

# 福建武平朱砂根种质资源表型性状遗传多样性分析

罗小婷<sup>1,2</sup>, 刘行发<sup>3</sup>, 蔡长福<sup>2</sup>, 廖柏林<sup>4</sup>, 张盛钟<sup>4</sup>, 张森行<sup>3</sup>, 蔡邦平<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup>福建农林大学风景园林与艺术学院, 福州 350002; <sup>2</sup>厦门市园林植物园, 福建厦门 361003; <sup>3</sup>福建省武平南坊国有林场, 龙岩 364300; <sup>4</sup>福建省龙岩市林业种苗站, 龙岩 364000)

**摘要:** 为了研究朱砂根 (*Ardisia crenata* Sims) 种质资源表型多样性, 对 56 份朱砂根种质资源的 32 个表型性状进行分析。多样性分析结果表明 56 份朱砂根种质存在丰富的变异, 18 个质量性状的 Shannon-Wiener 指数变化范围为 0.3~1.247, 均值为 0.734; 14 个数量性状 Shannon-Wiener 指数 1.931~2.071, 均值 2.007, 变异系数 8.98%~46.32%, 均值 23.3%。相关性分析结果表明, 果枝部位颜色的相关性显著, 主干和果枝的生长数量性状之间呈极显著相关。主成分分析结果表明, 8 个主成分累计贡献率达到 76.34%, 主要为植株与果枝长度, 果实、叶片等颜色, 是朱砂根种质表型差异的主要因素; 筛选获得 5 个综合得分高的朱砂根优良种质资源。聚类分析可将 56 份朱砂根种质分为 6 个类群, 不同类群间表型性状存在较大差异。丰富的表型多样性和变异类型为朱砂根优良种质资源的选育、开发和利用奠定了基础。

**关键词:** 朱砂根; 种质资源; 表型多样性; 主成分分析; 聚类分析; 综合评价

## Genetic Diversity Analysis of Phenotypic Traits in *Ardisia crenata* Germplasm Resources in Wuping, Fujian

LUO Xiaoting<sup>1,2</sup>, LIU Xingfa<sup>3</sup>, CAI Changfu<sup>2</sup>, LIAO Bolin<sup>4</sup>, ZHANG Shengzhong<sup>4</sup>, ZHANG Senhang<sup>3</sup>, CAI Bangping<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup>College of Landscape Architecture and Art, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002; <sup>2</sup>Xiamen Botanical Garden, Xiamen 361003, Fujian; <sup>3</sup>Fujian Wuping Nanfang State Forestry Farm, Longyan 364300; <sup>4</sup>Fujian Longyan Forestry Seedling Station, Longyan 364000)

**Abstract:** To explore the phenotypic diversity of *A. crenata* germplasm resources, 32 phenotypic traits of 56 *A. crenata* germplasm resources were analyzed. Diversity analyses showed that 56 *A. crenata* germplasm had enriched variation, with the Shannon-Wiener indices of 18 qualitative traits varying from 0.3 to 1.247, with a mean value of 0.734, and 14 quantitative traits with Shannon-Wiener indices ranging from 1.931 to 2.071, with a mean value of 2.007, and coefficients of variation 8.98%~46.32%, mean value 23.3%. The results of the correlation analysis showed that the correlation of the color of fruiting branch parts was significant, and there was a highly significant correlation between the growth quantity traits of the main stem and fruiting branches. Principal component analysis indicated that eight principal components with a cumulative contribution of 76.34%, mainly plant and fruiting

收稿日期: 2024-05-28 网络出版日期:

第一作者研究方向为园林植物与观赏园艺, E-mail: 1221775039@fafu.edu.cn

通信作者: 张森行, 研究方向为林业种苗花卉, E-mail: shbslc020@sina.com

蔡邦平, 研究方向为园林植物与观赏园艺, E-mail: caibangping@xiamenbg.com

基金项目: 福建省林业科技项目 (闽林科便函 [2020] 9 号); 福建省种业创新与产业化工程 (2021-2025 年) 项目 (ZYCX-LY-202104); 厦门市社会发展领域指导性项目 (3502Z2024ZD4013)

Foundation projects: Fujian Forestry Science and Technology Project (Letter of Fujian Forestry Science and Technology [2020] No.9); Fujian Seed Industry Innovation and Industrialisation Project (2021-2025) (ZYCX-LY-202104); Xiamen Municipal Directed Project in the Field of Social Development (3502Z2024ZD4013)

branch length, fruit and leaf color, were the main factors for phenotypic differences in *A. crenata* germplasm; five excellent germplasm resources of *A. crenata* with high composite scores were obtained by screening. Cluster analysis could classify the 56 *A. crenata* germplasm into six taxa, and there were large differences in phenotypic traits among different taxa. The abundant phenotypic diversity and varietal types provide a basis for the selection, development, and utilization of superior germplasm resources of *A. crenata*.

**Key words:** *Ardisia crenata*; germplasm resources; phenotypic diversity; principal component analysis; cluster analysis; comprehensive evaluation

朱砂根为报春花科紫金牛属植物，又名富贵籽、大罗伞、黄金万两等，分布于我国长江以南大部分地区，生长于海拔 100-2400 米的疏、密林下荫湿的灌木丛中，印度、缅甸、马来半岛、印度尼西亚至日本有分布<sup>[1]</sup>。朱砂根果实球形，成熟果色红艳，果量丰富，自 10 月（国庆节）至翌年 3 月（春节后）挂果，被赋予“富贵”、“团圆”、“多子多福”等寓意，是深受消费者喜爱的极佳观果植物。

自上世纪 90 年代福建省武平县开始引种驯化培育后，朱砂根逐渐发展成为当地的特色花卉产业。朱砂根作为新兴观果植物，其栽培历史极为短暂，国内外对于朱砂根的研究主要集中于生理生化<sup>[2-4]</sup>、繁殖栽培<sup>[5-7]</sup>、药理作用<sup>[8-11]</sup>、种质资源多样性<sup>[12-14]</sup>等方面。在云南、广东、浙江、江西、海南、贵州等朱砂根分布地，均有研究者对当地紫金牛属植物资源进行调查和评价<sup>[15-20]</sup>，为紫金牛属植物的开发利用提供依据；毛世忠等<sup>[21]</sup>利用层次分析法对广西的紫金牛属野生观赏植物进行综合评价，结果以朱砂根综合评价值最高，最具观赏价值和开发潜力；骆亮等<sup>[22]</sup>利用荧光 ISSR 对福建省 20 个朱砂根野生居群的 255 个植株进行遗传多样性及遗传结构分析；陶萌春<sup>[23]</sup>以 6 个野生朱砂根居群 144 个单株的 20 个形态性状进行分析，揭示朱砂根不同居群植株形态的地理分化特性；康阳等<sup>[24]</sup>分析 16 份朱砂根品种的表型性状遗传多样性，筛选出 4 个核心种质资源；郎云虎等<sup>[25]</sup>基于 ITS 和 matK 序列，揭示 16 个不同居群的 69 份朱砂根存在丰富的遗传多样性，且遗传距离与地理空间距离相关。种质资源是品种创新、改良和新品种选育的关键和基础，朱砂根种质资源的遗传多样性研究有利于揭示种源间的遗传变异和进化关系，对优良种质资源的挖掘、创新和利用具有重要意义。目前对于朱砂根种质资源的研究，存在野生居群为主、代表性种质资源少、调查性状少等问题，无法满足对朱砂根品种创新与改良的实际需求、无法适应人们对朱砂根优良品种的评测。本研究以福建省武平县收集保存的 56 个朱砂根种质资源为试验材料，选择 32 个表型性状对供试植株进行观测，分析朱砂根种质资源表型多样性，以期对种质资源保存、开发利用和新品种 DUS 测试与选育提供参考，对其他观果植物的研究具有一定参考价值。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

