

29个兜兰属物种的表型多样性及亲缘关系研究

范继征, 李秀玲, 何荆洲, 曾艳华, 王丰顺, 卜朝阳

(广西壮族自治区农业科学院花卉研究所, 南宁 530007)

摘要: 兜兰属植物花型奇特、色彩绚丽、观赏期长, 极具观赏价值和经济价值。兜兰属的分类存在较大争议。本研究对迁地保存的29个兜兰属物种的27个表型性状进行了多样性分析和相关性分析, 并在此基础上分析了29个兜兰属物种的亲缘关系。结果表明, 兜兰属植物表型性状多样性十分丰富。17个数量性状的遗传多样性指数(H')变化范围为0.7834~2.0318, 其中遗传多样性指数大于2.0的强变异性状是花自然长度和花自然宽度, 遗传多样性指数小于1.0的弱变异性状是着花数; 10个质量性状的遗传多样性指数变化范围为0.5098~1.1241, 其中花瓣形态和唇瓣主色多样性指数较高, 均超过了1.0, 较小的是假雄蕊底部有无凹缺和花药特征。从多样性分析结果可以看出, 29个兜兰属物种的表型性状种间差异较大, 具有较高的多样性。17个数量性状的变异系数(CV)在18.22%~59.09%之间, 其中花瓣长/花瓣宽和花葶长变异系数均超50%, 说明兜兰种间表型性状的离散程度较大。相关性分析表明不同种各个表型性状关系密切且复杂。主成分分析筛选出5个特征值大于1的主成分, 累计贡献率达84.176%, 能够反映兜兰表型性状的绝大部分信息, 且花部器官的性状和指标对表型多样性影响很大。亲缘关系分析表明, 29种兜兰被分为6大类群, 与前人其他分类方法结果相似, 但也存在一定的差异。

关键词: 兜兰属; 种质资源; 表型性状; 遗传多样性

Studies on the Phenotypic Diversity and the Genetic Relationships of 29 Species of *Paphiopedilum*

FAN Ji-zheng, LI Xiu-ling, HE Jing-zhou, ZENG Yan-hua, WANG Feng-shun, BU Zhao-yang

(Flower Research Institute, Guangxi Academy of Agricultural Sciences, Nanning 530007)

Abstract: *Paphiopedilum* species are known as unique flower shape, gorgeous color, long ornamental period and have great ornamental and economic value. The classification of the genus is controversial. The diversity and correlation analysis of 27 phenotypic traits were carried out by investigating 29 species of *Paphiopedilum*, and cluster analysis was carried out based on the principal components of phenotypic traits. The results showed that the phenotypic traits of *Paphiopedilum* were rich in diversity. The variation range of genetic diversity index (H') of 17 quantitative characters was 0.7834-2.0318. Among them, the strong variation characters with genetic diversity index greater than 2.0 were flower length and flower width, the weak variation character with genetic diversity index less than 1.0 was flower number, and the variation range of genetic diversity index of 10 quality characters was 0.5098-1.1241. The diversity indexes of petal shape and Lip main color were the highest, both exceeding 1.0, and the smallest were staminode bottom concave and anther type, from the results of diversity analysis, it can be seen that 29 species of *Paphiopedilum* have large differences in phenotypic traits among species, with rich diversity. The coefficients of variation (CV) of 17 quantitative traits ranged 18.22%-59.09%, the petal length/petal width and peduncle length exceeded 50%, the results showed that the interspecific

收稿日期: 2022-11-04 修回日期: 2022-12-02 网络出版日期: 2022-12-28

URL: <https://doi.org/10.13430/j.cnki.jpgr.20221104001>

第一作者研究方向为兰科植物种质保护与新品种选育, E-mail: jizheng_fan@163.com

通信作者: 李秀玲, 研究方向为兰科植物种质保护与遗传育种, E-mail: congzxiao@163.com

卜朝阳, 研究方向为兰科植物遗传育种, E-mail: yangnv@126.com

基金项目: 广西自然科学基金项目(2020GXNSFBA297136); 广西农业科学院项目(桂农科2021YT131, 桂农科2021JM28, 桂农科JZ202013, 桂农科2021JM116)

Foundation projects: Guangxi Natural Science Foundation Project (2020GXNSFBA297136); Projects of Guangxi Academy of Agricultural Sciences (Guinongke2021YT131, Guinongke2021JM28, GuinongkeJZ202013, Guinongke2021JM116)

phenotypic characters of *Paphiopedilum palustratum* were dispersed greatly. Correlation analysis showed that the phenotypic characters of *Paphiopedilum* were closely related and complex. Five principal components with eigenvalues greater than 1 were selected by principal component analysis, and the cumulative contribution rate was 84.176%, which could reflect most of the information of the phenotypic characters of *Paphiopedilum*, and the characters and indexes of flower organs had a great impact on the phenotypic diversity. Cluster analysis showed that 29 species of *Paphiopedilum* were divided into 6 groups, which was similar to other classification methods, but there were also some differences.

Key words: *Paphiopedilum*; germplasm resources; phenotypic traits; genetic diversity

兜兰(*Paphiopedilum* Pfitzer)又称拖鞋兰、仙履兰等,是兰科(Orchidaceae)杓兰亚科兜兰属植物的总称,其花形奇特、色彩艳丽、开花持久,在形态、大小、颜色和质地上表现出丰富的多样性^[1-2]。全属约有109个种,主要分布于亚洲热带地区至太平洋岛屿^[1,3]。我国野生兜兰资源丰富,但由于过度采挖和生境的破坏,多数种类已濒临灭绝,兜兰属所有物种均被列入《濒危野生动植物种国际贸易公约》(CITES, The Convention on International Trade of Endangered Species)附录I而被禁止交易。我国兜兰属所有种已列入国家重点保护植物名录,除带叶兜兰和硬叶兜兰属于二级保护物种以外,其余均属于一级保护物种。由于兜兰属植物极富变异性,并且经过不同地域间的相互引种栽培种植,使兜兰种质资源表型性状产生较大差异,给兜兰属物种的鉴定和分类带来一定的困难。

种质资源是物种基因改良和新品种选育的基础,表型性状的鉴定和描述是研究种质资源最基本、最直接的方法和途径^[4-7],表型研究已在粮食作物^[8-10]、蔬菜^[11-12]、水果^[13-14]、花卉林木^[15-16]等不同植

物种质研究中广泛应用,也有通过表型性状对春兰、寒兰、文心兰^[17-19]等兰科花卉进行遗传多样性分析的报道。对兜兰属的遗传多样性分析大多采用分子标记、核型分析以及叶片表皮微观特征等方法进行分类研究^[20-26],或者针对某一特定种在不同分布居群的表型多样性进行分析^[27-29],基于表型性状对兜兰属多个种进行种间遗传多样性和亲缘关系等方面的研究尚未见报道。

本研究以迁地保存的29个兜兰属物种为试验材料,针对27个表型性状进行表型遗传多样性和亲缘关系研究,以期为兜兰属植物种质资源分类、鉴定、亲缘关系分析和新品种选育提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

迁地保存的29种兜兰种质资源均保存在广西农业科学院花卉研究所兰科植物种质资源圃(108°22'E, 22°48'N, 海拔73 m),保存时间均超过3年。种质资源信息见表1,部分种质花朵形态见图1。

表1 不同种兜兰种质名称及来源

Table 1 The name and geographical origin of the different species of *Paphiopedilum*

