

川贝母种质资源的表型多样性及综合评价

杨泽敏^{1,2}, 王 业³, 吴宇涵^{2,4}, 谢慧敏⁵, 付绍兵⁵, 徐福荣¹, 高 旦^{2*}, 李西文^{2*}

1. 云南中医药大学中药学院, 云南 昆明 650500
2. 中国中医科学院中药研究所, 北京 100700
3. 中国中医科学院 中医药健康产业研究所, 江西 南昌 330000
4. 吉林农业大学中药材学院, 吉林 长春 130118
5. 京都念慈菴总厂有限公司, 香港 999077

摘要: 目的 为筛选川贝母 *Fritillaria cirrhosa* 优质种质资源, 开展新品种和良种选育, 通过性状变异进行表型调查。方法 采用隶属函数和偏最小二乘-回归分析 (partial least square-regression analysis, PLS-R)、相关性分析 (correlation analysis, CA)、聚类分析、主成分分析 (principal component analysis, PCA) 等方法, 对 23 份种质资源的 10 个农艺性状、5 个生理和 9 个品质性状进行综合评价。结果 农艺性状的多样性指数为 1.808~2.337, 其中鳞茎鲜质量和果质量的多样性指数最高, 均为 2.30。24 个数量性状的变异系数为 6.63%~102.36%, 其中农艺性状的变异主要来源于果质量、花朵数目和鳞茎鲜质量; 品质指标的变异主要来源于鸟苷、腺苷和胸苷的差异。相关性分析显示生物碱含量和鳞茎鲜质量与茎粗、叶长、果长、果直径以及果质量等都表现出了正相关关系。聚类分析将收集的种质分成 3 大类群, 第 I 类群具有鳞茎鲜质量、生物碱含量和果实质量较高的特点, 第 III 类群中核苷类物质含量较高。PCA 将 24 个性状简化为 6 个主成分, 累积贡献率为 78.746%。PLS-R 与偏最小二乘-判别分析 (partial least square-discriminant analysis, PLS-DA) 揭示果直径、叶宽和脱氧腺苷、鸟嘌呤对 D 值的贡献较大, 可作为筛选优良种源的关键指标。结论 综合排名前 3 位的种质为 ZA、HG、GH 表型, 具有品质优, 含量丰富的特点, 可作为潜在的良好种进行培育。川贝母农艺性状中的叶宽、茎粗和鳞茎鲜质量, 以及品质性状中的脱氧腺苷、鸟嘌呤和尿嘧啶, 是区分川贝母优劣的关键性状。对川贝母表型进行了较为全面的分类并开展资源系统评价, 可为川贝母遗传资源挖掘和良种选育奠定基础。

关键词: 川贝母; 表型多样性; 相关性分析; 隶属函数; 偏最小二乘-判别分析; 脱氧腺苷; 鸟嘌呤; 尿嘧啶; 综合评价
中图分类号: R286.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-2670(2025)02-0635-12
DOI: 10.7501/j.issn.0253-2670.2025.02.025

Phenotypic diversity and comprehensive evaluation of germplasm resources of *Fritillaria cirrhosa*

YANG Zemin^{1,2}, WANG Ye³, WU Yuhan^{2,4}, XIE Huimin⁵, FU Shaobing⁵, XU Furong¹, GAO Dan², LI Xiwen²

1. School of Chinese Materia Medica, Yunnan University of Chinese Medicine, Kunming 650500, China
2. Institute of Chinese Materia Medica, China Academy of Chinese Medical Sciences, Beijing 100700, China
3. Institute of Chinese Materia Medica, Medicine Health Industry, China Academy of Chinese Medical Sciences, Nanchang 330000, China
4. School of Chinese Medicinal Materials, Jilin Agricultural University, Changchun 130118, China
5. Nin Jiom Medicine Manufactory (Hong Kong) Limited, Hong Kong 999077, China

Abstract: Objective In order to screen high-quality germplasm resources of *Fritillaria cirrhosa* and conduct selection and breeding of new and improved varieties, this study conducted a phenotypic survey through trait variations. **Methods** Various methods were employed, including affiliation function, partial least squares-regression analysis (PLS-R), correlation analysis (CA), cluster analysis, and principal component analysis (PCA), to comprehensively evaluate 10 agronomic, five physiological, and nine qualitative traits

收稿日期: 2024-05-02

基金项目: 中国中医科学院科技创新工程项目 (CI2024C003YN, CI2021A03910); 国家重大新药创制科技重大专项 (2019ZX09201005-006-001); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金 (L2023022, Z2023014, ZXKT22061, ZZ18-YQ-036)

作者简介: 杨泽敏 (1998—), 男, 硕士研究生, 从事中药优良种源繁育与技术研究。E-mail: yangzm0615@163.com

*通信作者: 高 旦 (1993—), 男, 助理研究员, 从事中药材质量评价及全程质量追溯。E-mail: dgao@icmm.ac.cn

李西文 (1978—), 男, 研究员, 博士生导师, 从事品质中药材栽培及育种研究。E-mail: xwli@icmm.ac.cn

among 23 germplasm resources. **Results** The results demonstrated that the diversity indices of agronomic traits ranged from 1.808 to 2.337, with the highest diversity indices for bulb fresh weight and fruit weight, both of which were 2.30. The coefficients of variation for the 24 quantitative traits ranged from 6.63% to 102.36%, with the variations of the agronomic traits mainly originating from the variations in fruit weight, number of flowers, and bulb fresh weight; and those of the quality indexes mainly originating from the differences in guanosine, adenosine and thymosine. Correlation analyses revealed positive associations between alkaloid content and bulb fresh weight with stem thickness, leaf length, fruit length, fruit diameter, and fruit weight. Cluster analysis classified the collected germplasm into three major groups. Group I was characterised by higher bulb fresh weight, alkaloid content and fruit weight, and group III had a higher content of nucleosides. PCA simplified 24 traits into six principal components with a cumulative contribution of 78.746%. PLS-R and partial least square-discriminant analysis (PLS-DA) revealed that fruit diameter, leaf width and deoxyadenosine and guanine contributed more to the D value, which can be used as a key index to screen for good seed sources. **Conclusion** The top 3 comprehensively ranked germplasm were ZA, HG, and GH phenotypes, which were characterised by excellent quality and rich content. These varieties hold potential as valuable seed sources. Leaf width, stem thickness and bulb fresh weight in agronomic traits, and deoxyadenosine, guanine and uracil in quality traits were screened as the key traits to differentiate the superiority and inferiority of *F. cirrhosa*. The present study provides a more comprehensive classification and resource systematic evaluation of the phenotypes of *F. cirrhosa*, serving as a foundation for genetic resource exploration and breed selection of *F. cirrhosa*.

Key words: *Fritillaria cirrhosa* D. Don; phenotypic diversity; correlation analysis; affiliation function; partial least square-discriminant analysis; deoxyadenosine; guanine; uracil; comprehensive evaluation

遗传多样性是种群间和个体间的遗传变异总和^[1], 而遗传变异则是个体间的遗传差异特征, 也是引起表型变异的决定因素。植物基因组是动态的, 在自然界中并不稳定, 这导致植物的表观遗传变化更频繁^[2]。因此, 植物表型作为遗传因子和环境长期过程中共同作用的结果, 能直接体现植株的遗传多样性, 并展现出植株间表型和基因型的差异, 进而反映植物遗传多样性的差异^[3-4]。系统育种开始以来, 自然变异和分化已被广泛地识别并应用于作物品种的改良。表型分类是种质资源鉴定的重要环节, 也是研究植物遗传多样性最直观和最基础的方法^[7], 已成功用于农作物及中药材育种, 以提高其综合性能^[2, 5-6]。

川贝母 *Fritillaria cirrhosa* D. Don 药用历史悠久, 具有清热润肺、化痰止咳、消痈散结的功效^[8], 以其为原料的中成药达 200 多种^[9-11]。川贝母的生长和分布受到野生环境的影响^[12], 广泛分布于中国西南部的横断山和邻近地区以及印度、不丹和尼泊尔的喜马拉雅山脉东部^[13-14]。然而, 由于其生长条件要求苛刻且近年来人为的过度采挖, 造成川贝母的野生资源濒临灭绝, 在 2021 年列为二级国家重点保护野生植物^[16]。川贝母从野生到引种的历程较短, 缺乏稳定的品系或栽培品种。在自然栽培条件下种子数量少、发芽率及成活率极低, 远远不能满足扩繁和扩种的需求^[17]。同时由于川贝母种业尚处于起步阶段, 种子来源仍以野外收集和农产品附属物为主, 导致人工种植川贝母遗传背景混杂, 表型多样性更

