



汪生林,崔佳瑞,单楠,等.我国南方地区参薯表型性状多样性分析[J].江西农业大学学报,2025,47(3):618-629.

WANG S L,CUI J R,SHAN N,et al.Analysis of phenotypic character diversity of *Dioscorea alata* L. in southern China[J].Acta agriculturae universitatis Jiangxiensis,2025,47(3):618-629.

我国南方地区参薯表型性状多样性分析

汪生林,崔佳瑞,单楠,李子豪,黄英金,周庆红,孙静宇*

(江西农业大学 蔬菜高质高效栽培及利用江西省重点实验室,江西 南昌 330045)

摘要:【目的】旨在分析我国南方地区参薯种质资源表型性状多样性,为参薯种质资源创新利用与品种选育提供理论依据。【方法】以我国南方地区的20份参薯种质资源为材料,通过生物学鉴定和表型性状多样性分析,并结合主成分分析和聚类分析,系统研究参薯种质资源的表型差异和遗传变异。【结果】(1)供试的20份参薯种质资源变异丰富,其中,质量性状农指范围在0.325~1.280,根毛分布、块茎形状、块茎颜色表现最丰富;数量性状的变异系数范围在11.96%~163.80%,块茎横径的变异系数最大(163.80%),而叶片SPAD值的变异系数最小(11.96%)。(2)基于表型性状的聚类分析表明,当欧式平均距离为20时,参薯种质资源可分为2类,其中丽江紫参薯单独成一类;当欧式平均距离为15时,参薯种质资源被分为5类。【结论】地下部块茎性状是影响参薯多样性的主要因素,其中块茎横径对表型变异的贡献最大。综合评价显示,丽江紫参薯、赣紫蒞3号、赣白玉2号在表型性状上表现优异,具有较高的推广应用潜力。

关键词:参薯;表型性状;聚类分析;主成分分析

中图分类号:S632.1 文献标志码:A

文章编号:1000-2286(2025)03-0618-12

CSTR:32399.14.aauj.2025053

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Analysis of phenotypic character diversity of *Dioscorea alata* L. in southern China

WANG Shenglin, CUI Jiarui, SHAN Nan, LI Zihao,
HUANG Yingjin, ZHOU Qinghong, SUN Jingyu*

(Jiangxi Provincial Key Laboratory of Vegetable Cultivation and Utilization, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China)

Abstract: [Objective] This study aims to analyze the genetic diversity of *Dioscorea alata* L. resources in southern China, thus providing a theoretical basis for their innovative utilization and variety breeding. [Method] Twenty *Dioscorea alata* L. germplasm resources from southern China were subjected to biological identification and phenotypic diversity analysis. Principal component analysis and cluster analysis were conducted to

收稿日期:2024-11-26 修回日期:2025-02-18

基金项目:国家自然科学基金项目(32460767)和江西省重点研发计划项目(20232BBF60007)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China (32460767) and the Key Research and Development Project of Jiangxi Province (20232BBF60007)

作者简介:汪生林,讲师,博士, orcid.org/0000-0003-2545-1222; slinyx@jxau.edu.cn*通信作者:孙静宇,讲师,博士,主要从事山药种质资源创新与利用研究, orcid.org/0000-0002-7148-9603, sunjingyu@jxau.edu.cn.

©《江西农业大学学报》编辑部,开放获取 CC BY-NC-ND 协议

systematically investigate the phenotypic differences and genetic variations among these resources. [Result] (1) The germplasm resources of the 20 samples exhibited abundant variations. The Shannon index for qualitative traits ranged from 0.325 to 1.280, with root hair distribution, tuber shape, and tuber color showing the highest diversity. The coefficient of variation for quantitative traits ranged from 11.96% to 163.80%, with tuber diameter exhibiting the highest variation (163.80%) and leaf SPAD value showing the lowest variation (11.96%). (2) Cluster analysis based on phenotypic traits revealed that with an Euclidean distance of 20, the germplasm resources were divided into two clusters, with Lijiang Purple yam forming a separate cluster. With an Euclidean distance of 15, the resources were further divided into five clusters. [Conclusion] Underground tuber traits are the primary factors influencing the diversity of *Dioscorea alata* L., with tuber diameter contributing the most to phenotypic variation. Comprehensive evaluation shows that Lijiang Purple yam, Ganziyu No.3, and Ganbaiyu No.2 exhibited outstanding phenotypic traits, demonstrating significant potential for promotional application.

Keywords: *Dioscorea alata* L.; phenotypic trait; cluster analysis; principal component analysis

【研究意义】参薯(*Dioscorea alata* L.), 别称大薯、脚板薯、水山药等, 是薯蓣科薯蓣属多年生草质缠绕藤本植物, 也是我国南方普遍栽培的山药种类之一^[1]。其块茎富含淀粉、维生素、蛋白质等营养成分^[2-3], 同时含有薯蓣多糖^[4]、薯蓣皂苷^[5]、花青素^[6]等多种生理活性物质, 具有重要的营养价值和保健功能。我国参薯种山药栽培历史悠久, 种质资源丰富, 具有重要的研究与开发利用价值, 通过挖掘其遗传多样性, 揭示优良性状的遗传基础, 可为品种改良提供理论依据; 同时, 研究其多糖、酚类及维生素等活性成分的健康功效, 可为功能性食品及药用资源开发提供科学支持^[7-8]。然而, 目前对参薯种质资源的系统整理、鉴定及综合评价仍然不足, 导致其开发利用相对滞后。【前人研究进展】表型性状直接反映了植物的外部特征, 是植物经典分类与多样性评价的重要依据^[9-10]。吴迪等^[11]对275份辣椒种质资源的18个表型性状进行分析, 发现其变异系数为17.06%~84.02%, 并建议从果肉厚度、种子千粒质量和单株挂果数等性状入手, 开展高产新品种的选育和改良。李凯等^[12]对74份番茄种质的23个表型性状进行遗传多样性分析, 结果显示其变异程度高、类型丰富, 其中12个数量性状的遗传多样性指数为1.27~2.05(以株高最大), 11个质量性状的遗传多样性指数为0.20~1.39(以果顶性状最大)。关于山药遗传多样性的研究也取得了一定进展, 李丽红等^[13]基于7个数量性状和12个质量性状, 对72份福建山药种质资源进行分析, 将其划分为薯蓣、褐苞薯蓣、山薯和参薯4个类群。同时, 张武君等^[14]对37份福建山药地方种质资源的研究表明, 其数量性状的变异系数为21.01%~68.26%, 质量性状的多样性指数范围在0.281~1.349。此外, Cao等^[15]对112份山药材料的26个表型性状进行综合评价, 发现薯蓣属的遗传多样性最高, 其中叶形、叶柄颜色和块茎颜色的Shannon多样性指数较高, 且地下块茎性状的变异显著大于地上部性状。

