

滇重楼种质资源的表型遗传多样性及综合评价

苏锁财^{1,3}, 吉 槟¹, 李婧媛¹, 张文丽¹, 陆 明¹, 李开琚¹, 邓 盈¹, 赵艳丽^{1,3}, 徐福荣^{1,2*}

1. 云南中医药大学中药学院, 云南 昆明 650500

2. 云南省傣医药与彝医药重点实验室, 云南 昆明 650500

3. 云南省南药可持续利用研究重点实验室, 云南 昆明 650500

摘要:目的 筛选滇重楼 *Paris polyphylla* var. *yunnanensis* 优质种质资源, 揭示表型性状同皂苷含量之间的关联, 为滇重楼种质资源挖掘和良种选育奠定基础。方法 通过遗传多样性分析、相关性分析、聚类分析 (cluster analysis, CA)、主成分分析 (principal component analysis, PCA)、偏最小二乘-判别分析 (partial least square-discriminant analysis, PLS-DA) 和偏最小二乘-回归分析 (partial least square-regression analysis, PLS-R), 对筛选出的 41 份滇重楼种质资源的 25 个农艺性状、10 个品质性状进行综合评价。结果 农艺性状的 RSD 和遗传多样性指数 (H') 分别在 3.56%~66.63%、1.80~2.25, 品质性状的 RSD 和 H' 分别在 34.26%~130.18%、1.47~2.00; 其中, 农艺性状的变异主要来源于茎秆紫色部分长、花梗长、花梗占比, 品质性状的变异主要来源于重楼皂苷 V、H 和纤细薯蓣皂苷的含量。相关性分析显示重楼皂苷 I、II、VII 含量之和与株高、茎粗、叶形指数、根茎粗、粉末色度值 L^* 和 E^*_{ab} 等呈正相关。聚类分析将滇重楼种质分成 3 大类群, 第 I 类群属高产型种质, 第 II 类群属高品质种质, 第 III 类群整体长势较差、有效成分含量和产量低, 综合表现较差。PCA 将 35 个性状简化为 8 个主成分, 累积贡献率为 85.602%。PLS-DA 与 PLS-R 揭示茎高、叶长、根茎粗、粉末色度值 L^* 、 E^*_{ab} 、重楼皂苷 I、II、VII 含量之和对 D 值的贡献较大, 是区分滇重楼优劣的重要性状。结论 综合排名前 3 位的种质为 SZ-16、SZ-11、SZ-9, 具有品质优异和产量较高的特点, 可作为潜在良种进行培育。农艺性状中的茎高、叶长、根茎粗和粉末色度值 L^* 、 E^*_{ab} , 以及品质性状中的重楼皂苷 I、II、VII 含量之和, 可作为筛选优良种质的重要指标。

关键词: 滇重楼; 表型遗传多样性; 相关性分析; 偏最小二乘-判别分析; 重楼皂苷; 综合评价; 优良种质筛选

中图分类号: R282.12 文献标志码: A 文章编号: 0253-2670(2026)19-7807-12

DOI: 10.7501/j.issn.0253-2670.2026.19.024

Phenotypic genetic diversity and comprehensive evaluation of germplasm resources of *Paris polyphylla* var. *yunnanensis*

SU Suocai^{1,3}, JI Bin¹, LI Jingyuan¹, ZHANG Wenli¹, LU Ming¹, LI Kaijun¹, DENG Ying¹, ZHAO Yanli^{1,3}, XU Furong^{1,2}

1. School of Chinese Materia Medica, Yunnan University of Chinese Medicine, Kunming 650500, China

2. Yunnan Key Laboratory of Dai and Yi Medicine, Kunming, 650500, China

3. Yunnan Key Laboratory of Southern Medicinal Sustainable Utilization, Kunming 650500, China

Abstract: Objective To screen high-quality germplasm resources of Dianchonglou (*Paris polyphylla* var. *yunnanensis*), reveal the associations between phenotypic traits and saponin content, and lay a foundation for the exploration of genetic resources and the breeding of improved varieties. **Methods** Through genetic diversity analysis, correlation analysis, cluster analysis (CA), principal component analysis (PCA), partial least squares-discriminant analysis (PLS-DA), and partial least squares-regression analysis (PLS-R), a comprehensive evaluation was conducted on 25 agronomic traits and 10 quality traits of 41 selected *P. polyphylla* var. *yunnanensis* germplasm resources. **Results** The RSD and genetic diversity index (H') for agronomic traits ranged from 3.56% to 66.63% and from 1.80 to 2.25, respectively. For quality traits, RSD and H' ranged from 34.26% to

收稿日期: 2026-02-02

基金项目: 滇重楼新品种选育 (202502AS090021); 云南省科技人才和平台计划 (202105AG070012)

作者简介: 苏锁财 (2000—), 男, 硕士研究生, 研究方向为中药资源开发与利用。Tel: 19988478942 E-mail: ssc2824@163.com

*通信作者: 徐福荣 (1971—), 男, 研究员, 硕士生及博士生导师, 研究方向为中药资源开发与利用。

Tel: 13759178255 E-mail: xfrong99@163.com

130.18% and from 1.47 to 2.00, respectively. The variation in agronomic traits was mainly attributed to the length of the purple stem portion, pedicel length, and pedicel ratio, while the variation in quality traits was mainly attributed to the contents of polyphyllin V, polyphyllin H, and gracillin. Correlation analysis showed that the sum of polyphyllin I, II, and VII contents was positively correlated with plant height, stem diameter, leaf shape index, rhizome diameter, and powder color values L^* and E^*_{ab} . Cluster analysis classified the *P. polyphylla* var. *yunnanensis* germplasm into three major groups: Group I represented high-yield germplasm, Group II represented high-quality germplasm, and Group III exhibited overall poor growth, low active component contents, and low yield, indicating a generally poor comprehensive performance. PCA simplified the 35 traits into eight principal components, with a cumulative contribution rate of 85.602%. PLS-DA and PLS-R revealed that stem height, leaf length, rhizome diameter, powder color values L^* and E^*_{ab} , and the total content of polyphyllin I, II, and VII contributed substantially to the D value, and could serve as important indicators for selecting superior provenances. **Conclusion** The top three germplasm resources based on comprehensive ranking were SZ-16, SZ-11, and SZ-9, which exhibited high quality and high yield, making them potential candidates for cultivation as elite varieties. The stem height, leaf length, rhizome diameter, and powder color values L^* and E^*_{ab} among agronomic traits, together with the total content of polyphyllin I, II, and VII among quality traits, are important characteristics for distinguishing superior from inferior *P. polyphylla* var. *yunnanensis* germplasm. **Key words:** *Paris polyphylla* Smith var. *yunnanensis* (Franch.) Hand. -Mazz; phenotypic genetic diversity; correlation analysis; partial least squares-discriminant analysis; polyphyllins; comprehensive evaluation; elite germplasm screening

