林学院,北京 102206; 5. 山东农业工程学院农业科技学院,山东济南 250100;
6. 齐鲁工业大学(山东省科学院菏泽分院),山东菏泽 274000; 7. 甘肃济临牡丹科技产业有限公司,甘肃临夏 731100]

摘要:以67份代表性牡丹种质资源为研究对象,选取表型的24个质量性状和26个数量性状进行描述和测定,采用变异分析、聚类分析、相关性分析、主成分分析和表型性状综合评价方法,结合多样性指数,对牡丹表型性状进行多样性分析及综合评价。67份牡丹种质资源的表型呈现出变异类型多、变异程度高等特点,质量性状 Shannon - weaver 指数为0.183~1.860,数量性状变异系数为6.02%~37.41%,单果种子数变异系数(37.41%)最大。当欧氏距离为17.5时,67份种质资源可分为7个类群,其中类群II的种质数量最多(37个),初步明确了各类群的主要特征性状,表明牡丹品种在表型性状上具明显差异,而各数量性状间大部分存在显著相关性。前8个主成分累积贡献率达到80.973%,可综合代表牡丹表型数据的大部分信息。针对油用、观赏、综合利用等不同用途进行评价,共筛选出10份最优种质。牡丹种质资源表型多样性高、变异类型丰富,为牡丹品种选育奠定了物质基础,期待筛选出的不同用途牡丹种质可为牡丹的开发利用及新品种选育提供参考。

关键词:牡丹;种质资源;表型性状;多样性;综合评价

中图分类号:S685.110.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2023)15-0130-11

牡丹(*Paeonia suffruticosa* Andr.)为芍药科(Paeoniaceae)芍药属(*Paeonia*)牡丹组(Section Moutan DC.)植物,雌雄同株,其品种多,栽培历史悠久,分布范围广,被尊称为“花中之王”^[1]。牡丹是集药用^[2-5]、油用^[6-9]、观赏^[10-12]等综合利用开发为一体的多功能高效益名贵花卉,应用潜力巨大。对于牡丹多价值的资源需求,推动了牡丹育种工作的进程。表现型极易产生变异的特点^[13-14]使牡丹品种呈现多样化,表现出丰富的遗传多样性,在相当程度上扩充了牡丹种质资源,为牡丹的性状改良奠定了基础。因此,开展牡丹种质资源表型性状遗传变异及综合评价研究,对牡丹种质资源保护、创新利用及定向育种有重要意义。

目前有关牡丹种质资源遗传变异和多样性评价大多为单一品种表型性状的研究,如紫斑牡丹^[13,15-19]、滇牡丹^[14,20]、日本牡丹^[21]、大花黄牡丹^[22]等。以多个品种表型性状为研究对象的报道主要集中在油用牡丹^[23-25],其表型性状多以种子大小、含油量、单株产量为主,目的是筛选高产油用牡丹品种。涉及株型、叶型、花型等观赏性状统计研究的报道较少^[15-16],而对于牡丹多品种样本多性状的研究更少,进而影响了牡丹育种的进程。

在前期研究的基础上,笔者所在课题组对同质圃中保存的300多个牡丹品种资源进行连续多年的观察和比较,目前已筛选出67份具有观赏、药用、油用的代表性品种,选择24个质量性状和26个数量性状进行多元统计分析和综合评价,旨在为定向筛选优良种质,也为牡丹开发利用及新品种选育提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

所有试验材料均来自山东省林草种质资源中心港沟保育库同质圃(36°37'34.83"N,

收稿日期:2022-11-20

基金项目:鲁甘科技协作项目(编号:YDZX2021103);山东省重点研发计划(农业良种工程)项目(编号:2020LZGC009);山东省重点研发计划(编号:2021SFGC1205)。

作者简介:孙 燕(1998—),女,山东荣成人,硕士研究生,研究方向为中药资源学。E-mail:1066550819@qq.com。

通信作者:高德民,博士,教授,研究方向为中药资源及开发利用。E-mail:gdm607@126.com。

117°10′20.79″E),该圃位于山东省济南市历城区,属于温带季风气候区,年均气温 15.0 ℃,年均降水量 661.8 mm,年均日照时数 2 970.2 h(数据来源于 2021 中国统计年鉴 <http://www.stats.gov.cn/tjsj/>

ndsj/2021/indexch.htm)。试验于 2022 年 4—9 月进行,选取的 67 份牡丹种质资源为已移栽并生长 3 年的牡丹品种(表 1)。

表 1 67 份牡丹种质资源名称及编号

编号	种质名称	编号	种质名称	编号	种质名称	编号	种质名称
1	鲁荷红	18	飞燕	35	秀丽红	52	太阳
2	黑海撒金	19	初鸟	36	小叶青龙卧墨池	53	雏鹅黄
3	雪迎桃花	20	A2	37	映红	54	晨红
4	胭脂红	21	岛锦	38	捧盛子	55	A18
5	乌金耀辉	22	富贵满堂	39	乌云集盛	56	姚黄
6	卷叶红	23	层中笑	40	大红宝珠	57	古城春色
7	彩绘	24	珠光墨润	41	A14	58	腰带红
8	紫二乔	25	如花似玉	42	B2	59	新日月
9	花二乔	26	古斑统春	43	锦袍红	60	群芳殿
10	红宝石	27	粉兰盘	44	赵粉	61	烟龙紫
11	香玉	28	肉芙蓉	45	A0	62	月宫珠光
12	景玉	29	王妃插雪	46	粉中冠	63	冠世墨玉
13	兰月亮	30	雪塔	47	首案红	64	宫娥乔装
14	冠群芳	31	A13	48	新世纪	65	平湖秋月
15	桃红飞翠	32	紫云	49	朱沙垒	66	柳叶红
16	玉面桃花	33	花蝴蝶	50	中原春光	67	亭亭玉立
17	乌龙捧盛	34	鹤顶红	51	春色满园		

1.2 研究方法

1.2.1 质量性状测定方法 根据《中国牡丹种质资源》^[26]记载的牡丹形态特征,分别对花蕾形态、花姿、花色、外花瓣形状、外瓣边缘、色斑形态、色斑边缘形态、色斑颜色、雄蕊着生方式、花丝颜色、雄蕊发育情况、房衣形态、房衣颜色、柱头颜色、雌蕊外观、心皮被毛情况、花萼瓣化程度、复叶形状、顶小叶顶端分裂、侧小叶形态、侧小叶边缘缺刻程度、侧小叶平整程度、侧小叶叶背被毛情况、小叶叶尖等 24 个质量性状(表 2)进行观察记录。