【本研究切入点】我国的参薯种质资源主要分布于长江以南的亚热带和热带地区^[16-17], 近年来, 随着参薯种植面积与规模持续扩大, 品种混杂、种性退化等问题日益突出, 亟需开展参薯表型性状的精准鉴定及遗传多样性研究。【拟解决的关键问题】本研究以我国南方地区20份参薯种质资源为材料, 通过系统分析其质量性状和数量性状的表型数据, 揭示参薯表型变异规律及遗传多样性特征, 并结合主成分分析和聚类分析方法, 对参薯种质资源进行综合评价, 以为参薯种质资源的收集保存、鉴定评价及新品种选育提供材料基础和理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试材料为江西农业大学蔬菜高效栽培及利用江西省重点实验室收集或新育成的20份参薯种质资源, 包括来源于江西、福建、广东、云南的14份名优地方品种, 以及由实验室培育的6个新品种(表1)。

表1 供试材料
Tab.1 Information of test materials

编号 Number	品种代号 Variety code	品种名称 Variety name	来源 Source
1	Da-01	龙岩白山药	福建龙岩名优地方品种
2	Da-05	赣白玉1号	江西农业大学育成的新品种
3	Da-06	赣紫蒞2号	江西农业大学育成的新品种
4	Da-09	宜春紫山药	江西袁州名优地方品种
5	Da-11	湛江紫山药	广东湛江名优地方品种
6	Da-20	赣雪紫1号	江西农业大学育成的新品种
7	Da-24	赣紫蕴1号	江西农业大学育成的新品种
8	Da-29	兴国白山药1号	江西兴国名优地方品种
9	Da-30	遂川白山药	江西遂川名优地方品种
10	Da-31	兴国白山药2号	江西兴国名优地方品种
11	Da-38	丽江紫参薯	云南丽江名优地方品种
12	Da-41	曲江白山药	云南曲江名优地方品种
13	Da-274	于都紫山药2号	江西于都名优地方品种
14	Da-284	上犹紫山药	江西上犹名优地方品种
15	Da-303	赣白玉2号	江西农业大学育成的新品种
16	Da-400	于都紫山药1号	江西于都名优地方品种
17	Da-401	增城紫山药	广东增城名优地方品种
18	Da-403	赣紫蒞3号	江西农业大学育成的新品种
19	Da-404	安远紫山药	江西安远名优地方品种
20	Da-407	章贡白山药	江西章贡名优地方品种

1.2 试验方法

试验于2023年4月20日至11月2日在江西农业大学生态园科研基地进行,每份材料选取10个无病虫害、长度约10 cm的块茎为种薯,依次浸泡于0.01%的咪鲜胺溶液、0.001%的2,4-滴钠盐溶液各5 min,晾干后催芽。

田间试验采用随机区组设计,设置3次重复,每个小区的长为5 m,宽为0.75 m,采用单行起垄种植,株距为0.5 m,每个小区种植10个单株,按照常规方法进行山药种植及田间管理。

1.3 测定项目和方法

在参薯生长旺盛期(8月20日前后)测定地上部表型性状,块茎收获期(11月2日)测定地下部表型性状。每个小区随机选取6株生长状态一致且无病虫害的植株,按单株测定其表型性状。共测定了19个表型性状,包括11个质量性状和8个数量性状(表2)。表型性状的测定参照《山药种质资源描述规范和数据标准》^[18]进行,为了便于统计分析质量性状,对这11个质量性状进行分级,并根据不同的指标性状进行数字赋值(表2)。

1.4 数据标准化处理及统计分析

采用Excel 2021软件对20份参薯种质资源的表型性状数据进行汇总,利用SPSS 20.0软件计算数量性状之间的Pearson相关系数并分析其显著性,并通过Origin 2021软件绘制相关性热图。

根据质量性状的赋值,对19个表型性状数据进行统计,计算最大值(max)、最小值(min)、平均值(\bar{x})、标准差(SD),以及变异系数(CV, $CV=SD/\bar{x}$)。根据总体平均值(\bar{x})和标准差(σ),将数据分为10个等级,其中1级为 $[X, <(\bar{x}-2\sigma)]$,10级为 $[X, >(\bar{x}+2\sigma)]$,每级间隔为 0.5σ ,根据性状在各级别的分布情况,构建0~1矩阵;并利用公式 $H' = -\sum P_i \ln P_i$ 计算Shannon-Weaver遗传多样性指数(P_i 为第*i*种变异的频率)。完成19个性状的分级量化后,统计其分布频率和Shannon多样性指数^[19]。

使用SPSS 20.0软件对8个数量性状进行标准化处理后,开展主成分分析、隶属函数分析和综合评价计算^[20]。通过计算相关矩阵的特征根及其累积贡献率确定主成分,并利用特征向量筛选重要性状;根

据隶属函数值和权重系数计算综合评价 D 值 (D value), 对种质资源进行综合排名; 此外, 基于欧式平均距离, 采用 R 型聚类分析方法探讨 8 个数量性状之间的聚类关系^[21-22]。

对 19 个表型性状赋值并标准化后, 使用 SPSS 20.0 软件构建矩阵数据, 并采用系统聚类法 (组间连接法, 欧式平均距离) 对 20 份参薯种质资源进行聚类分析。根据聚类结果, 统计分析不同类别的 19 个性状的平均值, 以及各类别间表型性状的差异。

表 2 参薯表型性状测量指标

Tab.2 Criteria for measuring phenotypic trait in *Dioscorea alata* L.