本试验的 56 份朱砂根种质资源由福建省武平县南坊国有林场提供（表 1），试验植株收集于福建省武平县，均为当地各花圃栽培的品种或变异品系，集中栽植于武平县东留镇大洋村朱砂根种质资源圃中，统

一管理，生长健壮，性状稳定。序号 1-38 种质编号为种质资源圃所保存编号，株龄 5 a，其中 1803 和 1810 为申报审定品种；序号 39-47 种质为已审定的 9 个品种，根据品种名缩写进行编号，株龄 3 a；序号 48-56 的 9 个种质为申报审定品种，根据拟定品种名缩写进行编号，株龄 3 a。

表 1 56 份朱砂根种质资源

Table 1 56 *A. crenata* germplasm resources

序号 No.	编号 Code	类别 Type	品种名称/拟定品种名称 Variety name/ proposed variety name	序号 No.	编号 Code	类别 Type	品种名称/拟定品种名称 Variety name/ proposed variety name
1	1801	绿叶红果品系	\	29	1829	绿叶红果品系	\
2	1802	绿叶红果品系	\	30	1830	绿叶红果品系	\
3	1803	申报审定品种	鸿福龙（申请号：20240853）	31	1831	紫叶红果品系	\
4	1804	绿叶红果品系	\	32	1832	绿叶红果品系	\
5	1805	紫叶红果品系	\	33	1833	绿叶红果品系	\
6	1806	绿叶红果品系	\	34	1834	绿叶红果品系	\
7	1807	绿叶红果品系	\	35	1835	绿叶红果品系	\
8	1808	绿叶红果品系	\	36	1836	绿叶红果品系	\
9	1809	绿叶红果品系	\	37	1837	紫叶红果品系	\
10	1810	申报审定品种	双色龙（申请号：20240852）	38	1838	绿叶红果品系	\
11	1811	绿叶红果品系	\	39	BXZ	品种	碧霞珠
12	1812	绿叶红果品系	\	40	CCJ	品种	串串金
13	1813	绿叶红果品系	\	41	CD	品种	赤丹
14	1814	绿叶红果品系	\	42	CLL	品种	赤玲珑
15	1815	绿叶红果品系	\	43	DFG	品种	大富贵
16	1816	紫叶红果品系	\	44	FJR	品种	粉佳人
17	1817	紫叶红果品系	\	45	FMT	品种	福满堂
18	1818	绿叶红果品系	\	46	FZ	品种	福株
19	1819	绿叶红果品系	\	47	JG	品种	金果
20	1820	绿叶红果品系	\	48	WLZ	申报审定品种	舞龙珠（申请号：20240834）
21	1821	绿叶红果品系	\	49	YLG	申报审定品种	银龙骨（申请号：20240849）
22	1822	绿叶红果品系	\	50	ZLZ	申报审定品种	紫龙珠（申请号：20240848）
23	1823	绿叶红果品系	\	51	JLC	申报审定品种	巨龙串（申请号：20240833）
24	1824	绿叶红果品系	\	52	JFL	申报审定品种	聚福龙（申请号：20240835）
25	1825	绿叶红果品系	\	53	FDL	申报审定品种	粉丹龙（申请号：20240847）
26	1826	绿叶红果品系	\	54	ZJL	申报审定品种	紫娇龙（申请号：20240851）
27	1827	绿叶红果品系	\	55	LLC	申报审定品种	彩鳞龙（申请号：20240850）
28	1828	绿叶红果品系	\	56	JBL	申报审定品种	金边龙（申请号：20240832）

\：该种质资源为变异品系，无品种名称

\: This germplasm resource is a mutant strain without variety name.

## 1.2 性状测定

根据朱砂根的主要观赏性状，结合康阳<sup>[24]</sup>和骆亮<sup>[26]</sup>的研究，选择 32 个表型性状对供试种质资源进行观测，其中数量性状 14 个、质量性状 18 个（表 2）。在朱砂根果实成熟期，每份种质资源均选择 3 株长势一致的健康植株进行观测。质量性状主要采用目测法，颜色性状使用英国皇家园林协会 RHS 比色卡测量；干



级 $<X-S$ …… $X+1.5S \leq 9$ 级 $<X+2S$ ,  $X+2S \leq 10$ 级, 分级后进行频率分布和 Shannon-Wiener 多样性指数 ( $H'$ ) 的计算。Shannon-Wiener 多样性指数 ( $H'$ ) =  $-\sum P_i \ln P_i$ , 其中  $P_i$  为某一个性状第  $i$  个级别出现的概率。

质量性状根据赋值后的数据计算频率分布, 并进一步计算多样性指数  $H'$ 。

用 SPSS (Version20) 软件进行相关性分析, 相关系数使用 Pearson 系数。将获得的相关性数据通过 Excel 2016 进行整理并绘制热图,  $P < 0.05$  标记为\*, 表示显著相关性,  $P < 0.01$  标记为\*\*, 表示极显著相关性。

使用 SPSS (Version20) 进行主成分分析和聚类分析。主成分分析以特征值大于 1 为标准提取主成分。综合评价得分的计算, 以主成分特征向量除以特征值的算术平方根作为权重, 标准化后的原始数据与相应权重进行线性加权求和, 得到主成分综合得分。系统聚类方法采用组间连接, 区间度量标准为平均欧式距离。

## 2 结果与分析

### 2.1 多样性分析

**2.1.1 质量性状多样性分析** 56 份朱砂根种质资源质量性状的多样性分析结果表明 18 个质量性状  $H'$  指数变化范围 0.3 (主干) ~1.247 (果枝分轴颜色), 平均 0.734 (表 3)。多样性指数最高的 5 个质量性状依次为果枝分轴颜色 (1.247)、宿萼颜色 (1.094)、叶型 (0.992)、果皮颜色 (0.947) 和叶背颜色 (0.931), 其中有 4 个性状与颜色相关, 说明朱砂根种质资源各部位在颜色方面存在丰富的变化。 $H'$  最低的 3 个性状为主干 (0.3)、果实形状 (0.377) 和果枝姿态 (0.464), 说明这 3 个质量性状的遗传特性最为稳定。根据频率分布显示, 大多数朱砂根种质资源的质量性状特征为: 有主干 (91.1%)、果实形状球形 (87.5%)、果枝姿态近平展 (85.7%)。

表 3 朱砂根种质资源质量性状分布频率及多样性

Table 3 Frequency of distribution and diversity of quality traits in *A. crenata* germplasm resources

性状 Traits	频率分布(%) Frequency distribution								Shannon-Wiener 多样性指数 ( $H'$ )
	1	2	3	4	5	6	7	8	
主干 Main stem	91.1	8.9							0.300
冠形 Crown shape	23.2	67.9	5.4	1.8	1.8				0.904
叶型 Leaf shape	14.3	35.7	50						0.992
叶横切面形状 Leaf cross-section shape	82.1	17.9							0.470
叶缘波状程度 Degree of undulation of leaf margin	7.1	50	42.9						0.897
枝密度 Branch density	16.1	82.1	1.8						0.528
分枝角度 Branching angle	21.4	73.2	5.4						0.716
果枝姿态 Fruit branch posture	1.8	85.7	12.5						0.464
果实形状 Fruit shape	87.5	12.5							0.377
果皮光泽 Fruit skin lustre	8.9	67.9	23.2						0.817
当年生枝颜色 Current branch color	16.1	78.6	3.6	1.8					0.675
叶表颜色 Leaf surface color	19.6	71.4	3.6	3.6	1.8				0.872
叶背颜色 Leaf back color	73.2	16.1	1.8	1.8	1.8	3.6	1.8		0.931