1.2.2 数量性状测定方法 利用米尺测量花梗长度(cm)、株高(cm)、冠幅(cm)、复叶长(cm)、复叶宽(cm)、二回羽状复叶长(cm)、二回羽状复叶宽(cm);利用游标卡尺测量花径(cm)、花高(cm)、外瓣长(cm)、外瓣宽(cm)、花药长(mm)、花丝长(mm)、叶柄长(cm)、果实直径(cm)、果角长(cm)、果角宽(cm);利用电子天平称量种子平均粒质量(g)、单果质量(g);利用 Epson/V700 PHOTO 扫描仪和 WinSEEDLE 种子图像分析系统对种子表面积(mm²)、种子长度(mm)、种子宽度(mm)、种子体积(mm³)、种子宽长比等进行统计;并通过计数法计

算小叶数(张)、单果种子数(粒)。

1.3 数据处理

利用 Microsoft Excel 2019、SPSS 21.0 软件对调查数据进行分析,并基于单因素(One - Way ANONA)方差进行统计分析。将各质量性状的调查结果进行赋值,分为 1~7 级(表 2),计算每级的分布频率,统计各性状的 Shannon - weaver 多样性指数(H')^[27-28]。多样性指数计算公式如下:

$$H' = - \sum P_i \times \ln P_i。$$

式中: P_i 为某性状第 i 级别样品数量占总数量的比例; i 为级别数。

计算各数量性状的均值、标准差、偏度、峰度、变异系数等,分析不同品种间的差异。采用平方欧氏距离因子进行聚类分析^[29]。对表型数量性状进行关联分析,相关系数使用 Pearson 系数^[30]。以特征值 >1 为提取主成分的标准,各主成分得分(Z_x)计算方法为:以主成分特征向量除以特征值的算数平方根作为权重,标准化后的原始数据与相应权重进行线性加权求和,得到主成分得分。综合评价方法的公式如下:

$$Z = \sum Z_x \times \beta_x。$$

式中: Z 为综合评价得分; Z_x 为各主成分得分值; β_x 成分数^[28]。
为各主成分对应的相对方差贡献率; x 为前 8 个主

表 2 67 份牡丹种质资源 24 个质量性状的赋值

表型质量性状	赋值级别						
	1 级	2 级	3 级	4 级	5 级	6 级	7 级
花蕾形态	扁圆形	圆形	圆尖形	长圆尖形			
花姿	直立	侧垂					
花色	白色	粉色	红色	紫红色	紫色	黑色	其他
外花瓣形状	倒卵形	圆形					
外瓣边缘	平滑	浅齿裂	深齿裂				
色斑形态	无	卵圆形	椭圆形	菱形			
色斑边缘形态	无	辐射状					
色斑颜色	无	红色	紫红色	紫色	黑色		
雄蕊着生方式	正常	腰金	点金	藏金			
花丝颜色	白色	粉红色	紫红色	黑色	其他		
雄蕊发育情况	正常	部分正常					
房衣形态	全包	半包	残存	消失			
房衣颜色	白色	粉红色	紫红色	黑色	其他		
柱头颜色	白色	粉红色	紫红色	其他			
雌蕊外观	隐含	微显	袒露				
心皮被毛情况	无	有					
花萼瓣化程度	正常	部分瓣化					
复叶形状	卵形	圆形	长形				
顶小叶顶端分裂	浅裂	中裂	深裂	全裂			
侧小叶形态	卵形	长卵形	狭长卵形				
侧小叶边缘缺刻程度	无	弱	强				
侧小叶平整程度	平整	波曲	反卷				
侧小叶叶背被毛情况	无	有					
小叶叶尖	圆钝	突尖	锐尖	渐尖			

2 结果与分析

2.1 牡丹种质资源质量性状的多样性分析

67 份牡丹种质资源质量性状的分析结果(表 3)显示,在 24 个质量性状中,共检测到 82 个变异类型。Shannon - weaver 指数(H')变化范围为 0.183 ~ 1.860,平均值为 0.836,表明牡丹种质资源质量性状的变异类型较丰富。其中,花色、色斑颜色、房衣形态、房衣颜色、柱头颜色、顶小叶顶端分裂这 6 个质量性状的 Shannon - weaver 指数较大,说明这些性状的表现型在该性状上分布比较均匀。花色多样性指数值最大,为 1.860,该性状粉色占比最多(25.37%),黑色占比最少(5.97%),而其他颜色中还包 括粉白色、蓝紫色、紫黑色等多种复合色,揭示

牡丹花色性状蕴藏较大的遗传变异。

外花瓣形状、外瓣边缘、复叶形状、侧小叶平整程度、侧小叶叶背被毛情况、小叶叶尖这 6 个性状的 Shannon - Weaver 指数较小,说明这几个性状表现型相对较少,且每个表现型在该性状上分布不均匀。其中,外花瓣形状性状中倒卵形表现型占 95.52%,同时侧小叶平整程度性状中平整表现型占 83.58%,说明大部分牡丹外花瓣为倒卵形及侧小叶呈现平整外观。

而花姿、色斑边缘形态、雄蕊发育情况、心皮被毛情况、花萼瓣化程度等其他 5 个性状的表现型分布频率几乎为 1 : 1,Shannon - Weaver 指数均在 0.680 ~ 0.693 之间,推测这些性状在牡丹种群中出现概率接近。

