

17种石斛属植物表型性状多样性分析

贺漫媚, 代色平, 陈秀萍, 吴俭峰, 刘国锋, 阮琳, 王伟^①

(广州市林业和园林科学研究院, 广东 广州 510405)

摘要: 以17种石斛属(*Dendrobium* Sw.)植物为研究对象,通过观测6个叶表型性状和15个花表型性状,从形态学角度对石斛属植物表型性状进行变异和多样性分析,并揭示各表型性状间的相互关系。结果表明:叶表型性状变异系数为28.78%~63.63%,花表型性状变异系数为31.26%~117.65%,不同表型性状变异幅度差异明显,花表型性状的变异幅度大于叶表型性状。21个表型性状的Shannon's多样性指数差异较小,为4.372~4.393,Shannon's多样性指数最大的是萼囊长、最小的是花柄长和唇瓣宽。Shannon's多样性指数与变异系数整体存在显著($p<0.05$)线性相关。主成分分析结果显示:前4个主成分的累计贡献率达84.2%,可以反映17种石斛属植物表型性状的基本特征,其中花纵径、叶面积、侧萼长、萼囊长和叶长宽比是造成石斛属植物表型差异的主要因子。聚类分析结果表明:17种石斛属植物可聚为4组,聚类结果与传统分类存在一定差异。相关性分析结果表明:叶各表型性状间和花各表型性状间整体上存在显著或极显著($p<0.01$)相关性,叶厚与除侧萼长、侧萼宽和萼囊长外的12个花表型性状均存在显著或极显著相关性。综合研究结果表明:石斛属植物表型性状变异丰富,拥有丰富的表型多样性,各表型性状之间有着密切且复杂的关系。

关键词: 石斛属; 花; 叶; 表型性状; 表型变异; 表型多样性

中图分类号: Q944.3; S682.31 文献标志码: A 文章编号: 1674-7895(2024)02-0071-09

DOI: 10.3969/j.issn.1674-7895.2024.02.08

Analysis on phenotypic trait diversity of 17 *Dendrobium* species HE Manmei, DAI Seping, CHEN Xiuping, WU Jianfeng, LIU Guofeng, RUAN Lin, WANG Wei^① (Guangzhou Institute of Forestry and Landscape Architecture, Guangzhou 510405, China), *J. Plant Resour. & Environ.*, 2024, 33(2): 71-79, 90

Abstract: Taking 17 *Dendrobium* Sw. species as research objects, the variation and diversity analyses of phenotypic traits of *Dendrobium* species were conducted and the relationships between phenotypic traits were revealed in terms of morphology by observing 6 leaf phenotypic traits and 15 flower phenotypic traits. The results show that the coefficients of variation of leaf phenotypic traits are 28.78%–63.63%, those of flower phenotypic traits are 31.26%–117.65%, there are evident differences in variation degrees of different phenotypic traits, and the variation degree of flower phenotypic traits is greater than that of leaf phenotypic traits. The differences in Shannon's diversity indexes of 21 phenotypic traits are relatively small, which are 4.372–4.393, and the Shannon's diversity index of calyx sac length is the largest, and those of pedicel length and labellum width are the smallest. There is a significant ($p<0.05$) linear relationship between Shannon's diversity index and coefficient of variation in general. The principal component analysis result shows that the cumulative contribution rate of the first four principal components reaches 84.2%, which can reflect the basic characteristics of phenotypic traits of 17 *Dendrobium* species, in which, the flower vertical diameter, leaf area, lateral sepal length, calyx sac length, and leaf length to width ratio are the main factors causing phenotypic differences among *Dendrobium* species. The clustering

收稿日期: 2023-10-29

基金项目: 广州市科学技术局农业和社会发展科技项目(202206010058); 广州市林业和园林局部门预算项目(穗财编[2020]94号; 穗财编[2023]1号)

作者简介: 贺漫媚(1978—),女,广东河源人,本科,高级工程师,主要从事园林植物资源开发与利用研究。

^①通信作者 E-mail: waynelove@126.com

引用格式: 贺漫媚, 代色平, 陈秀萍, 等. 17种石斛属植物表型性状多样性分析[J]. 植物资源与环境学报, 2024, 33(2): 71-79, 90.

analysis result shows that 17 *Dendrobium* species can be clustered into 4 groups, and there are some differences between the clustering results and traditional classification. The correlation analysis result shows that there are significant or extremely significant ($p < 0.01$) correlations between leaf phenotypic traits and flower phenotypic traits in general, and leaf thickness has significant or extremely significant correlations with other 12 flower phenotypic traits except lateral sepal length, lateral sepal width, and calyx sac length. The comprehensive research results indicate that *Dendrobium* species have abundant phenotypic variations and rich phenotypic diversity, and there are close and complex relationships between phenotypic traits.

Key words: *Dendrobium* Sw.; flower; leaf; phenotypic trait; phenotypic variation; phenotypic diversity

石斛属 (*Dendrobium* Sw.) 是兰科 (Orchidaceae) 植物的一个大属, 全球有 1 000 余种, 广泛分布于热带和亚热带地区^[1]。中国石斛属植物约有 80 种, 主要分布于贵州、云南、海南、广东、广西、台湾等省 (自治区)^[1]。石斛属植物不仅具有巨大的经济和药用价值, 还具有观赏和科研价值。近几十年来, 由于过度采挖、生境破坏、气候变化等原因, 许多野生石斛种类急剧减少, 被列为国家重点保护野生植物。因此, 有必要针对石斛种质资源的保护与利用开展相关研究。目前有关石斛属的研究主要集中在植物基因组学^[2]、植物化学成分^[3]、种苗繁育技术^[4]、花粉与药帽形态结构^[5-6]等方面, 而关于其表型多样性的研究较为缺乏。

表型性状是植物各种形态特征的组合, 受遗传基因与环境条件共同调控。植物经过长期的自然选择和环境胁迫, 通常会出现表型变异, 这也是植物适应不同生境的一种生存策略^[7-8]。表型多样性侧重研究植物群体在不同生境下的表型变异规律。通过研究植物表型多样性能够认识植物群体的遗传变异规律及其对环境的响应与适应机制, 这也是选育植物优良品种的最初途径, 对于珍稀植物保护与利用具有重要意义。

叶片是植物光合呼吸的重要器官, 其形态特征直接影响植物的生长发育过程^[9]。花作为重要的生殖器官, 其形态特征对虫媒传粉和植株繁殖能力有重要影响^[10]。例如: 叶面积越大越有利于植株捕获更多光能; 较厚的叶片可以储存更多水分, 从而提高植株耐旱性^[11]; 大而鲜艳的花朵更能吸引传粉者, 从而提高植株繁殖成功率^[10]。近年来, 叶和花的表型性状已被广泛用于兜兰属 (*Paphiopedilum* Pfitzer)^[12]、兰属 (*Cymbidium* Sw.)^[13-15]、虾脊兰属 (*Calanthe* R. Br.)^[16]等兰科植物表型多样性研究, 以揭示其表型性状的变异程度及多样性特征。

尽管已有研究探讨了某些石斛属种类表型性状的变异规律, 但未在属水平上开展表型性状多样性研究。张振臣等^[17]对铁皮石斛 (*D. officinale* Kimura et Migo) 茎和叶的表型性状进行了变异分析; 刘靛等^[18]对春石斛 (*Dendrobium* spp.) 不同种类叶和花的表型性状进行了变异分析; 何涛等^[19]和张本厚等^[20]对不同产地的金钗石斛 (*D. nobile* Lindl.) (即石斛) 茎、叶和花的表型性状开展了变异性和多样性研究。这些研究结果表明: 不同产地的铁皮石斛、春石斛和金钗石斛在表型性状上存在明显差异, 拥有丰富的表型多样性。然而, 关于石斛属表型性状变异规律和多样性特征尚不清楚。石斛属种类丰富, 形态多样, 对其进行表型性状研究将有助于筛选具有优良性状的种类, 并可通过种间杂交定向培育和发展新种类, 为石斛属植物的育种工作提供参考依据。