滇重楼 *Paris polyphylla* Smith var. *yunnanensis* (Franch.) Hand. -Mazz. 为百合科 (Liliaceae) 重楼属 *Paris* L. 多年生草本植物, 是云南省的道地药材, 始载于汉代《神农本草经》, 具有清热解毒、消肿止痛、凉肝定惊的功效^[1], 其主要成分为重楼皂苷, 主要分布在我国云南、四川、贵州和缅甸北部。近年来, 随着滇重楼的大面积人工种植, 入药品质不稳定已成为引种驯化中迫切需要解决的实际问题^[2]。栽培的滇重楼种质主要来自野生群体, 植株的生长习性、有效成分和抗病性等方面都存在差异, 栽培后难以保证药材品质, 对相关中成药的生产造成较大影响, 优良滇重楼种质选育已成为滇重楼产业的难点和热点。由于滇重楼的基因组较大, 且基因组学的分子育种还不成熟, 所以在滇重楼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意义。已有研究表明, 滇重楼的植物表型性状与药材生物量、皂苷成分间具有关联性。如李戈等^[3]发现滇重楼的茎粗与药材生物量的关系呈极显著正相关; 王骞等^[4]研究表明滇重楼中的皂苷成分, 即重楼皂苷 I、重楼皂苷 II、重楼皂苷 VI 与重楼皂苷 VII 之和与滇重楼植株的叶长、叶形指数 (长宽比) 呈显著正相关关系; 王元忠等^[5]发现滇重楼地上性状与药材生物量鲜质量为正相关关系。目前, 有关滇重楼种质资源及其相关性状遗传多样性的研究仍较为匮乏, 尚难以为其资源利用及新品种选育提供充分的理论支撑。

遗传多样性是生物多样性的核心组成部分, 本

质是同一物种内, 不同个体之间所有遗传信息的总和^[6]。而遗传变异指生物间遗传物质的差异, 是遗传多样性产生的根本原因。研究植物的遗传多样性, 可为其种质资源评价与育种工作提供基础。由于植物基因组在自然界中并不稳定, 进而导致了植物的表观遗传变化频繁, 因此, 植物表型多样性可有效反映物种遗传结构异质性, 是开展种质资源多样性研究的重要切入点^[7]。

本研究基于师宗乔林重楼生物科技有限公司建立的滇重楼种质资源圃, 选择经系统选育法筛选出的 41 份 7 年生滇重楼新品种为供试材料, 通过对它们的 25 个农艺性状和 10 个品质性状采用遗传多样性分析、相关性分析、聚类分析 (cluster analysis, CA)、主成分分析 (principal component analysis, PCA)、偏最小二乘-判别分析 (partial least square-discriminant analysis, PLS-DA) 与偏最小二乘-回归分析 (partial least square-regression analysis, PLS-R)^[8]等方法解析农艺性状、有效成分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滇重楼种质资源综合评价体系, 并筛选出综合表现较优的滇重楼种质, 为新品种选育奠定遗传资源基础。

1 材料与仪器

1.1 材料

本研究选用 7 年生滇重楼材料来自师宗县滇重

楼种质资源圃（师宗乔林重楼生物科技有限公司，103°59'36"E，24°45'37"N，海拔 1 874.2 m，年降雨量 1 392.3 mm），通过田间观测与试验鉴定，筛选出 41 批药材（编号 SZ-1~SZ-41），经云南中医药大学徐福荣研究员鉴定为重楼属植物云南重楼 *P. polyphylla* Smith var. *yunnanensis* (Franch.) Hand.-Mazz。

1.2 仪器与试剂

Agilent 1260 型高效液相色谱仪（美国安捷伦科技公司）；390HA 225SM-DR 型十万分之一电子天平（上海天美天平仪器有限公司）；DLH-100 型高速多功能粉碎机（武义祺腾电器有限公司）；DHG-24 型电热鼓风干燥箱（上海-恒科学仪器有限公司）；YMJ-A 型便携式叶面积测定仪（山东来因光电科技有限公司）；卷尺、直尺、游标卡尺（浙江温岭市三叶量具有限公司）；SB25-12DTD 型超声波清洗机（宁波新芝生物科技股份有限公司）；NH310 型色差仪（深圳三恩驰科技有限公司）。对照品重楼皂苷 I（批号 111590-202105，质量分数≥94.50%），重楼皂苷 II（批号 11591-201604，质量分数≥91.40%）、重楼皂苷 VII（批号 111593-202105，质量分数≥98.40%）及重楼皂苷 VI（批号 111592-201604，质量分数≥97.00%）均购自中国食品药品检定研究院；对照品重楼皂苷 H（批号 201022-111，质量分数≥98.00%）、重楼皂苷 V（批号 20120704，质量分数≥99.07%）重楼皂苷 III（批号 21061701，质量分数≥99.39%）、纤细薯蓣皂苷（批号 21050807，质量分数≥98.91%）购于昆明森岚科技有限公司；甲醇、乙腈（色谱纯、美国默克公司）；水为娃哈哈纯净水，其他试剂均为分析纯。

2 方法

2.1 表型性状的测定

在不同种质滇重楼群体内，随机选取盛花期（7 年生）健康的滇重楼 10 株，各性状的调查标准^[9]见表 1。

2.2 色度值测定

参照课题组前期建立的粉末色度值测定方法^[10]，记录粉末色度值 L^* 、 a^* 、 b^* ，根据公式 $E^*_{ab} = (L^{*2} + a^{*2} + b^{*2})^{1/2}$ 计算总色度值 E^*_{ab} 。

2.3 皂苷含量测定

参照课题组前期建立的色谱条件及方法^[11]，色谱条件：Agilent zorbax SB-Aq 色谱柱（250 mm×4.6 mm，

表 1 滇重楼表型性状及统计标准

Table 1 Phenotypic traits and statistical criteria of *P. polyphylla* var. *yunnanensis*

性状	标准
株高/cm	地上茎基部至顶部的高度
茎高/cm	地上茎基部至叶柄着生处
紫色部分长度/cm	主茎上呈现紫色及紫红色的连续区域长度
茎粗/mm	使用游标卡尺测量主茎基部（距地面 5 cm 处）
叶片数量/个	单株一轮的叶片总数
叶片长/cm	叶基至叶尖的长度
叶片宽/cm	与测量叶长同步，测量同一叶片最宽处的宽度
叶形指数	叶片长/叶片宽
花瓣数量/枚	于盛花期人工计数每朵花中花瓣的实际枚数
花瓣长度/cm	花瓣着生点至花瓣顶端的长度
萼片长/cm	萼片基部至顶端的长度
萼片宽/cm	与测量萼片同步，测量同一萼片最宽处的宽度
萼片面积/cm ²	规范使用便携式叶面积测定仪测定
萼片数量/枚	单株一轮的萼片总数，一般与叶片对应
花梗长度/cm	茎顶叶轮中心至花基部的长度
花梗占比	花梗长/株高
雄蕊数量/枚	人工计数雄蕊的总数，通常为萼片的 2 倍
根茎粗/mm	使用游标卡尺测量根茎中部最粗处的直径
根茎鲜质量/g	冲洗干净后用吸水纸吸干表面水分后用电子天平测量其质量
根茎干质量/g	将鲜品切片烘干至恒定质量后用电子天平测量其质量
干质量率/%	根茎干质量/根茎鲜质量
L^*	粉末色度值，代表亮度， $L^*=0$ 为黑色， $L^*=100$ 为白色， L^* 越大亮度越大
a^*	粉末色度值，代表红绿色度， a^* 为负值时为绿色，正值时为红色
b^*	粉末色度值，代表黄蓝色度， b^* 为负值时为蓝色，正值时为黄色