加突出。由于川贝母的基因组较大, 且基因组学的分子育种还不成熟, 所以在川贝母丰富的遗传多样性中, 通过表型性状筛选出对逆境抗性高、产量稳定性高的新品种具有重要现实意义。但是到目前为止, 川贝母的表型遗传学研究还很薄弱。所以本研究通过表型分类, 筛选基因型相对一致的表型, 分析川贝母种质资源表型性状的变异规律, 建立川贝母种质资源的综合评价体系, 筛选最优的评价指标, 为川贝母资源的保护和可持续利用提供依据。

本研究对 7 年生不同表型川贝母的遗传多样性进行评估, 基于表型对该群体进行分类和筛选, 评价各种质的性状变异。采用主成分分析 (principal component analysis, PCA)、相关性分析 (correlation analysis, CA) 与偏最小二乘-回归分析^[22] (partial least square-regression analysis, PLS-R) 等方法解析农艺性状、光合参数、含量和产量等变量间的相互关系, 采用变量投影重要性 (variable importance in the projection, VIP) 分析方法筛选重要植物表型性状。通过以上方法本研究建立了基于表型分类的川贝母种质资源综合评价体系, 并筛选出综合表现较优的川贝母种质, 为新品种选育奠定遗传资源基础。

1 材料与仪器

1.1 材料

本研究在青海省海东市互助土族自治县川贝母规范化种植基地, 开展川贝母表型调查与收集 (青海绿康生物开发有限公司, 东经 36° 59', 北纬

101° 59'), 基地海拔 3 050 m, 属大陆寒温带气候, 土壤类型为高山草甸土。经中国中医科学院中药研究所李西文研究员鉴定, 所有表型均为百合科植物川贝母 *F. cirrhosa* D. Don, 具体见表 1。各表型均来自互助县川贝母规范化种植基地, 于 2022 年 10

月 1 日播种规格大小一致“6 年生”的川贝母鳞茎, 底肥使用农家肥, 上覆麦秸。在 2023 年 5 月(出苗期)~10 月(倒苗期)之间对川贝母表型进行挂牌分类, 并在分类完成后进行相关指标的测定和分析, 其他栽培措施按照基地日常管理。

表 1 川贝母表型信息

Table 1 Phenotypic information of *F. cirrhosa*

编号	分类依据	种质表型	编号	分类依据	种质表型
ZA	出苗时间间隔 ≥ 15 d	早出苗	KL	叶宽 ≥ 1 cm (平均值)	宽叶
WA		晚出苗	ZL	叶宽 < 1 cm (平均值)	窄叶
P	植株紫色	全紫	BC	叶先端卷曲 ≥ 2	多卷曲
G	植株绿色	全绿	PC	叶先端卷曲 < 2	少卷曲
HG	高度 ≥ 35 cm (平均值)	高杆	LS	第 1 轮叶着生方式	轮生
SG	高度 < 35 cm (平均值)	矮杆	HS		互生
DH	花朵数目 ≥ 4 朵	多花	DS		对生
SH	花朵数目 < 4 朵	少花	SL	叶片深绿	深绿
GH	花朵以绿色为主	绿花紫斑点	QL	叶片浅绿	浅绿
YH	花朵以黄色为主	黄花紫斑点	LG	果实长度 ≥ 23 mm	长果
LF	外花被片长 ≥ 5.5 cm (平均值)	长花被片	DG	果实长度 < 23 mm	短果
SF	外花被片长 < 5.5 cm (平均值)	短花被片			

1.2 仪器与试剂

Agilent1260 高效液相色谱仪(美国 Agilent 公司); 色谱柱: ZORBAXA SB-C₁₈ (250 mm $\times$ 4.6 mm, 5 μ m); DHG-9070 型烘箱(上海一恒科学仪器有限公司), BO-1000S1 型多功能粉碎机(永康市铂欧五金制品有限公司), HH-8 型水浴锅(北京华港通科技有限公司), FA1004E 型万分之一电子天平(常州市幸运电子设备有限公司), LI-6800 型便携式光合仪(LI-COR 公司, 美国), TSY-4N 型叶绿素仪(金科利达公司), 752 型紫外-可见光分光光度计(上海舜宇恒平科学仪器有限公司), UPTC-10 型纯水机(杭州亿捷科技有限公司)。对照品尿苷(批号 CFS202101)、鸟苷(批号 CFS202101)、胸苷(批号 CFS202102)、腺苷(批号 CFS202201)、胞苷(批号 CFN92490)、鸟嘌呤(批号 CFS202101)、尿嘧啶(批号 CFS202101), 均购自武汉中标科技有限公司, 质量分数 $\geq 98\%$, 脱氧腺苷(质量分数 $> 98\%$, 伊势久生物科技有限责任公司, 货号 958-09-8), 西贝母碱(质量分数 $> 98\%$, 北京金克隆生物技术有限公司, 货号 BP6122); 甲醇为色谱纯; 水为超纯水; 其他化学试剂均为分析纯。

2 方法

2.1 农艺性状的测定

在不同表型川贝母群体内, 随机选取盛花期(7 年生)健康的川贝母植株 20 株, 分别测量株高、茎粗、叶长、叶宽、基部对生叶高、花数。倒

苗期每个分区随机采收 20 株健康植株的成熟果实, 并测量和统计果长、果直径、果实质量和鳞茎鲜质量等。

2.2 叶片光合参数测定

在川贝母果期, 选择晴朗无风天气, 确保测定时太阳光强度相对稳定, 于上午 8:00 至 11:00 选取川贝母植株顶部向下第 3 对生成成熟功能性叶片中部, 用 TSY-4N 叶绿素仪测叶绿素含量相对值; 利用便携式光合仪测定其光合参数。主要参数有净光合速率、气孔导度、蒸腾速率及胞间 CO₂ 浓度。随机选取 5 株生长性状、大小基本一致的川贝母进行测定, 每株同一叶片同一部位重复测定 3 次。光合仪的仪器参数控制: 采用标准叶室 2 cm² 开放式气路, 内置红蓝光源控制光强为光饱和点光强 400 μ mol/(m²·s)。叶室 CO₂ 浓度采用 CO₂ 小钢瓶控制, 设置为 400 μ mol/mol; 设置叶室温度 20 $^{\circ}$ C, 相对湿度 55%, 气体流速 500 μ mol/s。

2.3 总生物碱含量的测定

干燥鳞茎中总生物碱含量的测定按照《中国药典》2020 年版^[8]含量测定项下规定进行。2.0 g 的粉末用 3 mL 浓氨水浸泡 1 h, 然后用 40 mL 三氯甲烷-甲醇(4:1)混合物回流提取 2 h。

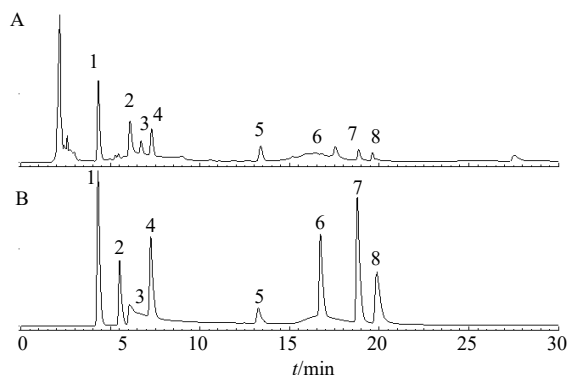
2.4 核苷成分的提取和测定

参照游静等^[23]的测定方法。对 23 份川贝母种质资源的 8 个核苷成分含量进行测定, 每份样品设 3 个重复, 取平均值。

2.4.1 供试品溶液的制备 称取 1.0 g 干燥鳞茎粉末, 10 mL 蒸馏水超声提取 1 h, 离心 10 min, 用蒸馏水稀释至 25 mL, 用 0.45 μm 微孔滤膜滤过, 即得供试品溶液。

2.4.2 对照品溶液的制备 分别精密称取减压干燥至恒定质量的尿嘧啶、胞苷、鸟嘌呤、尿苷、鸟苷、胸苷、腺苷和脱氧腺苷对照品适量, 加纯净水溶解并制成质量浓度分别为 2.0、2.0、3.0、2.0、2.0、3.0、3.0、2.0 mg/mL 的对照品贮备液。

2.4.3 色谱条件 Zorbaxa SB-C₁₈ 色谱柱 (250 mm $\times$ 4.6 mm, 5 μm), 流动相为甲醇 (A) -水 (B), 梯度洗脱: 0~10 min, 1%~5% A; 10~15 min, 5%~15% A; 15~20 min, 15%~20% A; 20~30 min, 20%~30% A; 检测波长 260 nm。体积流量 1.0 mL/min, 进样量 20 μL 。色谱图见图 1。



1-尿嘌呤; 2-胞苷; 3-鸟嘌呤; 4-尿苷; 5-鸟苷; 6-胸苷; 7-腺苷; 8-脱氧腺苷。

1-urinary purine; 2-cytidine; 3-guanine; 4-uridine; 5-guanosine; 6-thymidine; 7-adenosine; 8-deoxyadenosine.