近年来, 石斛属植物在园林中的应用日益广泛, 不同石斛属种类的观赏性和适应性各不相同。如杓唇石斛 [*D. moschatum* (Buch.-Ham.) Sw.] 和流苏石斛 (*D. fimbriatum* Hook.) 花大、适应性强, 但花量少; 翅萼石斛 (*D. cariniferum* Rehb. f.) 和美花石斛 (*D. loddigesii* Rolfe) 花色艳丽, 但适应性较差; 亮叶石斛 (*D. laevifolium* Stapf) 和燕石斛 (*D. equitans* Kraenzl.) 花期长, 但花小、花色单一。总体来说, 这些石斛属种类的观赏性、适应性仍有所欠缺, 需要通过育种进行改良, 培育观赏性高、适应性强且能广泛应用于城市园林的种类, 以满足园林行业对石斛应用的要求。鉴于此, 本研究以在广东地区兰花专类园应用效果较好的 17 种石斛属植物为研究对象, 通过观测叶和花的形态结构, 对其表型性状进行变异分析、多样性分析及相关性分析, 从形态学角度阐明石斛属植物表型性状的变异规律和多样性特征, 揭示石斛属植物各表型性状间的相互关系, 以为石斛属植物野生资源保护利用和优良品种选育推广提供基础数据。

1 材料和方法

1.1 材料

研究材料为从国内外收集的 17 种石斛属植物, 相关信息见表 1。供试的所有材料均种植于广州市林业和园林科学研究院兰科植物种质资源圃(东经 113°16'38"、北纬 23°09'36")。

于 2019 年 11 月, 将 17 种石斛属植物经过丛芽

扩繁获得的分生苗进行仿野生种植, 栽培容器为直径 20 cm、高 15 cm 的塑料盆, 栽培基质为树皮和椰壳粒(体积比 1 : 2)。每种石斛属植物种植 5 盆, 每盆 6 株。所有塑料盆均置于大棚内的苗床上进行常规管理, 棚内年平均气温为 23.1 °C, 空气相对湿度为 70%~80%, 通风良好, 光照充足, 配备遮阳网、喷雾等设施。在种植 2 a 后, 每种石斛属植物随机挑选 30 株生长状况良好且较为一致的植株进行后续的表型性状观测。

表 1 17 种石斛属植物材料信息

Table 1 The information of 17 *Dendrobium* Sw. species materials

种类 Species	组 ¹⁾ Section ¹⁾	产地 Origin	花期 Flowering phase
杓唇石斛 <i>D. moschatum</i>	石斛组 Sect. <i>Dendrobium</i>	中国云南西双版纳 Xishuangbanna of Yunnan, China	4 月至 6 月 April to June
肿节石斛 <i>D. pendulum</i>	石斛组 Sect. <i>Dendrobium</i>	中国云南西双版纳 Xishuangbanna of Yunnan, China	3 月至 4 月 March to April
流苏石斛 <i>D. fimbriatum</i>	石斛组 Sect. <i>Dendrobium</i>	中国云南西双版纳 Xishuangbanna of Yunnan, China	4 月至 6 月 April to June
玫瑰石斛 <i>D. crepidatum</i>	石斛组 Sect. <i>Dendrobium</i>	中国云南西双版纳 Xishuangbanna of Yunnan, China	4 月至 5 月 April to May
翅梗石斛 <i>D. trigonopus</i>	黑毛组 Sect. <i>Formosae</i>	中国云南西双版纳 Xishuangbanna of Yunnan, China	3 月至 4 月 March to April
晶帽石斛 <i>D. crystallinum</i>	石斛组 Sect. <i>Dendrobium</i>	中国云南西双版纳 Xishuangbanna of Yunnan, China	5 月至 6 月 May to June
球花石斛 <i>D. thyrsoflorum</i>	顶叶组 Sect. <i>Chrysotoxae</i>	中国云南文山 Wenshan of Yunnan, China	4 月至 5 月 April to May
翅萼石斛 <i>D. cariniferum</i>	黑毛组 Sect. <i>Formosae</i>	中国云南文山 Wenshan of Yunnan, China	3 月至 4 月 March to April
美花石斛 <i>D. loddigesii</i>	石斛组 Sect. <i>Dendrobium</i>	中国云南文山 Wenshan of Yunnan, China	4 月至 5 月 April to May
细叶石斛 <i>D. hancockii</i>	石斛组 Sect. <i>Dendrobium</i>	中国四川广元 Guangyuan of Sichuan, China	5 月至 6 月 May to June
黑毛石斛 <i>D. williamsonii</i>	黑毛组 Sect. <i>Formosae</i>	中国广西桂林 Guilin of Guangxi, China	4 月至 5 月 April to May
聚石斛 <i>D. lindleyi</i>	顶叶组 Sect. <i>Chrysotoxae</i>	中国广西玉林 Yulin of Guangxi, China	3 月至 5 月 March to May
亮叶石斛 <i>D. laevifolium</i>	距囊组 Sect. <i>Pedilonum</i>	中国台湾台南 Tainan of Taiwan, China	8 月至 11 月 August to November
燕石斛 <i>D. equitans</i>	基肿组 Sect. <i>Crumenata</i>	中国台湾台南 Tainan of Taiwan, China	5 月至 6 月 May to June
大明石斛 <i>D. speciosum</i>	顶叶组 Sect. <i>Chrysotoxae</i>	澳大利亚昆士兰 Queensland, Australia	2 月至 3 月 February to March
四角石斛 <i>D. farmeri</i>	顶叶组 Sect. <i>Chrysotoxae</i>	泰国清莱 Chiang Rai, Thailand	6 月至 7 月 June to July
扭瓣石斛 <i>D. tortile</i>	石斛组 Sect. <i>Dendrobium</i>	越南河内 Hanoi, Vietnam	1 月至 3 月 January to March

¹⁾ 依据《中国植物志》^[21] 和《石斛兰》^[22] According to *Flora Reipublicae Popularis Sinicae*^[21] and *Dendrobium*^[22].

1.2 方法

于 2022 年 1 月至 2023 年 5 月, 参考范继征等^[12] 和何涛等^[19] 的方法在盛花期对石斛属植物的 21 个表型性状进行观测, 包括 6 个叶表型性状(叶厚、叶长、叶宽、叶长宽比、叶面积、叶周长)和 15 个花表型性状(花朵数、花纵径、花横径、花柄长、花瓣长、花瓣宽、唇瓣长、唇瓣宽、侧萼长、侧萼宽、中萼长、中萼宽、萼囊长、萼囊宽、子房长)。

从每个塑料盆的 6 株植株中各采集 1 枚成熟叶(植株中部完全展开的叶片), 使用游标卡尺(精度 0.01 mm)测量叶厚(叶片最宽处近中间点的厚度), 使用 CI-203 激光叶面积仪(上海泽泉科技股份有限公司)测量叶长(叶片基部至尖端的长度)、叶宽(叶片最宽处的长度)、叶面积(叶片基部至顶部的投影

面积)和叶周长(叶片边缘的总长度), 并计算叶长宽比(叶长与叶宽的比值), 结果取平均值。从每盆的 6 株植株中各采集 1 朵花(花序顶部向下第 3 朵完全盛开的花)进行解剖, 使用游标卡尺(精度 0.01 mm)测量花纵径(花纵向的最大长度)、花横径(花横向的最大长度)、花柄长(花柄基部至子房基部的长度)、花瓣长(花瓣基部至顶部的长度)、花瓣宽(花瓣最宽处的长度)、唇瓣长(唇瓣基部至顶部的长度)、唇瓣宽(唇瓣最宽处的长度)、中萼长(中萼片基部至顶部的长度)、中萼宽(中萼片最宽处的长度)、侧萼长(侧萼片基部至顶部的长度)、侧萼宽(侧萼片最宽处的长度)、萼囊长(萼囊基部至顶部的长度)、萼囊宽(萼囊最宽处的长度)、子房长(子房基部至顶部的长度), 结果取平均值。

1.3 统计分析

采用 SPSS 23、R 4.2.2 和 EXCEL 2019 软件进行数据统计和分析。采用单因素方差分析和 LSD 多重比较检验各表型性状在不同石斛属种类间的差异显著性,参照文献[12,15]计算变异系数和 Shannon's 多样性指数。