果枝总轴颜色 Fruiting branch total axis color	1.8	5.4	89.3	1.8	1.8						0.476
果枝分轴颜色 Fruiting branch rachis color	1.8	19.6	60.7	8.9	3.6	1.8	1.8	1.8			1.247
果柄颜色 Fruit stalk color	1.8	89.3	1.8	3.6	1.8	1.8					0.510
果皮颜色 Fruit skin color	1.8	8.9	76.8	3.6	1.8	1.8	3.6	1.8			0.947
宿萼颜色 Persistent sepal color	1.8	42.9	46.4	1.8	1.8	5.4					1.094

**2.1.2 数量性状多样性分析** 56 个朱砂根种质资源数量性状  $H'$  变化范围为 1.931~2.071, 平均值 2.007 (表 4), 表明这 14 个数量性状呈现较高水平的多样性, 其中果实横径 (2.071)、果实纵径 (2.067) 和株高 (2.049) 的  $H'$  较高, 果枝数量  $H'$  最低为 1.931。14 个数量性状的变异系数为 8.98%~46.32%, 平均值 23.3%, 表明朱砂根种质资源的数量性状存在丰富的变异 (表 5)。其中节间长度的变异系数最高 (46.32%), 当年生主干高次之 (37.86%), 表明不同朱砂根种质资源间, 其节间长度和当年生主干高差异较大。果实纵径的变异系数最低 (8.98%), 说明果实纵径的性状稳定性较高。

表 4 朱砂根种质资源数量性状分布频率及多样性

Table 4 Frequency and diversity of quantitative traits in *A. crenata* germplasm resources

性状 Traits	频率分布 (%) Frequency distribution										Shannon-Wiener 多样性指数 ( $H'$ )
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
株高 (cm) Plant height	1.8	5.4	8.9	19.6	12.5	16.1	17.9	14.3	1.8	1.8	2.049
冠幅 (cm) Crown width		5.4	8.9	19.6	23.2	14.3	14.3	7.1	3.6	3.6	2.015
干径 (cm) Trunk diameter	5.4	1.8	8.9	12.5	17.9	30.4	8.9	5.4	7.1	1.8	2.008
当年生主干高 (cm) Current year trunk height		8.9	5.4	12.5	25	21.4	7.1	12.5	3.6	3.6	1.996
节间长度 (cm) Interval length		7.1	7.1	21.4	14.3	25	10.7	5.4	8.9		1.942
叶长 (cm) Leaf length	1.8	1.8	17.9	16.1	14.3	14.3	8.9	19.6	5.4		1.995
叶宽 (cm) Leaf width	1.8	1.8	5.4	26.8	21.4	17.9	10.7	7.1	1.8	5.4	1.950
叶柄长 (cm) Petiole length		5.4	7.1	23.2	14.3	21.4	12.5	8.9	3.6	3.6	2.007
果枝总轴长度 (cm) Fruiting branch total axis length	1.8	7.1	7.1	12.5	21.4	16.1	19.6	10.7		3.6	2.010
果枝分轴长度 (cm) Fruiting branch meristem length	1.8	1.8	17.9	12.5	19.6	16.1	14.3	12.5	1.8	1.8	2.009
果实纵径 (cm) Longitudinal diameter of fruit	1.8	5.4	5.4	23.2	16.1	17.9	12.5	10.7	3.6	3.6	2.067
果实横径 (cm) Transverse diameter of fruit	1.8	3.6	10.7	17.9	25	12.5	12.5	7.1	5.4	3.6	2.071
果枝数量 Number of fruiting branches	1.8	3.6	5.4	23.2	16.1	23.2	16.1	5.4		5.4	1.931
单穗果数 Number of fruits per branch	1.8	1.8	12.5	16.1	21.4	16.1	14.3	8.9	5.4	1.8	2.046

表 5 朱砂根种质资源数量性状差异

Table 5 Quantitative trait differences in *A. crenata* germplasm resources

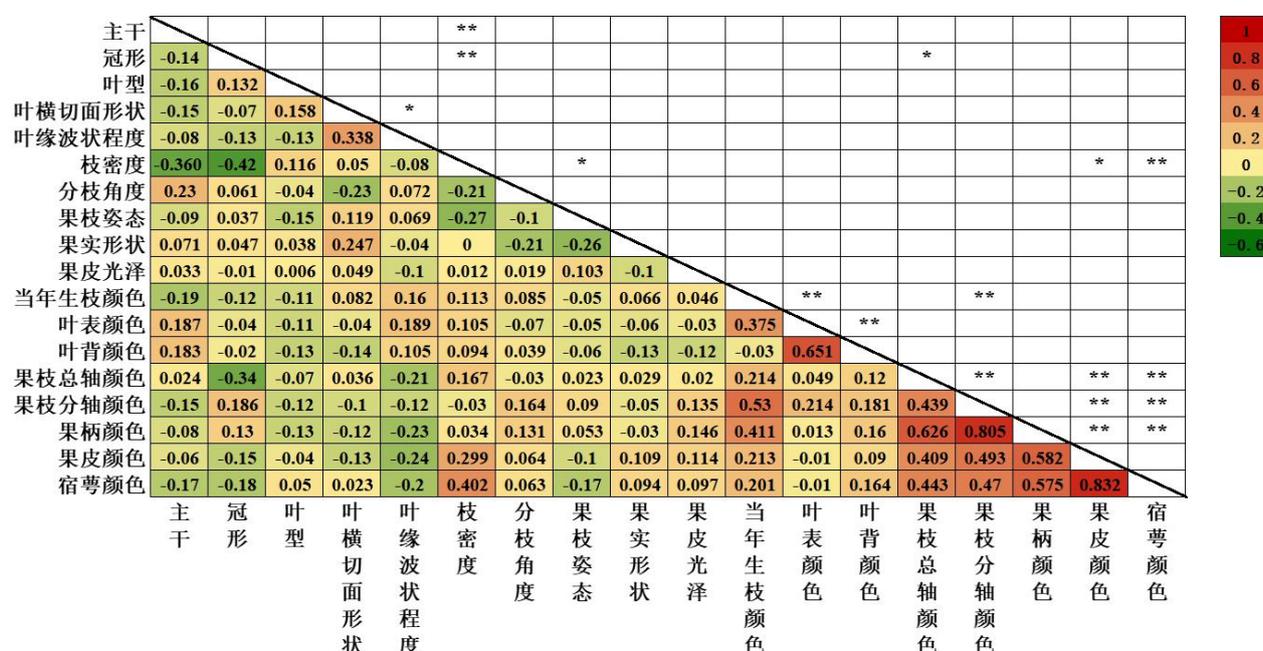
性状 Traits	极小值 Min.	极大值 Max.	平均值 Average	标准差 SD	变异系数 (%) CV
株高 (cm) Plant height	25.00	109.00	68.75	19.28	28.05
冠幅 (cm) Crown width	29.50	66.50	44.70	7.85	17.56
干径 (cm) Trunk diameter	1.03	2.05	1.55	0.24	15.16
当年生主干高 (cm) Current year trunk height	6.00	36.00	20.42	7.73	37.86
节间长度 (cm) Interval length	0.10	1.50	0.84	0.39	46.32
叶长 (cm) Leaf length	6.05	10.90	8.68	1.23	14.14
叶宽 (cm) Leaf width	2.03	4.43	3.16	0.48	15.07
叶柄长 (cm) Petiole length	0.47	1.13	0.76	0.15	19.73
果枝总轴长度 (cm) Fruiting branch total axis length	3.83	19.33	11.68	3.16	27.06