	表型性状 Phenotypic trait	测量标准及赋值 Standard of measurement
数量性状 Quantitative trait	叶长	收获期茎蔓中部最大叶片的叶长平均值/cm
	叶宽	收获期茎蔓中部最大叶片的叶宽平均值/cm
	叶柄长	生长盛期叶片自叶柄基部至叶片基部的长度平均值/cm
	节间长	生长盛期茎蔓中部节间的长度平均值/cm
	块茎横径	收获期地下块茎的最大长度平均值/cm
	块茎纵径	收获期地下块茎的最大宽度平均值/cm
	块茎鲜重	收获期地下块茎的鲜重平均值/g
	叶片 SPAD 值	收获期茎蔓中部最大叶片的测量平均值 (SPAD)
质量性状 Qualitative traits	叶形	卵形(1); 心形(2); 剑形(3)
	叶色	黄绿色(1); 灰绿色(2); 深绿色(3)
	叶柄色	绿色基部紫色(1); 绿色(2)
	零余子	无(0); 有(1)
	块茎形状	近圆(1); 卵形(2); 圆柱(3); 脚板状(4); 不规则(5)
	块茎外表皮颜色	浅褐色(1); 褐色(2); 灰色(3)
	块茎内表皮颜色	乳白色(1); 黄白色(2); 紫色(3)
	块茎肉色	乳白色(1); 紫白色(2); 紫色(3)
	块茎肉质	光滑(1); 粒状(2)
	根毛	无(0); 有(1)
	根毛分布	底部(1); 中上部(2); 中下部(3); 全部(4)

SPAD 仪器生产厂家: 日本 Konica Minolta 仪器公司, 型号: SPAD-502。

The chlorophyll meter used in this study was the SPAD-502 model from Konica Minolta instruments, Japan.

2 结果与分析

2.1 基于质量性状的变异及遗传变异特征

20 份参薯种质资源茎蔓旋转性均为右旋, 对其他 11 个质量性状的统计分析结果表明, 各性状在不同等级上的分布并不均匀。具体来说, 叶片形状有 3 种类型, 其中剑形比例最高; 叶片颜色也有 3 种类型, 以黄绿色占比最大; 叶柄颜色分为基部紫色和绿色 2 种类型, 基部紫色占比更高; 零余子有结零余子和不结零余子 2 种类型, 大多数参薯不结零余子; 块茎形态有 5 种类型, 主要为卵形; 块茎外表皮颜色有 3 种类型, 以褐色为主; 块茎内表皮颜色同样有 3 种类型, 紫色为主; 块茎肉色有 3 种类型, 主要为乳白色; 块茎肉质分为光滑和粒状 2 种类型, 多数为粒状; 根毛有长根毛和不长根毛 2 种类型, 多数样本有长根毛; 根毛分布有 4 种类型, 多数集中在中上部 (表 3)。

从以上结果可以看出, 11 个质量性状的遗传表现具有不同的集中性, 不同性状的遗传多样性水平也存在差异。总体而言, 多样性指数的变化范围为 0.325~1.280, 平均值为 0.812。其中, 根毛分布的多样性指数最高, 块茎肉质的多样性指数最低。其他性状的遗传多样性指数由大到小依次为: 块茎形态 (1.238)、块茎肉色 (0.999)、块茎内表皮颜色 (0.857)、叶形和叶色 (0.791)、块茎外表皮颜色 (0.746)、叶柄色和零余子根毛有无 (0.647) (表 3)。

表 3 质量性状频率分布及多样性指数
Tab.3 Frequency distribution and diversity index of quality traits

性状 Trait	频率/% Frequency						Shannon 指数 Shannon index
	0	1	2	3	4	5	
叶形 Leaf shape		0.30	0.05	0.65			0.791
叶色 Leaf color		0.65	0.30	0.05			0.791
叶柄色 Petiole color		0.65	0.35				0.647
零余子 Bulbil	0.65	0.35					0.647
块茎形状 Tuber shape		0.05	0.50	0.10	0.30	0.05	1.238
块茎外表皮颜色 Tuber outer epidermis color		0.25	0.70	0.05			0.746
块茎内表皮颜色 Tuber inner epidermis color		0.10	0.25	0.65			0.857
块茎肉色 Tuber flesh colored		0.50	0.35	0.15			0.999
块茎肉质 Tuber fleshy		0.10	0.90				0.325
根毛 Root hair	0.30	0.70					0.611
根毛分布 Root hair distribution	0.30	0.40	0.10	0.20			1.280

2.2 基于数量性状的变异及遗传多样性分析

由表 4 可知,8 个数量性状存在差异,变异系数范围为 11.96%~163.80%,均超过 10%,说明参薯材料之间差异明显。其中,块茎横径的变异系数最高(163.80%),其次为块茎鲜重(59.43%)和块茎纵径(44.14%);叶片长度的变异系数最低(11.96%),其后依次为叶绿素 SPAD 值(12.69%)、节间长度(12.77%)、叶片宽度(15.34%)和叶柄长度(15.54%)。

从变异范围来看,块茎鲜重的变异范围最大,达到 1 126.44 g(189.85~1 316.29 g);叶片长度的变异范围为 12.87~20.07 cm,叶片宽度为 6.88~13.10 cm,叶柄长度为 6.38~12.50 cm,节间长度为 10.58~17.83 cm,块茎横径为 7.56~147.34 cm,块茎纵径为 11.60~50.04 cm,叶片 SPAD 值为 35.54~53.44。