表 3 67 份牡丹种质资源质量性状的分布和多样性指数

表型质量性状	各性状分布率(%)							Shannon - Weave 指数
	1 级	2 级	3 级	4 级	5 级	6 级	7 级	
花蕾形态	16.42	4.48	73.13	5.97				0.833
花姿	52.24	47.76						0.692
花色	13.43	25.37	8.96	16.42	17.91	5.97	11.94	1.860
外花瓣形状	95.52	4.48						0.183
外瓣边缘	1.49	77.61	20.90					0.587
色斑形态	47.76	10.45	4.48	37.31				1.096
色斑边缘形态	47.76	52.24						0.692
色斑颜色	47.76	1.49	38.81	4.48	7.46			1.116
雄蕊着生方式	70.15	26.87	1.49	1.49				0.727
花丝颜色	7.46	7.46	77.61	5.97	1.49			0.815
雄蕊发育情况	58.21	41.79						0.680
房衣形态	34.33	49.25	4.48	11.94				1.109
房衣颜色	10.45	13.43	61.19	2.99	11.94			1.165
柱头颜色	14.93	17.91	52.24	14.93				1.215
雌蕊外观	31.34	40.30	28.36					1.087
心皮被毛情况	50.75	49.25						0.693
花萼瓣化程度	58.21	41.79						0.680
复叶形状	7.46	5.97	86.57					0.487
顶小叶顶端分裂	8.96	28.36	34.33	28.36				1.298
侧小叶形态	14.93	76.12	8.96					0.708
侧小叶边缘缺刻程度	47.76	17.91	34.33					1.028
侧小叶平整程度	83.58	13.43	2.99					0.524
侧小叶叶背被毛情况	92.54	7.46						0.265
小叶叶尖	1.49	7.46	4.48	86.57				0.520

2.2 牡丹种质资源数量性状多样性分析

2.2.1 数量性状指标特征 26 个数量性状的平均变异系数为 22.41%，变异幅度为 6.02% ~ 37.41%，表明牡丹品种资源的表型多样性较为丰富(表 4)。变异系数较大的性状是单果种子数(37.41%)、单果质量(37.08%)、冠幅(32.44%)，说明这几个性状在群内的遗传变异程度较高。变异系数较小的性状是种子长度(8.30%)、种子宽度(8.07%)、种子宽长比(6.02%)，说明这几个性状在群内的遗传变异程度较低。株型、花形、叶形、果实及种子性状的平均变异系数次序为株型(30.83%) > 叶形(23.85%) > 花形(22.23%) > 果实及种子(20.20%)。61.54% 的牡丹表型数量性状的变异系数在 20% 以上，表现出变异程度高、性状类别多的特点，为牡丹育种提供充足的发展空间。

2.2.2 聚类分析 基于数量性状数据对 67 份牡丹进行聚类分析，结果如图 1 所示。在欧氏距离为

17.5 时，67 份牡丹可以分为 7 大类群：类群 I，主要是小果小种子型品种，包括胭脂红、冠群芳等 6 个品种；类群 II，大部分为花部性状差异大的品种，包括小花型品种桃红飞翠、紫云等 12 个品种及大花型品种首案红、太阳等 25 个品种，该类群种质数量最多；类群 III，主要是叶茂型品种，包括紫二乔、层中笑等 6 个品种；类群 IV，大部分为株高、冠幅中等但种子较大的品种，包括朱沙垒、晨红等 4 个品种；类群 V，大部分为株高、冠幅及种子等性状都较大的品种，包括黑海撒金、月宫珠光等 6 个品种；类群 VI，主要是大果大种子型品种，包括平湖秋月、A13 等 7 个品种；类群 VII，仅含有 1 份种质，即彩绘，该品种株型极大。

2.2.3 牡丹种质资源表型数量性状关联性分析 67 份牡丹种质资源数量性状关联性分析结果(表 5)显示，营养器官性状之间的相关性较强，繁殖器官性状之间的相关性也较强。仅种子宽长比与种

表4 67份牡丹种质资源数量性状描述性统计分析结果

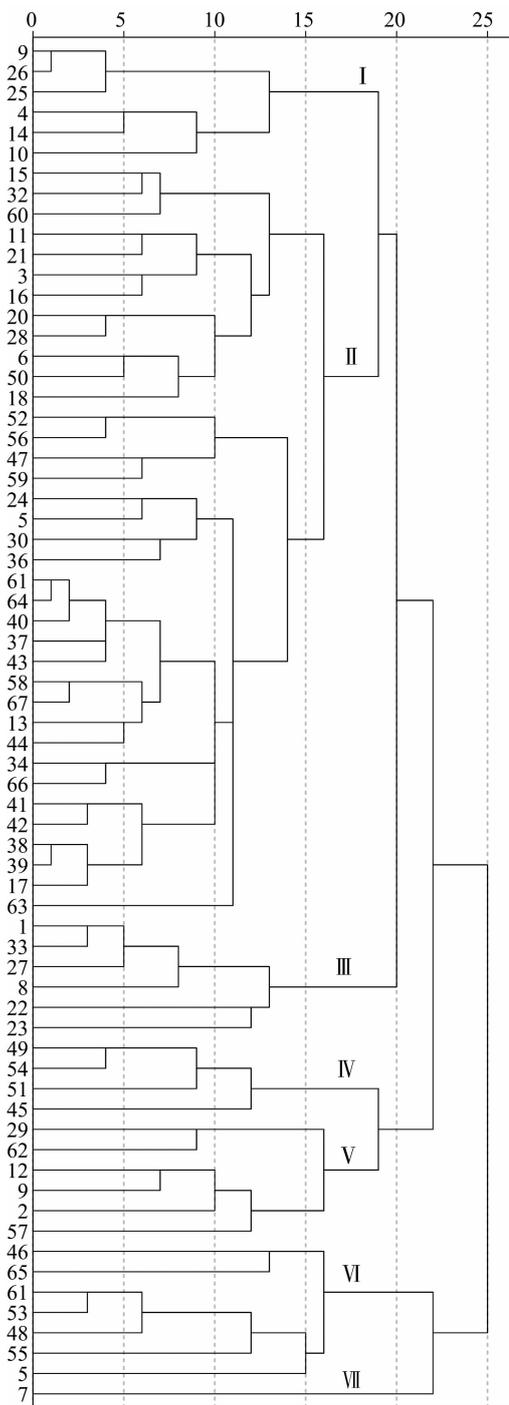
表型性状	具体性状	极小值	极大值	均值	标准差	偏度	峰度	变异系数(%)	
								百分比	平均值
株型性状	株高(cm)	35.00	119.00	67.97	19.86	0.56	-0.13	29.21	30.83
	冠幅(cm)	30.00	187.00	82.85	26.87	0.77	2.24	32.44	
花部形态性状	花梗长度(cm)	10.00	37.00	22.73	5.24	0.52	0.55	23.05	22.23
	花径(cm)	3.67	18.00	12.53	2.51	-0.51	1.36	20.00	
	花高(cm)	3.47	8.33	4.96	0.97	0.92	1.28	19.59	
	外瓣长(cm)	4.53	8.73	6.57	0.98	-0.01	-0.36	14.95	
	外瓣宽(cm)	4.30	8.50	6.22	1.06	0.16	-0.84	17.11	
	花药长(mm)	3.00	12.67	7.30	2.17	0.49	-0.46	29.73	
	花丝长(mm)	6.00	28.67	16.96	5.29	0.09	-0.77	31.18	
	复叶长(cm)	18.50	41.50	28.65	5.07	0.34	-0.37	17.70	23.85
叶部形态性状	复叶宽(cm)	6.00	28.25	17.21	4.70	0.22	-0.24	27.30	
	二回羽状复叶长(cm)	8.00	19.00	12.24	2.73	0.56	-0.51	22.32	
	二回羽状复叶宽(cm)	5.50	18.00	8.57	1.94	1.91	7.24	22.67	
	小叶数(张)	2.00	13.00	6.58	2.06	0.99	2.63	31.31	
	叶柄长(cm)	7.00	17.50	11.14	2.43	0.56	-0.05	21.80	
	单果种子数(粒)	1.00	4.00	2.18	0.82	0.69	0.33	37.41	20.20
	果实直径(cm)	3.15	8.03	5.46	0.90	-0.09	0.68	16.44	
	果角长(cm)	1.27	3.70	2.65	0.47	-0.17	0.30	17.73	
果实及种子性状	果角宽(cm)	0.67	2.60	1.60	0.38	0.12	0.31	23.79	
	种子表面积(mm ²)	34.74	66.13	49.56	7.51	0.15	-0.52	15.14	
	种子长度(mm)	7.34	10.73	8.89	0.74	0.41	0.22	8.30	
	种子宽度(mm)	6.09	8.34	7.28	0.59	-0.23	-0.81	8.07	
	种子体积(mm ³)	144.01	358.43	243.95	54.60	0.13	-0.79	22.38	
	种子宽长比	0.67	0.89	0.83	0.05	-0.84	0.36	6.02	
	种子平均粒质量(g)	0.07	0.44	0.24	0.07	-0.01	0.48	29.81	
	单果质量(g)	0.25	2.22	1.00	0.37	0.60	0.94	37.08	