果枝分轴长度 (cm) Fruiting branch meristem length	1.20	5.67	3.13	0.86	27.64
果实纵径 (cm) Longitudinal diameter of fruit	0.69	1.05	0.85	0.08	8.98
果实横径 (cm) Transverse diameter of fruit	0.73	1.18	0.94	0.10	10.22
果枝数量 Number of fruiting branches	8.00	45.00	22.50	6.63	29.44
单穗果数 Number of fruits per branch	14.00	80.33	42.19	12.22	28.97

## 2.2 相关性分析

质量性状相关性分析中, 极显著正相关关系的有果皮颜色与宿萼颜色 (0.832)、果枝分轴颜色与果柄颜色 (0.805)、叶表颜色与叶背颜色 (0.651)、果枝总轴颜色与果柄颜色 (0.626), 枝密度与主干、冠形均呈负相关且  $P < 0.01$ , 相关系数分别为 -0.36 和 -0.42 (图 1)。

数量性状相关性分析中, 首先相关系数最大的为果实横径与果实纵径 (0.92), 其次为株高与当年生主干高相关系数 0.723, 再次节间长度与株高、当年生主干高相关系数分别为 0.687 和 0.679, 最后果枝总轴长度、果枝分轴长度、株高与冠幅 4 个性状相互之间相关系数介于 0.5~0.7, 均为极显著正相关关系 (图 2)。

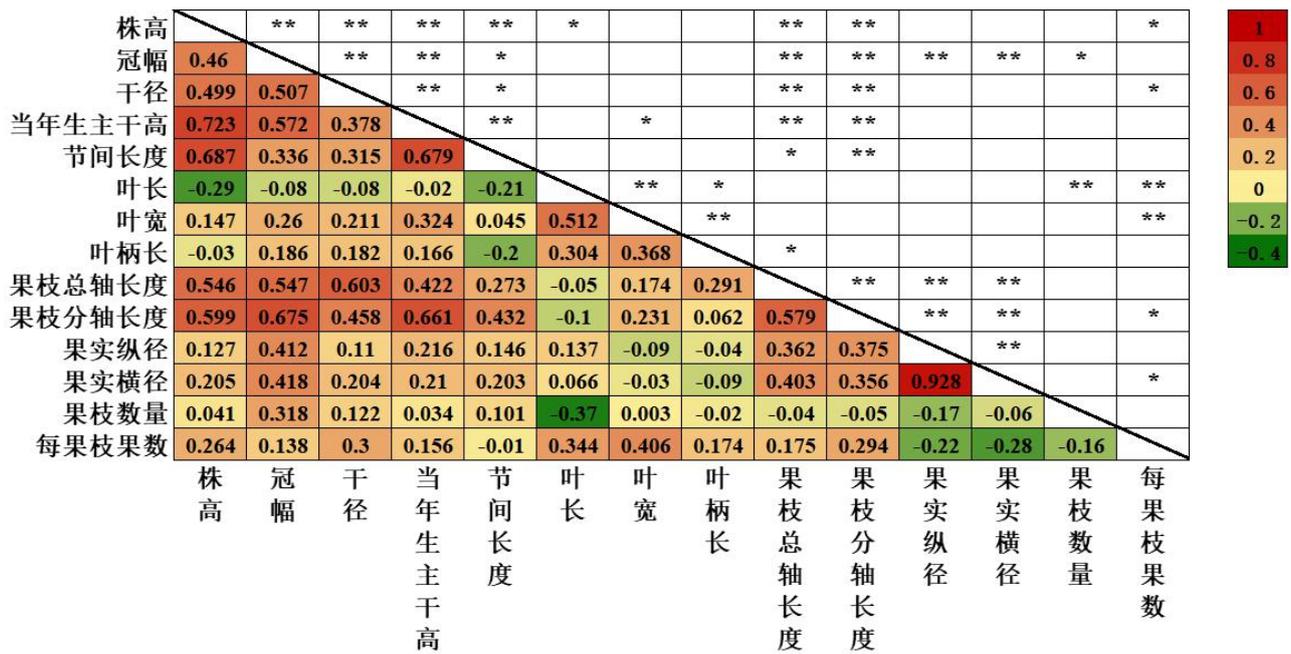


\*: 显著相关 ( $P < 0.05$ ); \*\*: 极显著相关 ( $P < 0.01$ )

\*: significant correlation ( $P < 0.05$ ); \*\*:  $P < 0.01$ , highly significant correlation ( $P < 0.01$ )

图 1 朱砂根种质资源质量性状相关性

Fig. 1 Correlation of quality traits in *A. crenata* germplasm resources



\*: 显著相关 ( $P < 0.05$ ); \*\*: 极显著相关 ( $P < 0.01$ )

\*: significant correlation ( $P < 0.05$ ); \*\*:  $P < 0.01$ , highly significant correlation ( $P < 0.01$ )

图 2 朱砂根种质资源数量性状相关性

Fig. 2 Correlations of quantitative traits in *A. crenata* germplasm resources

### 2.3 主成分分析

将所有 32 个表型性状数据进行 KMO 和 Bartlett 球形检验，结果显示 KMO 值为 0.528 ( $< 0.6$ )，表明这些数据不适合于主成分分析。因此根据相关性分析剔除部分相关较弱（大部分相关系数介于 -0.1~0.1）的性状数据，最终筛选出 26 个表型性状进行主成分分析，其 KMO 值为 0.602，Sig. 值小于 0.05。

提取特征值大于 1 的 8 个主成分，累计贡献率达到 76.34%，包含朱砂根种质资源表型性状数据的大部分信息（图 3，表 6）。PC1 贡献率为 20.03%，特征向量较大的性状包括果枝分轴长度、冠幅、株高、果枝总轴长度、当年生主干高、干径、果实横径和果实纵径，主要反映植株整体、枝干长度和果实大小的特性；PC2 贡献率为 16.21%，特征向量较大的性状依次为果枝分轴颜色、果柄颜色、宿萼颜色、果皮颜色、单穗果数和果枝总轴颜色，主要反映果实数量和果枝、果实等各部位与颜色相关的特性；PC3 贡献率为 8.67%，特征向量较大的性状包括叶长、果实纵径、果实横径，反映叶片和果实大小；PC4 贡献率为 8.12%，特征向量较大的性状包括叶背颜色、叶表颜色、叶宽，主要反映了叶部性状；PC5 贡献率为 7.87%，特征向量较大的性状包括主干、冠幅，主要反映了植株整体特性；PC6 贡献率为 6.44%，特征向量较大的性状包括果枝数量、叶横切面形状、叶柄长；PC7 贡献率为 4.64%，特征向量较大的性状包括主干、叶型、叶柄长、宿萼颜色、果皮颜色；PC8 贡献率为 4.37%，特征向量较大的性状包括叶型、叶背颜色、叶表颜色、叶缘波状程度。