序号 Code	种名 Name of variety	学名 Scientific name	来源地 Locality	序号 Code	种名 Name of variety	学名 Scientific name	来源地 Locality
1	麻栗坡兜兰	<i>P. malipoense</i>	广西平南县	16	海伦兜兰	<i>P. helenae</i>	云南文山市
2	浅斑兜兰	<i>P. malipoense</i> var. <i>jackii</i>	云南文山市	17	亨利兜兰	<i>P. henryanum</i>	广西平南县
3	美花兜兰	<i>P. ×fanaticum</i>	广西平南县	18	格丽兜兰	<i>P. gratixianum</i>	云南富民县
4	硬叶兜兰	<i>P. micranthum</i>	广西平南县	19	青蛙紫毛兜兰	<i>P. lushuiense</i>	云南富民县
5	德氏兜兰	<i>P. delenatii</i>	云南文山市	20	安南兜兰	<i>P. villosum</i> var. <i>annamense</i>	云南富民县
6	杏黄兜兰	<i>P. armeniacum</i>	云南富民县	21	包氏兜兰	<i>P. villosum</i> var. <i>boxallii</i>	云南文山市
7	白花兜兰	<i>P. emersonii</i>	广西平南县	22	虎斑兜兰	<i>P. tigrinum</i>	贵州兴义市
8	香花兜兰	<i>P. hangianum</i>	广西平南县	23	白旗兜兰	<i>P. spicerianum</i>	台湾南投县
9	同色兜兰	<i>P. concolor</i>	云南文山市	24	卷萼兜兰	<i>P. appletonianum</i>	云南富民县
10	文山兜兰	<i>P. wenshanense</i>	贵州都匀市	25	紫纹兜兰	<i>P. purpuratum</i>	云南文山市
11	巨瓣兜兰	<i>P. bellatulum</i>	云南普洱市	26	彩云兜兰	<i>P. wardii</i>	贵州兴义市
12	带叶兜兰	<i>P. hirsutissimum</i>	广西百色市	27	秀丽兜兰	<i>P. venustum</i>	云南昆明市
13	红旗兜兰	<i>P. charlesworthii</i>	云南富民县	28	长瓣兜兰	<i>P. dianthum</i>	云南文山市
14	小叶兜兰	<i>P. barbigerum</i>	云南富民县	29	胼胝兜兰	<i>P. callosum</i>	广西平南县
15	陈莲兜兰	<i>P. tranlienianum</i>	云南富民县				

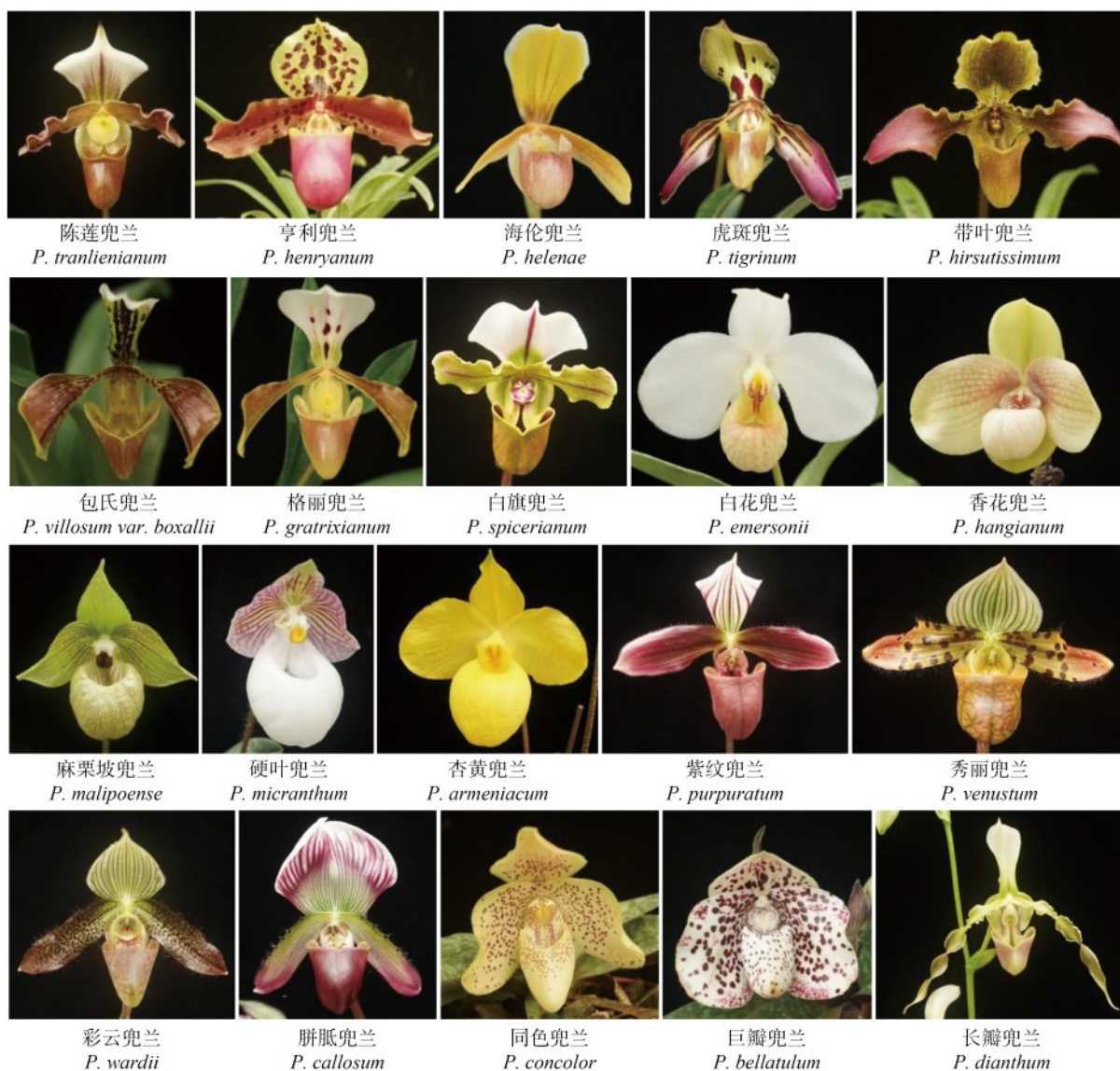


图1 部分兜兰属物种开花图片

Fig.1 Flowering pictures of some *Paphiopedilums*

1.2 试验方法

参考《花卉种质资源描述规范》中兜兰表型性状描述规范以及蝴蝶兰、石斛兰等相关DUS测试指南^[30]和数据控制规范^[31],选取具有代表性且遗传相对稳定的27个表型性状为测定指标(表2~3),采用直尺、布尺、游标卡尺和肉眼观察的方法进行测量、观察并记录数据。

27个表型性状包括17个数量性状和10个质量性状,其中数量性状包括叶长、叶宽、着花数、花萼长、花萼粗、花自然长度、花自然宽度、中萼片长、中萼片宽、花瓣长、花瓣宽、唇瓣长、唇瓣宽、假雄蕊长、假雄蕊宽、子房长以及花瓣长/花瓣宽;质量性状包括株型、叶腹面有无网格纹、唇瓣形状、唇瓣口有耳状结构、花药特征、假雄蕊有无乳突、中萼片及花瓣

色斑、花瓣形态、唇瓣主色、假雄蕊底部是否凹缺。

调查时间从2018年1月到2022年3月,每个物种调查5株,质量性状取最近3年的鉴定结果,数量性状同样取最近3年的平均值,并进行统计学分析。

1.3 数据分析

采用EXCEL 2007计算平均值数、标准差、变异系数和多样性指数。表型变异系数 $CV(\%) = \sigma/\mu \times 100\%$,公式中 σ 为标准差, μ 为平均值, CV 表示表型性状的离散程度。根据平均值和标准差对所有性状进行10级分类,每级的相对频率用于计算多样性指数(Shannon index),第1级 $X_i < (X - 2\sigma)$,中间每一级均增加0.5 s,直到第10级为 $X_i > (X + 2\sigma)$,其计算公式为 $H' = -\sum P_i \ln P_i$,公式中 $P_i = N_i/N$ 为第*i*个表现形式的出现概率, N_i 为第*i*个表现形式的出现次数, N