子长度呈极显著负相关(-0.392),其余相关性强的均为正相关,这与计算方式有关。其中,叶部形态性状之间的相关系数在0.138~0.897之间(除自身相关外,下同),且80.00%为极显著正相关,93.33%为显著正相关,推测与牡丹光合作用及合理利用空间有关,这与牡丹营养生长息息相关。花部形态性状与果实及种子性状之间的显著性相关性系数在0.256~0.491之间,果实与种子形态性状之间的显著相关性系数在0.248~0.988之间,推测与牡丹发育过程有关,这与牡丹生殖生长息息相关。同时,单果种子数与果实直径(0.666)、果角长(0.653)、果角宽(0.514)、种子宽度(0.326)、种子平均粒质量(0.483)、单果质量(0.733)等性状呈极显著正相关,与种子表面积(0.248)、种子体积(0.294)呈显著正相关,说明单果质量与果实直径

指数对单果种子数的贡献率最大。果角长与种子长度呈显著正相关(0.289),果角宽与种子宽度呈极显著正相关(0.384),说明果实大小与种子大小表现出一致性。

2.3 牡丹优良种质筛选

2.3.1 牡丹表型性状主成分分析 对50个表型性状同时进行主成分分析显示,Kaiser-Meyer-Olkin(KMO)值为0.417(<0.5),说明按所有性状分析不满足相关性条件。同样,对24个质量性状进行主成分分析时,KMO值为0.464,也不符合条件。但统计的质量性状中,花部性状占70.83%以上,因此后续品种筛选及聚类分析均以数量性状为筛选条件,适当结合花部性状进行筛选。以数量性状做主成分分析时,KMO值为0.627,满足条件。相关性分析结果表明,牡丹种质资源的数量性状之间具有较强



样品编号对应表 1

图1 67份牡丹基于26个数量性状的聚类图

26.691%,决定第1主成分的性状主要集中在果实及种子,如单果质量、种子体积、种子宽度、果实直径等性状,说明第1主成分主要与果实、种子产量相关,称为产量因子。第2主成分贡献率为16.027%,决定第2主成分的性状主要集中在叶部性状,如复叶长、二回羽状复叶长、复叶宽等性状,说明第2主成分主要对叶部相关性状影响较大,说明主要与植株营养生长相关,称为营养因子。第3主成分贡献率为10.914%,除对种子的部分性状影响较大外,主要集中在株型性状上,称为株型因子。第4、第5主成分贡献率依次为6.969%、6.023%,对花部性状影响较大,说明主要与植株生殖生长相关,称为生殖因子。

2.3.2 牡丹性状综合评价 牡丹作为重要的油用、观赏植物,获得高产、叶茂、型优、花美的品种是目前牡丹开发利用及新品种选育的关键目标。经主成分分析,计算67份牡丹资源各主成分的得分及综合得分,筛选出前10名表现最优的牡丹种质资源(表7)。

第1主成分排前10名的种质为平湖秋月、A13、彩绘、雏鹅黄、粉中冠、春色满园、古城春色、A18、A0、富贵满堂,这些种质的果实及种子个头大、质量大,产量性状较优,宜选择作为油用品种。

第2主成分排前10名的种质为紫二乔、层中笑、乌金耀辉、鲁荷红、花蝴蝶、岛锦、粉兰盘、花二乔、古斑统春、肉芙蓉,这些种质的叶片长且宽,数量多,叶部性状较优,宜选择作为叶茂品种。

第3主成分排前10名的种质为黑海撒金、彩绘、月宫珠光、初乌、冠群芳、王妃插雪、景玉、香玉、花二乔、古城春色,这些种质株高中等,冠幅大,株型性状较优,宜选择作为型优品种。

第4、5主成分排前10名的种质分别为首案红、新日月、太阳、粉中冠、晨红、粉兰盘、景玉、朱沙垒、冠群芳、鹤顶红和富贵满堂、王妃插雪、冠世墨玉、粉兰盘、A18、黑海撒金、赵粉、朱沙垒、层中笑、新世纪,这些种质的相同点是均表现出花大、花瓣长且宽的特点,花部性状较优,不同点是前一组的花径、花药等性状数值更大,后一组的花高、花丝等性状数值更大,宜选择作为花美品种。