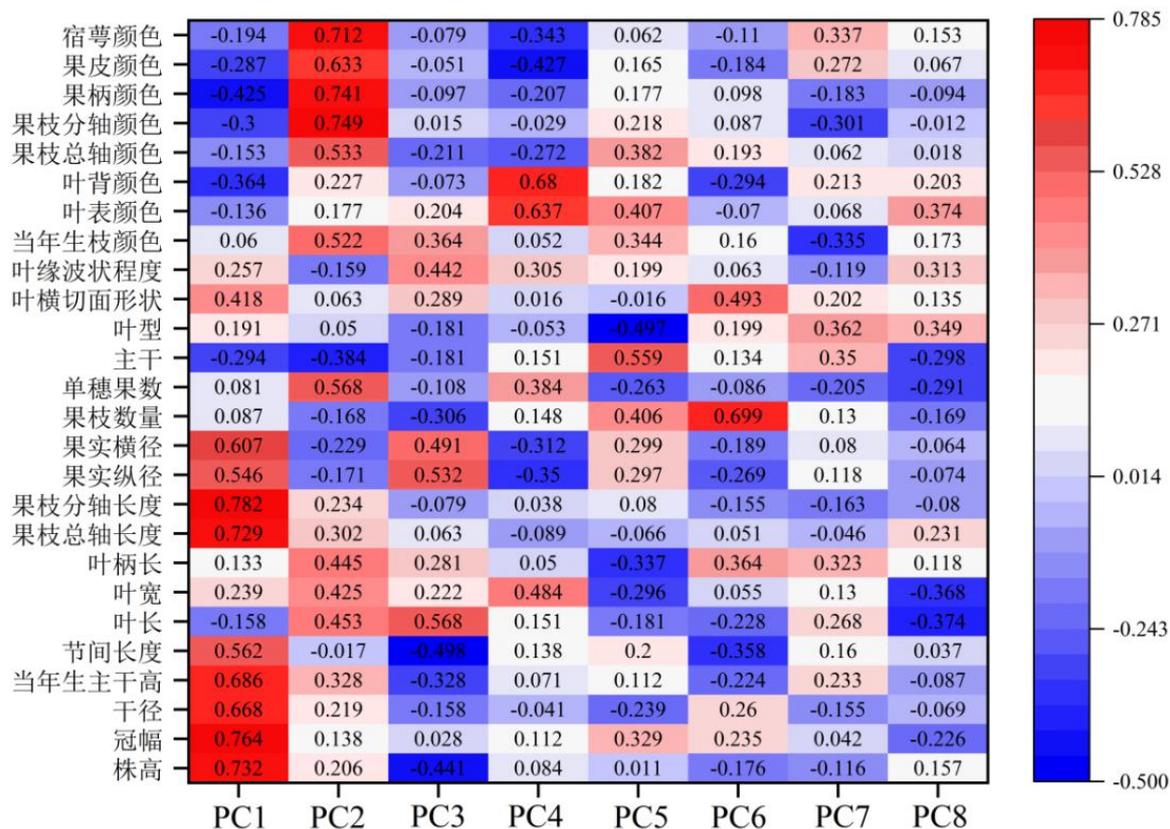


图 3 朱砂根种质资源主成分分析

Fig. 3 Principal component analysis of *A. crenata* germplasm resources

表 6 朱砂根种质资源主成分特征值及方差贡献率

Table 6 Principal component eigenvalues and variance contributions of *A. crenata* germplasm resources

主成分	特征值	方差贡献率(%)	累计贡献率(%)
Principal component	Eigenvalue	Variance contribution	Cumulative contribution
PC1	5.208	20.03	20.03
PC2	4.216	16.214	36.243
PC3	2.253	8.665	44.908
PC4	2.111	8.118	53.027
PC5	2.046	7.87	60.896
PC6	1.674	6.44	67.336
PC7	1.206	4.64	71.976
PC8	1.136	4.367	76.343

## 2.4 综合评价

主成分值  $F_n$  的计算公式为： $F_1=0.343Z_1+0.335Z_2+0.321Z_3+0.038Z_4+0.038Z_5+0.183Z_6+0.038Z_7+0.038Z_8$ ，其中  $Z_n$  为标准化后的性状数据，以此类推计算出  $F_1\sim F_8$  的 8 个主成分值（表 7）。综合得分计算公式为： $F=(0.2003F_1+0.16214F_2+0.08665F_3+0.08118F_4+0.0787F_5+0.0644F_6+0.0464F_7+0.04367F_8)/0.7634$ 。结果显示，综合得分排名前五的朱砂根种质资源依次为 1803, 1823, 1810, 1838, FDL（表 7、图 4）。1803 植株高大，叶片较大，枝条长，果实大且单穗果实数量多；1823 果实、冠幅大，干径较粗、当年生主干长；1810 叶表

黄绿色，叶背紫红色，植株高大，叶片较宽；1837 叶背浅紫色，单穗果实数量多，干径较粗；FDL 相比于其他种质其各部位颜色均具有特异性，叶表黄绿色、叶背浅紫红色，枝干肉粉色，果实粉红色。

表 7 朱砂根种质资源主成分值的筛选

Table 7 Screening of principal component values of *A. crenata* germplasm resources

编号 Code	主成分值 Principal component value								综合得分 Aggregate score	排名 Rankings
	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8		
1803	4.83	3.32	1.76	0.1	0.95	-0.61	-0.48	-0.9	2.148	1
1823	2.49	3.84	0.3	-0.95	0.68	0.25	0.43	0.08	1.533	2
1810	2.06	1.16	1.25	0.58	3.35	-1.63	0.91	0.28	1.271	3
1837	3.06	2.63	0.05	-0.2	-0.65	-0.33	-0.14	-0.57	1.205	4
FDL	0.82	-1.18	0.81	5.41	-0.74	2.95	2.95	1.39	1.061	5