5 μm)；流动相为水 (A)-乙腈 (B)，梯度洗脱程序为 0~10 min，35%~40% B；10~22 min，40%~42% B；22~23 min，42%~40% B；23~38 min，40% B；38~45 min，40%~47% B；检测波长 203 nm；柱温 25 ℃；体积流量 0.7 mL/min；进样量 10 μL。记录色谱图及峰面积，计算甾体皂苷含量。

2.4 数据处理统计与分析

采用 Excel 2021 进行数据处理并计算其平均值、标准差、RSD 和遗传多样性指数（Shannon-Wiener diversity index, H' ）。根据计算结果将所有材料每个性状划分为 10 个等级，每 1 级的相对频率 (P) 用于 H' 计算^[8]。

$$H' = -\sum P_i \ln P_i \tag{1}$$

P_i 表示第 i 种变异类型出现频率

利用 IBM SPSS Statistics 26.0 进行表型性状的多样性统计分析、相关性分析、CA、PCA，采用 SIMCA 14.1 进行 PLS-DA、PLS-R、VIP 分析。滇重楼表型性状的综合评价：首先依据公式（2）计算各性状隶属函数值；随后依据公式（3）结合 PCA 结果计算各性状权重；最后通过公式（4）利用 35 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^[8]。相关计算公式如下。

$$\mu(X_i) = (X_i - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min}) \quad (2)$$

$\mu(X_i)$ 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

$$W_i = P_i / \sum P_i \quad (3)$$

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

$$D = \sum [\mu(X_i) \times W_i] \quad (4)$$

D 值为每份样品 35 个性状的综合得分，其中， i 表示参与评分的第 i 个性状

3 结果分析

3.1 滇重楼表型性状的遗传多样性分析

对 41 份滇重楼种质资源的 35 个农艺性状进行遗传变异分析，结果见表 2。25 个农艺性状的 RSD 和 H' 分别分布在 3.56%~66.63%、1.80~2.25。RSD 平均值为 19.10%，其中，茎秆紫色部分长 RSD 最大（66.63%），变异幅度在 0~118.00 cm，粉末总色度值 E^*_{ab} RSD 最低（3.56%），变异幅度在 69.54~83.69； H' 平均值为 2.03，除叶片数量、叶片宽、花瓣数量、萼片数量、花梗长度、雄蕊数量、粉末色度值 a^* 、 b^* 等性状外，其他 17 个性状的 H' 均 > 2.00，其中，叶片长 H' 最高（2.25），雄蕊数量 H' 最低（1.80）。

滇重楼种质资源有效成分质量分数的 RSD 和 H' 的结果见表 3，不同有效成分质量分数的 RSD 和 H' 分别在 34.26%~130.18%、1.47~2.00。RSD 平均值为 65.75%，其中，重楼皂苷 V 的 RSD 值最大（130.18%），变异幅度在 0~0.04%，重楼皂苷 I、II、VII 质量分数之和的 RSD 值最小（34.26%），变异幅度在 0.64%~2.06%； H' 平均值为 1.77，其中重楼皂苷 II 和重楼皂苷 VII 的 H' 最高（2.00），重楼皂苷 V 的 H' 最低（1.47）。

3.2 各性状间的相关性分析

为了探究 35 个农艺性状间的关系，本研究对

表 2 滇重楼主要农艺性状的变异情况

Table 2 Variation of main agronomic traits in *P. polyphylla* var. *yunnanensis*

指标	最大值	最小值	平均值	标准差	RSD/%	H'
PH/cm	152.33	59.5	106.84	22.41	20.98	2.13
SH/cm	118.00	40.67	80.30	17.50	21.79	2.07
PC/cm	118.00	0	39.99	26.64	66.63	2.01
SD/mm	2.56	1.14	1.75	0.29	16.32	2.12
LN/个	10.00	5	7.54	0.91	12.03	1.97
LC/cm	22.97	10.87	16.87	2.78	16.46	2.25
LK/cm	10.90	5.27	8.26	1.40	16.88	1.90
LI	3.17	1.44	2.09	0.42	20.31	2.02
FN/个	10.00	5	7.56	0.90	11.97	1.95
FC/cm	6.90	3.27	4.99	0.80	16.11	2.14
SC/cm	10.60	5.07	7.14	1.28	17.97	2.06
SK/cm	3.10	1.7	2.43	0.39	15.95	1.88
SA/cm ²	32.86	9.42	19.21	5.37	27.94	2.17
SN/个	10.00	5	7.56	0.90	11.97	1.83
FLS/cm	38.93	9.77	22.79	7.06	30.98	1.93
FLS/PH	0.40	0.09	0.22	0.08	36.36	2.16
SS/枚	20.00	10	15.12	1.81	11.97	1.80
RD/mm	89.17	22.15	56.12	16.81	29.95	2.03
FW/g	353.41	119.67	225.61	61.18	27.12	2.09
DW/g	123.40	36.17	73.79	20.13	27.27	2.15
DWR	0.35	0.29	0.33	0.01	4.26	2.04
L^*	83.26	69.08	77.27	2.81	3.64	2.02
a^*	4.85	2.55	3.23	0.49	15.17	1.83
b^*	10.72	6.86	8.29	0.80	9.71	1.97
E^*_{ab}	83.69	69.54	77.79	2.77	3.56	2.18

PH-株高；SH-茎高；PC-紫色部分长度；SD-茎粗；LN-叶片数量；LC-叶长；LK-叶宽；LI-叶形指数；FN-花瓣数量；FC-花瓣长度；SC-萼片长；SK-萼片宽；SA-萼片面积；SN-萼片数量；FLS-花梗长；FLS/PH-花梗占比；SS-雄蕊数量；RD-根茎粗；FW-鲜质量；DW-干质量；DWR-干质量率； L^* -亮度； a^* -红绿色度； b^* -黄蓝色度； E^*_{ab} -总色度；下列图表同。

PH-plant height; SH-stem height; PC-length of purple stem portion; SD-stem diameter; LN-leaf number; LC-leaf length; LK-leaf width; LI-leaf shape index; FN-petal number; FC-petal length; SC-sepal length; SK-sepal width; SA-sepal area; SN-sepal number; FLS-pedicel length; FLS/PH-pedicel ratio (FLS/PH); SS-stamen number; RD-rhizome diameter; FW-fresh weight; DW-dry weight; DWR-dry weight rate; L^* -lightness; a^* -redness/greenness value; b^* -yellowness/blueness value; E^*_{ab} -total color difference; The above abbreviations and their corresponding full terms apply to the following figures and tables.