综合评价位于前十的种质为彩绘、层中笑、A13、雏鹅黄、富贵满堂、黑海撒金、A18、岛锦、平湖秋月、古城春色,它们在8个主成分排名前十中出现的频数依次为3、4、1、1、3、2、2、1、2,其油用及观赏价值均相对较高。

的相关性,可以将26个数量性状数据标准化后进行主成分分析。

67份牡丹种质资源数量性状主成分分析结果(表6)显示,前8个主成分累积贡献率为80.973%,表明前8个主成分代表了牡丹表型数据的大部分信息,因此选取前8个主成分对牡丹种质资源进行评价。其中,第1主成分贡献率为

表 5 67 份牡丹种质资源表型数量性状关联性分析结果

相关系数

表型性状	株高	冠幅	花梗长度	花径	花高	外瓣长	外瓣宽	花药长	花丝长	复叶长	复叶宽	二回羽状复叶长	二回羽状复叶宽	小叶数	叶柄长	单果种子数	果实直径	果角长	果角宽	种子表面积	种子长度	种子宽度	种子体积	种子宽长比	种子平均粒质量	单果质量
株高	1.000																									
冠幅	0.697**	1.000																								
花梗长度	0.442**	0.227	1.000																							
花径	0.097	0.109	0.105	1.000																						
花高	0.183	0.302*	0.043	0.073	1.000																					
外瓣长	0.105	0.059	0.056	0.585**	0.147	1.000																				
外瓣宽	0.197	0.201	0.034	0.520**	0.232	0.701**	1.000																			
花药长	0.197	0.541**	0.086	0.030	0.075	-0.110	-0.007	1.000																		
花丝长	0.126	0.378**	0.250*	-0.048	0.437**	-0.174	0.082	0.517**	1.000																	
复叶长	0.239	0.298*	0.417**	-0.035	0.139	0.014	0.087	0.260*	0.371**	1.000																
复叶宽	-0.042	0.013	0.213	-0.056	0.228	-0.059	-0.065	0.042	0.233	0.629**	1.000															
二回羽状复叶长	-0.064	0.150	0.143	-0.124	0.146	-0.080	-0.077	0.201	0.337**	0.760**	0.799**	1.000														
二回羽状复叶宽	0.220	0.184	0.149	0.072	0.221	0.016	0.095	0.207	0.237	0.570**	0.563**	0.543**	1.000													
小叶数	0.179	0.196	0.208	-0.175	0.369**	-0.200	-0.088	0.185	0.205	0.273*	0.346**	0.370**	0.242*	1.000												
叶柄长	0.310*	0.243*	0.485**	-0.092	0.090	-0.025	0.075	0.151	0.314**	0.879**	0.400**	0.513**	0.398**	0.138	1.000											
单果种子数	0.127	0.010	0.125	0.168	0.189	0.330**	0.144	0.103	0.109	0.180	0.168	0.105	0.147	0.036	0.188	1.000										
果实直径	0.049	-0.028	0.122	0.376**	-0.006	0.491**	0.306*	0.196	-0.013	0.148	0.119	0.068	0.046	0.068	0.067	0.666**	1.000									
果角长	0.179	0.008	0.127	0.307*	-0.018	0.401**	0.204	0.160	0.023	0.055	-0.017	-0.098	0.022	-0.026	0.060	0.653**	0.871**	1.000								
果角宽	-0.045	-0.071	0.089	0.309*	-0.074	0.313**	0.156	0.161	0.077	0.211	0.226	0.112	0.121	-0.047	0.095	0.514**	0.561**	0.538**	1.000							
种子表面积	0.257*	0.247*	0.290*	0.191	0.168	0.299*	0.336**	0.143	0.136	0.038	0.000	-0.093	0.097	0.034	-0.001	0.248*	0.379**	0.385**	0.320**	1.000						
种子长度	0.296*	0.266*	0.240	0.154	0.133	0.209	0.256*	0.117	0.172	0.017	-0.009	-0.079	0.103	0.024	-0.043	0.141	0.270*	0.289*	0.217	0.927**	1.000					
种子宽度	0.144	0.153	0.293*	0.181	0.170	0.339**	0.335**	0.141	0.064	0.073	0.023	-0.065	0.097	0.051	0.048	0.326**	0.442**	0.435**	0.384**	0.912**	0.702**	1.000				
种子体积	0.226	0.223	0.296*	0.207	0.171	0.338**	0.368**	0.138	0.113	0.050	0.006	-0.093	0.093	0.029	0.017	0.294*	0.418**	0.413**	0.357**	0.988**	0.864**	0.957**	1.000			
种子宽长比	-0.187	-0.137	0.072	0.050	0.043	0.172	0.112	0.035	-0.134	0.064	0.037	0.003	-0.020	0.042	0.109	0.237	0.233	0.207	0.231	-0.028	-0.392**	0.375**	0.111	1.000		
种子平均粒质量	0.015	0.058	0.061	0.237	0.055	0.361**	0.268*	0.203	0.165	0.207	0.234	0.144	0.066	-0.011	0.162	0.483**	0.609**	0.575**	0.023**	0.475**	0.391**	0.499**	0.501**	0.139	1.000	
单果质量	0.152	0.129	0.131	0.345**	0.048	0.457**	0.336**	0.211	0.095	0.292*	0.186	0.181	0.173	0.059	0.233	0.733**	0.773**	0.718**	0.712**	0.389**	0.273*	0.454**	0.435**	0.231	0.733**	1.000