图 1 混合对照品 (A) 和供试品溶液 (B) HPLC 色谱图

Fig.1 HPLC chromatogram of mixed control (A) and test solution (B)

2.4.4 线性方程的绘制 精密吸取“2.4.2”项下混合对照品溶液 0.2、0.4、0.8、1.6、3.2、5.0 μL , 按“2.1.2”项下色谱条件进样测定, 记录色谱图。以峰面积 (Y) 对进样量 (X) 进行线性回归, 8 种核苷类成分标准曲线的回归方程见表 2, 相关系数 (r) 均大于 0.990, 说明峰面积与核苷含量之间具有显著的线性相关性。

2.4.5 方法学考察 参考本课题组 Wang 等^[24]对该方法的方法学考察, 精密度、稳定性、重复性及加样回收率均符合实验要求。

2.5 数据统计与分析

采用 Excel 2021 进行数据统计并计算其平均值、

表 2 8 种核苷成分标准曲线方程及线性范围

Table 2 Standard curve equations and linear ranges of eight nucleoside components

成分	回归方程	线性范围/ $(\mu\text{g} \cdot \text{mL}^{-1})$	r
尿嘌呤	$Y=446.82 X-70.029$	0.1563~2.500	0.996 4
胞苷	$Y=194.46 X-30.804$	0.1563~2.500	0.994 9
鸟嘌呤	$Y=167.86 X-83.11$	0.2343~3.750	0.999 4
尿苷	$Y=493.99 X-181.71$	0.1563~2.500	0.999 3
鸟苷	$Y=48.975 X-11.754$	0.1563~2.500	0.996 0
胸苷	$Y=386.15 X-93.044$	0.2343~3.750	0.994 9
腺苷	$Y=336.44 X-81.106$	0.2343~3.750	0.994 5
脱氧腺苷	$Y=331.13 X-59.188$	0.1563~2.500	0.993 1

中位数、标准差、四分位数、变异系数 (coefficient of variation, CV) 和遗传多样性指数 (Shannon-Wiener diversity index, H') 用于性状数值的分布统计和评价性状数值的离散程度; 利用 IBM SPSS Statistics 26.0 进行表型性状的描述性统计、相关性分析、CA、PCA、PLS-R、偏最小二乘-判别分析 (partial least square-discriminant analysis, PLS-DA)、VIP 分析等用 SIMCA 14.1 计算; 川贝母表型性状的综合评价: 首先依据公式 (1) 计算各性状隶属函数值; 随后依据公式 (2) 结合 PCA 结果计算各性状权重; 最后通过公式 (3) 利用 24 个性状的隶属函数值 (μ) 与性状权重计算每份样品表型性状的综合评分。相关计算公式^[7]如下。

$$\mu(X_i) = (X_i - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min}) \quad (1)$$

$\mu(X_i)$ 为样品第 i 个性状的隶属函数值, X_i 为每份样品第 i 个性状的实测值, $X_{\min}$ 和 $X_{\max}$ 分别表示所有样品第 i 个性状的最大值和最小值。

$$W_i = P_i / \sum P_i \quad (2)$$

W_i 为样品第 i 个性状的权重, P_i 是经过主成分分析计算得到的第 i 个性状的贡献率

$$D_j = \sum [\mu(X_i) \times W_i] \quad (3)$$

D 值为每份样品 24 个性状的综合得分, 其中, i 表示参与评分的第 i 个性状

3 结果与分析

3.1 川贝母表型性状的性状变异分析

通过对种植基地川贝母茎秆、花、果实和叶片的表型进行调查, 共发现川贝母典型表型 23 种, 其质量性状具有丰富的遗传变异。测定和分析不同川贝母表型的 24 个数量性状发现, 各性状的 CV 为 6.63%~102.36%。其中农艺性状的变异主要来源于果质量、花朵数目和鳞茎鲜质量等指标 (表 3); 而品质指标的变异主要是鸟苷、腺苷和胸苷等物质且

表 3 23 份川贝母种质主要数量性状的特征比较

Table 3 Comparison of characteristics of main quantitative traits of 23 *F. cirrhosa* germplasm