为该性状所有表现形式出现次数之和^[5,15]。利用 SPSS 20 软件对表型数据进行主成分分析,以特征

值大于 1 的标准提取主成分,用主成分代替所有数值进行系统聚类分析,再根据欧氏距离聚类。

表 2 数量性状及测量方法

Table 2 The quantitative traits and test methods

数量性状 Quantitative traits	测量方法 Test methods
叶长(cm) LL	成熟叶片自叶基部至叶片尖端的长度
叶宽(cm) LW	成熟叶片最宽处的长度
着花数 FN	一个花葶着生花朵的数量
花葶长(cm) PL	自花葶基部至最顶端一朵小花花柄基部的长度
花葶粗(mm) PD	花葶最粗处横切面的宽度
花自然长度(cm) FL	花盛开时中萼片最上端至唇瓣或合萼片最底端的自然长度
花自然宽度(cm) FW	花盛开时花瓣之间的最大距离
中萼片长(cm) DSL	中萼片纵向最大长度
中萼片宽(cm) DSW	中萼片横向最大长度
花瓣长(cm) PL2	自花瓣基部至顶部的长度
花瓣宽(cm) PW	花瓣最宽处的长度
唇瓣长(cm) LL2	唇瓣自基部至底部的长度
唇瓣宽(cm) LW2	唇瓣最宽处横切面的长度
假雄蕊长(cm) SL	假雄蕊纵向中心轴的长度
假雄蕊宽(cm) SW	假雄蕊横向最大长度
子房长(cm) OL	自子房基部到顶部的长度
花瓣长/花瓣宽 PL2/PW	花瓣长与花瓣宽的比值

LL: Leaf length; LW: Leaf width; FN: Flower number; PL: Peduncle length; PD: Peduncle diameter; FL: Flower length; FW: Flower width; DSL: Dorsal sepal length; DSW: Dorsal sepal width; PL2: Petal length; PW: Petal width; LL2: Lip length; LW2: Lip width; SL: Staminode length; SW: Staminode width; OL: Ovary length; The same as below

表 3 质量性状及赋值规则

Table 3 Quality traits and assignment rules

质量性状 Quality traits	赋值标准 Assign a value standard				
	0	1	2	3	4
株型 PT		直立	半直立	平展	
叶腹面有无网格纹 LR	无	有			
唇瓣形状 LS		球形	拖鞋形	盾形	
唇瓣口有无耳状结构 LE	无耳	有耳			
花药特征 AT	散	黏			
假雄蕊有无乳突 SP	无	有			
中萼片及花瓣色斑 DSPD		匀色	斑点或板块	条纹或网纹	
花瓣形态 PS		卵形	桨形	矩圆形	线形
唇瓣主色 LMC		白色或粉色	黄色	绿色或青色	红色或褐色
假雄蕊底部有无凹缺 SBC	无	有			

PT: Plant type; LR: Leaf reticulate; LS: Lip shape; LE: Lip edge; AT: Anther type; SP: Staminode papilla; DSPD: Dorsal sepal and petal design; PS: petal shape; LMC: Lip main color; SBC: Staminode bottom concave; The same as below

2 结果与分析

2.1 数量性状多样性分析

29种兜兰种质的 17 个数量性状的平均值、最小值、最大值、标准差、变异系数以及多样性指数见表 4。数量性状变异系数范围为 18.22%~59.09%,其中变

异系数超过 50% 的性状有花瓣长/花瓣宽和花葶长,分别为 59.09% 和 55.68%,前者变幅为 0.96~8.72,后者变幅为 3.74~39.66 cm;变异系数小于 20% 的有唇瓣长、花葶粗和花自然长度,变异系数分别是 18.22%、18.35% 和 18.77%,变幅分别是 3.04~7.20 cm、0.20~0.43 mm 和 5.20~10.23 cm。17 个数量性状的多样性

指数范围为0.7834~2.0318,其中多样性指数大于2.0的强变异性状有2个,分别是花自然长度和花自然宽度,多样性指数分别达2.0255和2.0318,说明兜兰属不同物种之间花朵大小差异较大;小于1.0的弱变异性状是着花数,多样性指数是0.7834,说明兜

兰属物种的着花数相对稳定,变化不大;其余性状的多样性指数均介于1~2之间,属于中等变异性状。从17个数量性状分析来看,29种兜兰种质遗传差异较大,遗传变异丰富。

表4 数量性状的变异和多样性

Table 4 Variation and diversity of quantitative traits

性状 Traits	平均值 Mean	最小值 Min.	最大值 Max.	标准差 SD	变异系数(%) CV	多样性指数 H'
叶长(cm) LL	18.2321	9.35	33.28	6.6399	36.42	1.7310
叶宽(cm) LW	3.1666	1.24	5.20	1.0605	33.49	1.9549
着花数 FN	1.1034	1.00	2.40	0.2758	24.99	0.7834
花葶长(cm) PL	17.4986	3.74	39.66	9.7431	55.68	1.8636
花葶粗(mm) PD	0.2869	0.20	0.43	0.0527	18.35	1.9923
花自然长度(cm) FL	7.7772	5.20	10.23	1.4593	18.76	2.0255
花自然宽度(cm) FW	8.0366	4.46	13.16	2.0186	25.12	2.0318
中萼片长(cm) DSL	4.2659	2.76	5.81	0.9673	22.68	1.8269
中萼片宽(cm) DSW	3.4959	2.28	5.16	0.7781	22.26	1.9923
花瓣长(cm) PL2	5.1576	3.52	8.91	1.1967	23.20	1.7934
花瓣宽(cm) PW	2.5431	0.96	4.60	1.1599	45.61	1.8967
唇瓣长(cm) LL2	4.5476	3.04	7.20	0.8288	18.22	1.7305
唇瓣宽(cm) LW2	2.7324	1.62	5.16	0.9601	35.14	1.8065
假雄蕊长(cm) SL	1.2793	0.70	2.30	0.4166	32.57	1.8664
假雄蕊宽(cm) SW	1.1848	0.62	2.15	0.3762	31.75	1.8480
子房长(cm) OL	4.6172	2.98	6.72	1.0832	23.46	1.8084
花瓣长/花瓣宽 PL2/PW	2.5069	0.96	8.72	1.4813	59.09	1.5953

2.2 质量性状多样性分析

兜兰种质质量性状的频率分布及多样性分析见表5。29种兜兰种质的10个质量性状中,株型多为平展,其次是直立,半直立最少;多数种质的叶腹面具有网格纹;唇瓣形状多为盾形,其次是球形,拖鞋形最少;唇瓣口部大多有耳;花药多具黏性;假雄蕊大多无乳突;中萼片及花瓣色斑多为匀色,其次是斑点和斑块,条纹和网纹最少;花瓣形态多为矩形,其次是卵形,然后是桨形,仅长瓣兜兰为线

形;唇瓣主色多数为红色或褐色;假雄蕊的底部只有少量具有凹缺。质量性状遗传多样性指数范围为0.5098~1.1241,其中花瓣形态和唇瓣主色多样性指数较高,分别为1.1167和1.1241;多样性指数较低的是假雄蕊底部有无凹缺和花药特征,分别为0.5098和0.5890;介于0.6~1.0之间属于中等变异性状共6个。综合分析来看,10个质量性状在29种不同兜兰种间遗传差异较大,表现出不同程度的多样性。

表5 质量性状的频率分布及多样性分析

Table 5 Frequency distribution and diversity analysis of quality traits

性状 Traits	不同表型级别频率 Frequency of different phenotypic degree					多样性指数 H'
	0	1	2	3	4	
株型 PT		0.3793	0.1379	0.4828		0.9925
叶腹面有无网格纹 LR	0.4828	0.5172				0.6926
唇瓣形状 LS		0.2759	0.1034	0.6207		0.8860
唇瓣口有无耳状结构 LE	0.3793	0.6207				0.6637
花药特征 AT	0.2759	0.7241				0.5890
假雄蕊有无乳突 SP	0.6552	0.3448				0.6442
中萼片及花瓣色斑 DSPD		0.4828	0.3793	0.1379		0.9925
花瓣形态 PS		0.3793	0.1379	0.4483	0.0345	1.1167
唇瓣主色 LMC		0.1724	0.1379	0.1034	0.5862	1.1241
假雄蕊底部有无凹缺 SBC	0.7931	0.2069				0.5098