采用 R 4.2.2 软件的 vegan 包对 17 种石斛属植物的所有表型性状进行主成分分析;采用 R 4.2.2 软件的 cluster 包和 pvcust 包对 17 种石斛属植物进行聚类分析,聚类分析前先将数据进行标准化处理,采用欧氏距离(Euclidean distance)作为相似性度量,以离差平方和法绘制树状聚类图;采用 R 4.2.2 软件的 linkET 包对叶和花表型性状进行 Spearman 相关性分析。

2 结果和分析

2.1 叶表型性状多样性分析

叶表型性状分析结果(表 2)显示:6 个叶表型性状在不同石斛属植物间均存在极显著($p < 0.01$)差

异。叶片最厚的是大明石斛(*D. speciosum* J. E. Smith)(1.71 mm)、最薄的是流苏石斛(0.22 mm);叶片最长的是大明石斛(14.57 cm)、最短的是美花石斛(2.76 cm);叶片最宽的是球花石斛(*D. thyrsiflorum* Rchb. f.)(6.74 cm)、最窄的是细叶石斛(*D. hancockii* Rolfe)(2.75 cm);叶长宽比最大的是玫瑰石斛(*D. crepidatum* Lindl. ex Paxt.)(2.37)、最小的是美花石斛(0.84);叶面积最大的是大明石斛(69.61 cm²)、最小的是美花石斛(7.60 cm²);叶周长最大的是球花石斛(235.49 cm)、最小的是美花石斛(62.35 cm)。

叶表型性状的变异系数介于 28.78%~63.63%之间,其中,叶面积的变异系数最大,叶厚的变异系数次之(59.04%),叶宽的变异系数最小。叶表型性状的 Shannon's 多样性指数差异较小,介于 4.374~4.386 之间,其中,叶厚的 Shannon's 多样性指数最大,叶长宽比的 Shannon's 多样性指数最小。

2.2 花表型性状多样性分析

花表型性状分析结果(表 3)显示:15 个花表型性状在不同石斛属植物间均存在极显著($p < 0.01$)差

表 2 17 种石斛属植物叶表型性状多样性分析($\bar{X} \pm SD$)¹⁾

Table 2 Diversity analysis of leaf phenotypic traits of 17 *Dendrobium* Sw. species ($\bar{X} \pm SD$)¹⁾

种类 Species	叶厚/mm Leaf thickness	叶长/cm Leaf length	叶宽/cm Leaf width	叶长宽比 Leaf length to width ratio	叶面积/cm ² Leaf area	叶周长/cm Leaf perimeter
杓唇石斛 <i>D. moschatum</i>	0.31±0.02ij	10.36±0.65cd	4.92±0.69bc	2.13±0.23abc	39.17±8.34b	170.54±51.68abcd
肿节石斛 <i>D. pendulum</i>	0.39±0.04hi	8.89±1.85de	4.53±0.82bcde	2.04±0.62abc	31.84±5.66bcd	175.06±39.45abcd
流苏石斛 <i>D. fimbriatum</i>	0.22±0.02j	8.27±1.13e	4.14±0.40cde	1.99±0.13abc	28.19±7.37cde	163.79±52.74bcd
玫瑰石斛 <i>D. crepidatum</i>	0.39±0.04hi	8.73±0.96de	3.72±0.60ef	2.37±0.27a	24.76±6.36cdef	171.53±29.05abcd
翅梗石斛 <i>D. trigonopus</i>	0.59±0.03fg	7.43±1.44ef	3.97±0.78def	1.93±0.57abc	23.37±7.28cdefg	119.31±28.97de
晶帽石斛 <i>D. crystallinum</i>	0.88±0.07c	4.51±0.82hij	5.29±0.42b	0.85±0.12f	21.12±5.05defg	111.08±28.63de
球花石斛 <i>D. thyrsiflorum</i>	0.58±0.06fg	12.33±1.69b	6.74±0.82a	1.85±0.35abc	65.58±12.15a	235.49±36.46a
翅萼石斛 <i>D. cariniferum</i>	0.49±0.05gh	8.51±1.81de	4.65±0.55bcd	1.83±0.29abc	32.96±9.03bc	194.38±49.49ab
美花石斛 <i>D. loddigesii</i>	0.75±0.14de	2.76±0.40j	3.30±0.35fg	0.84±0.09f	7.60±1.41h	62.35±9.97e
细叶石斛 <i>D. hancockii</i>	0.25±0.01j	5.98±1.07fgh	2.75±0.37g	2.24±0.65ab	13.61±1.90gh	114.56±17.03de
黑毛石斛 <i>D. williamsonii</i>	0.55±0.10fg	5.24±1.87ghi	4.25±0.29cde	1.25±0.51def	17.70±5.38efgh	125.22±38.20cde
聚石斛 <i>D. lindleyi</i>	0.86±0.16cd	7.11±1.50efg	3.14±0.66fg	2.31±0.59ab	17.21±5.45fgh	90.91±30.96e
亮叶石斛 <i>D. laevifolium</i>	0.58±0.09fg	7.37±1.84ef	4.26±0.85cde	1.74±0.33bcd	26.70±11.21cdef	173.43±86.21abcd
燕石斛 <i>D. equitans</i>	1.33±0.08b	3.51±0.64ij	3.26±0.17fg	1.09±0.25ef	9.77±1.54h	93.66±12.13e
大明石斛 <i>D. speciosum</i>	1.71±0.21a	14.57±2.61a	6.41±1.08a	2.33±0.56ab	69.61±14.70a	205.21±94.40ab
四角石斛 <i>D. farmeri</i>	0.65±0.18ef	12.07±1.33bc	6.68±0.46a	1.82±0.28abc	63.80±5.28a	234.62±55.31a
扭瓣石斛 <i>D. tortile</i>	0.52±0.03fgh	7.73±0.26ef	4.85±0.22bcd	1.60±0.13cde	31.51±1.12bcd	187.87±22.45abc
均值 Mean	0.65±0.38	7.96±3.33	4.52±1.30	1.78±0.60	30.85±19.63	154.65±64.74
F 值 F value	77.59 **	24.53 **	19.46 **	7.85 **	32.29 **	6.10 **
CV/%	59.04	41.81	28.78	33.98	63.63	41.86
H'	4.386	4.375	4.378	4.374	4.381	4.378

¹⁾ 同列中不同小写字母表示在不同种类间差异显著($p < 0.05$) Different lowercases in the same column indicate the significant ($p < 0.05$) differences between different species. **: $p < 0.01$. CV: 变异系数 Coefficient of variation; H': Shannon's 多样性指数 Shannon's diversity index.

表 3 17 种石斛属植物花表型性状多样性分析 ($\bar{X} \pm SD$)¹⁾
 Table 3 Diversity analysis of flower phenotypic traits of 17 *Dendrobium* Sw. species ($\bar{X} \pm SD$)¹⁾