表型编号	PH/cm	SD/mm	LC/cm	LK/cm	BLH/cm	FS/朵	FC/mm	FD/mm	FZ/g	XZ/g	SPAD	E
SH	35.59	4.05	7.91	0.93	10.96	3	21.31	13.64	1.72	19.28	26.42	0.001 6
DH	37.31	4.78	4.77	1.01	11.98	6	21.85	13.59	1.73	23.33	27.15	0.001 3
KL	40.35	5.35	9.60	1.59	11.48	6	22.46	14.03	2.08	36.86	29.82	0.001 6
ZL	39.63	4.59	8.81	0.87	12.80	5	20.51	13.25	1.77	23.86	23.98	0.002 4
P	47.31	3.65	8.92	0.96	12.44	3	19.00	13.77	0.34	27.46	40.73	0.002 2
G	35.60	3.18	7.66	0.86	9.86	2	19.00	12.83	0.28	22.38	37.60	0.002 2
ZA	37.00	4.61	9.53	1.27	9.73	4	22.02	15.41	1.87	15.82	38.91	0.002 3
WA	32.88	3.85	8.48	0.87	8.50	3	23.37	14.96	2.06	13.17	43.98	0.002 1
DS	33.70	3.70	8.43	0.95	8.79	3	20.44	13.37	1.36	18.47	42.99	0.002 8
HS	31.13	3.41	7.82	0.79	6.67	3	18.98	12.72	1.01	16.77	41.07	0.002 1
LS	34.47	3.73	8.28	0.84	9.97	3	21.69	14.13	1.31	19.87	45.13	0.002 6
BC	35.06	4.25	8.54	0.96	9.20	4	21.53	15.87	2.03	20.18	38.06	0.002 0
PC	27.42	3.88	6.86	0.86	6.58	3	19.98	14.35	1.70	15.75	34.48	0.002 0
GH	32.24	4.60	9.25	1.01	7.98	4	20.96	14.66	1.60	23.91	41.49	0.005 7
YH	35.82	4.21	9.29	1.13	9.97	4	20.99	14.00	1.66	20.64	40.86	0.002 5
LF	34.53	4.55	8.55	0.99	8.40	4	23.43	14.43	2.01	28.15	46.07	0.001 8
SF	29.81	4.23	7.51	0.91	6.23	4	20.07	14.29	1.56	23.61	42.37	0.001 9
SG	28.67	4.05	7.87	0.9	6.99	3	19.19	13.63	1.34	16.72	30.86	0.002 4
HG	43.69	4.45	10.10	1.09	11.36	4	20.01	14.75	1.76	29.12	45.60	0.002 9
QL	39.14	3.06	8.03	0.84	13.16	2	20.51	11.94	1.08	12.75	49.01	0.002 3
SL	36.94	3.46	8.16	0.87	12.51	3	22.15	13.50	1.23	15.69	50.73	0.002 7
LG	37.36	3.99	8.70	0.91	9.84	3	27.34	15.50	2.30	23.37	41.19	0.001 7
DG	40.84	3.93	8.92	0.86	9.69	3	18.32	14.32	1.40	21.37	46.90	0.001 9
变异范围	27.42~47.31	3.06~5.35	4.77~10.10	0.84~1.59	6.23~13.16	3.0~6.0	18.32~23.37	11.94~15.50	0.28~2.30	12.75~36.86	23.98~50.73	0.001 3~0.005 7
平均值	35.93	4.07	8.35	0.97	9.79	3.57	21.09	14.04	1.53	21.24	39.37	0.002 3
标准差	4.68	0.55	1.08	0.17	2.08	1.04	1.95	0.93	0.51	5.66	7.39	0.000 9
四分位数	32.88	3.70	7.87	0.86	8.40	3	19.98	13.50	1.31	16.72	34.48	0.001 9
	39.14	4.55	8.92	1.01	11.48	4	22.02	14.66	1.87	23.86	45.13	0.002 5
CV/%	13.03	13.46	12.99	17.95	21.25	29.08	9.25	6.63	33.21	26.65	18.76	36.88
H'	2.146	1.9705	2.175	1.808	2.214	1.908 5	2.109 5	2.133 5	2.304	2.337	/	/
表型编号	A	Ci	gsw	Aa/%	Up/($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)	Cy/($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)	Gu/($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)	Ur/($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)	Ga/($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)	Th/($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)	Ad/($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)	De/($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)
SH	6.96	200.05	0.09	0.13	28.00	7.87	64.46	14.50	/	/	13.04	5.86
DH	4.57	248.07	0.05	0.11	20.66	9.31	58.00	21.33	34.53	18.85	12.67	6.90
KL	8.81	239.09	0.11	0.09	30.80	9.34	62.71	15.90	17.97	/	/	6.91
ZL	14.00	230.32	0.11	0.12	50.69	7.86	118.02	11.33	/	/	/	6.16
P	16.27	332.26	0.19	0.09	9.27	5.07	23.25	28.17	68.46	7.94	36.84	6.06
G	13.69	285.76	0.15	0.10	7.23	8.72	19.29	29.60	150.01	7.08	24.70	7.55
ZA	9.32	182.64	0.10	0.10	15.89	5.52	24.55	25.55	/	9.19	32.10	7.49
WA	9.15	198.14	0.10	0.18	14.60	5.93	29.57	37.48	54.66	11.84	40.69	7.60
DS	7.81	323.92	0.18	0.15	52.46	8.69	126.22	12.70	/	11.80	/	7.26
HS	11.32	208.40	0.1	0.14	47.32	10.83	115.72	14.74	/	/	/	5.97
LS	9.84	297.94	0.17	0.14	47.54	10.33	97.92	/	/	/	/	6.05
BC	7.18	244.09	0.11	0.11	19.00	8.64	29.90	14.94	33.02	22.23	21.18	7.23
PC	6.97	242.74	0.13	0.19	20.17	8.82	37.13	34.86	32.27	26.43	36.83	6.15
GH	6.93	358.87	0.47	0.11	26.98	5.77	82.82	27.12	68.05	7.01	15.18	7.09
YH	8.04	330.23	0.17	0.12	15.77	7.27	58.67	37.04	105.39	9.45	14.42	6.00
LF	9.42	200.44	0.05	0.12	18.69	8.34	35.29	15.45	29.38	10.19	16.49	7.10
SF	11.71	164.02	0.09	0.12	15.98	8.02	44.72	22.61	31.65	11.25	18.87	7.13
SG	4.60	340.29	0.15	0.18	27.69	5.34	45.60	15.12	29.10	9.79	19.20	7.07
HG	15.60	275.25	0.21	0.13	24.50	5.91	52.69	18.32	28.37	20.82	11.74	7.36
QL	16.78	337.05	0.20	0.12	25.51	6.19	59.37	19.15	58.32	8.06	10.18	6.25
SL	10.35	261.89	0.11	0.11	32.58	5.70	91.84	/	/	/	/	6.29
LG	9.90	219.65	0.10	0.14	39.78	8.13	90.02	11.71	57.68	/	7.55	6.96
DG	4.96	262.14	0.12	0.11	39.78	8.86	63.39	16.37	42.33	15.69	/	7.51
变异范围	4.57~16.78	164.02~358.87	0.05~0.47	0.09~0.19	7.23~52.46	5.07~10.83	19.29~126.22	0~37.48	0~150.01	0~26.43	0~40.69	5.86~7.60
平均值	9.75	260.14	0.14	0.13	27.43	7.67	62.22	19.30	36.57	9.03	14.42	6.78
标准差	3.57	56.89	0.08	0.03	13.27	1.68	31.90	10.03	37.45	7.86	13.04	0.60
四分位数	6.973 51	208.4	0.098	0.11	15.98	5.91	35.29	14.50	0	0	0	6.15
	11.71	323.92	0.172 58	0.14	39.78	8.82	90.02	27.12	57.68	11.84	21.18	7.26
CV/%	36.67	21.87	59.24	21.95	48.37	21.90	51.26	51.96	102.36	87.11	90.41	8.90
H'	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/

“/”表示核苷类未检出；PH-株高；SD-茎粗；LC-叶长；LK-叶宽；BLH-基部对生叶高；FS-花数；FC-果长；FD-果直径；FZ-果实质量；XZ-鳞茎鲜质量；SPAD-叶绿素含量；E-蒸腾速率；A-净光合速率；Ci-胞间CO₂浓度；gsw-气孔导度；Aa-生物碱含量；Up-尿嘧啶；Cy-胞苷；Gu-鸟嘌呤；Ur-尿苷；Ga-鸟苷；Th-胸苷；Ad-腺苷；De-脱氧腺苷；图2和表4、5同。

“/” indicates that nucleosides were not detected; PH-plant height; SD-stem thickness; LC-leaf length; LK-leaf width; BLH-basal leaf height; FS-flower number; FC-fruit length; FD-fruit diameter; FZ-fruit weight; XZ-fresh weight of bulb; SPAD-chlorophyll content; E-transpiration rate; A-net photosynthesis rate; Ci-intercellular CO₂ concentration; gsw-stomatal conductance; Aa-alkaloid content; Up-uracil; Cy-cytosine; Gu-guanine; Ur-uridine; Ga-guanosine; Th-thymidine; Ad-adenosine; De-deoxyadenosine; same as Fig. 2 and tables 4, 5.

23 份表型中仅有 ZL、HS、LS、SL 同时不含有鸟苷、胸苷和腺苷,说明品质性状表现出较大的变异性。各表型中的 10 个农艺性状的 H' 为 1.808~2.337,其中株高、叶长、基部对生叶高、果长、果直径、果实质量和鳞茎鲜质量多样性指数均大于 2.00,总体显示川贝母种质资源表型多样性较丰富。以上分析表明 23 份不同川贝母种质资源表型具有较为丰富的遗传多样性,性状间的差异较大,适宜

进行品种鉴定评价和比较分析。

3.2 各性状间的相关性分析

为了探究 24 个数量性状间的关系,本研究对所调查的 24 个性状进行了 Pearson 相关性分析,结果表明川贝母多数性状存在不同程度的相关性(图 2)。其中药效成分总生物碱含量与多数农艺性状呈正相关,如茎粗、叶长、果长、果直径、果质量以及鳞茎鲜质量均与其含量呈极显著的正相关($P <$

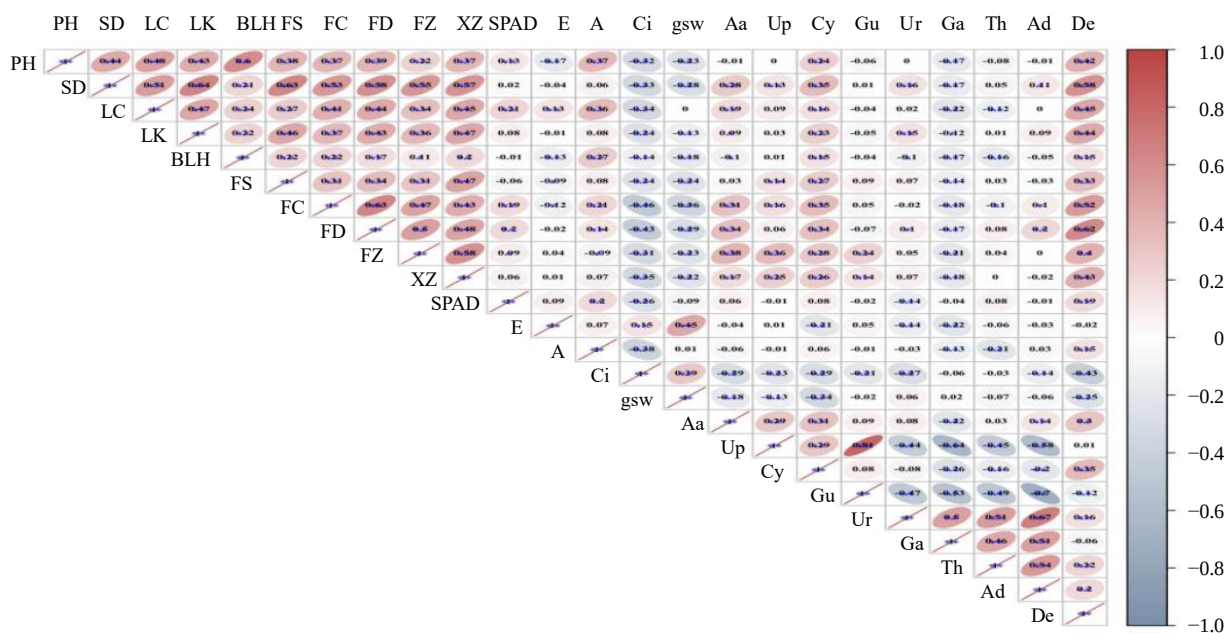


图 2 各数量性状间的相关性分析

Fig. 2 Correlation analysis among quantitative traits

0.01); 与叶宽呈显著的正相关($P < 0.05$),而基部对生叶高呈显著的负相关($P < 0.05$)。其次尿嘧啶、胞苷、腺苷和脱氧腺苷等核苷类物质与总生物碱含量也呈极显著的正相关($P < 0.01$),与鸟苷呈极显著的负相关($P < 0.01$)。