2.3 种质资源表型性状的相关性分析

29种兜兰种质资源的27个表型性状的相关性分析结果见表6。不同性状间呈极显著相关或显著相关的表型性状共160对,占总数的45.58%。其中呈极显著相关的共有110对,含正相关70对,负相关40对,呈显著相关的性状有50对,其中正相关31对,负相关19对。较多性状的相关系数绝对值在0.800以上,其中,唇瓣形状与唇瓣口是否有耳状结构、花药特征的相关性最强,相关系数分别达到了0.950和0.941;唇瓣口是否有耳状结构与花瓣形态和唇瓣主色的相关性次之,相关系数分别为0.914和0.908;唇瓣长与唇瓣宽、假雄蕊长与假雄蕊宽、花瓣形态与唇瓣主色,相关系数分别为0.889、0.868、0.825;花瓣宽与花瓣形态、唇瓣形状、唇瓣口是否有耳状结构呈极显著负相关,相关系数分别为-0.912、-0.890、-0.875;假雄蕊长、假雄蕊宽、唇瓣宽与花药特征的相关系数分别为-0.877、-0.862和-0.825。以上分析可以看出,虽然不同种兜兰种质各个性状间的相互关系复杂多变,但花器官相关性状之间的关系最为密切。

2.4 主成分分析

29种兜兰种质的27个表型性状主成分分析结果见表7。前5个主成分的特征值均大于1,累计贡献率达84.176%,说明这5个主成分可以反映27个性状的主要特征。

第1主成分的贡献率最大为37.334%,其中影响较大(特征向量绝对值较大)的性状为唇瓣形状、花药特征、花瓣宽、唇瓣口特征,这些特征向量的绝对值均在0.900以上,其次是花瓣形态、假雄蕊长、假雄蕊宽、唇瓣宽,这些特征向量绝对值均在0.800~0.900之间,主要代表了花器官直接的表现性状;第2主成分的贡献率为22.758%,其中影响最大的性状是花瓣长,特征向量为0.881,其次是子房长、花萼长、花自然宽度和花萼粗,特征向量均在0.700以上,主要代表了株型、叶片、花萼等植株性状;第3主成分的贡献率为11.917%,其中影响最大的性状是叶腹面是否具网格纹,特征向量为-0.835,其次是叶片长、假雄蕊底部是否凹缺和假雄蕊有无乳突;第4主成分的贡献率为7.141%,中萼片宽是影响最大的性状;第5主成分的贡献率为5.024%,着花数是影响最大的性状。以上结果表明,不同兜兰种质的表型变异主要来源于唇瓣性状、花瓣大小及形态、花药特征和唇瓣口特征等。

2.5 亲缘关系分析

基于27个表型性状对29种兜兰种质进行亲缘关系分析,结果见图2。在欧氏距离为7处,可将其分成6大类,第I类包含的种最多,包括小叶兜兰、陈莲兜兰、亨利兜兰、海伦兜兰、安南兜兰、虎斑兜兰、带叶兜兰、青蛙紫毛兜兰、包氏兜兰、格丽兜兰、红旗兜兰和白旗兜兰这12个物种,这一类物种唇瓣是典型的盾形,唇瓣口直立有耳,花药黏质,叶片绿色无网格纹;第II类有白花兜兰、香花兜兰、麻栗坡兜兰、浅斑兜兰、美花兜兰、硬叶兜兰、德氏兜兰和杏黄兜兰8个物种,此类物种唇瓣呈球形,唇瓣口无耳,花药较散黏性差,花瓣呈卵圆形,花瓣长宽比较小;卷萼兜兰、紫纹兜兰、彩云兜兰和秀丽兜兰这4个物种组成了第III类,这4个物种假雄蕊底部凹缺且有乳突,叶片均有网格纹;第IV类仅包含胼胝兜兰1个物种,胼胝兜兰与第III类4个物种相似,但上述4个物种在栽培中均开单花,而胼胝兜兰可开双花;第V类包括同色兜兰、文山兜兰和巨瓣兜兰3个近缘种,这3个物种唇瓣呈拖鞋形且唇瓣口无耳,与其他物种差异较大,花萼短,叶片有明显的网格纹;第VI类只有长瓣兜兰1个物种,长瓣兜兰多花,花瓣窄且长,从外形上看,与其他物种差异较大。由以上分析可以看出,第III类的4个物种和第IV类的胼胝兜兰亲缘关系较近,第VI类长瓣兜兰和其他28个物种之间的亲缘关系最远。

3 讨论

表型性状是植物基因型和环境共同作用的结果,具有稳定性和一定的变异性,是认识植物种质最直接、最简易的方法^[5,7]。本研究选用27个表型性状对29种兜兰属种质进行了多样性分析、相关性分析、主成分分析和亲缘关系分析,发现兜兰属种间性状差异大,不同性状间关系复杂。

遗传多样性是物种生存的遗传基础,物种的遗传多样性越丰富,对环境的胁迫适应能力越强,变异系数和多样性指数是对种质资源遗传多样性的反映,变异系数代表性状的离散程度,多样性指数说明分析数值的丰富度和均匀度,一般来说多样性指数达到1.000以上即为多样性程度高^[15,32]。本研究调查的17个数量性状变异系数介于18.22%~59.09%之间,其中花瓣长/花瓣宽变异系数最大,16个数量性状和2个质量性状的多样性指数均在1.000以上,花自然长度和花自然宽度这两个数量性状的多样性指数达到了2.000以上,充分说明兜兰