图 4 5 份优秀朱砂根种质资源

Fig. 4 Five excellent *A. crenata* germplasm resources

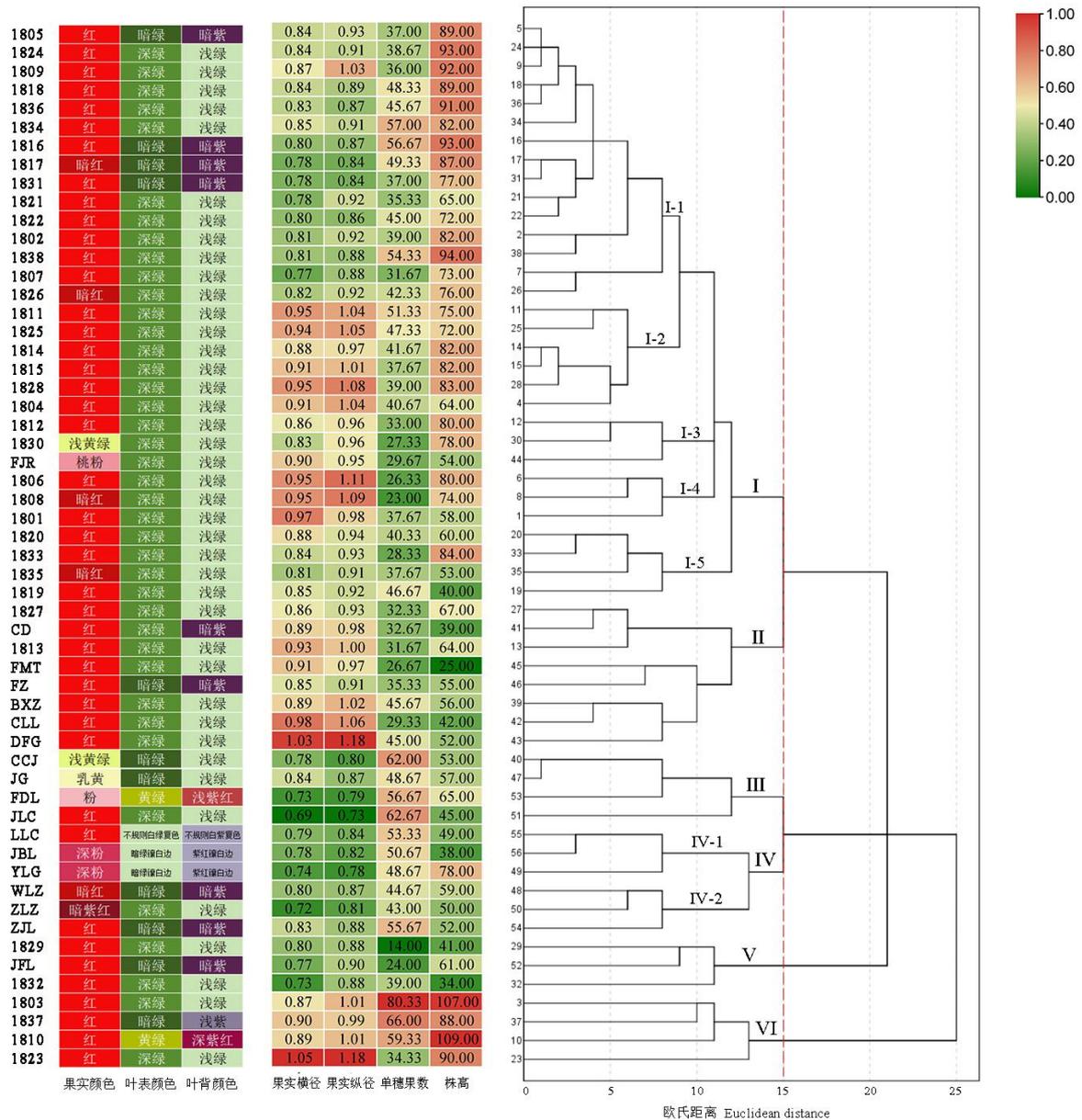
## 2.5 聚类分析

根据 26 个表型性状对 56 份朱砂根种质资源进行系统聚类分析，结果显示，在欧氏距离为 15 时，56 份朱砂根种质资源被分为 6 个类群（图 5）。

第 I 类包含 31 份朱砂根种质，大部分叶长中等或较小，果实颜色主要为红色，叶表深绿色或暗绿色，叶背浅绿色或暗紫色，果枝总轴均为黄绿色。当欧氏距离为 9 时，31 份种质又可分为 5 个亚类群。其中，I-1 株高较高，叶长较短，叶片横切面均为浅 V 型；I-2 果实较大；I-3 果枝总轴长度较其他亚类群长，1803 和 FJR 果色特殊；I-4 果实同样较大，但单穗果数少于 I-2；I-5 叶柄较长。

第 II、III、IV 和 V 类朱砂根种质大部分为株高和冠幅中等或较小的类型。第 II 类包括 8 份朱砂根种质，果色均为红色，果实较大，果实横径平均 1.005cm，单穗果数较少。第 III 类包括 4 份朱砂根种质，即 CCJ, JG, FDL, JLC，主要特征为叶长较长，单穗果数较多，果实颜色特殊。第 IV 类包括 6 份朱砂根种质，主要特征为果实较小，果实颜色或叶片颜色类型丰富。当欧氏距离为 13 时，又可分为 2 个亚类群，YLG、LLC 和 JBL 为一个亚类群，叶片颜色具有特异性，均为复色叶。第 V 类仅包括 3 份朱砂根种质，即 1829、JFL、1832，主要特征为果枝数量多，平均 40 个，单穗果数少，平均 26 个。

第VI类包括4份朱砂根种质，即1803、1837、1810、1823，这四份种质与其他类群相比，株高、冠幅、干径、叶长、果枝总轴长度和分轴长度均较大。



图片左侧为部分性状的原始数据

The left side of the picture shows the raw data of some traits.

图 5 56 份朱砂根种质资源聚类图

Fig. 5 Clustering of 56 *A. crenata* germplasm resources

### 3 讨论

表型多样性一定程度上反映了遗传多样性，表型多样性研究能够以直观、便捷的方法初步揭示植物的遗传变异水平，对观赏植物的优种筛选和品种改良具有指导意义<sup>[27,28]</sup>。经过多年的有性繁殖和栽培后，朱砂根表型逐渐呈现多样化，品种资源日益丰富，然而其种质资源的表型多样性研究仍然较少。本研究对 56 份朱砂根种质资源的 18 个质量性状和 14 个数量性状展开了表型性状多样性分析，Shannon-Wiener 多样性指

数和变异系数结果表明不同性状存在不同程度的遗传多样性。一般认为，变异系数大于 10%则表明不同种质间的性状差异较大，变异系数越大则该性状的遗传多样性越丰富<sup>[29]</sup>。除了果实纵径，其余 13 个数量性状的变异系数均大于 10%，说明这些性状在朱砂根不同种质间的遗传变异较为丰富。Shannon-Wiener 多样性指数反映了性状的丰富度和均匀度<sup>[30]</sup>。植株各部位颜色极大地影响着朱砂根的观赏性，而果枝分轴颜色、宿萼颜色、果皮颜色和叶背颜色这 4 个性状的多样性指数均较高，遗传信息丰富，在育种中有广阔的改良和选择空间。另外，朱砂根种质数量性状的多样性指数明显高于质量性状，由此说明质量性状稳定性较高，而数量性状更易于受到外界环境的影响而产生差异，这与王业社<sup>[31]</sup>、苏群<sup>[32]</sup>、杨思霞<sup>[33]</sup>等研究结果基本吻合。

相关性分析可以揭示植物在生长发育过程中不同表型性状之间联系的密切程度。18 个质量性状之间的相关性分析表明，果枝上各个部位颜色的相关性显著。14 个数量性状之间，果实横径与纵径相关性最强，而朱砂根主干和果枝的生长数量性状之间存在极显著的相关性，表明在朱砂根发育过程中，主干和果枝协调生长。研究结果对于朱砂根关联性状的选择及提高优良种质选育效率具有指导意义。

主成分分析能够将原来众多的表型性状进行降维，归结成几个相互独立的综合指标，使种质资源的评价过程简单且客观<sup>[34]</sup>。本研究根据特征值大于 1 为标准，提取到 8 个主成分，累计贡献率 76.34%。8 个主成分中特征向量较大的有 PC1 的冠幅、株高、当年生主干高、干径、果枝总轴长度和分轴长度，PC2 的果枝分轴颜色、果柄颜色、宿萼颜色和果皮颜色，PC4 的叶表颜色及叶背颜色，PC6 的果枝数量，主要涉及植株整体大小，果枝长度，以及果实、叶片等各部位颜色，这些性状既是造成朱砂根种质表型差异的主要因素，也是衡量朱砂根观赏价值的重要因子，在种质资源评价及实际育种过程中应重点关注。进一步根据主成分分值计算 56 个种质的综合得分筛选优秀朱砂根种质，综合得分排名前五的依次为 1803, 1823, 1810, 1838 和 FDL，表明这 5 份朱砂根种质性状优异，观赏性强，具有较高的开发和利用价值，可以作为重要种质进行推广。

聚类分析在揭示种质资源之间的亲缘关系及遗传差异中具有重要作用<sup>[35]</sup>。本研究将 56 份朱砂根种质资源聚为 6 个类群。种质数量最多的为第 I 类，包含 31 份朱砂根种质，类群内遗传相似性较高，大部分为红果、绿叶。根据株高、果实大小或颜色等性状，31 份种质又可进一步划分为 5 个亚类群。第 III 和 IV 两个类群植株果色和叶色变化丰富，单穗果实数量多，具有较高的观赏价值和育种潜力。第 VI 类可用于选育大株型、果实大且果量多的品种。