所调查的 35 个性状进行了 Pearson 相关性分析，结果见图 1。表型性状之间存在一定相关性，株高与茎高、茎粗、叶长、根茎粗、粉末色度值 L^* 和 E^*_{ab} 呈极显著正相关（ $P < 0.001$ ），与叶形指数和花梗长呈显著正相关（ $P < 0.05$ ），与粉末色度值 a^* 呈极显著负相关（ $P < 0.001$ ）；茎高与茎粗、叶长、根茎粗、

表 3 滇重楼有效成分变异情况
Table 3 Variation of active components in *P. polyphylla* var. *yunnanensis*

指标	质量分数/%			标准差	RSD/%	<i>H'</i>
	最大值	最小值	均值			
PPVII	0.45	0.03	0.19	0.10	55.21	2.00
PPH	0.36	0.00	0.11	0.09	80.01	1.84
PPVI	0.20	0.03	0.09	0.05	52.02	1.88
PPII	0.60	0.08	0.26	0.12	48.82	2.00
PPIII	0.09	0.02	0.05	0.02	36.31	1.67
PPG	0.46	0.00	0.11	0.10	89.69	1.73
PPI	1.28	0.27	0.57	0.24	42.70	1.83
PPV	0.04	0.00	0.01	0.01	130.18	1.47
PRTS	2.92	0.82	1.38	0.48	34.89	1.54
I+II+VII	2.06	0.64	1.01	0.35	34.26	1.74

PPVII-重楼皂苷 VII; PPH-重楼皂苷 H; PPVI-重楼皂苷 VI; PPII-重楼皂苷 II; PPIII-重楼皂苷 III; PPG-纤细薯蓣皂苷; PPI-重楼皂苷 I; PPV-重楼皂苷 V; PRTS-重楼总皂苷; I+II+VII-重楼皂苷 I、II、VII 含量之和; 下列图表同。

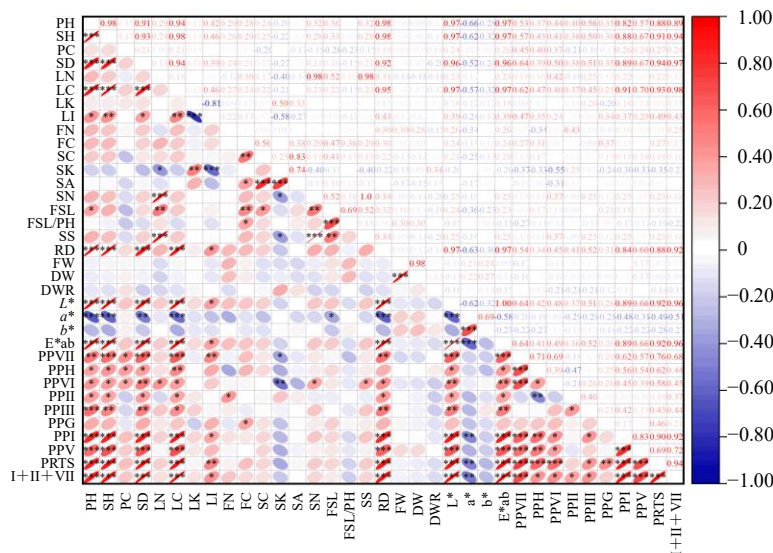
PPVII-polyphyllin VII; PPH-polyphyllin H; PPVI-polyphyllin VI; PPII-polyphyllin II; PPIII-polyphyllin III; PPG-gracillin; PPI-polyphyllin I; PPV-polyphyllin V; PRTS-total saponins of *Paris polyphylla* var. *yunnanensis*; I+II+VII-total content of polyphyllin I, II and VII; The above abbreviations and their corresponding full terms apply to the following figures and tables.

粉末色度值 L^* 和 E^*_{ab} 呈极显著正相关 ($P<0.001$), 与叶形指数呈中等显著正相关 ($P<0.01$), 与粉末色度值 a^* 呈极显著负相关 ($P<0.001$); 茎粗与叶长、根茎粗、粉末色度值 L^* 和 E^*_{ab} 呈极显著正相关 ($P<0.001$), 与叶形指数呈显著正相关 ($P<0.05$),

与粉末色度值 a^* 呈中等显著负相关 ($P<0.01$); 叶片数量与萼片数量和雄蕊数量呈极显著正相关 ($P<0.001$), 与花梗长呈中等显著正相关 ($P<0.01$), 与萼片宽呈显著负相关; 叶片长与根茎粗、粉末色度值 L^* 和 E^*_{ab} 呈极显著正相关 ($P<0.001$), 与粉末色度值 a^* 呈极显著负相关 ($P<0.001$); 叶片宽与萼片宽、花瓣长与萼片长呈中等显著正相关 ($P<0.01$)。

根茎中不同重楼皂苷含量之间也存在一定的相关性其中重楼皂苷 I、II、VII 含量之和与重楼皂苷 VII、重楼皂苷 I 和重楼皂苷 V 呈极显著正相关 ($P<0.001$), 与重楼皂苷 H、重楼皂苷 VI、重楼皂苷 II、重楼皂苷 III 呈显著正相关 ($P<0.05$); 重楼皂苷 II 与重楼皂苷 H 呈中等显著负相关 ($P<0.01$)。

同时, 植株的表型性状与其根茎中不同重楼皂苷含量间也存在一定相关性, 重楼皂苷 I、II、VII 总含量与株高、茎高、茎粗、叶长、根茎粗、粉末色度值 L^* 和 E^*_{ab} 呈极显著正相关 ($P<0.001$), 与叶形指数呈显著正相关 ($P<0.05$), 与粉末色度值 a^* 呈中等显著负相关 ($P<0.01$); 重楼皂苷 VII、重楼皂苷 I、重楼皂苷 V 分别与多个表型性状呈极显著正相关 ($P<0.001$), 如茎高、茎粗、叶长、粉末色度值 L^* 和 E^*_{ab} ; 重楼皂苷 VI 与萼片宽呈中等显著负相关 ($P<0.01$); 纤细薯蓣皂苷与花瓣长呈显著正相关 ($P<0.05$), 与其余性状无相关性; 根茎鲜质量和干质量与多数皂苷含量无显著相关性。



* $P<0.05$ ** $P<0.01$ *** $P<0.001$.

图 1 各性状的相关性分析

Fig. 1 Correlation analysis of traits

3.3 不同滇重楼种质资源聚类分析

为了明确滇重楼群体间的遗传多样性,采用系统聚类平方欧氏距离法对 41 份滇重楼种质资源的 35 个农艺性状进行聚类分析(图 2),在欧式距离 20 时可将该群体分成 3 大类群。第 I 类群包含 25 份不同的滇重楼种质,分别是 SZ-2、SZ-3、SZ-5、SZ-7、SZ-8、SZ-10、SZ-12、SZ-14、SZ-15、SZ-17、SZ-18、SZ-21、SZ-22、SZ-28、SZ-30、SZ-31、SZ-32、SZ-33、SZ-34、SZ-35、SZ-36、SZ-37、SZ-38、SZ-40、SZ-41。第 II 类群包含 6 份不同的滇重楼种质,分别是 SZ-1、SZ-6、SZ-9、SZ-11、SZ-16、SZ-29。第 III 类群包含 10 份不同的滇重楼种质,分别是 SZ-4、SZ-13、SZ-19、SZ-20、SZ-23、SZ-24、SZ-25、SZ-26、SZ-27、SZ-39。比较每一类群各性状平均值和 RSD,结果表明(表 4),第 I 类群萼片宽、地下根茎鲜质量、地下根茎干质量的均值最大、RSD 较小,重楼皂苷总皂苷含量和重楼皂苷 I、II、VII 含量之和的均值居中、RSD 较小。第 II 类群株高、茎高、茎粗、叶长、叶形指数、根茎粗、粉末色度值 L^* 和 E^*_{ab} 、重楼皂苷总皂苷含量和重楼皂苷 I、II、VII 总含量的均值最大、RSD 较小,地下根茎鲜质量、地下根茎干质量的均值居中、RSD 较小。第 III 类群多个性状的均值最低、重楼皂苷总皂苷含量和重楼皂苷 I、II、VII 含量之和均值最低、RSD 较小。