表 6 表型性状的相关性分析

Table 6 Correlation analysis of phenotypic characteristics

性状	叶长	叶宽	着花数	花葶长	花葶粗	花自然长度	花自然宽度	中萼片长	中萼片宽	花瓣长	花瓣宽	唇瓣长	唇瓣宽	假雄蕊长	假雄蕊宽	
Traits	LL	LW	FN	PL	PD	FL	FW	DSL	DSW	PL2	PW	LL2	LW2	SL	SW	
叶长 LL	1															
叶宽 LW	-0.091	1														
着花数 FN	0.142	0.542**	1													
花葶长 PL	0.198	0.434*	0.415*	1												
花葶粗 PD	0.327	0.613**	0.402*	0.521**	1											
花自然长度 FL	0.256	0.531**	0.148	0.570**	0.734**	1										
花自然宽度 FW	0.427	0.343	0.313	0.680**	0.541**	0.592**	1									
中萼片长 DSL	0.487**	0.396*	-0.023	0.333	0.611**	0.708**	0.439*	1								
中萼片宽 DSW	0.090	0.271	-0.142	-0.263	0.042	0.163	0.439*	0.587**	1							
花瓣长 PL2	0.636**	0.480**	0.542**	0.550**	0.675**	0.486**	0.723**	0.046	0.075	1						
花瓣宽 PW	-0.241	0.445*	-0.098	0.11	0.393*	0.417*	0.296	0.193	0	0.075	1					
唇瓣长 LL2	-0.067	0.367	-0.034	0.421*	0.496**	0.709**	0.408*	0.245	0.03	0.129	0.599**	1				
唇瓣宽 LW2	-0.107	0.313	-0.091	0.416*	0.467*	0.675**	0.457**	0.249	-0.149	0.074	0.693**	0.889**	1			
假雄蕊长 SL	-0.111	0.311	0.085	0.229	0.421*	0.511**	0.471**	0.231	-0.225	0.150	0.752**	0.627**	0.762**	1		
假雄蕊宽 SW	-0.280	0.351	0.009	0.262	0.341	0.444*	0.465*	0.275	-0.147	0.136	0.721**	0.503**	0.651**	0.868**	1	
子房长 OL	0.354	0.284	0.353	0.747**	0.454*	0.415*	0.664**	0.330	-0.149	0.644**	-0.056	0.264	0.151	-0.016	0.078	1
花萼长/花瓣宽 PL2/PW	0.409*	0.017	0.639**	0.292	0.108	-0.092	0.165	0.015	-0.095	0.469*	-0.735*	-0.332	-0.426*	-0.402*	-0.430*	0.417*
株型 PT	-0.496**	0.106	-0.07	-0.226	-0.181	-0.104	-0.109	-0.324	-0.019	-0.426*	0.570**	0.246	0.356	0.479**	0.417*	0.417*
叶腹面有无网纹 LR	-0.579**	0.470*	0.369*	0.355	0.142	0.092	0.043	-0.239	-0.159	0.045	0.279	0.217	0.150	0.101	0.257	0.257
唇瓣形状 LS	0.494**	-0.431*	-0.034	-0.151	-0.241	-0.317	-0.226	0.01	0.154	0.11	-0.890**	-0.587**	-0.724**	-0.817**	-0.792**	-0.792**
唇瓣口有无耳状结构 LE	0.528**	-0.459*	-0.069	0.009	0.171	-0.171	-0.082	0.102	0.057	0.138	-0.875**	-0.443*	-0.555**	-0.677**	-0.645**	-0.645**
花药特征 AT	0.401*	-0.353	0.008	-0.309	-0.291	-0.440*	-0.358	-0.09	0.241	0.068	-0.805**	-0.676**	-0.825**	-0.877**	-0.862**	-0.862**
假雄蕊有无乳突 SP	0.425*	-0.526**	-0.277	-0.295	-0.181	-0.097	-0.303	0.19	0.029	-0.179	-0.443*	-0.319	-0.297	-0.355	-0.469*	-0.469*
中萼片及花瓣斑 DSPD	0.062	0.145	0.33	-0.026	0.112	-0.08	-0.197	0.022	0.278	0.219	-0.503**	-0.331	-0.500**	-0.536**	-0.489**	-0.489**
花瓣形态 PS	0.365	-0.385*	0.155	0.103	-0.19	-0.251	-0.026	-0.082	-0.022	0.16	-0.912**	-0.450*	-0.578**	-0.647**	-0.613**	-0.613**
唇瓣主色 LMC	0.492**	-0.347	-0.033	0.140	-0.074	-0.015	0.088	0.29	-0.032	0.237	-0.802**	-0.394*	-0.443*	-0.542**	-0.482**	-0.482**
假雄蕊底部有无凹缺 SBC	-0.077	0.129	0.308	0.316	0.047	-0.046	0.103	-0.005	-0.104	0.321	-0.437*	-0.131	-0.311	-0.338	-0.122	-0.122
性状	子房长	花萼长/花瓣宽	株型	叶腹面有无网纹 LR	唇瓣形状	唇瓣口有无耳状结构	假雄蕊有无乳突	花药特征	中萼片及花瓣斑	花瓣形态	唇瓣主色	假雄蕊底部	假雄蕊底部	假雄蕊底部	假雄蕊底部	假雄蕊底部
Traits	OL	PL2/PW	PT	网格纹 LR	LS	LE	SP	AT	DSPD	PS	LMC	SBC	SBC	SBC	SBC	SBC
子房长 OL	1															
花萼长/花瓣宽 PL2/PW	0.366	1														
株型 PT	-0.399*	-0.546**	1													
叶腹面有无网纹 LR	0.237	-0.067	0.108	1												
唇瓣形状 LS	0.153	0.624**	-0.722**	-0.405*	1											
唇瓣口有无耳状结构 LE	0.260	0.643**	-0.760**	-0.471**	0.950**	1										
花药特征 AT	0.019	0.532**	-0.600**	-0.287	0.941**	0.790**	1									
假雄蕊有无乳突 SP	-0.201	0.150	-0.239	-0.751**	0.539**	0.567**	0.448*	1								
中萼片及花瓣斑 DSPD	0.051	0.532**	-0.684**	0.212	0.522**	0.422*	0.571**	-0.057	1							
花瓣形态 PS	0.299	0.802**	-0.669**	-0.289	0.869**	0.914**	0.722**	0.345	0.345	1						
唇瓣主色 LMC	0.329	0.613**	-0.704**	-0.440*	0.824**	0.908**	0.640**	0.549**	0.33	0.825**	1					
假雄蕊底部有无凹缺 SBC	0.480**	0.554**	-0.611**	0.493**	0.379*	0.399*	0.315	-0.371*	0.609**	0.540**	0.387*	1				

*和**分别表示在 $P < 0.05$ 和 $P < 0.01$ 水平上显著相关* and ** indicate significant correlation at $P < 0.05$ and $P < 0.01$, respectively

表 7 表型性状主成分分析

Table 7 Principal component analysis of phenotypic traits

性状 Traits	主成分 Principle component				
	1	2	3	4	5
叶长 LL	-0.365	0.531	0.578	0.031	-0.309
叶宽 LW	0.483	0.508	-0.320	0.484	-0.142
着花数 FN	0.003	0.535	-0.490	0.024	-0.601
花葶长 PL	0.230	0.774	-0.126	-0.326	0.108
花葶粗 PD	0.373	0.737	0.120	0.250	-0.081
花自然长度 FL	0.475	0.668	0.319	0.180	0.240
花自然宽度 FW	0.338	0.749	0.165	-0.276	-0.122
中萼片长 DSL	0.126	0.614	0.515	0.372	0.138
中萼片宽 DSW	-0.089	-0.009	0.152	0.822	0.151
花瓣长 PL2	0.003	0.881	0.043	0.121	-0.289
花瓣宽 PW	0.934	-0.033	0.090	0.154	-0.027
唇瓣长 LL2	0.702	0.311	0.158	-0.044	0.345
唇瓣宽 LW2	0.813	0.222	0.246	-0.178	0.233
假雄蕊长 SL	0.856	0.140	0.184	-0.175	-0.135
假雄蕊宽 SW	0.821	0.149	0.034	-0.154	0.049
子房长 OL	-0.033	0.798	-0.090	-0.280	0.141
花瓣长/花瓣宽 PL2/PW	-0.641	0.524	-0.240	-0.145	-0.309
株型 PT	0.657	-0.535	-0.014	-0.066	-0.305
叶腹面有无网格纹 LR	0.367	0.146	-0.835	0.018	0.209
唇瓣形状 LS	-0.972	0.131	0.113	0.037	0.065
唇瓣口有无耳状结构 LE	-0.905	0.245	0.224	-0.135	0.167
花药特征 AT	-0.935	-0.009	-0.020	0.220	-0.053
假雄蕊有无乳突 SP	-0.526	-0.176	0.683	-0.024	-0.090
中萼片及花瓣色斑 DSPD	-0.558	0.280	-0.451	0.449	0.132
花瓣形态 PS	-0.874	0.280	-0.056	-0.231	0.066
唇瓣主色 LMC	-0.784	0.359	0.276	-0.195	0.166
假雄蕊底部有无凹缺 SBC	-0.383	0.462	-0.623	-0.099	0.353
特征值 Eigenvalue	10.080	6.145	3.218	1.928	1.357
方差贡献率(%) Variance contribution rate	37.334	22.758	11.917	7.141	5.027
累计贡献率(%) Cumulative contribution rate	37.334	60.092	72.009	79.150	84.176

种质具有丰富的表型性状多样性,兜兰属种质的利用潜力巨大。

相关性分析表明一种表型性状间接反映另一种表型性状,即少数重要表型性状的改变可间接影响整体表型^[15,32]。本研究得到的相关性分析结果显示,45.58%的表型性状呈现显著相关或极显著相关,另外还有一些性状与其他性状不显著相关,如中萼片宽与其他性状相关性均不显著,花瓣长与叶长、叶宽、着花数、花葶长、花葶粗、花自然长度、花自然宽度、中萼片长、子房长呈极显著正相关,与花瓣长/花瓣宽呈显著正相关,与株型呈显著负相关,与其他性状相关性均不显著;子房长与花葶长、花自然宽度、花瓣长、假雄蕊底部是否凹缺呈极显著

正相关,与花葶粗、花自然长度呈显著正相关,与株型呈显著负相关外,与其他性状相关性均不显著。相关性分析说明了兜兰表型性状间关系密切并且复杂。

主成分分析将27个性状简化为5个主要成分,累计方差贡献率达84.176%,可以解释不同兜兰种质主要表型性状的大部分信息。研究发现,唇瓣形状、花药特征、花瓣宽、唇瓣口特征、花瓣形态、假雄蕊长、假雄蕊宽、唇瓣宽等8个指标可以反映29种兜兰表型的遗传多样性,其中包含了4个质量性状和4个数量性状,又以质量性状对表型多样性的影响更大。这些性状指标都集中在花器官,因此花器官性状是兜兰分类中的重要鉴定依据。