综上所述,20 份参薯种质资源的变异系数和变异范围均较大,表明参薯性状差异显著,遗传多样性丰富。

表 4 数量性状统计分析
Tab.4 Descriptive statistics of quantitative traits

性状 Trait	平均数 Mean	最大值 Max	最小值 Min	变异范围 Range	标准差 SD	变异系数 CV
叶长/cm Leaf length	17.32	20.07	12.87	7.20	2.07	11.96%
叶宽/cm Leaf width	9.90	13.10	6.88	6.22	1.52	15.34%
叶柄长/cm Petiole length	8.27	12.50	6.38	6.12	1.29	15.54%
节间长/cm Internode length	14.67	17.83	10.58	7.25	1.87	12.77%
块茎横径/cm Tuber diameter	18.63	147.34	7.56	139.78	30.51	163.80%
块茎纵径/cm Tuber longitudinal diameter	18.63	50.04	11.60	38.44	8.22	44.14%
块茎鲜重/g Tuber weight	578.28	1316.29	189.85	1126.44	343.67	59.43%
叶片 SPAD 值 Soil plant analysis development of leaf	42.03	53.44	35.54	17.9	5.34	12.69%

2.3 基于数量性状间的相关性分析

基于 Pearson 相关系数分析,参薯的 8 个数量性状之间存在不同程度的关联性(表 5)。其中,5 组性状之间存在极显著相关性($P < 0.01$),2 组性状之间存在显著相关性($P < 0.05$)。具体而言,叶长与叶宽($r = 0.853$)、叶长与叶柄长($r = 0.713$)、叶长与节间长($r = 0.585$)以及叶柄长与叶宽($r = 0.774$)均呈极显著正相关;叶宽与节间长($r = 0.480$)呈显著正相关。此外,块茎横径与块茎鲜重($r = 0.713$)呈极显著正相关,块茎纵径与块茎鲜重($r = 0.490$)呈显著正相关。

表5 数量性状间相关性分析
Tab.5 Correlation analysis between quantitative traits

性状 Trait	叶长 Leaf length	叶宽 Leaf width	叶柄长 Petiole length	节间长 Internode length	块茎横径 Tuber diameter	块茎纵径 Longitudinal diameter	块茎鲜重 Tuber weight	叶片SPAD值 Soil plant analysis development of leaf
叶长 Leaf length	1.000							
叶宽 Leaf width	0.854**	1.000						
叶柄长 Petiole length	0.713**	0.774**	1.000					
节间长 Internode length	0.585**	0.480*	0.156	1.000				
块茎横径 Tuber diameter	0.168	0.087	0.182	-0.026	1.000			
块茎纵径 Tuber longitudinal diameter	0.113	0.197	0.349	-0.269	0.066	1.000		
块茎鲜重 Tuber weight	0.253	0.180	0.335	-0.096	0.713**	0.490*	1.000	
叶片SPAD值 Soil plant analysis development of leaf	0.268	0.221	-0.171	0.400	-0.096	-0.209	-0.223	1.000

SPSS软件Pearson相关系数显著性分析(*; $P < 0.05$; **; $P < 0.01$)。

Analysis was performed by SPSS software(*; $P < 0.05$; **; $P < 0.01$).

2.4 基于数量性状间的主成分分析

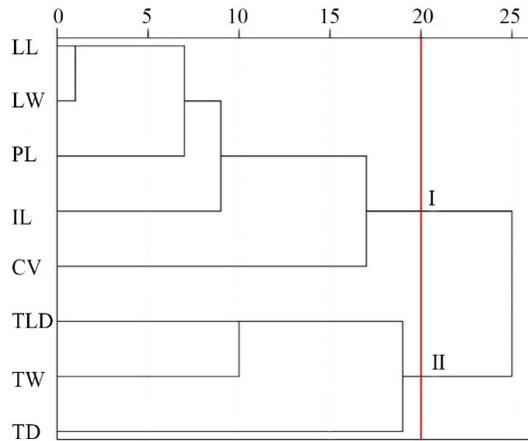
主成分分析结果表明(表6),前5个主成分(PC1~PC5)的累计贡献率为88.30%,能够较好地反映参薯主要性状的变异信息。其中,第1个主成分(PC1)的特征值为2.897,贡献率为36.215%,决定性特征向量为叶长(0.551)、叶宽(0.549)和叶柄长(0.433),主要反映地上部叶片相关性状,适用于筛选叶片较大、叶柄较长的品种;第2个主成分(PC2)的特征值为1.739,贡献率为21.736%,决定性特征向量为块茎鲜重(0.552),其次为块茎纵径(0.508),主要反映块茎发育对参薯生育结实的影响;第3个主成分(PC3)的特征值为0.990,贡献率为12.377%,决定性特征向量为块茎横径(0.878),主要反映块茎横向发育特征;第4个主成分(PC4)的特征值为0.743,贡献率为9.293%,决定性特征向量为叶片SPAD值(0.570),与光合作用效率相关;第5个主成分(PC5)的特征值为0.694,贡献率为8.679%,决定性特征向量为块茎纵径(0.577),其次为节间长(0.411),反映植株产量与长势潜力。

表6 8个表型性状的主成分分析
Tab.6 Principal component analysis of 8 phenotypic traits

性状 Trait	主成分分析 Principal component analysis				
	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5
叶长 Leaf length	0.551	0.065	0.055	-0.010	-0.148
叶宽 Leaf width	0.549	0.055	-0.055	0.034	-0.122
叶柄长 Petiole length	0.433	0.287	-0.178	-0.432	0.215
节间长 Internode length	0.382	-0.152	-0.071	0.266	0.411
块茎横径 Tuber diameter	0.090	-0.234	0.878	-0.381	0.103
块茎纵径 Tuber longitudinal diameter	-0.065	0.508	0.301	0.465	0.577
块茎鲜重 Tuber weight	0.061	0.552	0.284	0.242	-0.613
叶片SPAD值 Soil plant analysis development of leaf	0.215	-0.520	0.125	0.570	-0.166
特征值 Eigenvalue	2.897	1.739	0.990	0.743	0.694
贡献率/% Contribution rate	36.215	21.736	12.377	9.293	8.679
累计贡献率/% Cumulative contribution rate	36.215	57.951	70.329	79.622	88.300

2.5 基于数量性状间的聚类分析

R 型聚类分析结果表明(图 1),基于欧氏平均距离为 20 的分类阈值,参薯的 8 个数量性状可被划分为两大类,在第 I 类中,当距离为 10 时可进一步分为 2 个亚组,第一亚组包括叶长、叶宽、叶柄长和节间长,主要反映地上部形态特征,第二亚组为叶片 SPAD 值,表征光合作用能力;第 II 类包括块茎横径、块茎纵径和块茎鲜重,集中体现块茎发育状况。结合主成分分析的结果,从每类中选取 2 个代表性指标,确定叶长、叶宽、块茎横径和块茎鲜重作为评价参薯种质资源表型性状的关键指标。