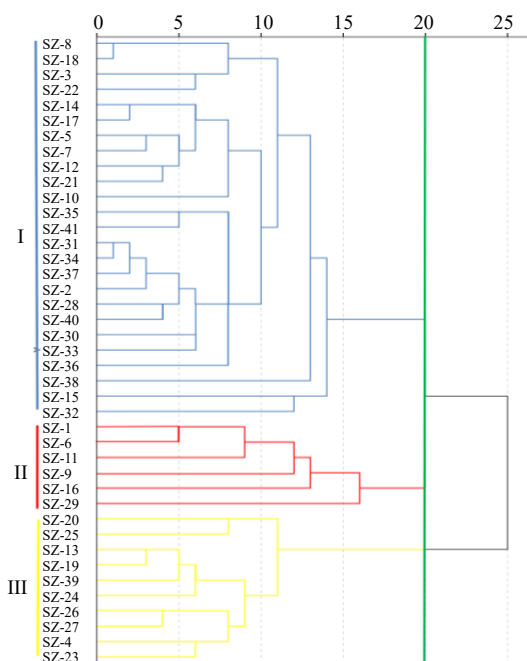


图 2 不同滇重楼种质资源聚类分析

Fig. 2 Cluster analysis of different germplasm resources of *P. polyphylla* var. *yunnanensis*

表 4 各类群性状平均值和 CV 统计与比较

Table 4 Statistics and comparison of mean values and CV of traits among different groups

性状	Cluster I		Cluster II		Cluster III	
	平均值	RSD/%	平均值	RSD/%	平均值	RSD/%
PH	110.70	11.49	138.75	6.69	78.05	13.58
SH	82.20	11.35	107.74	5.74	59.09	16.53
PC	38.40	56.14	53.51	52.49	24.53	59.97
SD	1.80	5.05	2.18	10.22	1.38	13.31
LN	7.31	12.21	7.39	3.40	8.20	11.21
LC	16.98	7.79	21.73	4.48	13.65	9.72
LK	8.10	16.67	8.21	17.46	8.71	17.60
LI	2.16	19.61	2.70	13.95	1.61	19.30
FN	7.59	13.07	7.78	11.07	7.37	9.88
FC	4.90	14.91	5.32	15.26	5.00	19.82
SC	6.95	16.53	7.66	21.94	7.30	19.01
SK	2.46	14.72	2.35	16.09	2.38	19.98
SA	17.27	24.62	18.31	30.47	17.56	31.63
SN	7.35	12.25	7.39	3.40	8.20	11.21
FSL	22.50	34.65	22.83	20.36	23.48	29.08
FSL/PH	0.20	30.26	0.17	24.37	0.30	28.13
SS	14.69	12.25	14.78	3.40	16.40	11.21
RD	59.38	13.97	80.34	8.15	33.42	22.27
FW	237.45	24.25	210.70	21.86	194.95	26.20
DW	77.80	24.58	68.91	21.07	63.51	26.87
DWR	0.33	4.17	0.33	4.77	0.33	5.07
L^*	77.61	1.53	81.57	1.88	73.85	2.87
a^*	3.18	14.68	2.78	5.83	3.62	11.21
b^*	8.41	10.49	7.78	4.44	8.30	8.68
E^*_{ab}	78.14	1.46	81.99	1.90	74.41	2.84
PPVII	0.16	45.96	0.35	17.91	0.16	59.33
PPH	0.10	70.51	0.23	45.93	0.07	96.32
PPVI	0.09	48.92	0.13	48.14	0.07	53.78
PPII	0.27	47.98	0.34	37.02	0.18	42.21
PPIII	0.05	33.63	0.07	21.20	0.03	19.10
PPG	0.11	60.44	0.17	117.78	0.06	61.19
PPI	0.54	25.96	1.00	22.04	0.36	18.49
PPV	0.01	112.99	0.02	68.13	0.00	141.10
PRTS	1.32	17.36	2.31	15.44	0.94	13.26
I+II+VII	0.97	15.57	1.70	15.89	0.70	5.38

3.4 不同滇重楼种质 PCA

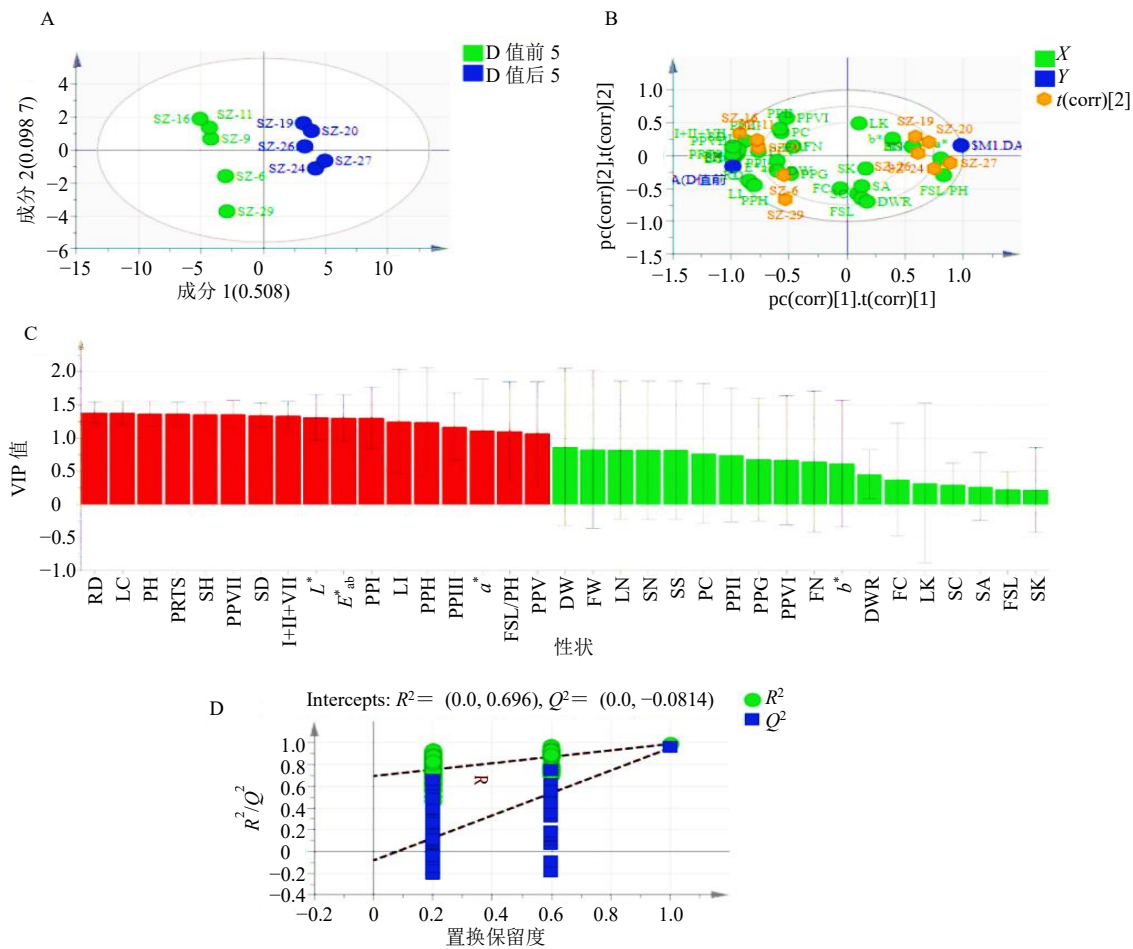
对不同滇重楼种质的 35 个性状进行 PCA(图 3),分析结果显示(表 5),所有性状提取了 8 个主成分,累积贡献率为 85.602%。第 1 和第 7 主成分的特征值和贡献率,分别为 12.879、37.880%和 1.307、3.843%,主要包括株高(0.969)、茎高(0.973)、茎粗(0.947)、叶片长(0.976)、根茎粗(0.948)、