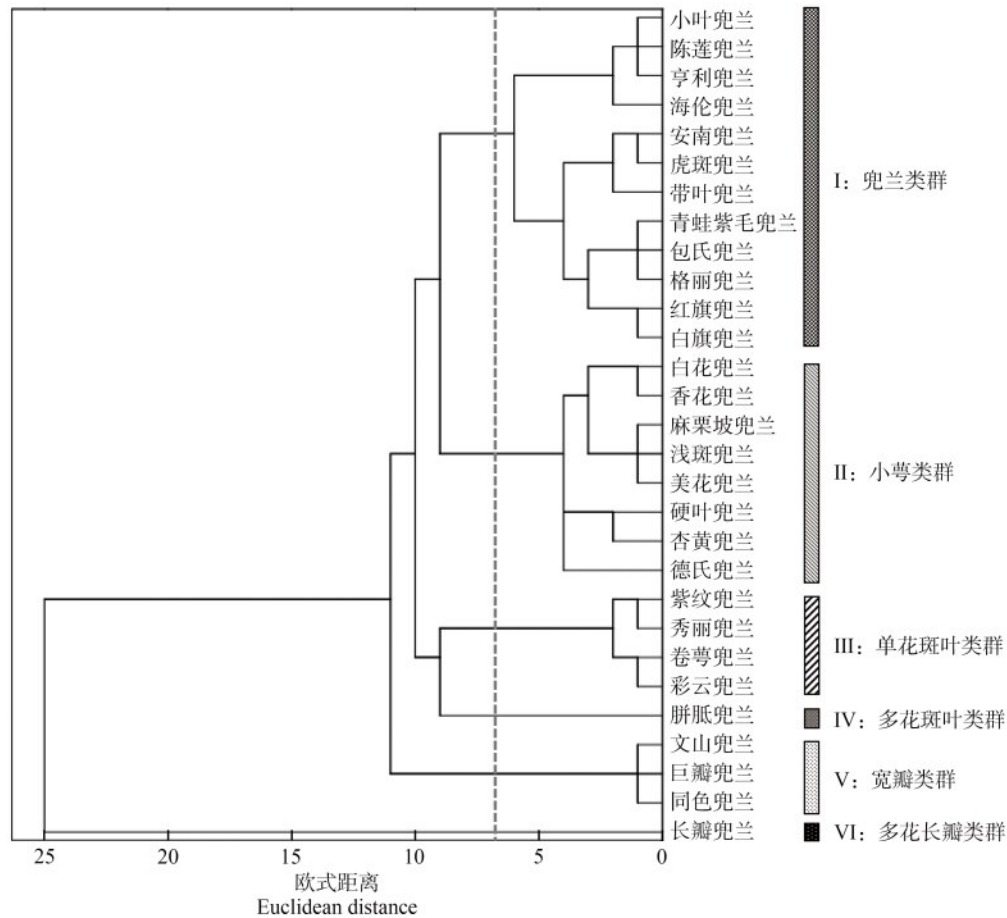


图2 兜兰种质资源亲缘关系聚类图

Fig.2 Cluster diagram of genetic relationship of germplasm resources of *Paphiopedilum*

植物学家们对兜兰属植物分类的研究由来已久,早在1886年,德国植物学家E.H.Pfitzer首先创立了*Paphiopedilum*这个属名,将兜兰属从杓兰属中分离出来,此后不同的植物学家对兜兰属植物的分类提出了不同的分类标准^[33-41]。由于兜兰属植物种类较多,遗传背景差异较大,分类较为复杂,甚至同一学者在不同时期有不同的分类方法^[33-34]。本研究通过亲缘关系分析,29种兜兰种质被分为6个类群,第I类与大部分学者对兜兰亚属(组)的分类基本一致^[1,33-38,40],主要包含了兜兰亚属(组)的9个物种以及2个变种(安南兜兰、包氏兜兰)和1个杂交种(青蛙紫毛兜兰),其中安南兜兰和包氏兜兰是紫毛兜兰的变种,青蛙紫毛兜兰是白旗兜兰和紫毛兜兰的杂交种;第II类包括白花兜兰和香花兜兰这两个绿叶类兜兰以及麻栗坡兜兰、浅斑兜兰、硬叶兜兰、美花兜兰、杏黄兜兰和德氏兜兰,这一类被许多学者统称为小萼亚属,前两个种被一些学者称为小萼亚属绿叶组^[36-39],其中浅斑兜兰为麻栗坡兜兰的变种,美花兜兰是硬叶兜兰和麻栗坡兜兰的杂交种,这与

部分学者采用表型、核型、分子标记等方法得到的分类结果基本一致^[21,36-39];第III类包含卷萼兜兰、紫纹兜兰、彩云兜兰和秀丽兜兰4个物种,而与之形态略为相近的胼胝兜兰被单独划分为第IV类,两个类群的亲缘关系较近,不少学者^[1,33,35-36,39]把上述5个物种共同分在单花斑叶亚属(组)中;第V类是宽瓣亚属(或者同色组),包含文山兜兰、巨瓣兜兰和同色兜兰这3个近缘种,不少学者把它们单独做为一个亚属—宽瓣亚属^[33-35,38-39],也有学者把这一类划分在宽瓣亚属^[40]或者该属下面的分支,即与小萼组并列的同色组中^[1,31],但是从表型特征和表型数据来看,这一类群的花药特征、假雄蕊长、唇瓣宽、中萼片长等更接近第IV类,并且在主成分分析中,花药特征、假雄蕊长、唇瓣宽这些指标占据重要地位,说明了这一类群与小萼类群差异较大、亲缘关系较远;从表型性状来看,长瓣兜兰无论植株形态还是开花形态均与其他物种差异较大,被单独归在了第VI类,并且与其他类群距离较远,许多学者把长瓣兜兰归入兜兰亚属以下的多花长瓣组^[1,33,35-36,39]或者

多花亚属以下的多花长瓣组^[38]。

表型性状鉴定是认识种质资源和培育新品种的基石^[7],对表型的观察也是兜兰属植物最早、最直观的分类方法之一^[37,39]。本研究通过对叶片、花器官形态和主色等表型性状对29种兜兰种质资源的表型多样性及亲缘关系进行了分析,可为兜兰新品种选育提供科学依据,同时为利用表型数据开展兜兰属种质研究提供了参考,将有助于兜兰新品种的选育和推广。相对于核型分析以及分子标记等其他分类方法,表型性状虽会受环境因子等的影响,但表型研究具有直观、简单、方便的优点,适用于兜兰种植者、爱好者和一般的研究者,对兜兰属植物的鉴别和分类研究具有一定的参考价值。下一步可以考虑将兜兰表型描述更加细化、统一化,增加兜兰种质资源数据统计数量,同时增加同一物种不同来源地兜兰种质数据资料,进行差异性分析,从而进一步提高分类鉴定的准确性。