注: **表示极显著相关($P < 0.01$), *表示显著相关($P < 0.05$)。

表 6 数量性状前 8 个主成分的特征向量、特征值、贡献率及累积贡献率

表型性状	特征向量							
	主成分 1	主成分 2	主成分 3	主成分 4	主成分 5	主成分 6	主成分 7	主成分 8
株高	0.325	0.243	0.491	0.407	-0.225	-0.366	0.057	-0.322
冠幅	0.307	0.368	0.538	0.389	-0.346	0.013	0.015	0.075
花梗长度	0.364	0.337	0.231	0.026	0.080	-0.556	0.231	-0.062
花径	0.406	-0.287	-0.079	0.560	0.174	0.091	-0.183	0.073
花高	0.237	0.286	0.249	0.199	0.117	0.601	0.352	-0.227
外瓣长	0.533	-0.363	-0.141	0.521	0.333	0.065	-0.026	0.000
外瓣宽	0.481	-0.201	0.104	0.574	0.348	0.175	0.001	0.169
花药长	0.304	0.328	0.164	0.038	-0.623	0.197	-0.038	0.405
花丝长	0.258	0.522	0.238	0.005	-0.304	0.342	-0.049	0.260
复叶长	0.382	0.802	-0.171	0.061	0.148	-0.230	-0.078	0.131
复叶宽	0.252	0.672	-0.303	-0.211	0.341	0.151	-0.127	-0.118
二回羽状复叶长	0.187	0.787	-0.284	-0.129	0.210	0.138	-0.169	0.042
二回羽状复叶宽	0.293	0.598	-0.046	0.045	0.263	0.098	-0.163	-0.059
小叶数	0.120	0.486	0.092	-0.152	-0.054	0.267	0.375	-0.430
叶柄长	0.300	0.685	-0.122	0.119	0.086	-0.443	0.047	0.143
单果种子数	0.639	-0.046	-0.396	0.000	-0.230	0.022	0.111	-0.293
果实直径	0.751	-0.224	-0.392	0.013	-0.188	0.002	-0.007	-0.183
果角长	0.709	-0.279	-0.298	0.000	-0.318	-0.100	0.015	-0.225
果角宽	0.641	-0.116	-0.418	-0.149	-0.107	0.001	-0.161	0.112
种子表面积	0.748	-0.227	0.505	-0.314	0.167	-0.008	-0.022	0.039
种子长度	0.616	-0.174	0.609	-0.298	0.125	0.008	-0.303	-0.106
种子宽度	0.768	-0.236	0.285	-0.320	0.198	-0.026	0.281	0.182
种子体积	0.779	-0.244	0.431	-0.301	0.185	-0.014	0.077	0.091
种子宽长比	0.198	-0.087	-0.423	-0.013	0.079	-0.044	0.760	0.367
种子平均粒质量	0.742	-0.108	-0.235	-0.171	-0.114	0.092	-0.184	0.114
单果质量	0.817	-0.069	-0.379	0.044	-0.184	-0.008	-0.068	-0.078
特征值	6.940	4.167	2.838	1.812	1.566	1.397	1.271	1.063
贡献率(%)	26.691	16.027	10.914	6.969	6.023	5.375	4.887	4.087
累积贡献率(%)	26.691	42.718	53.632	60.601	66.624	71.999	76.886	80.973

3 讨论

3.1 牡丹表型性状变异规律

在牡丹同质圃实地调查过程中发现,牡丹种质资源的叶色、小叶排列疏密程度、叶片质地、牡丹单茎着花量、果实被毛情况等性状在植株之间无显著变异,说明这些表型性状受外界环境影响较小,较为稳定。Shannon - weaver 指数已广泛应用于园林植物表型性状的多样性评价^[31-32]。本研究中,从 67 份牡丹种质资源中共检测到 24 种表型质量性状和 82 个变异类型,Shannon - weaver 指数平均值为 0.836,表明牡丹种质资源表型性状的多样性高,变异类型丰富。花色的 Shannon - weaver 指数最大,牡

丹花色表现型种类十分丰富,这与吴芳芳等对牡丹花瓣运用 CIE Lab 表色系统测定的结果^[33]相似,可为后期进行观赏良种的选育提供丰富的材料。26 个数量性状平均变异系数为 22.41%,植株形态平均变异系数要大于所有的繁殖性状的平均变异系数,这与李树发对不同环境下滇牡丹表型变异统计的结果^[20]相似。但在同一环境条件下,出现植株形态变异潜力最高的情况,可能是与其品种环境适应性有很大关系。在各部位单性状的变异系数中,变异程度最高的 2 个性状均出现在果实性状中,这与崔虎亮等的研究结果^[25]相似,表明牡丹果实的变异潜力较高,可为后续进行优质高产良种的选育提供丰富的材料。牡丹表型质量性状和数量性状均表现

表 7 牡丹种质资源主成分得分和综合得分

主成分	项目	排名									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
主成分 1	编号	65	31	7	53	46	51	57	55	45	22
	得分	6.041	4.814	4.499	3.930	3.876	3.636	3.604	3.198	3.043	3.021
主成分 2	编号	8	23	5	1	33	21	27	9	26	28
	得分	4.876	3.904	3.874	3.306	3.159	2.843	2.588	2.391	1.963	1.883
主成分 3	编号	2	7	62	19	14	29	12	11	9	57
	得分	3.971	3.963	3.827	3.727	2.692	2.434	2.072	2.033	2.002	1.709
主成分 4	编号	47	59	52	46	54	27	12	49	14	34
	得分	3.409	3.197	2.686	2.028	1.857	1.737	1.719	1.660	1.410	1.302
主成分 5	编号	22	29	63	27	55	2	44	49	23	48
	得分	2.973	2.569	2.280	2.221	2.187	1.773	1.524	1.476	1.346	1.207
主成分 6	编号	22	33	15	16	23	4	2	8	19	20
	得分	2.462	2.073	1.894	1.609	1.606	1.598	1.516	1.447	1.406	1.380
主成分 7	编号	11	32	21	60	23	3	47	59	27	6
	得分	2.295	1.724	1.647	1.493	1.461	1.448	1.364	1.307	1.298	1.277
主成分 8	编号	36	49	24	10	7	20	5	1	28	50
	得分	2.595	2.151	1.681	1.580	1.410	1.319	1.315	1.208	1.144	1.120
综合情况	编号	7	23	31	53	22	2	55	21	65	57
	得分	1.631	1.438	1.413	1.385	1.300	1.262	1.119	0.980	0.966	0.838

注:样品编号对应表 1。

出变异程度高、多样性丰富等特点,可为牡丹育种提供充足的发展空间。

67 份牡丹种质经聚类分析后,得到 7 大分类组别且各组别下又有多个小组,说明不同外观性状的牡丹在表型水平上具不同程度的差异,即外观性状可作为牡丹分类的一个依据,这与孙会忠等对牡丹的解剖学观察结论^[34]相似;并发现彩绘品种的株型差异较大,推测彩绘对环境的适应能力较强。相关性分析结果表明,叶部性状之间、果实及种子相关性性状之间相关性较强,说明植物生长性状、繁殖性状自身之间存在着紧密联系,这与谭万庆等对凤丹栽培群体表型性状的聚类结果^[35]相似。并且发现同一器官性状间相关性较强,而不同器官性状间相关性较弱,表明同一器官各性状之间可能存在相互影响,但不同器官间影响较小,这与崔虎亮等对油用牡丹表型性状的聚类结果部分相似^[25]。同时,牡丹的某些营养因子和生殖因子之间存在极显著相关关系,而生殖因子又和产量因子的某些性状存在极显著相关关系,表明营养生长的状况对生殖生长产生影响,而生殖生长最终又会对产量因子产生影响,这为提前筛选高产牡丹的工作提供了借鉴。