表 5 滇重楼各性状的 PCA 结果
Table 5 PCA results of various traits in *P. polyphylla* var. *yunnanensis*

性状	主成分							
	1	2	3	4	5	6	7	8
PH	0.969	-0.053	-0.004	0.021	-0.035	0.090	-0.047	0.129
SH	0.973	-0.056	0.043	0.039	-0.029	0.086	-0.078	0.077
PC	0.311	-0.176	0.475	-0.497	0.231	0.092	0.099	0.067
SD	0.947	-0.092	0.063	-0.095	-0.022	0.114	-0.061	0.115
LN	-0.115	0.935	0.069	0.143	0.009	-0.161	-0.020	0.044
LC	0.976	-0.073	0.096	0.017	-0.027	0.064	-0.082	0.024
LK	0.019	0.177	0.013	-0.012	0.905	0.052	-0.074	-0.151
LI	0.593	-0.222	0.087	0.038	-0.690	-0.018	-0.025	0.136
FN	0.275	-0.092	-0.348	0.174	-0.095	0.501	-0.293	-0.281
FC	0.050	0.206	0.130	0.459	0.218	0.122	-0.337	0.485
SC	0.105	0.075	0.033	0.789	0.290	-0.098	-0.183	0.077
SK	-0.017	-0.410	-0.198	0.212	0.792	-0.064	0.126	0.065
SA	0.060	-0.205	-0.090	0.640	0.650	-0.093	-0.068	0.090
SN	-0.083	0.941	0.010	0.157	0.008	-0.121	-0.047	0.009
FSL	0.140	0.399	0.098	0.718	-0.113	0.163	0.093	0.048
FSL/PH	-0.460	0.416	0.101	0.625	-0.063	0.040	0.121	-0.092
SS	-0.083	0.941	0.010	0.157	0.008	-0.121	-0.047	0.009
RD	0.948	-0.091	0.016	0.045	-0.065	0.101	-0.055	0.107
FW	0.123	-0.120	0.047	-0.037	0.006	0.963	0.080	0.033
DW	0.114	-0.190	0.108	-0.005	0.014	0.941	0.147	0.023
DWR	-0.040	-0.429	0.332	0.228	0.013	-0.044	0.428	-0.064
L^*	0.966	-0.069	0.052	-0.006	0.007	0.063	-0.040	0.049
a^*	-0.627	0.055	0.097	-0.156	-0.023	-0.020	0.578	-0.065
b^*	-0.127	-0.093	-0.081	-0.086	0.004	0.187	0.853	-0.017
E^* ab	0.966	-0.073	0.051	-0.010	0.008	0.068	-0.007	0.049
PPVII	0.481	0.062	0.711	-0.024	-0.186	-0.041	-0.101	0.002
PPH	0.408	-0.024	0.799	0.075	-0.096	0.074	-0.053	0.129
PPVI	0.372	0.346	0.406	-0.336	-0.227	-0.016	-0.096	0.139
PPII	0.469	-0.125	-0.692	-0.140	0.045	-0.055	-0.173	0.087
PPIII	0.744	0.065	-0.321	-0.096	-0.006	0.010	0.289	0.093
PPG	0.377	0.024	0.037	0.063	-0.253	-0.021	-0.019	0.765
PPI	0.894	0.040	0.258	0.005	0.015	0.035	-0.069	-0.139
PPV	0.632	0.008	0.447	0.083	0.003	0.169	-0.143	-0.392
PRTS	0.904	0.038	0.294	-0.047	-0.112	0.006	-0.116	0.142
I+II+VII	0.938	0.001	0.143	-0.054	-0.029	-0.008	-0.141	-0.065
初始特征值	12.879	4.262	3.433	2.462	1.989	1.739	1.307	1.035
贡献率/%	37.880	12.535	10.096	7.240	5.850	5.114	3.843	3.043
累积贡献率/%	37.880	50.415	60.511	67.751	73.602	78.716	82.559	85.602

长、粉末色度值 a^* 、 b^* 、叶片数量、萼片数量、雄蕊数量、叶片宽、萼片长、萼片宽、萼片面积等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，红色矩形），根茎粗、叶长、株高、重楼总皂苷含量、茎高、PPVII、茎粗、重楼皂苷 I、II、VII 含量之和、粉末色度值 L^* 、 E^* ab、PPI、叶形指数、PPH、PPIII、粉末色度值

a^* 、花梗占比、PPV>1.00，可作为区分优劣种质的关键性状。结合性状均值比较发现，得分较高的表型性状根茎粗、叶长、株高、茎高、茎粗、粉末色度值 L^* 、 E^* ab、叶形指数、重楼总皂苷含量、重楼皂苷 I、II、VII 含量之和数值显著高于得分较低的表型，但粉末色度值 a^* 、花梗占比显著高于得分较高的表型。



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-scatter plot of PCA scores; B-scatter plot of PLS-DA scores; C-VIP values of various trait indicators; D-permutation test plot.

图 4 D 值排名前 5 与 D 值排名后 5 供试材料的 PLS-DA

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

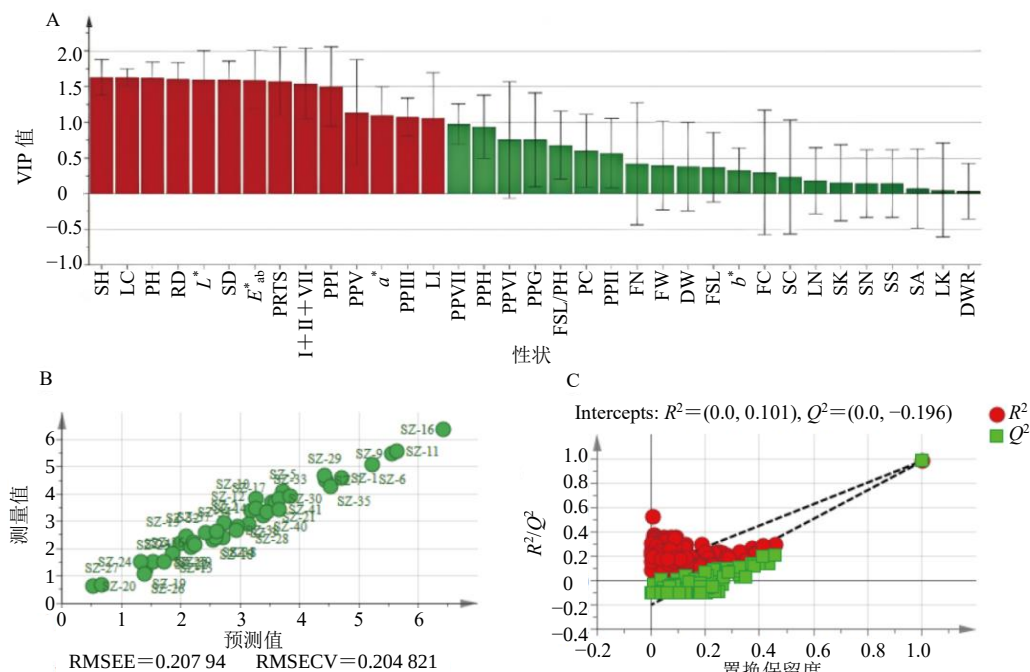
表 9 滇重楼种质资源的综合评价与排名

Table 9 Comprehensive evaluation and ranking of *P. polyphylla* var. *yunnanensis* germplasm resources