药用部位鳞茎鲜质量除与基部对生叶高呈显著的正相关($P < 0.05$)外,其他性状均呈极显著的正相关($P < 0.01$);同时也与尿嘧啶、胞苷、鸟嘌呤和脱氧腺苷含量呈极显著的正相关($P < 0.01$),鸟苷含量呈极显著的负相关($P < 0.01$)。其次净光合速率与株高、叶长、基部对生叶高、果长、果直径、叶绿素和脱氧腺苷含量呈极显著的正相关($P < 0.01$),与鸟苷、胸苷呈极显著的负相关($P < 0.01$),果质量呈显著的负相关($P < 0.05$)。

3.3 不同川贝母种质 PCA 和 CA

为了明确川贝母群体间的遗传多样性,采用

系统聚类平方欧式距离法对 23 份川贝母种质资源的 24 个表型性状进行聚类分析,结果显示,在欧式距离 16 时可将该群体分成 3 大类群(图 3-A)。第 I 群包含 14 份不同的川贝母种质,分别是 BC、PC、HG、DG、DH、KL、LF、SF、ZA、WA、SH、ZL、HS、LG。第 II 类群包括 LS、SL 和 DS 3 份种质。第 III 类群包括 DH、QL、SG、P、YH 和 G 6 份种质。比较每一类群各性状平均值和 CV 后发现(表 4),第 I 类群的种质茎粗、叶宽、花数、果长、果直径、果实质量、鳞茎鲜质量、生物碱含量和胸苷的均值较高,且胸苷的 CV 较大(89.88%);第 II 类群种质基部对生叶高、叶绿素含量、尿嘧啶、胞苷、鸟嘌呤和生物碱含量的均值较高,同时鸟苷和腺苷等核苷类成分为未检测出,大多数性状 CV 稳定且较小;第 III 类群种质株高、叶长、胸苷、蒸腾速率、净光合速率、胞间 CO_2 浓

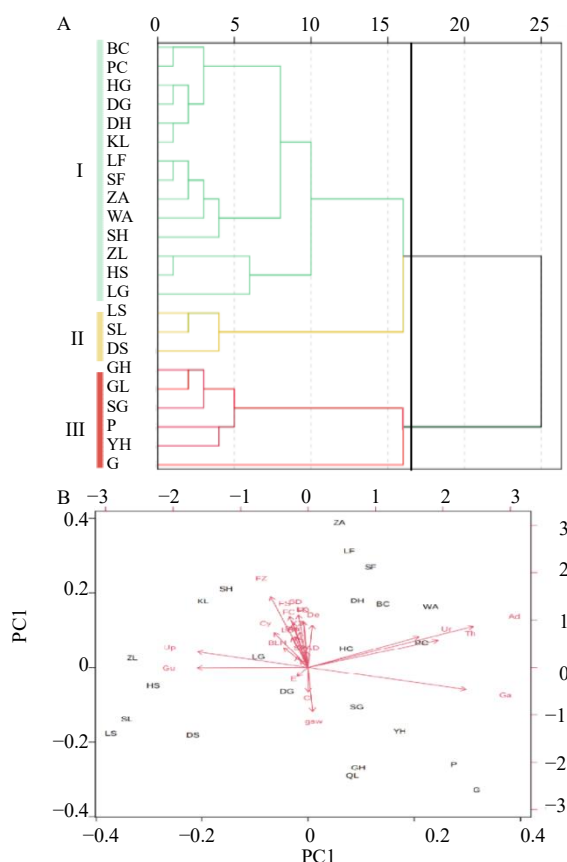


图 3 不同川贝母种质资源聚类分析 (A) 和主成分分析 (B)
Fig. 3 CA (A) and PCA (B) of different *F. cirrhosa* germplasm resources

度、气孔导度和尿苷、鸟苷、腺苷等核苷类均值较高，其中气孔导度和鸟苷的 CV 较高。

川贝母各数量性状呈现较强的相关性，为将表型评价指标进行降维并降低性状间共线性对后续评价的干扰，以 24 个性状为 X 变量进行 PCA (图 3-B)，分析结果显示 (表 5)，所有性状可提取为 6 个主成分，第 1~6 主成分特征值分别为 4.701、4.573、3.831、2.654、1.927 和 1.239；成分累积贡献率为 78.746%，可代表大部分性状信息。通过计算各性状的主成分得分可知，第 1 和 3 主成分中各因子的贡献率分别为 19.587% 和 16.003%，主要包括茎粗、叶宽、花数、果实质量和株高、叶长、基部对生叶高、鳞茎鲜质量，用于表征农艺性状的大部分性状，且该 2 类主成分中得分较高的种质为 KL 和 SH (图 3-B)；第 2 和 6 主成分贡献率为 18.906% 和 5.161%，主要包括尿苷、腺苷、胸苷和脱氧腺苷等与核苷类物质相关的，这 2 类主成分中得分较高的种质为 ZA 和 LF；第 4 和 5 主成分贡献率为 11.059% 和 8.029%，主要包括蒸腾速率、气孔导度和叶绿素含量、净光合速率与光合作用相关的指标，得分较高的种质为 LS、G 和 KL。

3.4 综合评分计算

在 PCA 基础上计算了 6 个主成分的 W 值 (W 值

表 4 各类群性状平均值和 CV 统计与比较

Table 4 Statistics and comparison of means and coefficients of variation of traits of taxa

性状	Cluster I		Cluster II		Cluster III	
	平均值	CV/%	平均值	CV/%	平均值	CV/%
PH/cm	35.90	12.64	35.03	4.83	36.46	17.54
SD/mm	4.28	11.35	3.63	4.08	3.79	15.93
LC/cm	8.29	16.02	8.29	1.63	8.50	8.62
LK/cm	0.99	21.05	0.89	6.41	0.95	11.42
BLH/cm	9.53	21.83	10.42	18.24	10.07	23.95
FS/朵	4.00	27.28	3.00	0.00	3.00	29.81
FC/mm	21.51	10.53	21.43	4.13	19.94	4.91
FD/mm	14.37	6.21	13.66	2.97	13.47	7.09
FZ/g	1.79	18.12	1.30	5.04	1.05	58.03
XZ/g	22.19	28.29	18.01	11.81	20.64	25.44
SPAD	37.57	20.91	46.28	8.64	40.09	14.71
E	0.002	20.32	0.003	3.81	0.003	48.18
A	9.28	33.95	9.33	14.40	11.05	46.96
Ci	222.50	14.22	294.59	10.57	330.74	7.34
gsw	0.11	35.98	0.15	24.69	0.22	55.65
Aa/%	0.13	22.04	0.13	15.26	0.12	27.42
Up/($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)	27.56	44.28	44.19	23.43	18.74	49.18
Cy/($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)	8.10	18.18	8.24	28.49	6.39	21.53
Gu/($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)	59.01	51.29	105.33	17.42	48.17	49.98
Ur/($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)	19.65	41.03	4.23	173.21	26.04	30.05
Ga/($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)	27.84	76.41	/	/	79.89	52.76
Th/($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)	13.32	89.88	3.93	173.21	8.22	14.23
Ad/($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)	16.24	91.20	/	/	20.09	47.60
De/($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)	6.88	8.72	6.53	9.81	6.67	9.74