种类 Species	<i>n</i>	<i>d_v</i> /mm	<i>d_t</i> /mm	<i>l_{p1}</i> /mm	<i>l_{p2}</i> /mm	<i>b_p</i> /mm	<i>l_{la}</i> /mm	<i>b_{la}</i> /mm
杓唇石斛 <i>D. moschatum</i>	9.0±1.4d	70.68±2.59b	64.88±4.94b	20.32±0.69fg	36.45±3.09b	21.79±5.09a	38.87±0.61a	24.43±0.76c
肿节石斛 <i>D. pendulum</i>	1.8±0.8g	43.11±1.53e	33.75±2.06e	21.35±2.07efg	25.01±1.62f	15.52±0.59c	17.32±1.35i	18.88±1.46e
流苏石斛 <i>D. fimbriatum</i>	7.2±1.3ef	54.35±1.42c	48.19±1.66c	30.12±2.01b	30.78±0.67d	16.04±0.62bc	31.10±1.17c	36.46±1.54a
玫瑰石斛 <i>D. crepidatum</i>	2.4±0.5g	37.10±2.37fg	27.27±4.22g	24.03±2.71de	21.28±1.04gh	8.07±0.32fg	14.98±0.83ij	16.41±1.69fg
翅梗石斛 <i>D. trigonopus</i>	1.6±0.5g	40.86±3.25ef	41.96±1.30d	25.50±1.44cd	30.44±1.33d	8.51±0.28efg	14.45±0.37j	13.43±0.67h
晶帽石斛 <i>D. crystallinum</i>	1.4±0.5g	38.13±9.48efg	25.57±2.04gh	10.20±1.84h	22.71±1.97g	6.25±0.62h	19.72±2.41fg	13.10±2.63h
球花石斛 <i>D. thyrsiflorum</i>	32.4±2.6a	34.44±1.02g	28.59±0.74fg	23.22±0.91def	19.81±0.71h	12.59±0.39d	16.36±0.42hi	15.36±0.53g
翅萼石斛 <i>D. cariniferum</i>	2.8±0.8g	56.72±5.30c	43.12±3.84d	26.03±2.38cd	34.48±0.61c	11.98±0.56d	22.78±1.63d	17.86±1.16ef
美花石斛 <i>D. loddigesii</i>	2.0±0.0g	38.54±3.71efg	33.45±1.66e	18.52±1.27g	22.91±2.10g	7.58±0.33gh	18.10±0.66hi	22.00±1.58d
细叶石斛 <i>D. hancockii</i>	2.0±0.0g	47.98±2.96d	33.27±3.59e	10.98±0.73h	27.02±1.08e	8.84±0.81efg	16.63±1.36ij	16.39±1.04fg
黑毛石斛 <i>D. williamsonii</i>	2.0±0.7g	41.23±3.29ef	36.18±1.11e	20.51±0.36fg	27.56±0.43e	10.21±0.33e	17.08±1.01i	13.47±0.54h
聚石斛 <i>D. lindleyi</i>	12.6±3.4c	29.54±1.91h	25.92±1.28gh	27.48±2.56bc	15.59±0.60j	8.22±0.59fg	20.20±1.04ef	26.29±0.42b
亮叶石斛 <i>D. laevifolium</i>	8.8±1.3de	27.19±6.08h	31.79±3.87ef	6.08±1.23i	17.86±2.36i	9.76±1.11ef	19.11±2.22fg	5.02±0.68i
燕石斛 <i>D. equitans</i>	6.0±0.0f	17.93±2.00i	11.37±1.67i	7.96±0.76hi	10.16±0.35k	2.72±0.21i	16.32±0.78hi	4.77±0.25i
大明石斛 <i>D. speciosum</i>	32.0±0.0a	18.22±3.43i	22.06±6.89h	21.99±4.13ef	22.24±1.27g	2.97±0.19i	10.97±0.61k	4.59±0.19i
四角石斛 <i>D. farmeri</i>	19.8±1.30b	40.56±1.61ef	25.83±1.73gh	20.24±3.40fg	21.12±0.66gh	17.40±0.98b	21.56±1.67de	18.99±1.96e
扭瓣石斛 <i>D. tortile</i>	1.2±0.4g	90.08±3.29a	82.39±5.64a	37.25±4.70a	48.14±1.57a	9.82±0.43ef	33.88±0.89b	21.61±1.37d
均值 Mean	8.5±10.0	42.74±17.86	36.21±16.64	20.69±8.23	25.50±8.76	10.49±5.03	20.55±7.30	17.00±8.05
F 值 F value	308.92 **	110.06 **	126.60 **	63.07 **	183.25 **	67.77 **	172.33 **	207.93 **
CV/%	117.65	41.80	45.96	39.76	34.33	47.96	35.50	47.32
H'	4.381	4.383	4.388	4.372	4.376	4.378	4.388	4.372
种类 Species	<i>l_{ms}</i> /mm	<i>b_{ms}</i> /mm	<i>l_{ls}</i> /mm	<i>b_{ls}</i> /mm	<i>l_c</i> /mm	<i>b_c</i> /mm	<i>l_o</i> /mm	
杓唇石斛 <i>D. moschatum</i>	30.13±1.91bc	13.65±0.76a	36.74±1.71a	12.87±0.68a	10.59±1.20h	4.38±0.16e	20.25±1.37a	
肿节石斛 <i>D. pendulum</i>	24.00±1.41fg	10.62±0.14c	23.06±1.22c	7.34±0.43d	4.69±0.08k	3.02±0.12fg	8.49±0.57h	
流苏石斛 <i>D. fimbriatum</i>	26.58±0.83def	13.77±0.51a	27.89±0.82b	12.25±0.39a	6.47±0.27j	4.09±0.14e	12.24±0.47d	
玫瑰石斛 <i>D. crepidatum</i>	19.49±0.74h	8.32±0.21ef	3.51±0.22i	2.48±0.09j	19.08±0.45g	10.54±0.58c	13.67±0.37c	
翅梗石斛 <i>D. trigonopus</i>	27.83±0.65cd	9.33±0.17d	8.01±0.03h	3.28±0.08i	22.46±0.34f	10.58±0.31c	16.05±0.93b	
晶帽石斛 <i>D. crystallinum</i>	18.27±3.44h	6.74±1.03hi	21.42±3.19cd	6.52±1.14ef	9.79±1.28h	2.78±0.35fgh	8.87±1.55gh	
球花石斛 <i>D. thyrsiflorum</i>	19.51±0.22h	9.09±0.21d	19.81±0.63de	9.76±0.32b	3.92±0.16k	2.78±0.09fgh	8.25±0.82hi	
翅萼石斛 <i>D. cariniferum</i>	31.77±1.88b	11.44±0.46b	11.02±0.75g	5.92±0.24fg	33.53±1.05b	16.12±1.42a	15.35±1.06b	
美花石斛 <i>D. loddigesii</i>	22.15±1.15g	8.15±0.62f	5.62±0.34i	3.33±0.32i	25.14±1.14e	12.08±1.10b	11.70±0.83de	
细叶石斛 <i>D. hancockii</i>	25.70±2.05def	10.47±0.37c	4.88±0.46i	3.37±0.33i	27.43±2.12d	8.63±0.54d	10.53±0.45ef	
黑毛石斛 <i>D. williamsonii</i>	26.82±0.41de	8.85±0.29de	14.62±1.72f	5.49±0.30g	29.88±0.70c	10.72±0.52c	12.89±0.45cd	
聚石斛 <i>D. lindleyi</i>	11.03±0.95i	6.21±0.09i	11.62±0.73g	6.86±0.68de	6.73±0.52j	2.37±0.14gh	10.63±1.87ef	
亮叶石斛 <i>D. laevifolium</i>	17.19±3.20h	7.71±0.80fg	17.51±3.30e	8.31±0.89c	4.04±0.16k	3.26±0.11f	5.75±0.24j	
燕石斛 <i>D. equitans</i>	9.43±0.41i	3.55±0.23k	14.49±1.28f	4.46±0.55h	10.03±0.61h	2.18±0.27h	3.70±0.80k	
大明石斛 <i>D. speciosum</i>	25.06±2.10ef	4.67±0.43j	21.26±4.34cd	6.98±0.72de	7.35±0.27ij	2.59±0.18fgh	7.14±1.12i	
四角石斛 <i>D. farmeri</i>	25.50±3.59def	7.19±0.91gh	19.30±2.45de	8.87±0.46c	8.38±0.82i	3.14±0.31fg	9.95±1.11fg	
扭瓣石斛 <i>D. tortile</i>	47.79±2.59a	10.53±0.23c	5.49±0.28i	4.34±0.40h	51.38±2.27a	15.58±0.77a	13.61±0.77c	
均值 Mean	24.02±8.64	8.84±2.76	15.66±9.00	6.61±3.03	16.52±13.04	6.75±4.80	11.12±4.07	
F 值 F value	100.43 **	143.29 **	121.42 **	159.80 **	865.66 **	390.74 **	88.06 **	
CV/%	35.98	31.26	57.44	45.85	78.92	71.10	36.56	
H'	4.382	4.375	4.378	4.377	4.393	4.385	4.373	

¹⁾ *n*: 花朵数 Flower number; *d_v*: 花纵径 Flower vertical diameter; *d_t*: 花横径 Flower transverse diameter; *l_{p1}*: 花柄长 Pedicel length; *l_{p2}*: 花瓣长 Petal length; *b_p*: 花瓣宽 Petal width; *l_{la}*: 唇瓣长 Labellum length; *b_{la}*: 唇瓣宽 Labellum width; *l_{ms}*: 中萼长 Middle sepal length; *b_{ms}*: 中萼宽 Middle sepal width; *l_{ls}*: 侧萼长 Lateral sepal length; *b_{ls}*: 侧萼宽 Lateral sepal width; *l_c*: 萼囊长 Calyx sac length; *b_c*: 萼囊宽 Calyx sac width; *l_o*: 子房长 Ovary length. 同列中不同小写字母表示在不同种类间差异显著 ($p < 0.05$) Different lowercases in the same column indicate the significant ($p < 0.05$) differences between different species. **: $p < 0.01$. CV: 变异系数 Coefficient of variation; H': Shannon's 多样性指数 Shannon's diversity index.