综上，本研究的 56 份朱砂根种质资源存在丰富的遗传变异，为其开发、利用优秀种质和创新育种提供了物质基础。虽然表型多样性调查简单易行，但植物表型容易受到外界环境的影响<sup>[36,37]</sup>。因此，可以结合分子标记技术，在挖掘优秀种质资源过程中获得更为精确的遗传信息，为种质资源的开发利用提供更加科学、合理的指导。

## 参考文献

- [1] Chen J, John J. Pipoly III. Myrsinaceae. In: Wu, Z.Y., Raven, P.H. & Hong, D. Y.(Eds.) Flora of China, Vol. 15: Science Press, Beijing & Missouri Botanical Garden Press, St Louis, 1996, pp.1-38.
- [2] 艾金祥,宋嘉怡,严浙楠,王志超,陈文倩,吴玉环,王燕燕,潘蕾蕾,许俞韬,刘鹏. 褪黑素对铅胁迫下虎舌红和朱砂根生理响应及 DNA 损伤的调控效应. 植物学报, 2022, 57 (02): 171-181.  
Ai J, Song J, Yan Z, Wang Z, Chen W, Wu Y, Wang Y, Pan L, Xu Y, Liu P. Effects of exogenous melatonin on physiological response and DNA damage of *Ardisia mamillata* and *A. crenata* under lead stress. Chinese Bulletin of Botany, 2022, 57(2): 171-181.
- [3] 马洪娜,吴依琳,马珊珊,檀龙颜,周英. 朱砂根叶响应 Ca<sup>2+</sup>(2+)胁迫的差异代谢物分析. 植物生理学报, 2023, 59 (09): 1771-1782.  
Ma H, Wu Y, Ma S, Tan L, Zhou Y. Analysis of differential metabolites in *Ardisia crenata* leaves in response to Ca<sup>2+</sup> stress. Plant Physiology Journal, 2023, 59 (09): 1771-1782.
- [4] Ai X, Li Yu, Xie H, Zhao C. Adaptive mechanisms of *Ardisia crenata* var. bicolor along an elevational gradient on Gaoligong Mountain, Southwest China. Journal of Mountain Science, 2023,20(3):765-778.
- [5] 周琪,吕享,林冰,田小桥,钟双萍,李佩仪. 朱砂根种胚繁育技术研究. 种子, 2022, 41 (08): 104-109+115.  
Zhou Q, Lu X, Lin B, Tian X, Zhong S, Li P. Study on breeding regulation technology of *Ardisia crenata* Sims embryo. Seed, 2022, 41(8): 104-109,115.
- [6] 张森行,严明基,张盛钟,刘行发,林庆华. 3种植物生长剂对朱砂根种子的出苗及幼苗生长的影响. 现代园艺, 2023, 46 (05): 22-23+27.  
Zhang S, Yan M, Zhang S, Liu X, Lin Q. Effects of three plant growth agents on seedling emergence and seedling growth of *Ardisia crenata*. Contemporary Horticulture, 2023, 46 (05): 22-23+27.
- [7] 赵财宝,陈苗苗,张光猛,艾星梅. 不同处理方式对黄果朱砂根顽拗性种子萌发的影响. 浙江农业科学, 2023, 64 (08): 1931-1934.  
Zhao C, Chen M, Zhang G, Ai X. Effects of different treatments on the germination of recalcitrant seeds of *Ardisia crenata* f. xanthocarpa. Journal of Zhejiang Agricultural Sciences, 2023, 64 (08): 1931-1934.
- [8] 李晓,石慧,丁晶鑫,俸婷婷,刘雄伟,刘畅,周英. 不同基原八爪金龙药材中黄酮、香豆素类化学成分分析. 中国药房, 2021, 32 (04): 443-452.  
Li X, Shi H, Ding J, Xian T, Liu X, Liu C, Zhou Y. Analysis of Chemical Constituents as Flavonoids and Coumarins in Radix *Ardisiae* from Different Sources. China Pharmacy, 2021, 32 (04): 443-452.
- [9] 权伟,刘畅,周英,何倩倩,石洋,党兆岩,刘雄利. 基于 NF- $\kappa$  B/STAT 信号通路探究朱砂根治疗大鼠急性咽喉炎的作用机制. 中草药, 2022, 53 (19): 6083-6092.  
Quan W, Liu C, Zhou Y, He Q, Shi Y, Dang Z, Liu X. Mechanism of *Ardisia crenata* on rats with acute pharyngitis based on NF- $\kappa$ B/STAT signaling pathway. Chinese Traditional and Herbal Drugs, 2022, 53 (19): 6083-6092.
- [10] Tao H, Zhou Y, Wei X, Yin X, Zhao C, Zhou Y. Anti-inflammatory activity of a new lactone isolated from the leaves of *Ardisia crenata* Sims. Chemistry biodiversity,2023,21(1):e202300983-e202300983.
- [11] 石慧,李晓,周英,丁晶鑫,刘畅,刘雄伟,董秀,陈赞,俸婷婷. 基于 UPLC-QE-HF-MS/MS 技术分析红凉伞化学成分及入血成分. 中国药房,2024,35(03):316-321.  
Shi H, Li X, Zhou Y, Ding J, Liu C, Liu X, Dong X, Chen Y, Xian T. Analysis of chemical constituents and components absorbed into plasma of *Ardisia crenata* based on UPLC-QE-HF-MS/MS. China Pharmacy, 2024,35(03):316-321.
- [12] 江香梅,温强,叶金山,江梅. 朱砂根群体遗传多样性 RAPD 分析.江西农业大学学报,2006(05):762-765+779.  
Jiang X, Wen Q, Ye J, Jiang M. RAPD Analysis of Genetic Diversity in *Ardisia crenata* Sims. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 2006(05):762-765+779.
- [13] 邓素芳,杨昉,赖钟雄. 朱砂根品种资源的 RAPD 分析.中国农学通报,2009,25(10):63-67.  
Deng S, Yang Y, Lai Z. Analyses of Germplasm by RAPD in *Ardisia crenata* Sims. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2009,25(10):63-67.
- [14] 杨昉,赖钟雄. 福建鼓山 23 份朱砂根种质资源的 RAPD 分析.福建农业学报,2010,25(01):53-57.  
Yang Y, Lai Z. RAPD analysis on 23 accessions of wild *Ardisia crenata* Sims. Germplasm from Mt. Gushan. Fujian Journal of Agricultural Sciences, 2010,25(01):53-57.
- [15] 张丽梅,张应红,郭凤根,杨生超.云南紫金牛属植物资源的调查与评价.中国野生植物资源,2013,32(01):59-61+67.  
Zhang L, Zhang Y, Guo F, Yang S. Investigation and Evaluation of *Ardisia* Resources in Yunnan. Chinese Wild Plant Resources, 2013,32(01):59-61+67.
- [16] 向春玲,冯志坚.广东紫金牛科药用植物资源.亚热带植物科学,2002,(03):52-55.