表 5 川贝母各性状的主成分分析结果

Table 5 Results of principal component analysis for each trait of *F. cirrhosa*

表型性状	主成分					
	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6
PH/cm	0.120	-0.090	0.810	-0.336	0.183	0.024
SD/mm	0.903	0.092	0.162	0.194	-0.275	-0.078
LC/cm	0.132	0.026	0.588	0.441	0.385	0.024
LK/cm	0.696	0.157	0.452	0.061	-0.151	-0.038
BLH/cm	0.050	-0.282	0.673	-0.408	0.102	-0.276
FS/朵	0.835	-0.065	0.173	-0.021	-0.392	-0.057
FC/mm	0.513	-0.071	-0.088	0.108	0.546	-0.241
FD/mm	0.577	0.419	-0.104	0.387	0.384	0.075
FZ/g	0.792	0.013	-0.269	0.313	0.240	-0.174
XZ/g	0.563	-0.031	0.547	-0.073	-0.236	0.276
SPAD	-0.424	0.061	0.153	0.256	0.600	0.393
E	-0.300	0.048	0.350	0.810	-0.168	-0.079
A	-0.365	-0.049	0.543	-0.328	0.312	-0.066
Ci	-0.539	0.002	0.434	0.348	-0.379	-0.045
gsw	-0.373	0.125	0.451	0.704	-0.268	-0.060
Aa	-0.194	0.032	-0.743	0.296	-0.002	-0.283
Up/($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)	0.006	-0.891	-0.134	0.301	0.008	0.081
Cy/($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)	0.201	-0.454	-0.400	-0.235	-0.258	0.497
Gu/($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)	-0.071	-0.886	-0.040	0.321	-0.075	-0.025
Ur/($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)	-0.090	0.822	-0.014	-0.037	-0.238	-0.135
Ga/($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)	-0.348	0.585	0.286	-0.120	-0.140	0.187
Th/($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)	0.054	0.621	-0.255	0.041	-0.178	0.262
Ad/($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)	-0.099	0.887	-0.151	-0.124	0.077	-0.278
De/($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)	0.267	0.476	-0.006	0.244	0.190	0.526
初始特征值	4.701	4.537	3.841	2.654	1.927	1.239
贡献率/%	19.587	18.906	16.003	11.059	8.029	5.161
累积贡献率/%	19.587	38.493	54.497	65.555	73.585	78.746

分别为 0.249、0.240、0.203、0.140、0.102 和 0.066), 并结合 24 个性状的 μ 值对 23 个表型的数量性状进行综合评分值(D 值), 对各种质表型进行综合评价, D 值越高, 表型性状的综合表现越好。结果显示(表 6), 综合排名前 5 位的种质为 ZA、HG、GH、KL 和 BC 表型, 后 5 位的是 QL、ZL、SH、LS 和 HS, 且其中 ZA 的 D 值(0.64) 最高, HS 的 D 值(0.22) 最低。

3.5 优良种源性状特征分析

选取综合评分最高的 5 个个体与评分最低的 5 个个体, 以样品 24 个数量性状为 X 变量, 结合 PLS-

DA 分析研究优劣种源间的性状差异。PLS-DA 分析表明, 得分较高的种源与得分较低的种源性状差异大, 2 组样品被明显区分(图 4-A)。

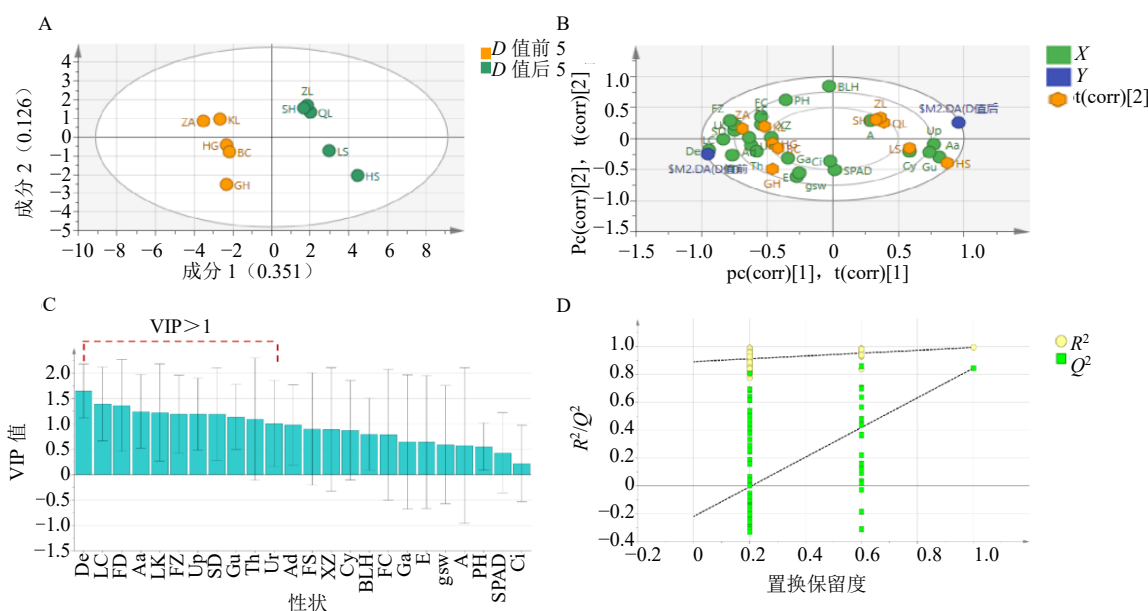
本次分析中的自变量拟合指数(R^2X)为 0.631, 因变量拟合指数(R^2Y)为 0.993, 模型预测指数(Q^2)为 0.845, R^2 和 Q^2 超过 0.5 表示模型拟合结果可接受。经过 200 次置换检验, 如图 4-D 所示, Q^2 回归线与纵轴的相交点小于 0, 说明模型不存在过拟合, 模型验证有效, 认为该结果可用于川贝母优劣种源间的鉴别分析^[25]。图 4-B 显示株高、茎粗、叶长、叶宽、花数、果长、果直径、鳞茎鲜质量等多数量性

表 6 23 份川贝母种质资源的综合评价与排名

Table 6 Comprehensive evaluation and ranking of 23 *F. cirrhosa* germplasm resources

表型编号	D 值	排名	表型编号	D 值	排名
ZA	0.64	1	G	0.45	13
HG	0.63	2	DH	0.41	14
GH	0.59	3	PC	0.38	15
KL	0.59	4	SG	0.38	16
BC	0.57	5	SL	0.37	17
LF	0.55	6	DS	0.36	18
WA	0.55	7	QL	0.35	19
P	0.51	8	ZL	0.34	20
YH	0.51	9	SH	0.34	21
LG	0.50	10	LS	0.33	22
SF	0.48	11	HS	0.22	23
DG	0.48	12			

状可用于区分评分较高的个体，净光合速率、胞苷、尿嘧啶、鸟嘌呤、生物碱含量可用于区分评分较低的个体。利用变量投影重要性计算性状 VIP 值计算显示（图 4-C 虚线方框内），脱氧腺苷、叶长、果直径、生物碱含量、叶宽、果实质量、尿嘧啶、茎粗、鸟嘌呤、胸苷、尿苷性状 VIP 值 >1.00 ，可作为区分优劣种源的关键性状。结合性状均值比较发现，得分较高的表型性状特征为茎粗、叶长、叶宽、果直径、果实质量、鳞茎鲜质量、胸苷和脱氧腺苷数值显著高于得分较低的表型，但非常有趣的是本课题组也发现生物碱含量、尿嘧啶和鸟嘌呤又显著高于得分较高的表型。为量化各表型性状与植株综合评分的关系，以 23 份川贝母种植资源的综合评分 D 值为 Y 变量，24 个性状为 X 变量，建立 Y 与 X 的 PLS-R。结果表明（图 5-A），川贝母地上性状果直径、叶宽、茎粗、叶



A-PCA 得分散点图；B-PLS-DA 得分散点图；C-各性状指标 VIP 值；D-置换检验图。

A-scatterplot of PCA scores; B-scatterplot of PLS-DA scores; C-VIP values for each trait indicator; D-permutation test plots.