纵坐标:8 个数量性状;横坐标:欧式平均距离。

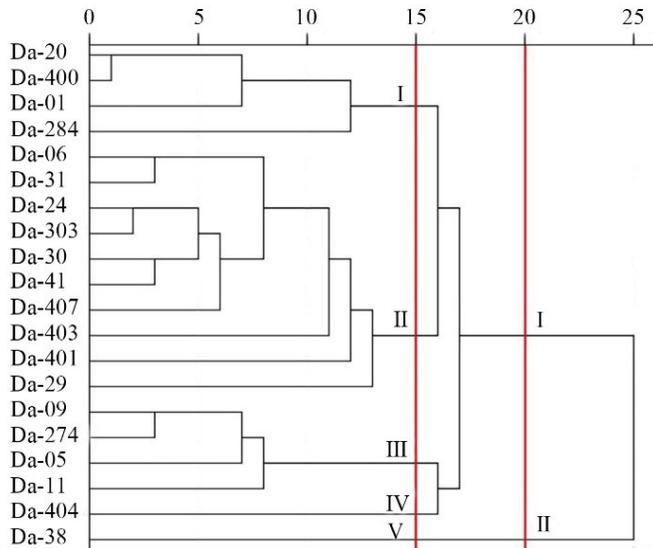
The vertical axis: 8 quantitative traits; the horizontal axis: European average distance.

图 1 参薯的数量性状 R 型聚类分析

Fig.1 R-type clustering of quantitative traits in *Dioscorea alata* L.

2.6 基于表型性状的聚类分析

基于 19 个表型指标对 20 份参薯种质资源进行了系统聚类分析(图 2)。结果表明,当聚类距离为 20 时,20 份参薯种质资源可分为 2 类,其中 Da-38 单独划分为一类,其余 19 个品种聚为另一类;当聚类距离为 15 时,这 20 份参薯种质资源进一步细分为 5 类,表明参薯种质资源在表型性状上表现出显著的遗传多样性。



纵坐标:20 份品种代号;横坐标:欧式平均距离。

The vertical axis: 20 varietal codes; The horizontal axis: European average distance.

图 2 基于表型特征的 20 份参薯种质资源聚类分析

Fig.2 Clustering for 20 varieties of *Dioscorea alata* L. based on phenotypic characters

根据各指标值总结出5类参薯种质的表型特征(表7)。第I类:包括4个品种,进一步划分为2个亚组, Da-01、Da-20、Da-400为一个亚组, Da-284为另一个亚组。该类种质表现为叶柄最长、叶片SPAD值最低,块茎呈扁平状且纵径最长,鲜重最大。第II类:包含10个品种,当聚类距离为10时可细分为4个亚组,其中 Da-06、Da-31、Da-24、Da-303、Da-30、Da-41、Da-407为一组, Da-401、Da-403、Da-29分别各为一组。该类种质块茎多为乳白色,趋向横向发育,且鲜重较小。第III类:由4个品种组成,可分为2个亚组, Da-09、Da-274、Da-05为一个亚组, Da-11为另一个亚组。该类种质叶片较小,块茎偏向纵向发育,且鲜重最小。第IV类:单一品种 Da-404,特征为节间较短,块茎发育适中,且皮肉均为紫色。第V类:单一品种 Da-38,具有最大的叶片、独特的叶形、深绿色的叶色和较高的叶绿素相对含量,块茎生长发育正常,肉色为紫白色。

表7 5类参薯的表型特征值

Tab.7 Phenotypic characteristic values of 5 types of *Dioscorea alata* L.

类别 Category	I	II	III	IV	V
叶形 Leaf shape	剑形(75%)	剑形(80%)	卵形(50%)剑形(50%)	卵形	心形
叶色 Leaf color	黄绿色(75%)	黄绿色(60%)	黄绿色(75%)	黄绿色	深绿色
叶柄色 Petiole color	绿色基部紫色	绿色(60%)	绿色基部紫色(75%)	绿色基部紫色	绿色基部紫色
零余子 Bulbil	无	有(50%)无(50%)	无(75%)	无	有
块茎形状 Tuber shape	扁平状	卵形(50%)	卵形(50%)	卵形	卵形
块茎外表皮颜色 Tuber outer epidermis color	褐色	褐色(50%)	褐色(75%)	褐色	褐色
块茎内表皮颜色 Tuber inner epidermis color	紫色	黄白色(50%)	紫色(75%)	紫色	紫色
块茎肉色 Tuber flesh colored	紫白色(50%)	乳白色(80%)	紫白色(50%)	紫色	紫白色
块茎肉质 Tuber fleshy	粒状	粒状(90%)	粒状(75%)	粒状	粒状
根毛 Root hair	有(75%)	有(50%)	有	有	有
根毛分布 Root hair distribution	中下部(50%)	无(50%)底部(20%)	底部(75%)	底部	中上部
叶长/cm Leaf length	17.66	18.03	14.38	17.89	20.07
叶宽/cm Leaf width	10.19	10.21	7.83	10.61	13.1
叶柄长/cm Petiole length	8.8	8.56	6.92	8.76	8.16
节间长/cm Internode length	13.89	15.8	12.85	10.58	17.83
块茎横径/cm Tuber diameter	16.95	24.77	9.38	10	9.54
块茎纵径/cm Tuber longitudinal diameter	27.03	15.32	18.43	16.98	20.5
块茎鲜重/ g Tuber Weight	1118.63	459.75	352.54	531.59	551.88
叶片SPAD值 Soil plant analysis development of leaf	36.31	42.83	41.26	48.56	53.44