异。花朵最多的是球花石斛(32.4)、最少的是扭瓣石斛 (*D. tortile* A. Cunn.) (1.2), 扭瓣石斛的花纵径 (90.08 mm)、花横径 (82.39 mm)、花柄长 (37.25 mm)、花瓣长(48.14 mm)、中萼长(47.79 mm)、萼囊

长(51.38 mm)均最大,构唇石斛的花瓣宽(21.79 mm)、唇瓣长(38.87 mm)、侧萼长(36.74 mm)、侧萼宽(12.87 mm)、子房长(20.25 mm)均最大,燕石斛的花纵径(17.93 mm)、花横径(11.37 mm)、花瓣长(10.16 mm)、花瓣宽(2.72 mm)、中萼长(9.43 mm)、中萼宽(3.55 mm)、萼囊宽(2.18 mm)、子房长(3.70 mm)均最小。

花表型性状的变异系数介于31.26%~117.65%之间,其中,变异系数高于50%的性状有花朵数、萼囊长、萼囊宽和侧萼长(变异系数分别为117.65%、78.92%、71.10%和57.44%),变异系数相对较低的性状有唇瓣长、花瓣长和中萼宽(变异系数分别为35.50%、34.33%、31.26%)。花表型性状的Shannon's多样性指数差异较小,介于4.372~4.393之间;Shannon's多样性指数最大的是萼囊长,Shannon's多样性指数最小的是花柄长和唇瓣宽。

总体上看,17种石斛属植物表型性状的Shannon's多样性指数与变异系数的变化趋势基本一致;当剔除花朵数后,其余20个表型性状的Shannon's多样性指数与变异系数存在显著线性关系($R^2=0.312$, $p=0.01028$,图1)。

2.3 表型性状的主成分分析

对17种石斛属植物的表型性状进行主成分分析,结果(表4)显示:前4个主成分的累计贡献率达84.2%,说明前4个主成分可以反映供试17种石斛属

植物表型性状的基本特征。第1主成分的贡献率为38.0%,其中影响较大(特征向量绝对值较大)的表型性状为花纵径(-1.345)、花横径(-1.305)和花瓣长(-1.307);第2主成分的贡献率为26.2%,其中影响较大的表型性状为叶面积(1.235)和叶长(1.199);第3主成分的贡献率为13.0%,其中影响较大的表型性状为萼囊长(0.691)和侧萼长(-0.691);第4主成分

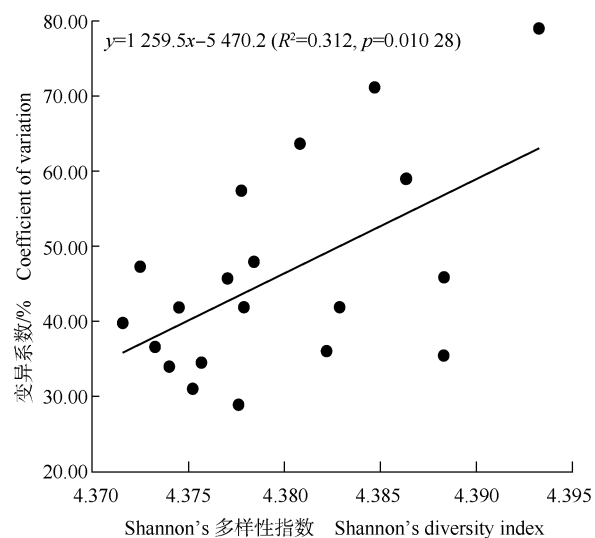


图1 17种石斛属植物表型性状Shannon's多样性指数与变异系数的相关性分析

Fig. 1 Analysis on correlation between Shannon's diversity index and coefficient of variation of phenotypic traits of 17 *Dendrobium Sw.* species

表4 17种石斛属植物表型性状的主成分分析

Table 4 Principal component analysis of phenotypic traits of 17 *Dendrobium Sw.* species

主成分 Principal component	各指标的特征向量 ¹⁾ Eigenvector of each index ¹⁾											
	δ	l_1	b_1	R	A	P	n	d_v	d_t	l_{p1}	l_{p2}	b_p
1	0.959	-0.147	-0.033	-0.214	-0.025	-0.295	0.491	-1.345	-1.305	-0.921	-1.307	-0.901
2	0.129	1.199	1.054	0.549	1.235	0.993	1.083	-0.097	-0.044	0.170	-0.093	0.688
3	0.523	0.570	0.548	0.176	0.645	0.594	0.391	0.047	0.095	0.474	0.333	-0.591
4	-0.459	0.407	-0.585	1.150	-0.032	0.091	0.024	-0.223	-0.235	0.245	-0.223	0.122

主成分 Principal component	各指标的特征向量 ¹⁾ Eigenvector of each index ¹⁾									特征值 Eigenvalue	贡献率/% Contribution rate	累计贡献率/% Cumulative contribution rate
	l_{1a}	b_{1a}	l_{ms}	b_{ms}	l_{ls}	b_{ls}	l_c	b_c	l_o			
1	-1.107	-0.946	-1.187	-1.229	-0.128	-0.328	-0.803	-0.815	-1.130	7.974	38.0	38.0
2	0.257	0.113	-0.011	0.157	1.040	1.125	-0.871	-0.851	-0.126	5.511	26.2	64.2
3	-0.469	-0.581	0.598	-0.411	-0.691	-0.674	0.691	0.633	-0.054	2.722	13.0	77.2
4	-0.372	0.297	-0.276	0.187	-0.420	-0.236	-0.141	0.075	0.206	1.460	7.0	84.2

¹⁾ δ : 叶厚 Leaf thickness; l_1 : 叶长 Leaf length; b_1 : 叶宽 Leaf width; R: 叶长宽比 Leaf length to width ratio; A: 叶面积 Leaf area; P: 叶周长 Leaf perimeter; n : 花朵数 Flower number; d_v : 花纵径 Flower vertical diameter; d_t : 花横径 Flower transverse diameter; l_{p1} : 花柄长 Pedicel length; l_{p2} : 花瓣长 Petal length; b_p : 花瓣宽 Petal width; l_{1a} : 唇瓣长 Labellum length; b_{1a} : 唇瓣宽 Labellum width; l_{ms} : 中萼长 Middle sepal length; b_{ms} : 中萼宽 Middle sepal width; l_{ls} : 侧萼长 Lateral sepal length; b_{ls} : 侧萼宽 Lateral sepal width; l_c : 萼囊长 Calyx sac length; b_c : 萼囊宽 Calyx sac width; l_o : 子房长 Ovary length.