参考文献

- [1] 刘仲健,陈心启,陈利君,雷嗣鹏.中国兜兰属植物.北京:科学出版社,2009
Liu Z J, Chen X Q, Chen L J, Lei S P. The genus *Paphiopedilum* in China. Beijing: Science Press, 2009
- [2] Zhang S B, Yang Y J, Li J W, Qin J, Zhang W, Huang W, Hu H. Physiological diversity of orchids. *Plant Diversity*, 2018, 40(4): 196-208
- [3] 尹玉莹,房林,李琳,陈砚,符稳群,吴坤林,曾宋君.兜兰属植物花期调控研究进展.热带作物学报,2022,43(4):769-778
Yin Y Y, Fang L, Li L, Chen Y, Fu W Q, Wu K L, Zeng S J. Advances in flowering regulation of *Paphiopedilum*. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2022, 43(4): 769-778
- [4] 刘浩,周闲容,于晓娜,杨修仕,刘三才,么杨,任贵兴.作物种质资源品质性状鉴定评价现状与展望.植物遗传资源学报,2014,15(1):215-221
Liu H, Zhou X R, Yu X N, Yang X S, Liu S C, Yao Y, Ren G X. Current situation and prospect of identification and evaluation of quality traits in crop germplasm resources. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2014, 15(1): 215-221
- [5] 姚祝芳,张雄坚,杨义伶,黄立飞,陈新亮,姚肖健,罗忠霞,陈景益,王章英,房伯平.177份甘薯地方资源表型性状的遗传多样性分析.作物学报,2022,48(9):2228-2241
Yao Z F, Zhang X J, Yang Y L, Huang L F, Chen X L, Yao X J, Luo Z X, Chen J Y, Wang Z Y, Fang B P. Genetic diversity of phenotypic traits in 177 sweetpotato landraces. *Acta Agronomica Sinica*, 2022, 48(9): 2228-2241
- [6] 杨涛,黄雅婕,李生梅,任丹,崔进鑫,庞博,于爽,高文伟.海岛棉种质资源表型性状的遗传多样性分析及综合评价.中国农业科学,2021,54(12):2499-2509
Yang T, Huang Y J, Li S M, Ren D, Cui J X, Pang B, Yu S, Gao W W. Genetic diversity and comprehensive evaluation of phenotypic traits in sea-island cotton germplasm resources. *Scientia Agricultura Sinica*, 2021, 54(12): 2499-2509
- [7] 王晓鸣,邱丽娟,景蕊莲,任贵兴,李英慧,李春辉,秦培友,谷勇哲,李龙.作物种质资源表型性状鉴定评价:现状与趋势.植物遗传资源学报,2022,23(1):12-20
Wang X M, Qiu L J, Jing R L, Ren G X, Li Y H, Li C H, Qin P Y, Gu Y Z, Li L. Evaluation on phenotypic traits of crop germplasm: Status and development. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2022, 23(1): 12-20
- [8] 胡标林,万勇,李霞,雷建国,罗向东,严文贵,谢建坤.水稻核心种质表型性状遗传多样性分析及综合评价.作物学报,2012,38(5):829-839
Hu B L, Wan Y, Li X, Lei J G, Luo X D, Yan W G, Xie J K. Analysis on genetic diversity of phenotypic traits in rice (*Oryza sativa*) core collection and its comprehensive assessment. *Acta Agronomica Sinica*, 2012, 38(5): 829-839
- [9] 周健,崔迪,赵洙敏,孙建昌,黎毛毛,马小定,王先俱,李相奎,赵峻贤,朴东洙,郭晓红,韩龙植.不同年代水稻品种主要农艺性状的表型评价.植物遗传资源学报,2019,20(6):1566-1578
Zhou J, Cui D, Zhao Z M, Sun J C, Li M M, Ma X D, Wang X J, Li X K, Zhao J X, Park D S, Guo X H, Han L Z. Phenotypic evaluation of main agronomic traits in rice varieties that were released over the past few decades. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2019, 20(6): 1566-1578
- [10] 刘志斋,郭荣华,石云素,蔡一林,曹墨菊,宋燕春,王天宇,黎裕.中国玉米地方品种核心种质花期相关性状的表型多样性研究.中国农业科学,2008,41(6):1591-1602
Liu Z Z, Guo R H, Shi Y S, Cai Y L, Cao M J, Song Y C, Wang T Y, Li Y. Phenotypic diversity of flowering-related traits of maize landraces from the core collection preserved in china national genebank. *Scientia Agricultura Sinica*, 2008, 41(6): 1591-1602
- [11] 朱世杨,刘庆,钟伟杰,张小玲,罗天宽,唐征,徐谦.80份花椰菜种质资源表型性状的遗传多样性分析.分子植物育种,2022,20(5):1672-1684
Zhu S Y, Liu Q, Zhong W J, Zhang X L, Luo T K, Tang Z, Xu Q. Genetic diversity analysis of 80 cauliflower germplasm resources based on phenotypic traits. *Molecular Plant Breeding*, 2022, 20(5): 1672-1684
- [12] 张加强,骆霞虹,陈常理,朱关林,金关荣.叶用芥菜种质表型性状的遗传多样性分析.植物遗传资源学报,2015,16(3):535-540
Zhang J Q, Luo X H, Chen C L, Zhu G L, Jin G R. Diversity analysis of leaf mustard germplasm based on phenotypic traits. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2015, 16(3): 535-540
- [13] 孙珍珠,李秋月,王小柯,赵婉彤,薛杨,冯锦英,刘小丰,刘梦雨,江东.宽皮柑橘种质资源表型多样性分析及综合评价.中国农业科学,2017,50(22):4362-4383
Sun Z Z, Li Q Y, Wang X K, Zhao W T, Xue Y, Feng J Y,