2.7 20份参薯种质资源的综合评价

为了筛选出优异的参薯种质资源,结合表型性状的主成分分析结果,计算分析隶属函数值及5个主成分的权重系数。结果显示,主成分PC1至PC5的权重系数(Wi)分别为0.41、0.25、0.14、0.11和0.10。基于这些系数,进一步计算分析20份参薯种质资源的综合评价值(D值)并对其进行排名(表8),其中,D值越大表明品种的综合性状越优异。结果显示, Da-38(丽江紫参薯)的D值最高,表现出生长周期长、活力强、叶片宽大、茎叶较粗壮、块茎形态规则等优良性状。此外, Da-403(赣紫蕨3号)、Da-303

(赣白玉 2 号)、Da-401(增城紫山药)、Da-400(于都紫山药 1 号)等品种也有较高的综合评价价值,可作为优异种质资源进行种质创新、良种繁育及推广。

表 8 前 10 名优良品种综合评估

Tab.8 Comprehensive evaluation of superior varieties

排名	品种代号 Variety code	品种名 Variety name	综合评价价值 D value
1	Da-38	丽江紫参薯	0.637
2	Da-403	赣紫蕨 3 号	0.489
3	Da-303	赣白玉 2 号	0.481
4	Da-401	增城紫山药	0.472
5	Da-400	于都紫山药 1 号	0.448
6	Da-29	兴国白山药 1 号	0.434
7	Da-20	赣雪紫 1 号	0.428
8	Da-24	赣紫蕴 1 号	0.407
9	Da-407	章贡白山药	0.387
10	Da-404	安远紫山药	0.368

3 讨论与结论

植物的农艺性状由基因与环境共同作用决定,对其调查与分析是研究植物遗传多样性的重要手段^[23],农艺性状的变异范围直接反映了遗传多样性的丰富程度。通过分析参薯的农艺性状,可以深入了解不同产地参薯的遗传多样性特点,为种质资源保存、开发利用及优良品种选育提供理论依据。同时,将农艺性状与目标性状相结合,能够显著加速参薯育种进程并提高育种效率^[24]。本研究对 20 份参薯种质资源进行了系统分析,结果显示,11 个质量性状的多样性指数变化范围为 0.325~1.280,8 个数量性状的变异系数范围为 11.96%~163.80%,表明供试材料具有丰富的遗传多样性,且品种间差异显著。与辛佳佳等^[25]报道的江西地方品种山药的性状变异(单株叶数变异系数最大为 64.76%,茎粗变异系数最小为 24.67%)相比,本研究中参薯块茎横径的变异系数显著更高,这种现象可能与参薯和山药之间的种间差异有关。在山药农艺性状多样性指数的研究中,叶片质地、块茎外皮颜色和茎蔓颜色是主要评价指标,其平均多样性指数为 1.017 3^[13]。本研究对参薯 11 个质量性状的多样性分析表明,其块茎根毛分布区域多变,块茎形态有 5 种类型,其中卵形和脚板状所占比例较高,肉色以乳白色或紫白色为主,其多样性主要集中在块茎相关特征上,平均多样性指数为 0.812,略低于福建山药。这一差异可能是由于本试验材料均为参薯种质,其表型变异程度低于不同种山药之间的变异。此外,数量性状受多基因控制且易受环境因素影响。本研究中,8 个数量性状的变异系数介于 11.96%(叶长)至 163.80%(块茎横径),均大于 10%,平均为 41.96%。这一结果与赵圆等^[26]研究基本一致,进一步证明参薯表型性状多样且材料丰富度较高,可为品种鉴定和选育提供丰富的遗传基础。

主成分分析法能够将多个评价指标转化为少数几个综合指标,既简化了评价过程,又能反映大部分性状信息。此外,将主成分分析与隶属函数及权重数据相结合,对植物种质资源进行综合评价,所得的 *D* 值在一定程度上代表了种质的综合性状优异性,为进一步的选育工作提供了参考依据^[27-29]。本研究采用主成分分析法,基于 8 个数量性状对 20 份参薯种质资源进行了综合评价。结果显示,不同参薯品种的 *D* 值范围为 0.091~0.637,均值为 0.358,表明品种间存在显著差异。根据综合评价排名,Da-38、Da-403 和 Da-303 位列前三,这些品种在叶片、块茎等相关性状上表现优异,遗传变异较大,具有较高的种质创新和培育潜力;与吴金平等^[30]对 66 份山药的研究相比,其提取的主成分包括高产株型、抗病性、块茎形态和颜色,作为品种选育的参考依据。

基于形态标记的系统聚类分析在一定程度上能够反映种质资源之间的亲缘关系^[31]。程文杰^[32]对 133 份参薯种质进行了性状统计,聚类结果显示可分为 6 个类群,且类群划分与叶片特征显著相关;刘

梓涵等^[33]则基于42份参薯种质将其分为2类,差异主要体现在块茎形状、内表皮颜色及肉质颜色等性状上。然而,本研究的聚类结果与前人存在一定差异,程文杰^[32]的类群划分主要基于叶片特征,而刘梓涵等^[33]的分类则侧重于块茎性状。本研究通过综合叶片、块茎、根系等多性状指标,将参薯种质划分为5个类群,进一步揭示了性状间的关联性。聚类结果与种质的地理来源存在一定的相关性,例如来源于云南丽江的丽江紫参薯单独聚为一类,这可能与其独特的形态特征和地理隔离有关。然而,其他类群中仍然包含来自不同地理来源的参薯种质资源,这可能是由于本研究样本容量有限且种质采集地较为集中,难以明确分类;此外,长期引种、人工选育、基因表达与外界环境的相互作用也会影响聚类结果。相较于前人研究,本研究的样本量虽较小,但在性状统计上更为全面;同时,本研究通过引入新性状和多维数据分析方法,为参薯种质资源的深入挖掘和利用提供了新的视角,具有一定的理论和实践价值。

综上所述,参薯的块茎性状的变异较茎叶性状更为丰富,其质量性状和数量性状的多样性指数平均值分别为0.812和1.577,数量性状的变异系数范围为11.96%~163.80%,表明品种间存在显著差异。同时,地上部和地下部性状之间存在显著或高度显著的相关性。基于主成分分析提取的5个主成分,可明确各特征向量所表征的关键性状。根据D值大小,丽江紫参薯、赣紫紫3号和赣白玉2号等品种在综合性状上表现突出,可作为优质育种材料。此外,结合主成分特征向量与性状聚类结果,叶片长宽比、块茎横径和块茎重可以作为品种选育的重要指标。