图 4 D 值排名前 5 与 D 值排名后 5 供试材料的 PLS-DA 分析

Fig. 4 PLS-DA of test materials with top 5 and bottom 5 D -value rankings

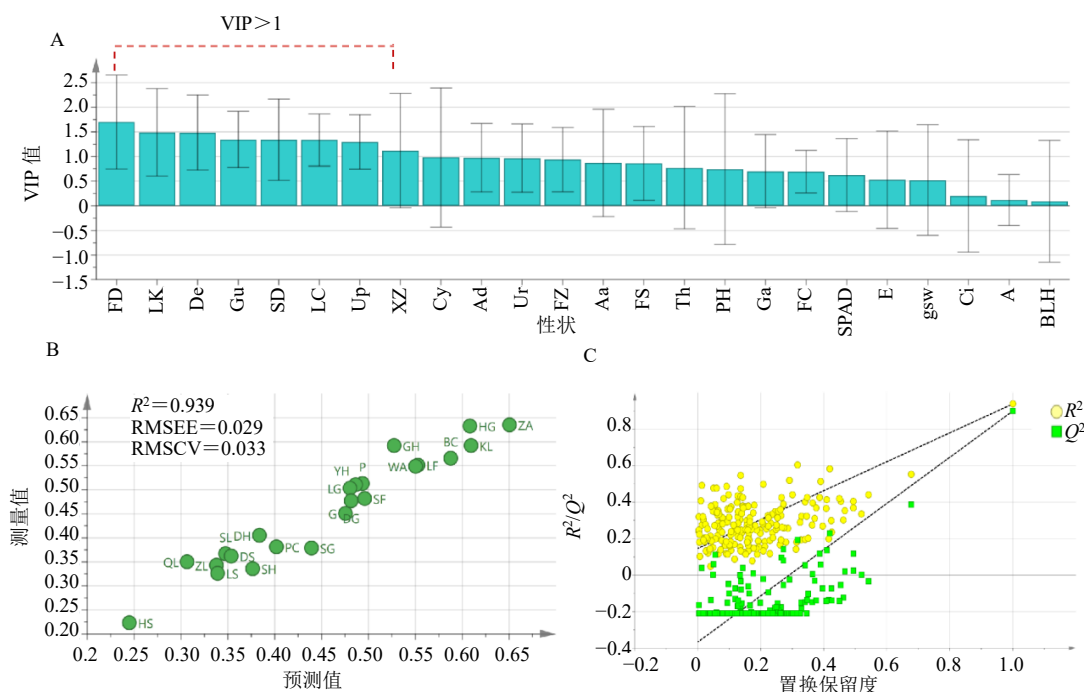
长、鳞茎鲜质量和品质性状脱氧腺苷、鸟嘌呤、尿嘧啶对 D 值的预测贡献最大，变量 VIP 值均大于 1.00。设定上述 8 个数量性状为 X 变量，样品综合评分 D 为 Y 变量，再次建立回归模型；结果显示（图 5-B）：8 个性状与 D 值线性关系良好，PLS-R 模型决定系数 (R^2) = 0.939，均方根误差 (RMSEE) 及交叉验证均方根误差 (RMSCV) 分别为 0.029 和 0.033；对预测模型进行 200 次置换重要性检验，模型无过拟合风险（图 5-C），表明 8 个性状是计算川贝母种质

资源综合评分的重要性状。

4 讨论

4.1 川贝母的表型多样性及变异分析

表型是植物进化适应环境的结果，在不同的环境中，植物经历着不同的逆境，进而产生相应的表型变异以适应新环境^[26-28]。明确种质资源的遗传多样性水平是开展育种工作的基础和前提^[28]，且优异的川贝母种质资源可满足高品质和高产量育种需求。形态学水平的表型分类研究仍是当前药用植物



A-各性状指标 VIP 值; B-测量值与预测值回归模型; C-置换检验图。

A-VIP values for each trait indicator; B-regression models of measured and predicted values; C-permutation test plots.

图 5 川贝母供试材料 *D* 值与 24 个性状的 PLS-RFig. 5 PLS-R analysis of *D* value and 24 traits of test materials of *F. cirrhosa*

种质资源评价的基本分析方法^[30]。川贝母属于百合科的名贵中药材,以百合科 DUS 指南以及中国植物志中对川贝母的描述为理论基础,结合课题组前期研究以及自身田间观察从川贝母茎秆、花、果实和叶片等形态结构性状方面对川贝母进行表型分类。川贝母种质遗传多样性比较丰富,但是系统的遗传多样性评价及产量相关因素分析仍较为缺乏。本研究通过对 23 份川贝母种质资源的 10 个农艺性状进行测量调查发现,川贝母的遗传 H' 值在 1.808~2.337,鳞茎鲜质量和果质量的 H' 值最高 (2.30),其他地上性状如株高、叶长、基部对生叶高、果长、果直径 H' 值 > 2.00,表明川贝母表型性状多样性丰富。

CV 越大,离散程度越高,反映出资源在适应环境时性状产生的差异,差异越大获得优良资源的可能性越大^[31-32]。有报道指出,当参试群体某一性状的变异系数大于 10% 时,表明该性状具有丰富的遗传变异^[33]。本研究对 23 份川贝母种质资源的 24 个数量性状进行变异性分析,结果表明,23 份表型性状的 CV 为 6.63%~102.36%,说明川贝母种质资源表型具有较高的多样性水平和品种改良的潜力。由于品质性状中鸟苷 (102.36%)、腺苷 (90.41%)

和胸苷 (87.11%) 各自分别在不同 7 种表型中未被检测出,导致其 CV 值较大,目前研究也发现川贝母中所含的核苷类化合物具有抗炎、抑制血小板凝集、降压、松弛平滑肌等作用^[34-35],可作为川贝母良种选育的一个指标;其次生物碱作为川贝母发挥平川止咳的主要的活性成分,其变异系数也达到 21.95%,亦可作为川贝母良种选育的一个重要指标。农艺性状的变异主要来源于果质量 (33.21%)、花朵数目 (29.08%) 和鳞茎鲜质量 (26.65%),且除果长和果直径 CV 小于 10% 以外,其他性状均大于 10%,表现出了丰富的遗传变异。以上研究结果表明,川贝母种质资源间的品质和农艺性状变异丰富,遗传多样性水平高,可为后续川贝母优良种源筛选及特异性状挖掘提供必要的遗传资源。

4.2 川贝母种质资源的综合评价

相关性分析是衡量 2 个变量因素相关密切程度的多元统计分析方法^[36]。对 24 个数量性状进行相关性分析发现,川贝母各个表型的数量性状之间存在着一定的相关性关系,主要药用成分生物碱的含量和药用部位鳞茎鲜质量、茎粗、叶长、果长、果直径和果质量等都表现出了正相关,也反映川贝母表型数量性状分类具有重要的作用。表型聚类代表

了从性状水平进行的聚类分析^[37], 研究结果将川贝母材料分成 3 大族群, 各个族群都具有明显的特征, 可以根据相应的育种目标选择相应的表型。第 I 类群有鳞茎鲜质量、生物碱含量和果实质量较高的特点, 可作为选育产量高、含量高的亲本; 第 III 类群中核苷类物质均检测到且尿苷、鸟苷、腺苷的含量较高, 可作为选育核苷类物质高的亲本。聚类的结果与川贝母不同表型和划分指标有很大关系, 对表型性状进行聚类分析可以预测川贝母种质资源之间的亲疏关系, 在一定程度上减少杂交亲本配组的盲目性^[31]; PCA 是将原有的多个具有相关性观测指标通过降维归纳为新的不相关主成分, 且新的主成分能反映原有观测指标的大部分信息, PCA 可用于综合评价^[38-39]。在本研究中, 6 个主成分的特征值均大于 1.00, 累积贡献率为 78.746%, 可代表大部分性状信息。为筛选出优质表型, 将表型数据进行标准化处理, 在 6 个主成分的基础上结合 24 个数量性状的 μ 值对 23 份表型的数量性状进行综合评分, 结果显示 ZA 表型的 D 值最高, 可优先作为高潜质良种进行培育。

4.3 优良种源性状筛选

田间观察发现川贝母群体的表型性状丰富, 但由于人工栽培时间较短, 目前尚缺乏有关川贝母群体品质和农艺性状变异的详细报道。为提高川贝母种质资源评价和选育的效率, 本研究将 D 值排名前 5 与排名后 5 的表型性状进行比较, 结合 PLS-DA 分析发现脱氧腺苷、叶长、果直径、生物碱含量、叶宽、果实质量、尿嘧啶、茎粗、鸟嘌呤、胸苷、尿苷等性状可作为区分优劣种源的关键性状。PLS-R 分析则发现, 川贝母地上性状果直径、叶宽、茎粗、叶长、鳞茎鲜质量和品质性状脱氧腺苷、鸟嘌呤、尿嘧啶对 D 值的预测贡献较大, 该结果可优化后续的种源筛选过程, 减少评价指标, 提高筛选和培育良种的效率和精准度。