种质编号	综合得分	排名	种质编号	综合得分	排名	种质编号	综合得分	排名
SZ-16	6.38	1	SZ-14	3.46	15	SZ-18	2.31	29
SZ-11	5.58	2	SZ-41	3.45	16	SZ-36	2.23	30
SZ-9	5.47	3	SZ-12	3.40	17	SZ-4	2.20	31
SZ-6	5.09	4	SZ-40	3.34	18	SZ-39	2.12	32
SZ-29	4.69	5	SZ-3	3.22	19	SZ-22	2.06	33
SZ-1	4.61	6	SZ-2	2.92	20	SZ-13	1.84	34
SZ-7	4.51	7	SZ-28	2.90	21	SZ-25	1.53	35
SZ-35	4.28	8	SZ-34	2.79	22	SZ-23	1.51	36
SZ-5	4.12	9	SZ-38	2.66	23	SZ-24	1.51	37
SZ-33	3.92	10	SZ-37	2.63	24	SZ-19	1.27	38
SZ-30	3.82	11	SZ-32	2.57	25	SZ-26	1.07	39
SZ-10	3.81	12	SZ-15	2.44	26	SZ-27	0.67	40
SZ-17	3.72	13	SZ-8	2.41	27	SZ-20	0.62	41
SZ-21	3.70	14	SZ-31	2.40	28			

为量化各表型性状与植株综合评分的关系,以 41 份滇重楼种质资源的 D 值为 Y 变量,35 个性状为 X 变量,建立 Y 与 X 的 PLS-R。结果表明(图 5-A, 红色矩形),茎高、叶长、株高、根茎粗、粉末色度值 L^* 、茎粗、 E^*_{ab} 、总皂苷含量、I、II、VII 总含量、PPI、PPV、粉末色度值 a^* 、PPIII、叶形指数对 D 值的预测贡献最大, VIP 值均大于 1.00。设定上述 14 个数量性状为 X

变量,样品 D 为 Y 变量,再次建立回归模型;结果显示(图 5-B): 14 个性状与 D 值线性关系良好, PLS-R 模型决定系数 (R^2) = 0.984, 均方根误差 (RMSEE) 及交叉验证均方根误差 (RMSCV) 分别为 0.208 和 0.205; 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 14 个性状是计算滇重楼种质资源综合评分的重要性状。



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 of various trait indicators; B-regression model of measured values and predicted values; C-permutation test plot.

图 5 滇重楼供试材料 D 值与 35 个性状的 PLS-R

Fig. 5 PLS-R analysis of D values and 35 traits in test materials of *P. polyphylla* var. *yunnanensis*

4 讨论

4.1 滇重楼表型遗传多样性及变异分析

药用植物表型性状的 H' 和 RSD 越大,则遗传多样性水平越高,高产量、高品质的良种选育时选择潜力越大^[12]。本研究基于 41 份滇重楼种质资源,通过对 35 个主要性状指标进行分析,发现它们的 H' 和 RSD 均较大,表现出较高的遗传多样性,这与前人基于分子标记分析滇重楼存在丰富变异的结果一致^[13],说明滇重楼存在较为丰富的变异类型。 H' 作为评价遗传多样性的重要指标之一,滇重楼的农艺性状 H' (平均值为 2.03) 大于品质性状 H' (平均值为 1.77),说明在滇重楼群体中农艺性状的遗传多样性比品质性状丰富。

RSD 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^[8]。有研究表明,当参试群体某一性状 RSD > 10% 时,表明该性状具有丰富的遗传变异^[14]。本研究结果表明,35 个性状的 RSD 值在 3.56%~130.18%,表明滇重楼种质资源具有较高的多样性水平和品种改良的潜力。农艺性状的变异主要来源于茎秆紫色部分长 (66.63%)、花梗占比 (30.98%)、花梗长 (30.98%) 等,且除干质量率、粉末色度值 L^* 、 b^* 、 E^*_{ab} ,其余性状均大于 10%,表现出丰富的遗传变异。类似地,苏泽春等^[15]对云南地区 23 份野生变家种的滇重楼的 16 个农艺性状进行了测定与分析,结果表明,16 个农艺性状具有较大的变异潜力,其结果与本研究基本一致。品质性状的变异主要来源于重楼皂苷 V (130.18%)、纤细薯蓣皂苷 (89.69%)、重楼皂苷 H (80.01%),三者 RSD 较大但 H' 较小,原因是其在多个滇重楼种质中未检测到

且在该群体中的极值差异大,导致 RSD 值较大。目前研究也发现滇重楼的不同皂苷对不同肿瘤细胞具有抑制作用^[16],因此有效成分含量可作为滇重楼良种选育的重要指标。以上研究结果表明,滇重楼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,可为后续滇重楼优良种质筛选及特异性状挖掘提供必要的遗传资源。

4.2 滇重楼种质资源综合评价

相关性分析是衡量 2 个变量之间关系强度和方向的多元统计分析方法。本研究对 41 份供试材料的株高、茎高、叶长等 25 个农艺性状,以及药典规定^[17]的中药重楼评价性指标成分重楼皂苷 I、II、VII 和文献报道^[18]的重楼皂苷 H、V、III 等 10 个品质指标进行相关性分析发现,滇重楼的重楼皂苷 I、II、VII 含量之和与多个农艺性状表现出了显著正相关,如株高、茎高、茎粗、叶长、叶形指数、根茎粗、粉末色度值 L^* 和 E^*_{ab} 等,与王赛等^[4]研究发现重楼皂苷 I、II、VI、VII 之和与滇重楼植株的叶长、叶形指数呈显著正相关关系的结果相似,由此可知,茎秆高大粗壮、叶长较长、叶形指数大和根茎粗的滇重楼种质皂苷成分含量较高,且也可看出在一定程度上,滇重楼药材断面偏浅白色,皂苷成分含量相对较高,这与重楼以根条粗壮、粉性足、断面白色者为佳相一致^[19],可为完善该药材的质量评价体系提供参考。根茎鲜质量可作为产量的代表,通过相关性分析,并结合聚类分析发现,滇重楼根茎鲜质量与其有效成分含量无显著相关性,因此可知滇重楼在生产上难以兼顾高产和高有效成分含量。本研究还发现 10 个有效成分含量之间存在显著或极显著的相关性,重楼总皂苷含量和重楼皂苷 I、II、VII 含量之和与各单体皂苷均呈显著正相关,表明各单体皂苷是构成总皂苷的主要化学物质基础,它们在含量消长上存在协同关系。