的贡献率为 7.0%, 其中影响较大的表型性状为叶长宽比(1.150)。

2.4 基于表型性状的聚类分析

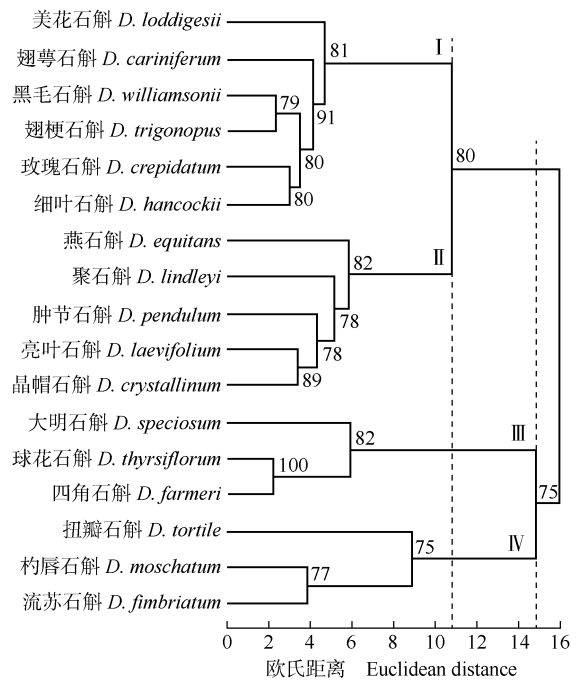
基于叶和花的 21 个表型性状对 17 种石斛属植物进行聚类分析, 结果(图 2)显示: 17 种石斛可分成 4 组; 在欧氏距离 10.8 处, 组 I 与组 II 聚在一起; 在欧氏距离 14.8 处, 组 III 与组 IV 聚在一起。组 I 包含美花石斛、翅萼石斛、黑毛石斛 (*D. williamsonii* Day et Rehb. f.)、翅梗石斛 (*D. trigonopus* Rehb. f.)、玫瑰石斛和细叶石斛; 组 II 包含燕石斛、聚石斛 (*D. lindleyi* Stendel.)、肿节石斛 (*D. pendulum* Roxb.)、亮叶石斛和晶帽石斛 (*D. crystallinum* Rehb. f.); 组 III 包含大明石斛、球花石斛和四角石斛 (*D. farmeri* Paxton); 组 IV 包含扭瓣石斛、杓唇石斛和流苏石斛。

通过比较各组表型性状均值(表 5)发现, 组 I 表型性状特征为叶片薄, 叶面积和周长小, 花朵数少, 侧萼短小, 萼囊大; 组 II 表型性状特征为叶片厚, 叶面积和周长小, 花朵小, 花柄短, 花瓣小, 中萼和子房短小; 组 III 表型性状特征为叶片厚, 叶面积和周长小, 花朵数多, 花朵小, 唇瓣和萼囊短小; 组 IV 表型性状特征为叶片薄, 花朵大, 花柄长, 花瓣、唇瓣、中萼、侧萼和子房均较大。

2.5 表型性状的相关性分析

对 17 种石斛属植物的表型性状进行相关性分析, 结果(图 3)显示: 叶表型性状间和花表型性状间大多存在显著 ($p < 0.05$) 或极显著 ($p < 0.01$) 相关性; 叶长、叶宽、叶长宽比、叶面积、叶周长与花纵径、花横

径、花瓣长、唇瓣长、唇瓣宽之间没有显著相关性, 而花朵数、花柄长、花瓣宽、中萼长、侧萼长、侧萼宽和萼囊长整体上与 6 个叶表型性状存在显著或极显著相关性; 叶厚与除侧萼长、侧萼宽和萼囊长外的 12 个花表型性状存在显著或极显著相关性。



分支上的数值表示自举检验支持度 The values on the branches indicate bootstrap support.

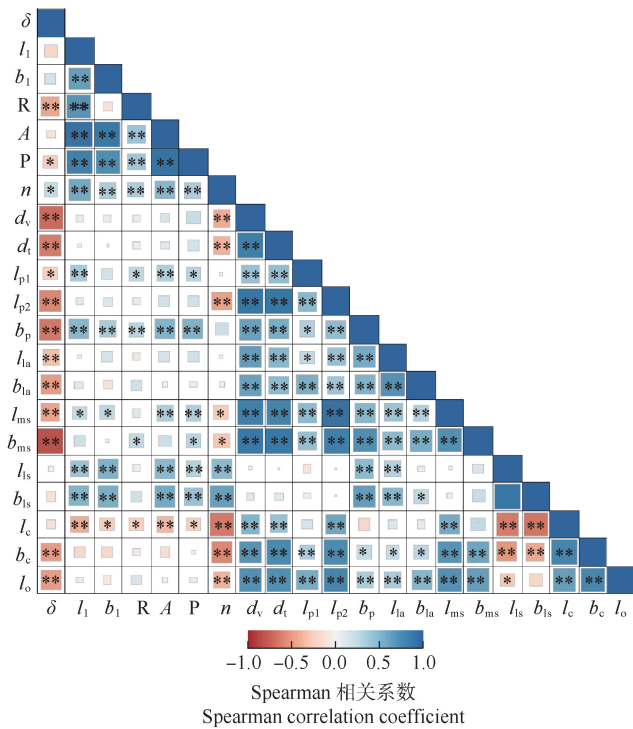
图 2 基于表型性状的 17 种石斛属植物聚类图
Fig. 2 Clustering dendrogram of 17 *Dendrobium* Sw. species based on phenotypic traits

表 5 17 种石斛属植物不同聚类分组的表型性状均值 ($\bar{X} \pm SD$)¹⁾
Table 5 Means of phenotypic traits in different clustering groups of 17 *Dendrobium* Sw. species ($\bar{X} \pm SD$)¹⁾

组别 Group	δ /mm	l_1 /cm	b_1 /cm	R	A/cm ²	P/cm	n	d_v /mm	d_t /mm	l_{p1} /mm	l_{p2} /mm
I	0.50±0.17	6.44±2.44	3.77±0.79	1.74±0.68	20.00±9.91	131.22±51.86	2.13±0.63	43.74±7.59	35.87±6.12	20.93±5.50	27.28±4.63
II	0.81±0.34	6.28±2.40	4.10±1.01	1.61±0.69	21.33±9.81	128.83±57.46	6.12±4.60	31.18±10.15	25.68±8.28	14.61±8.67	18.27±5.56
III	0.98±0.56	12.99±2.15	6.61±0.78	2.00±0.46	66.33±10.87	225.11±63.34	28.07±6.25	31.07±9.98	25.50±4.72	21.82±3.16	21.06±1.34
IV	0.35±0.13	8.78±1.37	4.64±0.57	1.91±0.28	32.96±7.64	174.07±42.57	5.80±3.61	71.70±15.30	65.15±15.03	29.23±7.69	38.46±7.72

组别 Group	b_p /mm	l_{la} /mm	b_{la} /mm	l_{ms} /mm	b_{ms} /mm	l_{ls} /mm	b_{ls} /mm	l_c /mm	b_c /mm	l_o /mm
I	9.20±1.57	17.34±2.94	16.60±3.15	25.63±4.19	9.43±1.25	7.94±3.97	3.98±1.31	26.25±4.93	11.45±2.48	13.37±2.07
II	8.50±4.36	18.53±2.16	13.61±8.52	15.98±5.75	6.97±2.40	17.62±4.78	6.70±1.48	7.06±2.62	2.72±0.45	7.49±2.73
III	10.99±6.23	16.29±4.58	12.98±6.43	23.36±3.59	6.98±1.95	20.12±2.82	8.54±1.29	6.55±2.03	2.84±0.31	8.45±1.53
IV	15.88±5.76	34.62±3.44	27.50±6.77	34.84±9.77	12.65±1.63	23.37±13.65	9.82±4.04	22.81±21.03	8.02±5.55	15.37±3.73

¹⁾ δ : 叶厚 Leaf thickness; l_1 : 叶长 Leaf length; b_1 : 叶宽 Leaf width; R: 叶长宽比 Leaf length to width ratio; A: 叶面积 Leaf area; P: 叶周长 Leaf perimeter; n: 花朵数 Flower number; d_v : 花纵径 Flower vertical diameter; d_t : 花横径 Flower transverse diameter; l_{p1} : 花柄长 Pedicel length; l_{p2} : 花瓣长 Petal length; b_p : 花瓣宽 Petal width; l_{la} : 唇瓣长 Labellum length; b_{la} : 唇瓣宽 Labellum width; l_{ms} : 中萼长 Middle sepal length; b_{ms} : 中萼宽 Middle sepal width; l_{ls} : 侧萼长 Lateral sepal length; b_{ls} : 侧萼宽 Lateral sepal width; l_c : 萼囊长 Calyx sac length; b_c : 萼囊宽 Calyx sac width; l_o : 子房长 Ovary length.



δ: 叶厚 Leaf thickness; l_1 : 叶长 Leaf length; b_1 : 叶宽 Leaf width; R: 叶长宽比 Leaf length to width ratio; A: 叶面积 Leaf area; P: 叶周长 Leaf perimeter; n : 花朵数 Flower number; d_v : 花纵径 Flower vertical diameter; d_t : 花横径 Flower transverse diameter; l_{p1} : 花柄长 Pedicel length; l_{p2} : 花瓣长 Petal length; b_p : 花瓣宽 Petal width; l_{la} : 唇瓣长 Labellum length; b_{la} : 唇瓣宽 Labellum width; l_{ms} : 中萼长 Middle sepal length; b_{ms} : 中萼宽 Middle sepal width; l_{ls} : 侧萼长 Lateral sepal length; b_{ls} : 侧萼宽 Lateral sepal width; l_c : 萼囊长 Calyx sac length; b_c : 萼囊宽 Calyx sac width; l_o : 子房长 Ovary length. *: $p < 0.05$; **: $p < 0.01$.