- Liu X F, Liu M Y, Jiang D. Comprehensive evaluation and phenotypic diversity analysis of germplasm resources in mandarin. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50 (22) : 4362-4383
- [14] 张莹,曹玉芬,霍宏亮,田路明,董星光,齐丹,张小双.基于花表型性状的梨种质资源多样性研究. *园艺学报*, 2016, 43(7): 1245-1256
- Zhang Y, Cao Y F, Huo H L, Tian L M, Dong X G, Qi D, Zhang X S. Research on diversity of pear germplasm resources based on flowers phenotype traits. *Acta Horticulturae Sinica*, 2016, 43(7):1245-1256
- [15] 苏群,杨亚涵,田敏,张进忠,毛立彦,唐毓玮,卜朝阳,卢家仕.49份睡莲资源表型多样性分析及综合评价. *西南农业学报*, 2019, 32(11):2670-2681
- Su Q, Yang Y H, Tian M, Zhang J Z, Mao L Y, Tang Y W, Bu Z Y, Lu J S. Phenotypic diversity analysis and comprehensive evaluation of 49 waterlily resources. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2019, 32(11):2670-2681
- [16] 蔡年辉,李亚麒,许玉兰,李伟,汪梦婷,陈诗,王亚楠,王大玮.不同生长优势等级云南松针叶表型多样性分析. *西南林业大学学报:自然科学*, 2019, 39(5):1-7
- Cai N H, Li Y Q, Xu Y L, Li W, Wang M T, Chen S, Wang Y N, Wang D W. Needles phenotypic diversity analysis in different dominance hierarchies of *pinus yunnanensis*. *Journal of Southwest Forestry University: Natural Sciences*, 2019, 39(5):1-7
- [17] 魏晓羽,刘红,瞿辉,李凤童,袁媛,刘春贵,马辉,张甜,包建忠,孙叶.158份春兰种质资源的表型多样性分析. *植物遗传资源学报*, 2022, 23(2):398-411
- Wei X Y, Liu H, Qu H, Li F T, Yuan Y, Liu C G, Ma H, Zhang T, Bao J Z, Sun Y. Phenotypic diversity analysis of 158 *Cymbidium goeringii* germplasm resources. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2022, 23(2):398-411
- [18] 段艳岭,范义荣,敖素燕,宁惠娟,郭雨楠.寒兰种质资源表型性状多样性分析. *中国农学通报*, 2014, 30(16):143-147
- Duan Y L, Fan Y R, Ao S Y, Ning H J, Guo Y N. Analysis on phenotypic character diversity of *cymbidium kanran* germplasm resources. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2014, 30(16): 143-147
- [19] 张叶,叶蓓蕾,邬静,刘乐,黎维诗,郝代成,谢尚潜,凌鹏.77份文心兰种质资源表型性状遗传多样性分析. *热带作物学报*, 2021, 42(8):2183-2190
- Zhang Y, Ye B L, Wu J, Liu L, Li W S, Hao D C, Xie S Q, Ling P. Analysis of genetic diversity of phenotypic traits of 77 *Oncidium* germplasm resources. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2021, 42(8):2183-2190
- [20] 孙彩云,张明永,叶秀萍,梁承邺,夏快飞.利用RAPD和同工酶研究中国兜兰属种间亲缘关系. *园艺学报*, 2005, 32(2): 268-272
- Sun C Y, Zhang M Y, Ye X L, Liang C Y, Xia K F. The relation of *paphiopedilum* species in china by RAPD and isozyme. *Acta Horticulturae Sinica*, 2005, 32(2):268-272
- [21] 陈业,石建明,沈文华,江辉,关萍.23种中国兜兰属植物亲缘关系的 ISSR 分析. *西南大学学报:自然科学*, 2013, 35(6): 15-21
- Chen Y, Shi J M, Shen W H, Jiang H, Guan P. ISSR analysis of phylogenetic relationship of 23 Chinese *Paphiopedilum* species. *Journal of Southwest University: Natural Science Edition*, 2013, 35(6): 15-21
- [22] 朱亚艳,王港,侯娜,王莲辉.贵州南部野生兜兰 SRAP 遗传多样性分析. *西南林业大学学报:自然科学*, 2017, 37(1): 10-14
- Zhu Y Y, Wang G, Hou N, Wang L H. Genetic diversity analysis of wild *paphiopedilum* species in the south of Guizhou. *Journal of Southwest Forestry University: Natural Sciences*, 2017, 37(1):10-14
- [23] 朱根发,杨志娟,王碧青,吕复兵,张显.兜兰亚属 12 种植物的核型分析. *热带亚热带植物学报*, 2011, 19(2):152-158
- Zhu G F, Yang Z J, Wang B Q, Lv F B, Zhang X. Karyotypes of 12 species of *paphiopedilum* subgenus *paphiopedilum*. *Journal of Tropical and Subtropical Botany*, 2011, 19(2):152-158
- [24] 孙同兴,胡玉熹,郎楷永.中国兜被兰属植物叶表皮微形态特征的研究. *云南植物研究*, 1999(1):59-64
- Sun T X, Hu Y X, Lang K Y. A study on micromorphological characters of leaf epidermis of *neottianthe* in china. *Acta Botanica Yunnanica*, 1999(1):59-64
- [25] 李宗艳,吴玉兰,彭坤.兜兰属(*Paphiopedilum*)10种植物叶表皮微观结构特征比较. *植物研究*, 2014, 34(6):723-729
- Li Z Y, Wu Y L, Peng K. Micro-morphological characters of leaf epidermis of ten species in genus *Paphiopedilum*. *Bulletin of Botanical Research*, 2014, 34(6):723-729
- [26] 查应琴,关萍,陈业,林耀光,康念,石建明.中国兜兰属 23 种植物叶表皮微形态特征初步研究. *植物科学学报*, 2019, 37(6):709-718
- Zha Y Q, Guan P, Chen Y, Lin Y G, Kang N, Shi J M. Preliminary study on leaf epidermal micromorphological character of 23 Chinese *Paphiopedilum* pfitz. species. *Plant Science Journal*, 2019, 37(6):709-718
- [27] 程浩,徐玉凤,王文晓,朱俊,贾瑞冬,杨树华,赵鑫,葛红.中国硬叶兜兰主要分布区居群表型多样性分析. *园艺学报*, 2020, 47(6):1098-1110
- Cheng H, Xu Y F, Wang W X, Zhu J, Jia R D, Yang S H, Zhao X, Ge H. Phenotypic diversity of *Paphiopedilum micranthum* populations from main distribution areas in China. *Acta Horticulturae Sinica*, 2020, 47(6):1098-1110
- [28] 王文晓,程浩,徐玉凤,葛红,杨树华,赵鑫,武荣花,贾瑞冬.带叶兜兰 5 个野生居群表型多样性分析. *植物遗传资源学报*, 2020, 21(5):1196-1206
- Wang W X, Cheng H, Xu Y F, Ge H, Yang S H, Zhao X, Wu R H, Jia R D. Phenotypic diversity analysis of five wild *Paphiopedilum hirsutissimum* populations. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2020, 21(5):1196-1206
- [29] 周妍慧,贾瑞冬,杨树华,赵鑫,葛红,罗文美,赵新梅,桑益恒.杏黄兜兰居群表型多样性分析. *园艺学报*, 2016, 43(7):

- 1337-1347
Zhou Y H, Jia R D, Yang S H, Zhao X, Ge H, Luo W M, Zhao X M, Sang Y H. Phenotypic diversity of *Paphiopedilum armeniacum* populations. *Acta Horticulturae Sinica*, 2016, 43(7):1337-1347
- [30] 朱根发, 陈和明, 吕复兵, 操君喜, 孙映波, 李冬梅, 尤毅, 李佐, 堵苑苑, 任永浩. NY/T2230-2012 植物新品种特异性、一致性和稳定性测试指南 蝴蝶兰. 北京: 中华人民共和国农业部, 2012
Zhu G F, Chen H M, Lv F B, Cao J X, Sun Y B, Li D M, You Y, Li Z, Du Y Y, Ren Y H. NY/T2230-2012 Guidelines for the conduct of tests for distinctness, uniformity and stability *Phalaenopsis* (*Phalaenopsis* Blume and \times *Doritaenopsis* hort.). Beijing: Ministry of Agriculture and Affairs of the People's Republic of China, 2012
- [31] 尹俊梅, 任羽, 杨光穗. 石斛兰种质资源描述规范和数据质量控制规范. 北京: 中国农业出版社, 2008
Yin J M, Ren Y, Yang G S. Descriptors and data quality control criterion for *Dendrobium*. Beijing: China Agriculture Press, 2008
- [32] 芮文婧, 王晓敏, 张倩男, 胡学义, 胡新华, 付金军, 高艳明, 李建设. 番茄 353 份种质资源表型性状遗传多样性分析. *园艺学报*, 2018, 45(3):561-570
Rui W J, Wang X M, Zhang Q N, Hu X Y, Hu X H, Fu J J, Gao Y M, Li J S. Genetic diversity analysis of 353 tomato germplasm resources by phenotypic traits. *Acta Horticulturae Sinica*, 2018, 45(3):561-570
- [33] Atwood J T. The relationships of the slipper orchids (subfamily Cypripedioideae, Orchidaceae). *Selbyana*, 1984, 7(2-4): 129-247
- [34] Cox A V, Pridgeon A M, Albert V A, Chase M W. Phylogenetics of slipper orchids (Cypripedioideae, Orchidaceae): Nuclear rDNA ITS sequences. *Plant Systematics and Evolution*, 1997, 208: 197-223
- [35] Cribb P J. The genus *Paphiopedilum*. 2nd edn. Kota Kinabalu (Sabah, Malaysia): National History Publications (Borneo) in association with Royal Botanic Gardens, Kew, 1998
- [36] Averyanov L, Cribb P J, Loc P K, Hiep N T. Slipper orchids of Vietnam. Kew: Kew Publishing, 2003
- [37] 萧元川. 巴菲尔鞋兰属的分类沿革. *台湾兰讯*, 2012(2): 16-21
Xiao Y C. Taxonomic Development of *Paphiopedilum*. *Taiwan Orchid Talks*, 2012(2): 16-21
- [38] 黄祯宏. 兰花浅介 II. 台湾: 台湾兰花产销发展协会, 2014: 120-124
Huang Z H. Guide to Orchid in Class II. Taiwan: Taiwan Orchid Growers Association (TOGA), 2014: 120-124
- [39] Chochai A, Fay M F, Ingrouille M J, Leitch I J. Molecular phylogenetics of *Paphiopedilum* (Cypripedioideae; Orchidaceae) based on nuclear ribosomal ITS and plastid sequences. *Botanical Journal of the Linnean Society*, 2012 (170): 176-196
- [40] Górnjak M, Szlachetko D L, Kowalkowska A K, Bohdanowicz J, Chu X C. Taxonomic placement of *Paphiopedilum canhii* (Cypripedioideae; Orchidaceae) based on cytological, molecular and micromorphological evidence. *Molecular Phylogenetics and Evolution*, 2014(70): 429-441
- [41] 中国科学院中国植物志编辑委员会. 中国植物志 (第 17 卷). 2 版. 北京: 科学出版社, 2006: 52-71
Flora of China Editorial Committee of Chinese Academy of Sciences. *Flora Reipublicae Popularis Sinicae* (Volume 17). 2nd edn. Beijing: Science Press, 2006: 52-71