3.2 牡丹良种选育策略

基于表型数量性状,采用主成分分析法,对 67 份牡丹种质资源按主成分得分及综合得分进行排序,并结合表型质量性状,针对油用、观赏(花部为主)及综合利用等价值,最终筛选出各价值中前 3 份表现最优的种质,以花色单纯无杂色,叶数、果量中等及未在表 7 出现的种质亭亭玉立为对照,对筛选出的 10 份(部分重合)种质的主要性状进行描述(表 8、图 2)。

亭亭玉立种质特点:落叶灌木;株高约 0.5 m,冠幅约 0.5 m;叶通常为二回三出复叶,复叶长形,叶背无毛;顶小叶顶端全裂;侧小叶长卵形、平整,边缘无缺刻;花蕾圆尖形;花白色,无色斑;花萼正常,外花瓣倒卵形、浅齿裂;花直立。膏葵果长圆形,密生黄褐色硬毛;果角长约 2.5 cm,宽约 2.0 cm;单果种子约 2 粒,单果质量约 0.8 g。种子长约 8.3 mm,宽约 7.3 mm;单种质量约 0.2 g。

4 结论

本研究对 67 份牡丹种质资源表型的质量性状、数量性状进行多样性分析及综合评价,发现以花色

表8 10份优选牡丹资源及特点描述

种质名称	特点	种质名称	特点
平湖秋月	顶小叶顶端深裂;侧小叶边缘强缺刻。外花瓣圆形、深齿裂。果角长约3.7 cm,宽约2.6 cm;单果种子约4粒,单果质量约1.8 g。种子长约9.6 mm,宽约8.0 mm;单种质量约0.4 g。油用价值高	太阳	株高约1.2 m,冠幅约1.0 m。顶小叶顶端深裂;侧小叶卵形、边缘强缺刻。花红色。果角长约2.8 cm,宽约1.7 cm;单果质量约1.1 g。种子长约8.0 mm,宽约6.8 mm;单种质量约0.3 g。观赏价值高
A13	株高约1.0 m,冠幅约1.0 m。花粉色,色斑菱形、紫红色、边缘辐射状;花萼部分瓣化。果角长约3.4 cm,宽约1.9 cm;单果种子约4粒,单果质量约1.6 g。种子长约9.7 mm,宽约7.7 mm;单种质量约0.4 g。油用及综合价值高	富贵满堂	株高约0.6 m,冠幅约0.7 m。复叶卵形。花蕾扁圆形;花紫色,色斑菱形、紫红色、边缘辐射状;花萼部分瓣化;花侧垂。果角宽约1.9 cm;单果质量约1.4 g。种子长约9.0 mm,宽约7.8 mm;单种质量约0.3 g。观赏价值高
彩绘	株高约1.2 m,冠幅约1.9 m。顶小叶顶端中裂;侧小叶边缘弱缺刻。花蕾扁圆形;花紫色;花侧垂。果角长约2.6 cm,宽约2.1 cm;单果种子约2粒,单果质量约1.5 g。种子长约10.5 mm,宽约8.1 mm;单种质量约0.3 g。油用及综合价值高	王妃插雪	株高约0.6 m,冠幅约0.7 m。叶背少毛。花粉色。果角宽约0.8 cm;单果种子约1粒。种子长约9.9 mm,宽约8.2 mm。观赏价值高
首案红	株高约0.9 m,冠幅约1.1 m。顶小叶顶端深裂;侧小叶卵形。花蕾圆形;花紫红色,色斑卵圆形、黑色、边缘辐射状;外花瓣平滑。果角长约2.4 cm,宽约1.2 cm;单果种子约3粒。种子长约7.5 mm,宽约6.5 mm;单种质量约0.1 g。观赏价值高	冠世墨玉	株高约0.7 m,冠幅约0.6 m。顶小叶顶端深裂;侧小叶波曲,边缘强缺刻。花黑色;外花瓣深齿裂。果角长约2.2 cm,宽约1.5 cm;单果种子约1粒。种子长约9.5 mm,宽约6.7 mm。观赏价值高
新日月	株高约1.0 m,冠幅约0.8 m。侧小叶边缘强缺刻。花红色;花侧垂。果角长约2.6 cm,宽约1 cm;单果种子约1粒,单果质量约0.6 g。种子长约7.3 mm,宽约6.2 mm。观赏价值高	层中笑	株高约0.7 m,冠幅约0.9 m。复叶圆形。花紫色;花萼部分瓣化。果角长约2.6 cm;单果种子约4粒,单果质量约1.5 g。种子长约8.9 mm,宽约7.7 mm;单种质量约0.3 g。综合价值高



a—平湖秋月; b—A13; c—彩绘; d—首案红; e—新日月; f—太阳; g—富贵满堂; h—王妃插雪; i—冠世墨玉; j—层中笑

图2 10份优选牡丹资源

为代表的观赏指标的多样性最大,以单果种子数及单果质量为代表的产量指标变异最大,牡丹种质资源具有表型多样性高、变异类型丰富的特点。同一

器官性状之间的相关性较强,某些营养因子与生殖因子有较强的相关关系,某些生殖因子又与产量因子有较强的相关关系。主成分分析发现花部性状

贡献率较为分散,变异呈现多向性。综合考虑,产量因子性状可作为油用育种的首选目标,而生殖因子性状可作为观赏育种的首选目标。同时,综合评价居前的材料可作为综合开发利用的重要种质资源。

致谢:山东农业工程学院刘炳甫、杨晨、刘文豪、杨合飞、刘榕畅等同学参加了牡丹种质资源表型调查,特此感谢!