本研究通过表型变异范围、相关性分析、CA、PCA、PLS-R 等综合分析方法对川贝母 23 份种质资源的 10 个农艺性状、5 个生理和 9 个品质性状进行评价, 发现川贝母种质性状指标间存在较大的变异和丰富的遗传多样性。采用 D 值对各种质进行综合评价发现, 综合排名前 3 位的种质表型为 ZA、HG 和 GH, 具有品质优和含量丰富的特点。通过 PLS-R 分析发现川贝母农艺性状中叶宽、茎粗、鳞茎鲜质量和品质性状中脱氧腺苷、鸟嘌呤、尿嘧啶

对 D 值的贡献较大, 在川贝母种质资源评价和新品种选育过程中可作为代表性评价指标。本研究可以为后续的川贝母保存遗传资源和设计育种提供参考, 为分子标记水平的分析和核心种质的构建提供数据支撑。

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突

参考文献

- [1] Wu X B, Duan L Z, Chen Q, *et al.* Genetic diversity, population structure, and evolutionary relationships within a taxonomically complex group revealed by AFLP markers: A case study on *Fritillaria cirrhosa* D. Don and closely related species [J]. *Glob Ecol Conserv*, 2020, 24: e01323.
- [2] Swarup S, Cargill E J, Crosby K, *et al.* Genetic diversity is indispensable for plant breeding to improve crops [J]. *Crop Sci*, 2021, 61(2): 839-852.
- [3] 秦之旷, 刘娜, 周霞, 等. 中亚热带赤皮青冈天然种群表型多样性分析 [J]. *广西植物*, 2023, 43(9): 1622-1635.
- [4] 马道承, 王凌晖, 梁机. 形态标记在植物中的应用研究进展 [J]. *江苏农业科学*, 2022, 50(8): 55-62.
- [5] 王家禄. 半夏种质资源评价及新品种选育 [D]. 北京: 中国中医科学院, 2022.
- [6] Rebetzke G J, Jimenez-Berni J, Fischer R A, *et al.* Review: High-throughput phenotyping to enhance the use of crop genetic resources [J]. *Plant Sci*, 2019, 282: 40-48.
- [7] 汪书丽, 肖建华, 罗建, 等. 喜马拉雅紫茉莉野生居群叶和花表型变异研究 [J]. *中草药*, 2024, 55(10): 3469-3476.
- [8] 中国药典 [S]. 一部. 2020: 123-124.
- [9] 罗运兴, 杨胜玉. 川贝母的临床应用概况 [J]. *亚太传统医药*, 2010, 6(4): 158-159.
- [10] Wang Y, Hou H P, Ren Q, *et al.* Natural drug sources for respiratory diseases from *Fritillaria*: Chemical and biological analyses [J]. *Chin Med*, 2021, 16(1): 40.
- [11] Lu Q X, Li R, Liao J Q, *et al.* Integrative analysis of the steroidal alkaloids distribution and biosynthesis of bulbs *Fritillariae Cirrhosae* through metabolome and transcriptome analyses [J]. *BMC Genomics*, 2022, 23(1): 511.
- [12] 陈士林, 贾敏如, 王瑀, 等. 川贝母野生抚育之群落生态研究 [J]. *中国中药杂志*, 2003, 28(5): 398-402.
- [13] Cunningham A B, Brinckmann J A, Pei S J, *et al.* High altitude species, high profits: Can the trade in wild harvested *Fritillaria cirrhosa* (Liliaceae) be sustained? [J]. *J Ethnopharmacol*, 2018, 223: 142-151.
- [14] 李西文. 川贝母保护生物学研究 [D]. 北京: 中国协和

- 医科大学, 2009.
- [15] Mathela M, Kumar A, Sharma M, *et al.* Hue and cry for *Fritillaria cirrhosa* D. Don, a threatened medicinal plant in the Western Himalaya [J]. *Discov Sustain*, 2021, 2(1): 38.
- [16] 四川省林业和草原局. 《四川有国家重点保护野生植物 231 种》 [M]. 成都: 四川科技出版社, 2021: 23.
- [17] 熊浩荣, 马朝旭, 国慧, 等. 川贝母野生基原植物资源分布和保育研究进展 [J]. *中草药*, 2020, 51(9): 2573-2579.
- [18] 蒋舜媛, 孙洪兵, 秦纪洪, 等. 基于生长适宜性和品质适宜性的川贝母功能型生产区划研究 [J]. *中国中药杂志*, 2016, 41(17): 3194-3201.
- [19] Jaiswal D, Agrawal S B. Ultraviolet-B induced changes in physiology, phenylpropanoid pathway, and essential oil composition in two *Curcuma* species (*C. caesia* Roxb. and *C. longa* L.) [J]. *Ecotoxicol Environ Saf*, 2021, 208: 111739.
- [20] 崔丹丹, 李林林, 王继龙, 等. 盐碱胁迫对红花种子萌发的影响 [J]. *中药材*, 2019, 42(1): 33-36.
- [21] 张勇, 韩多红, 晋玲, 等. 不同盐碱胁迫对红芪种子萌发和幼苗生理特性的影响 [J]. *中国中药杂志*, 2012, 37(20): 3036-3040.
- [22] 王元忠, 沈涛. 滇龙胆野生种质资源的表型多样性与综合评价 [J]. *植物遗传资源学报*, 2023, 24(01): 181-193.
- [23] 游静, 张德全, 潘兴娇, 等. 高效液相色谱法同时测定太白贝母与暗紫贝母中 9 种核苷类成分的含量 [J]. *食品与发酵工业*, 2016, 42(1): 174-179.
- [24] Wang Y, Yang Z, Li X, *et al.* Integrated microbiology and target metabolomics analysis reveal the interaction of plant-microbe-soil interactions leading to the phenotypic plasticity of *Fritillaria cirrhosa*. [J]. *Indu Crop Prod*, 2024, 219: 118999.
- [25] 邵淑贤, 徐梦婷, 林燕萍, 等. 基于电子鼻与 HS-SPME-GC-MS 技术对不同产地黄观音乌龙茶香气差异分析 [J]. *食品科学*, 2023, 44(4): 232-239.
- [26] Li M Y, Li J, Xie F J, *et al.* Combined evaluation of agronomic and quality traits to explore heat germplasm in celery (*Apium graveolens* L.) [J]. *Sci Hort*, 2023, 317: 112039.
- [27] 于跃, 孙健, 张静, 等. 198 份大麻种质资源农艺及品质性状综合评价 [J]. *植物遗传资源学报*, 2021, 22(4): 1021-1030.
- [28] 寸竹, 董益, 张广辉, 等. 云南省野生半夏资源调查及种质评价 [J]. *南方农业学报*, 2021, 52(8): 2069-2077.
- [29] 董俊美, 李锦超, 贾凯旋, 等. 基于农艺性状的山药种质资源遗传多样性分析 [J]. *江苏农业科学*, 2022, 50(18): 136-143.
- [30] 管仁伟, 郭瑞齐, 郭凤丹, 等. 金银花品种选育研究现状 [J]. *中药材*, 2022, 45(10): 2522-2529.
- [31] 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.
- [32] 马秀花, 唐楠, 唐道城, 等. 郁金香的表型遗传多样性及观赏价值综合评价 [J]. *分子植物育种*, 2021, 19(4): 1320-1336.
- [33] 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.
- [34] 崔治家, 马艳珠, 张小荣, 等. 川贝母化学成分和药理作用研究进展及质量标志物的预测分析 [J]. *中草药*, 2021, 52(9): 2768-2784.
- [35] 金鑫, 李春楠, 张辉. 贝母属药材中生物碱类化学成分及其药理活性研究进展 [J]. *中药材*, 2022, 45(9): 2273-2279.
- [36] 刘娟汝, 刘晓梅, 刘雨诗, 等. 基于色度分析原理的青黛有效成分含量与其色度值的相关性分析 [J]. *中国实验方剂学杂志*, 2019, 25(23): 165-170.
- [37] 朱丽, 代雪凤, 张盛林, 等. 魔芋种质资源遗传多样性研究进展 [J]. *分子植物育种*, 2024, 22(13): 4392-4399.
- [38] 曹禹, 阿勒合斯·加尔得木拉提, 玛力帕提·努尔太, 等. 基于主成分分析的谷子种质资源主要农艺性状综合评价 [J]. *黑龙江农业科学*, 2023, 1(3): 1-7.
- [39] 王英成, 芦光新, 邓晖, 等. 基于主成分分析的青贮玉米品种农艺性状评价及筛选研究 [J]. *草地学报*, 2019, 27(6): 1725-1732.

[责任编辑 时圣明]