聚类分析是研究作物种质资源的亲缘关系及起源的常用手段,可以直观体现种质个体间相关性的分类^[20]。研究结果将滇重楼材料分成 3 大类群,各个类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 类群整体表现产量高、有效成分含量较低,属高产型种质。第 II 类群整体表现长势好、有效成分含量高、产量较低,属高品质种质,第 III 类群多个性状的均值最低、整体长势较差、有效成分含量和产量最低,综合表现较差。

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,可用于综合评价^[21]。在本研究中,8 个主成分的特征值均大于 1.00,累积贡献率为 85.602%,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 8 个主成分的基础上结合 25 个农艺性状和 10 个品质性状的 μ 值对 41 份表型的数量性状进行综合评分,结果显示 SZ-16 表型的 D 值最高,可优先作为高潜质良种进行培育。

4.3 优良种质的性状筛选

为提高滇重楼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 发现根茎粗、叶长、株高、重楼总皂苷含量、茎高、重楼皂苷 VII、茎粗、重楼皂苷 I、II、VII 总含量、粉末色度值 L^* 、 E^*_{ab} 、重楼皂苷 I、叶形指数、重楼皂苷 H、重楼皂苷 III、粉末色度值 a^* 、花梗占比和重楼皂苷 V 等性状可作为区分优劣种质的重要性状;通过 PLS-R 分析则发现,茎高、叶长、株高、根茎粗、粉末色度值 L^* 、茎粗、 E^*_{ab} 、总皂苷含量、重楼皂苷 I、II、VII 总含量、重楼皂苷 I、重楼皂苷 V、粉末色度值 a^* 、重楼皂苷 III 和叶形指数对 D 值的预测贡献较大,该结果可优化后续的种质筛选过程,减少评价指标,提高筛选和培育良种的效率和精准度。然而,重楼皂苷 H 和重楼皂苷 V 在该群体中的极值差异较大,导致其 RSD 值过高,表明这 2 个性状的稳定性和一致性较差;此外,重楼皂苷 III 的含量较低(均值为 0.05%),且重楼皂苷 V 的含量亦最低(均值为 0.01%),与本实验室前期研究发现重楼皂苷 H、V、III 的含量低的结果一致^[22],同时,孙涵珠等^[23]研究发现健康及患病滇重楼中均未检测到重楼皂苷 V,重楼皂苷 H 仅在茎腐病滇重楼中检测到且含量较高,该结果可认证本研究结果,因此,这 3 个品质性状均不宜作为筛选优良种质的指标。

综上所述,本研究通过表型遗传多样性及变异分析、相关性分析、CA、PCA、PLS-DA、PLS-R 等综合分析方法对 41 份滇重楼种质资源的 25 个农艺性状和 10 个品质性状进行评价,发现滇重楼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 位的种质为 SZ-16、SZ-11、SZ-9,具有品质优异和产量较高的特点。滇重楼农艺性状中的茎高、叶长、根茎粗和粉末色度值 L^* 、 E^*_{ab} ,以及品质性状

中的重楼皂苷 I、II、VII 含量之和,在滇重楼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滇重楼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] 王元忠,沈涛. 红外光谱结合化学计量学对栽培滇重楼的产地鉴别研究 [J]. 中草药, 2023, 54(5): 1574-1581.
- [2] 施桂萍,王佳恩,马莉,等. 药材品质与药用植物表型性状间相关性研究进展 [J]. 中药材, 2024, 47(7): 1853-1861.
- [3] 李戈,王艳芳,唐玲,等. 滇重楼表型性状变异、主成分、相关及通径分析 [J]. 中药材, 2015, 38(7): 1339-1342.
- [4] 王骞,丁媛,杨敏,等. 滇重楼品质与产地和表型性状相关性分析 [J]. 中国中药杂志, 2019, 44(15): 3203-3212.
- [5] 王元忠,沈涛,张金渝. 滇重楼及其近缘种的表型变异与资源评价 [J]. 热带作物学报, 2021, 42(9): 2535-2541.
- [6] Zhou N, Xu L F, Park S M, *et al.* Genetic diversity, chemical components, and property of biomass *Paris polyphylla* var. *yunnanensis* [J]. *Front Bioeng Biotechnol*, 2021, 9: 713860.
- [7] 王良婷,丁晓霞,徐金智,等. 贵州朱砂根种质的表型性状及 DNA 条形码多样性分析 [J]. 世界中医药, 2025, 20(12): 2042-2049.
- [8] 杨泽敏,王业,吴宇涵,等. 川贝母种质资源的表型多样性及综合评价 [J]. 中草药, 2025, 56(2): 635-646.
- [9] 赵万顺,高文远,黄贤校,等. 重楼属药用植物的数量分类学研究 [J]. 中国中药杂志, 2010, 35(12): 1518-1520.
- [10] 蔡吹,张保得,符莹莹,等. 基于色差原理分析重楼有效成分含量与颜色的相关性研究 [J]. 中药材, 2025, 48(5): 1193-1199.
- [11] 赵艳丽,赖佳辉,蔡吹,等. 生长年限对滇重楼中甾体皂苷活性成分和生物量积累的影响 [J]. 中草药, 2023, 54(21): 7156-7165.
- [12] 童凯,孙旭,姜美杰,等. 华重楼的形态多样性及其与单株产量和质量的关系 [J]. 中国中药杂志, 2017, 42(7): 1300-1303.
- [13] Zhao X P, Zou G F, Zhao J, *et al.* Genetic relationships and diversity among populations of *Paris polyphylla* assessed using SCoT and SRAP markers [J]. *Physiol Mol Biol Plants*, 2020, 26(6): 1281-1293.
- [14] 刘靛,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.
- [15] 苏泽春,王泽清,陈翠. 运用聚类分析与 TOPSIS 法综合评价云南重楼种质资源 [J]. 贵州农业科学, 2015, 43(4): 16-19.
- [16] Liu X W, Sun Z T, Li D D, *et al.* Polyphyllin I inhibits invasion and epithelial-mesenchymal transition via CIP2A/PP2A/ERK signaling in prostate cancer [J]. *Int J Oncol*, 2018: 5678.
- [17] 中国药典 [S]. 一部. 2025: 1945.
- [18] 巨博雅,李燕敏,朱厚达,等. 关于完善 2020 年版《中国药典》重楼饮片质量标准 [J]. 中国实验方剂学杂志, 2019, 25(19): 256.
- [19] 卫生报馆编辑部. 中药大辞典 [M]. [影印本]. 上海: 上海交通大学出版社, 2018: 530.
- [20] Sharma S, Kour K, Bakshi P, *et al.* Exploring variability parameters, character association studies, and genetic divergence in pomegranate (*Punica granatum* L.) from temperate regions of North-Western Himalaya [J]. *Plant Physiol Biochem*, 2025, 229: 110605.
- [21] 赵美茜,姚雪莲,杨明,等. 基于 HPLC 指纹图谱结合化学模式识别及多成分定量测定的当归酒炙前后质量评价 [J]. 中草药, 2026, 57(1): 64-72.
- [22] 余红娅,赵艳丽,刘光华,等. 感病对滇重楼根茎中甾体皂苷积累的影响 [J]. 云南农业大学学报: 自然科学版, 2025(3): 117-125.
- [23] 孙涵珠,杨琬卿,刘嘉灏,等. 基于一测多评与化学计量分析的滇重楼及其近缘种质量评价方法 [J]. 中华中医药学刊, 2024, 42(3): 160-168.

[责任编辑 时圣明]