参考文献 References:

- [1] CHAIR H, SARDOS J, SUPPLY A, et al. Plastid phylogenetics of oceaania yams (*Dioscorea* spp., Dioscoreaceae) reveals natural interspecific hybridization of the greater yam (*D. alata*) [J]. Botanical journal of the linnean society, 2016, 180(3): 319-333.
- [2] 刘媛洁, 余俏, 张良. 脚板薯的研究进展[J]. 安徽农业科学, 2013, 41(24): 9951-9953.
LIU Y J, YU Q, ZHANG L. Review about the research on *Dioscorea alata* Lirm. sp [J]. Journal of Anhui agricultural sciences, 2013, 41(24): 9951-9953.
- [3] 丁志遵. 我国薯蓣资源研究与利用[J]. 作物品种资源, 1986(2): 1-4.
DING Z Z. Dioscorea resources research and utilization in China [J]. China seed industry, 1986(2): 1-4.
- [4] WANG P, SHAN N, ALI A, et al. Comprehensive evaluation of functional components, biological activities, and minerals of yam species (*Dioscorea polystachya* and *D. alata*) from China [J]. LWT-Food science and technology, 2022, 168: 113964.
- [5] SHAH H J, LELE S S. Extraction of diosgenin, a bioactive compound from natural source *Dioscorea alata* Var purpureae [J]. Journal of analytical & bioanalytical techniques, 2012, 3(4): 1-3.
- [6] IMBERT M P, SEAFORTH C. Anthocyanins in *Dioscorea alata* L. [J]. Experientia, 1968, 24(5): 445-447.
- [7] 王彦平, 田春丽, 孙瑞琳, 等. 紫山药的营养保健功能及开发利用研究进展[J]. 食品研究与开发, 2017, 38(1): 200-203.
WANG Y P, TIAN C L, SUN R L, et al. Research progress on nutritional and healthy functions of purple yam [J]. Food research and development, 2017, 38(1): 200-203.
- [8] 于东, 林跃伟, 陈桂星, 等. 紫山药营养成分分析研究[J]. 营养学报, 2010, 32(2): 190-192.
YU D, LIN Y W, CHEN G X, et al. Analysis of the nutritional components of purple yam [J]. Acta nutrimenta Sinica, 2010, 32(2): 190-192.
- [9] 翟艺兰, 张楚磊, 楚爱香, 等. 二十七种槭属植物表型多样性分析[J]. 浙江农业学报, 2023, 35(11): 2621-2635.
ZHAI Y L, ZHANG C L, CHU A X, et al. Phenotypic diversity in 27 *Acer* species [J]. Acta agriculturae Zhejiangensis, 2023, 35(11): 2621-2635.
- [10] 赵鹏霞, 杨旭, 杨志玲, 等. 基于腊叶标本分析的木姜叶柯表型性状变异及地理分化研究[J]. 江西农业大学学报, 2023, 45(2): 285-297.
ZHAO P X, YANG X, YANG Z L, et al. Phenotypic variation and geographical differentiation of lithocarpus litseifolius based on herbarium-specimen analysis [J]. Acta agriculturae universitatis Jiangxiensis, 2023, 45(2): 285-297.
- [11] 吴迪, 付文婷, 吴康云, 等. 275份辣椒种质资源表型性状的遗传多样性分析[J]. 中国瓜菜, 2024, 37(9): 47-53.