图3 17种石斛属植物表型性状间的相关性
Fig. 3 Correlations between phenotypic traits of 17 *Dendrobium* Sw. species

3 讨 论

表型性状变异对于植物适应不同生境及进化有重要作用^[7-8]。表型变异系数可以反映植物适应环境的潜力,变异系数越大,表示植物对环境的适应能力越强^[23]。本研究中,石斛属植物 21 个表型性状的变异系数为 28.78%~117.65%,与兰科其他属相比,石斛属的表型变异程度较大,如 29 种兜兰属植物 27 个表型性状的变异系数为 18.22%~59.09%^[12],7 种兰属植物 14 个表型性状的变异系数为 13.17%~38.89%^[13],11 种虾脊兰属植物 19 个表型性状的变异系数为 4.99%~27.80%^[16],表明石斛属植物具有较强的环境适应能力。

本研究发现,石斛属植物不同表型性状的变异系数不同,各性状变异幅度差异明显,表明不同性状对

环境变化的适应存在差异^[24]。变异系数高于 60% 的性状有花朵数、萼囊长、萼囊宽和叶面积,说明这些性状容易受到环境变化的影响,具有较高的可塑性;变异系数最小的性状是叶宽,说明叶宽是石斛属植物表型性状中较稳定的性状。整体来看,花表型性状的变异幅度(变异系数为 31.26%~117.65%)大于叶表型性状(变异系数为 28.78%~63.63%),说明石斛属植物的繁殖器官在面临环境胁迫时可能具有更大的表型可塑性,使得其种群易于繁衍。这一特点与其他兰科植物表型多样性研究结果^[12-13,15,18,20]一致。

本研究中,石斛属植物 21 个表型性状的 Shannon's 多样性指数 (H') 为 4.372~4.393,明显高于兜兰属 (H' 值为 0.51~2.03)^[12]、兰属 (H' 值为 0.10~1.69)^[13]、蝴蝶兰属 (H' 值为 0.38~1.32)^[25] 植物,说明石斛属植物具有丰富的表型多样性。总体上看,石斛属植物 20 个表型性状的 Shannon's 多样性指数与变异系数存在显著线性关系。换言之,变异系数较高的性状具有较高的 Shannon's 多样性指数,如萼囊长的变异系数较大,其 Shannon's 多样性指数也大。这与其他植物的研究结果不同,如酢浆草属 (*Oxalis* Linn.)、结缕草属 (*Zoysia* Willd.) 的表型变异系数与多样性指数之间不存在显著相关关系^[26-27]。

植物各性状之间并不是孤立的,而是通过形成相互协同或权衡的复杂关系来适应外界环境的变化^[28]。本研究中,花朵数与其形态大小(如:花纵径、花横径)呈负相关,表明石斛属植物在繁殖资源分配上存在“此消彼长”的权衡关系。这符合植物繁殖分配理论中的花数量与花大小之间存在权衡的假设^[29-30]。其次,叶厚与花朵数呈显著正相关,而与花大小(花纵径和花横径)呈极显著负相关,说明石斛属植物的叶片越厚,花数量越多,花形态越小;这与宫子惠等^[31]对蝴蝶兰属植物的研究结果一致。这可能是由于较厚的叶片可以储存更多的水分,有利于促进花器官的形成,增加花器官数目;但植物获取的资源有限难以同时增加花数量和花大小,所以植物在花数量与花大小之间采取了权衡策略。再者,叶表型性状(如:叶面积、叶周长等)与部分花表型性状(如:花柄长、花瓣宽等)存在显著相关性,说明石斛属植物的繁殖器官与营养器官存在相互依赖关系。叶表型性状间和花表型性状间整体上存在显著相关性,说明石斛属植物各表型性状之间有着复杂密切的关系,这与兜兰属、春兰 [*Cymbidium goeringii* (Rchb. f.) Rchb.

f.) 等兰科植物相似^[12,14]。

在传统分类中,《中国植物志》^[21]将石斛属划分为 12 组,本研究的 17 种石斛属植物隶属于 5 组,分别为石斛组 (Sect. *Dendrobium* Sw.)、黑毛组 [Sect. *Formosae* (Benth. et Hook. f.) Hook. f.]、顶叶组 (Sect. *Chrysotoxae* Kraenzl.)、距囊组 [Sect. *Pedilonum* (Bl.) Lindl.]、基肿组 (Sect. *Crumenata* Pfitz. Pflanzenfam.)。基于表型性状的聚类分析结果表明: 17 种石斛属植物可分成 4 组,该聚类结果与传统分类相比既有相同之处,也存在差异性。黑毛组的黑毛石斛、翅梗石斛、翅萼石斛和石斛组的玫瑰石斛、细叶石斛、美花石斛聚为 I 组;石斛组的晶帽石斛、肿节石斛、距囊组的亮叶石斛,顶叶组的聚石斛和基肿组的燕石斛聚为 II 组;顶叶组的大明石斛、球花石斛和四角石斛聚为 III 组;石斛组的扭瓣石斛、杓唇石斛和流苏石斛聚为 IV 组。未来研究可将传统分类学与 DNA 分子标记技术结合,深入探究石斛属植物的亲缘关系及其遗传多样性。本研究发现,17 种石斛属植物的聚类分组结果与叶厚、叶大小、花朵数、花朵大小、花器官大小关系密切。每组具有不同特征:组 I 叶片薄,叶面积和周长小,花朵数少,侧萼短小,萼囊大;组 II 叶片厚,叶面积和周长小,花朵小,花柄短,花瓣小,中萼和子房短小;组 III 叶片厚,叶面积和周长大,花朵数多,花朵小,唇瓣和萼囊短小;组 IV 叶片薄,花朵大,花柄长,花瓣、唇瓣、中萼、侧萼和子房均较大。该聚类结果可为石斛属植物的杂交育种及杂交子代表型多样性研究提供基础数据。整体来看,17 种石斛属植物的表型特征并未完全按照引种地的地理区域聚类,这一结果与野牡丹属 (*Melastoma* Linn.)、桃金娘属 [*Rhodomyrtus* (DC.) Rchb.] 植物表型性状的聚类结果一致^[32-33]。本研究利用主成分分析将 21 个表型性状简化为 4 个主成分,能够反映石斛属植物表型性状的大部分信息。这 4 个主成分中,花纵径、叶面积、侧萼长、萼囊长和叶长宽比的特征向量绝对值较大,表明这些性状是造成石斛属植物表型差异的主要因子。未来研究可依据这些表型性状开展石斛属植物资源评价及良种选育。

4 结 论

石斛属植物表型性状变异丰富,不同表型性状的变异幅度差异明显,花表型性状的变异幅度大于叶表

型性状。石斛属植物具有丰富的表型多样性,各表型性状的 Shannon's 多样性指数差异较小。石斛属植物表型性状间存在复杂且密切的关系,叶厚与花朵数呈显著正相关,而与花大小呈极显著负相关,叶各表型性状间和花各表型性状间整体存在显著相关性。基于叶和花表型性状,17 种石斛属植物可分为 4 组,聚类结果与传统分类存在一定差异。主成分分析表明花纵径、叶面积、侧萼长、萼囊长和叶长宽比是造成石斛属植物表型差异的主要因子。

参考文献:

- [1] 赖泳红,王仕玉,萧凤回. 中国石斛属植物资源分布的主要生态因子[J]. 中国农学通报, 2006, 22(6): 397-400.
- [2] 李 清,李 标,郭顺星. 兰科石斛属植物分子生物学研究进展[J]. 中国中药杂志, 2016, 41(15): 2753-2761.
- [3] 赵菊润,王艺涵,金 艳,等. 石斛属植物化学成分及药理活性研究进展[J]. 中国中药杂志, 2022, 47(9): 2358-2372.
- [4] 明兴加,冯婷婷. 中国石斛属植物种苗繁育技术的研究进展[J]. 安徽农业科学, 2010, 38(6): 2899-2902, 2920.
- [5] 王艳萍,李 璐,杨晨璇,等. 14 种石斛属(兰科)植物的花粉团形态及分类学意义[J]. 植物研究, 2021, 41(1): 12-25.
- [6] 王艳萍,李楚然,罗 艳,等. 中国 9 种石斛属植物的花药帽形态及其分类学意义初探[J]. 植物科学学报, 2021, 39(4): 367-378.
- [7] COLEMAN J S, MCCONNAUGHAY K D M, ACKERLY D D. Interpreting phenotypic variation in plants[J]. Trends in Ecology and Evolution, 1994, 9(5): 187-191.
- [8] VAN KLEUNEN M, FISCHER M. Constraints on the evolution of adaptive phenotypic plasticity in plants[J]. New Phytologist, 2005, 166: 49-60.
- [9] 张 林,罗天祥. 植物叶寿命及其相关叶性状的生态学研究进展[J]. 植物生态学报, 2004, 28(6): 844-852.
- [10] 蒋裕良,白坤栋,郭屹立,等. 北热带喀斯特森林木本植物花性状及其生境分异[J]. 生物多样性, 2016, 24(2): 148-156.
- [11] 李芳兰,包维楷. 植物叶片形态解剖结构对环境变化的响应与适应[J]. 植物学报, 2005, 22(增刊): 118-127.
- [12] 范继征,李秀玲,何荆洲,等. 29 个兜兰属物种的表型多样性及亲缘关系研究[J]. 植物遗传资源学报, 2023, 24(3): 680-691.
- [13] 傅巧娟,李春楠,赵福康,等. 7 种兰属种质表型性状遗传多样性分析[J]. 分子植物育种, 2018, 16(10): 3381-3394.
- [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] 王宏利,曾艳华,卜朝阳. 30 份建兰种质资源的表型性状遗传多样性研究[J]. 热带作物学报, 2021, 42(6): 1557-1565.
- [16] 弓 莉,罗 建,林 玲. 西藏虾脊兰属植物表型多样性研究[J]. 高原农业, 2020, 4(4): 351-356.

(下转第 90 页 Continued on page 90)

- 1898-1906.
- [49] 周丽丽, 李树斌, 吴亚岚, 等. 不同相思林叶片-凋落叶-土壤的生态化学计量特征[J]. 植物资源与环境学报, 2022, 31(2): 64-72.
- [50] 吴鹏, 崔迎春, 赵文君, 等. 喀斯特森林植被自然恢复过程中土壤化学计量特征[J]. 北京林业大学学报, 2019, 41(3): 80-92.
- [51] 罗亚勇, 张宇, 张静辉, 等. 不同退化阶段高寒草甸土壤化学计量特征[J]. 生态学杂志, 2012, 31(2): 254-260.
- [52] 梁建宏, 崔旭东, 文来艳, 等. 桂林典型岩溶区和非岩溶区土壤剖面钙镁形态迁移对比[J]. 中国岩溶, 2022, 41(2): 220-227.
- [53] 孙书存, 陈灵芝. 东灵山地区辽东栎叶养分的季节动态与回收效率[J]. 植物生态学报, 2001, 25(1): 76-82.
- [54] 汪洪, 褚天铎. 植物镁素营养的研究进展[J]. 植物学通报, 1999, 16(3): 245-250.
- [55] TESSIER J T, RAYNAL D J. Use of nitrogen to phosphorus ratios in plant tissue as an indicator of nutrient limitation and nitrogen saturation [J]. *Journal of Applied Ecology*, 2003, 40(3): 523-534.
- [56] CLEVELAND C C, LIPTZIN D. C : N : P stoichiometry in soil: is there a "Redfield ratio" for the microbial biomass? [J]. *Biogeochemistry*, 2007, 85(3): 235-252.
- [57] 曹娟, 闫文德, 项文化, 等. 湖南会同3个林龄杉木人工林土壤碳、氮、磷化学计量特征[J]. 林业科学, 2015, 51(7): 1-8.
- [58] 戚德辉, 温仲明, 王红霞, 等. 黄土丘陵区不同功能群植物碳氮磷生态化学计量特征及其对微地形的响应[J]. 生态学报, 2016, 36(20): 6420-6430.
- [59] VERGUTZ L, MANZONI S, PORPORATO A, et al. Global resorption efficiencies and concentrations of carbon and nutrients in leaves of terrestrial plants [J]. *Ecological Monographs*, 2012, 82(2): 205-220.
- [60] 刘万德, 苏建荣, 李帅锋, 等. 云南普洱季风常绿阔叶林演替系列植物和土壤C、N、P化学计量特征[J]. 生态学报, 2010, 30(23): 6581-6590.
- [61] 郭柯, 刘长成, 董鸣. 我国西南喀斯特植物生态适应性及石漠化治理[J]. 植物生态学报, 2011, 35(10): 991-999.

(责任编辑: 吴蕊夷)

(上接第79页 Continued from page 79)

- [17] 张振臣, 陈俊标, 马柱文, 等. 铁皮石斛种质资源主要表型性状的差异与相关分析[J]. 广东农业科学, 2010, 37(8): 78-80.
- [18] 刘靓, 庄卫东, 马晓娟, 等. 春石斛种质资源的表型性状及聚类分析[J]. 热带农业科学, 2023, 43(3): 1-10.
- [19] 何涛, 樊小莉, 鲁璐, 等. 不同种源石斛表型性状多样性及其与地理因子的相关性[J]. 植物资源与环境学报, 2021, 30(2): 1-11.
- [20] 张本厚, 胡燕花, 牛志韬, 等. 基于表型性状的金钗石斛种质资源多样性评价[J]. 中国生物工程杂志, 2022, 42(11): 5-17.
- [21] 中国科学院中国植物志编辑委员会. 中国植物志: 第十九卷[M]. 北京: 科学出版社, 1999: 67-146.
- [22] 王雁, 周进昌, 郑宝强, 等. 石斛兰[M]. 北京: 中国林业出版社, 2014: 43-98.
- [23] 冯秋红, 史作民, 徐峥静茹, 等. 岷江柏天然种群种实表型变异特征[J]. 应用生态学报, 2017, 28(3): 748-756.
- [24] 王常顺, 汪诗平. 植物叶片性状对气候变化的响应研究进展[J]. 植物生态学报, 2015, 39(2): 206-216.
- [25] 王钦, 黄捷, 涂松, 等. 蝴蝶兰不同品种表型性状遗传多样性分析[J]. 西南林业大学学报(自然科学), 2023, 43(6): 8-18.
- [26] 董钠, 李成儒, 凌瑞, 等. 基于表型性状的酢浆草属种质遗传多样性分析[J]. 分子植物育种, 2022, 20(16): 5506-5519.
- [27] 郑荣佳, 孔维一, 冯嘉欣, 等. 结缕草属植物表型多样性分析及优异种质筛选[J]. 草地学报, 2022, 30(9): 2325-2335.
- [28] 孙梅, 田昆, 张贇, 等. 植物叶片功能性状及其环境适应研究[J]. 植物科学学报, 2017, 35(6): 940-949.
- [29] MORGAN M. Fruit to flower ratios and trade-offs in size and number [J]. *Evolutionary Ecology*, 1993, 7: 219-232.
- [30] SARGENT R D, GOODWILLIE C, KALISZ S, et al. Phylogenetic evidence for a flower size and number trade-off [J]. *American Journal of Botany*, 2007, 94(12): 2059-2062.
- [31] 宫子惠, 李奥, 孙纪霞, 等. 蝴蝶兰“金公主”叶片与花性状相关性研究[J]. 山东农业科学, 2018, 50(9): 19-22.
- [32] 戴小红, 孙伟生, 贺建军, 等. 我国野牡丹属植物的表型多样性研究[J]. 热带作物学报, 2014, 35(10): 2036-2042.
- [33] 刘舒, 马正兵, 于晓丽, 等. 不同种源桃金娘表型性状多样性研究[J]. 广西植物, 2023, 43(10): 1932-1940.

(责任编辑: 吴蕊夷)