- Xiang C, Feng Z. Medicinal plant resources of Myrsinaceae in Guangdong Province. *Subtropical Plant Science*, 2002,(03):52-55.
- [17] 陈京,徐攀,姚振生.浙江紫金牛属药用植物资源.江西中医药,2012,43(06):58-61.  
Chen J, Xu P, Yao Z. Medicinal Plant Resources of *Ardisia* in Zhejiang. *Jiangxi Journal of Traditional Chinese Medicine*, 2012,43(06):58-61.
- [18] 鲍海鸥,陈波菱,陈波红,罗克红,庄国梁.江西紫金牛属植物资源状况和利用价值.安徽农业科学,2011,39(14):8474-8476+8637.  
Bao H, Chen B, Chen B, Luo K, Zhuang G. Plant Resources and Utilization Value of *Ardisia* in Jiangxi. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2011,39(14):8474-8476+8637.
- [19] 吴庆书,李东海,杨泽斌,杨小波.海南紫金牛属植物资源及其在园林中应用的前景.福建林业科技,2007,(03):176-180.  
Wu Q, Li D, Yang Z, Yang S. Plant resources of *Ardisia* and their application in landscapes in Hainan Island. *Journal of Fujian Forestry Science and Technology*, 2007,(03):176-180.
- [20] 田振华,骆红梅,何燕.贵州紫金牛属药用植物资源概况.中药材,1996,(03):116-118.  
Tian Z, Luo H, He Y. Overview of medicinal plant resources of *Ardisia* in Guizhou. *Journal of Chinese Medicinal Materials*, 1996,(03):116-118.
- [21] 毛世忠,邓涛,唐文秀,骆文华,丁莉,隗红燕.广西紫金牛属野生观赏植物的综合评价.广西植物,2012,32(04):501-506.  
Mao S, Deng T, Tang W, Luo W, Ding L, Kui H. Comprehensive evaluation of the wild ornamental plants of *Ardisia* in Guangxi. *Guihaia*, 2012, 32 (04): 501-506.
- [22] 骆亮,张文春,李龙,陈斌,彭东辉.不同居群朱砂根(*Ardisia crenata*)的荧光 ISSR 遗传多样性分析.分子植物育种,2021,19(18):6235-6247.  
Luo L, Zhang W, Li L, Chen B, Peng D. Genetic Diversity Analysis of *Ardisia crenata* in Different Populations by Fluorescence ISSR. *Molecular Plant Breeding*, 2010,25(01):53-57.
- [23] 陶萌春. 朱砂根(*Ardisia crenata*)居群的形态特征变异及聚类分析.植物资源与环境学报,2010,19(04):43-49.  
Tao M. Variation of morphological characters and cluster analysis of *Ardisia crenata* populations. *Journal of Plant Resources and Environment*, 2010,19(04):43-49.
- [24] 康阳,刘梓富,陈进燎,石晓玲,周育真,彭东辉.十六份朱砂根品种表型遗传多样性分析.北方园艺,2022,(12):71-78.  
Kang Y, Liu Z, Chen J, Shi X, Zhou Y, Peng D. Analysis of Phenotypic Genetic Diversity of 16 *Ardisia crenata* Cultivars. *Northern Horticulture*, 2022,(12):71-78.
- [25] 郎云虎,文琴琴,魏升华,严福林.基于 ITS 和 matK 序列的苗药朱砂根遗传多样性分析.种子,2024,43(01):29-35+42+157.  
Lang Y, Wen Q, Wei S, Yan F. Genetic Diversity Analysis of the Miao Medicine *Ardisia crenata* Based on ITS and matK Sequences, *Seed*, 2024, 43 (01): 29-35+42+157.
- [26] 骆亮.福建省不同居群朱砂根遗传多样性研究.福州:福建农林大学,2019.  
Luo L. Genetic diversity of different populations of *Ardisia crenata* in Fujian Province. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2019.
- [27] 刘学森,李娜,张雪云,肖丽,江律,罗乐,于超,张启翔.新疆单叶蔷薇居群表型变异及多样性研究.北京林业大学学报,2024,46(02):51-61.  
Liu X, Li N, Zhang X, Xiao L, Jiang L, Luo L, Yu C, Zhang Q. Phenotypic variation and diversity of natural *Rosa persica* populations in Xinjiang of northwestern China. *Journal of Beijing Forestry University*, 2024,46(02):51-61.
- [28] 王钦,黄捷,涂松,康阳,王菲,陈秀铭,彭东辉.蝴蝶兰不同品种表型性状遗传多样性分析.西南林业大学学报:自然科学,2023,43(06):8-18.  
Wang Q, Huang J, Tu S, Kang Y, Wang F, Chen X, Peng D. Analysis of Phenotypic Genetic Diversity of Various *Phalaenopsis* Varieties. *Journal of Southwest Forestry University: Natural Sciences*, 2023,43(06):8-18.
- [29] Xin Y, Wu Y, Qiao B, Su L, Xie S, Ling P. Evaluation on the phenotypic diversity of Calamansi (*Citrus microcarpa*) germplasm in Hainan island. *Scientific Reports*, 2022,12(1):371-371.
- [30] 李伟,王攀,其其格,张启昌,黄兵军,肖泽军.蓝莓种质资源表型多样性研究.北京林业大学学报,2020,42(02):124-134.  
Li W, Wang P, Qiqige, Zhang Q, Huang B, Xiao Z. Phenotypic diversity analysis of blueberry germplasm resources. *Journal of Beijing Forestry University*, 2020,42(02):124-134.
- [31] 王业社,侯伯鑫,秦志立,刘桃花,陈立军,杨贤均.紫薇品种表型多样性分析.植物遗传资源学报,2015,16(01):71-79.  
Wang Y, Hou B, Suo Z, Liu T, Chen L, Yang X. Phenotypic Diversity of *Lagerstroemia indica* Cultivars. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2015,16(01):71-79.
- [32] 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, Tian M, Zhang J, Mao L, Tang Y, Bu C, Lu J. Phenotypic Diversity Analysis and Comprehensive Evaluation of 49 Waterlily Resources.

Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2019,32(11):2670-2681.

- [33] 杨思霞,黄旭光,陆炎松,黄爱玲,黄宇寒,霍行,廖堂贵. 39 份朱槿品种资源表型多样性分析.热带作物学报,2024,45(04):722-733.  
Yang S, Huang X, Lu Y, Huang A, Huang Y, Huo X, Liao T. Phenotypic Diversity Analysis of 39 *Hibiscus rosa-sinensis* Cultivar Resources. Chinese Journal of Tropical Crops, 2024,45(04):722-733.
- [34] 王志强,郭松,刘声锋,郭守金,于蓉,田梅,董瑞. 西瓜种质资源果实主要数量性状的主成分分析.东北农业大学学报,2014,45(03):59-64.  
Wang Z, Guo S, Liu S, Guo S, Yu R, Tian M, Dong R. Principal component analysis for main quantitative characters on fruit of watermelon germplasm. Journal of Northeast Agricultural University, 2014,45(03):59-64.
- [35] 李赢,刘海翠,石晓旭,石吕,韩笑,刘建,魏亚凤.398 份裸大麦种质资源表型性状遗传多样性分析.植物遗传资源学报,2023,24(05):1311-1320.  
Li Y, Liu H, Shi X, Shi L, Han X, Liu Ji, Wei Y. Phenotypic Diversity Analysis of 398 Naked Barley Germplasm Resources. Journal of Plant Genetic Resources, 2023,24(05):1311-1320.
- [36] 刘杰,黄学辉. 作物杂种优势研究现状与展望.中国科学:生命科学,2021,51(10):1396-1404.  
Liu J, Huang X. Advances and perspectives in crop heterosis. Scientia Sinica(Vitae), 2021,51(10):1396-1404.
- [37] 刘青青,李雄杰,马亚琼,成美佳,王晨兆,高佩,马福林,郝静雯,刘瑞,冶贵生,马玉花.青海野生中国沙棘资源表型性状多样性分析.植物遗传资源学报,2023,24(04):1057-1064.  
Liu Q, Li X, Ma Y, Cheng M, Wang C, Gao P, Ma F, Hao J, Liu R, Ye G, Ma Y. Phenotypic Traits Diversity Analysis of *Hippophae rhamnoides* subsp. sinensis Wild Germplasm in Qinghai Province. Journal of Plant Genetic Resources, 2023,24(04):1057-1064..