- WU D, FU W T, WU K Y, et al. Genetic diversity analysis of phenotypic traits among 275 chili pepper germplasm resources [J]. *China cucurbits and vegetables*, 2024, 37(9): 47-53.
- [12] 李凯, 郑于莉, 刘燕, 等. 74 份番茄种质资源表型性状遗传多样性分析及综合评价 [J]. *安徽农业科学*, 2024, 52(14): 28-33.
- LI K, ZHENG Y L, LIU Y, et al. Genetic diversity analysis and comprehensive evaluation of phenotypic traits of 74 tomato germplasm resources [J]. *Journal of Anhui agricultural sciences*, 2024, 52(14): 28-33.
- [13] 李丽红, 华树妹, 陈芝华, 等. 福建山药地方品种表型性状的遗传多样性研究 [J]. *云南农业大学学报(自然科学)*, 2016, 31(2): 257-262.
- LI L H, HUA S M, CHEN Z H, et al. Phenotypic genetic diversity research on *Dioscorea* landraces of Fujian Province [J]. *Journal of Yunnan agricultural university (natural science)*, 2016, 31(2): 257-262.
- [14] 张武君, 陈菁琰, 刘保财, 等. 37 份福建山药地方品种主要性状遗传变异研究 [J]. *福建农业学报*, 2019, 34(11): 1246-1254.
- ZHANG W J, CHEN J Y, LIU B C, et al. Genetic variations on major traits of 37 Chinese yam germplasm [J]. *Fujian journal of agricultural sciences*, 2019, 34(11): 1246-1254.
- [15] CAO T, SUN J, SHAN N, et al. Uncovering the genetic diversity of yams (*Dioscorea* spp.) in China by combining phenotypic trait and molecular marker analyses [J]. *Ecology and evolution*, 2021, 11(15): 9970-9986.
- [16] 夏薇, 吴文婧, 许云, 等. 大薯种质资源多样性研究进展 [J]. *植物生理学报*, 2017, 53(5): 781-784.
- XIA W, WU W Q, XU Y, et al. Research progress for the genetics diversity analysis of water yam (*Dioscorea alata* L.) [J]. *Plant physiology journal*, 2017, 53(5): 781-784.
- [17] 宋曙辉, 刘庞源, 王文琪, 等. 不同产地紫山药营养和功能成分分析 [J]. *营养学报*, 2012, 34(1): 92-93.
- SONG S H, LIU P Y, WANG W Q, et al. Analysis of nutritional and functional components of purple *Dioscorea alata* L. in different areas [J]. *Acta nutrimenta Sinica*, 2012, 34(1): 92-93.
- [18] 王海平, 沈镛. 山药种质资源描述规范和数据标准 [M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2013.
- WANG H P, SHEN D. Descriptors and data standard for yam (*Dioscorea* spp.) [M]. Beijing: China's Agricultural Science and Technology Press, 2013.
- [19] 芮文婧. 基于表型性状与 SNP 标记的番茄种质资源遗传多样性分析 [D]. 银川: 宁夏大学, 2018.
- RUI W J. Genetic diversity analysis of tomato (*Solanum lycopersicum* L.) germplasm resources based on morphological and SNP markers [D]. Yinchuan: Ningxia University, 2018.
- [20] 郭强, 江清梅, 何洪良, 等. 基于主成分分析和聚类分析评价 141 份中蔗优良品系资源 [J]. *热带作物学报*, 2024, 45(1): 49-59.
- GUO Q, JIANG Q M, HE H L, et al. Evaluation of 141 excellent Zhongzhe sugarcane germplasm based on principal component analysis and cluster analysis [J]. *Chinese journal of tropical crops*, 2024, 45(1): 49-59.
- [21] 魏广伟, 阳慧怡, 王敏, 等. 芝麻种质资源表型性状遗传多样性分析及综合评价 [J]. *江苏农业科学*, 2022, 50(18): 122-130.
- WEI G W, YANG H Y, WANG M, et al. Genetic diversity analysis and comprehensive evaluation of phenotypic traits of sesame germplasm resources [J]. *Jiangsu agricultural sciences*, 2022, 50(18): 122-130.
- [22] 王荣, 董邵云, 刘小萍, 等. 黄瓜种质资源果实性状遗传多样性分析 [J]. *中国瓜菜*, 2024, 37(7): 20-28.
- WANG R, DONG S Y, LIU X P, et al. Genetic diversity analysis of fruit-related traits in cucumber germplasm resource [J]. *China cucurbits and vegetables*, 2024, 37(7): 20-28.
- [23] WU X, PI Z, LI S, et al. Exploring sampling strategies and genetic diversity analysis of red beet germplasm resources Using SSR Markers [J]. *Horticulturae*, 2024, 10(9): 1008.
- [24] SHARMA P, MEHTA G, SHEFALI, et al. Development and validation of heat-responsive candidate gene and miRNA gene based SSR markers to analysis genetic diversity in wheat for heat tolerance breeding [J]. *Molecular biology reports*, 2021, 48(1): 381-393.
- [25] 辛佳佳, 汤洁, 张洋, 等. 基于表型性状和 SSR 标记的江西地方山药种质遗传多样性分析 [J]. *江西农业学报*, 2023, 35(5): 7-13.
- XIN J J, TANG J, ZHANG Y, et al. Genetic diversity analysis of local *Dioscorea opposita* germplasm resources in Jiangxi Province based on phenotypic traits and SSR markers [J]. *Acta agriculturae Jiangxi*, 2023, 35(5): 7-13.

- [26] 赵圆,张艳芳,杨帆,等.基于形态标记和 AFLP 标记的山药种质资源遗传多样性分析[J].江苏农业科学,2023,51(6):47-54.
ZHAO Y,ZHANG Y F,YANG F,et al.Genetic diversity analysis of yam germplasm resources based on morphological markers and AFLP markers[J].Jiangsu agricultural sciences,2023,51(6):47-54.
- [27] 薛贤滨,贾琼,陈峥峰,等.基于主成分分析的苦荞麦重组自交系农艺性状综合评价[J].浙江农业学报,2024,36(4):748-759.
XUE X B,JIA Q,CHEN Z F,et al.Comprehensive evaluation of agronomic characteristics of recombinant inbred lines of tartary buckwheat based on principal component analysis[J].Acta agriculturae Zhejiangensis,2024,36(4):748-759.
- [28] 王楠艺,付文婷,周鹏,等.基于主成分分析的30个辣椒品种果实品质综合评价[J].中国瓜菜,2024,37(4):46-55.
WANG N Y,FU W T,ZHOU P,et al.Comprehensive evaluation of fruit quality of 30 pepper varieties based on principal component analysis[J].China cucurbits and vegetables,2024,37(4):46-55.
- [29] 马晓宣,张川,秦皖雪,等.129份葡萄种质资源的鉴定与综合评价[J/OL].分子植物育种(2024-02-26)[2024-08-12].
<https://link.cnki.net/urlid/46.1068.S.20240223.1440.008>.
MA X X,ZHANG C,QIN H X,et al.Identification and comprehensive evaluation of 129 grape germplasm resources[J/OL].Molecular plant breeding (2024-02-26)[2024-08-12].<https://link.cnki.net/urlid/46.1068.S.20240223.1440.008>.
- [30] 吴金平,矫振彪,郭凤领,等.基于形态学标记的山药种质资源遗传多样性研究[J].中国野生植物资源,2017,36(1):11-14.
WU J P,JIAO Z B,GUO F L,et al.Study on germplasm genetic diversity of yam based on morphological markers[J].Chinese wild plant resources,2017,36(1):11-14.
- [31] 宋吉轩,李云,邓仁菊,等.贵州紫心甘薯种质资源形态标记聚类分析[J].北方园艺,2017(18):58-61.
SONG J X,LI Y,DENG R J,et al.Cluster analysis of morphologic characteristic of germplasm resources for purple sweetpotato in Guizhou[J].Northern horticulture,2017(18):58-61.
- [32] 程文杰.大薯种质资源遗传多样性分析[D].海口:海南大学,2010.
CHENG W J.Studies on genetic diversity of *Dioscorea alata* L.[D].Haikou:Hainan University,2010.
- [33] 刘梓涵,苏洪乙,刘铭,等.基于表型性状和 EST-SSR 分子标记的参薯种质资源遗传多样性分析[J].分子植物育种,2023,21(21):7061-7070.
LIU Z H,SU H Y,LIU M,et al.Genetic diversity analysis of the germplasm resources of greater yam based on phenotypic traits and EST-SSR markers[J].Molecular plant breeding,2023,21(21):7061-7070.