参考文献:

- [1] 窦勇博. 牡丹花黄酮的抗氧化活性研究[J]. 中国果菜, 2016, 36(4): 23-26.
- [2] 高志情, 张岩松, 任利鹏, 等. 牡丹叶的研究进展及应用[J]. 云南化工, 2021, 48(11): 18-22.
- [3] Liu Z G, Li M Z, Qian D W, et al. Phytochemical profiles and the hypoglycemic effects of tree peony seed coats[J]. Food & Function, 2021, 12(23): 11777-11789.
- [4] Yang S C, Liu X Y, He J Y, et al. Insight into seasonal change of phytochemicals, antioxidant, and anti-aging activities of root bark of *Paeonia suffruticosa* (cortex moutan) combined with multivariate statistical analysis[J]. Molecules, 2021, 26(20): 6102.
- [5] 张庆甲, 李克明, 魏永利, 等. 牡丹叶内服外用治疗慢性痛风性关节炎临床观察[J]. 河北中医, 2018, 40(7): 1018-1020.
- [6] 王顺利, 任秀霞, 薛景祺, 等. 牡丹籽油成分、功效及加工工艺的研究进展[J]. 中国粮油学报, 2016, 31(3): 139-146.
- [7] 史国安, 焦封喜, 焦元鹏, 等. 中国油用牡丹的发展前景及对策[J]. 中国粮油学报, 2014, 29(9): 124-128.
- [8] Han X M, Wu S X, Wu M F, et al. Antioxidant effect of peony seed oil on aging mice[J]. Food Science and Biotechnology, 2017, 26(6): 1703-1708.
- [9] Su J H, Wang H X, Ma C Y, et al. Anti-diabetic activity of peony seed oil, a new resource food in STZ-induced diabetic mice[J]. Food & Function, 2015, 6(9): 2930-2938.
- [10] 杨礼通, 张文静, 雷映雪, 等. 推迟或提前牡丹花期的调控研究进展[J]. 四川农业科技, 2021(8): 80-81, 85.
- [11] 胡坤, 张萍, 雷应雪, 等. 天彭牡丹保育中心不同牡丹外形及其花期特征[J]. 四川农业科技, 2022(8): 42-45.
- [12] 刘娜, 秦安臣, 陈雪, 等. 植物生长调节剂对牡丹花期调控及花朵畸形的影响[J]. 河南农业大学学报, 2014, 48(5): 567-574.
- [13] 张晓晓, 宋超, 张延龙, 等. 秦岭与子午岭地区紫斑牡丹居群表型多样性研究[J]. 园艺学报, 2017, 44(1): 139-150.
- [14] 任秀霞, 张盈, 薛景祺, 等. 滇牡丹天然居群的遗传多样性分析[J]. 植物遗传资源学报, 2015, 16(4): 772-780.
- [15] 吴静, 成仿云, 庞利铮, 等. 紫斑牡丹表型性状与SSR分子标记的关联分析[J]. 北京林业大学学报, 2016, 38(8): 80-87.
- [16] 刘娜, 成仿云. 紫斑牡丹果实性状变异及其产量分级标准研究[J]. 植物科学学报, 2020, 38(3): 378-389.
- [17] 郭鑫, 成仿云, 钟原, 等. 紫斑牡丹花色表型数量分类研究[J]. 园艺学报, 2022, 49(1): 86-99.
- [18] 吴静, 成仿云, 钟原. 紫斑牡丹花色表型数量分类研究[J]. 园艺学报, 2016, 43(5): 947-956.
- [19] 庞利铮, 成仿云, 钟原, 等. 紫斑牡丹关联分析群体的表型分析[J]. 北京林业大学学报, 2012, 34(6): 115-120.
- [20] 李树发, 蔡艳飞, 张秀新, 等. 滇牡丹天然群体的表型多样性[J]. 西南农业学报, 2016, 29(10): 2470-2478.
- [21] 耿丹丹, 宋姝凡, 李彤彤, 等. 日本牡丹品种群表型性状遗传多样性分析[J]. 分子植物育种, 2022, 11(10): 1-27.
- [22] 唐琴, 曾秀丽, 廖明安, 等. 大花黄牡丹遗传多样性的SRAP分析[J]. 林业科学, 2012, 48(1): 70-76.
- [23] 刘艺平, 黄志远, 梁露, 等. 油用牡丹主要表型性状的相关分析[J]. 河南农业科学, 2019, 48(6): 99-105.
- [24] 张琳, 王佩佩, 韩雅祯, 等. 油用牡丹主要相关性状与SSR分子标记的关联分析[J]. 东北林业大学学报, 2019, 47(3): 31-37.
- [25] 崔虎亮, 黄弄璋, 闫海川, 等. 油用牡丹单株产量和主要表型性状的相关性[J]. 华南农业大学学报, 2017, 38(2): 86-91.
- [26] 张延龙, 牛立新, 张庆雨. 中国牡丹种质资源[M]. 北京: 中国林业出版社, 2020: 54-76.
- [27] 孙珍珠, 李秋月, 王小柯, 等. 宽皮柑橘种质资源表型多样性分析及综合评价[J]. 中国农业科学, 2017, 50(22): 4362-4383.
- [28] 杜庆鑫, 庆军, 刘攀峰, 等. 杜仲种质资源果实性状变异及综合评价[J]. 林业科学研究, 2021, 34(5): 13-23.
- [29] Wang J M, Ma S L Y, Li W Q, et al. Genetic variability and diversity of the main resources of lily assessed via phenotypic characters, pollen morphology, and ISSR markers[J]. Genetics and Molecular Research, 2016, 15(2): gmr. 15027638.
- [30] 杨玉洁, 胡晓艳, 黄尧, 等. 翅果油树人工林表型性状变异规律研究[J]. 林业科学研究, 2022, 35(5): 113-122.
- [31] 于秋香, 李扬, 李颖, 等. 基于果实表型的核桃种质资源遗传多样性分析[J]. 华北农学报, 2021, 36(增刊1): 53-61.
- [32] 顾云娇. 穗醋栗种质资源表型多样性分析及鲜食果实复合保鲜技术研究[D]. 延吉: 延边大学, 2019: 12.
- [33] 吴芳芳, 苗润田, 汪安印, 等. 基于花色表型的牡丹和芍药品种数量分类研究[J]. 北方园艺, 2021(3): 66-75.
- [34] 孙会忠, 侯小改, 刘改秀, 等. 5种野生牡丹叶片的解剖学特征[J]. 福建农林大学学报(自然科学版), 2012, 41(1): 24-28.
- [35] 谭万庆, 彭丽平, 刘政安, 等. 凤丹栽培群体表型多样性分析及综合评价[J]. 经济林研究, 2022, 40(3): 180-191.