

# 国内外栽培木薯 (*Manihot esculenta* Crantz) 种质资源表型多样性分析

肖鑫辉, 李开绵, 许瑞丽, 周建国, 张洁, 王明, 万仲卿, 叶剑秋

(中国热带农业科学院热带作物品种资源研究所/农业部木薯种质资源保护与利用重点实验室, 海南儋州 571737)

**摘要:**以国内外不同地理来源的 228 份木薯资源为材料, 通过评价植株 15 个茎和块根的描述型表型性状及 7 个与产量相关的数量性状, 初步了解其表型遗传多样性, 为种质资源创新利用、针对性地引种和育种亲本选配提供理论参考。结果表明, 国内外不同地理来源木薯资源描述型性状频率分布较一致, 多以张开型、三分叉、 $30^{\circ} \sim 45^{\circ}$  分枝角度、主茎内皮浅绿色居多, 块根性状以表皮粗糙、外皮淡褐色、内皮乳黄色、肉质白色资源居多; 数量性状多样性指数为 1.895 ~ 2.073, 描述型性状多样性指数为 0.435 ~ 1.889, 表明 228 份木薯资源遗传多样性丰富, 且数量性状存在较大程度变异 (8.91% ~ 44.60%), 国内资源块根直径极显著高于国外资源, 国外资源干物率极显著高于国内资源, 说明国内外资源的块根直径和干物率具有明显的遗传差异, 利用现有资源可能选育出产量高、品质好的品种。两步聚类分析将参试资源明显划分为两大类群, 类群 I 主要特征为株型张开、分枝角度中等偏大, 群体不整齐, 主茎较粗, 薯块产量较高资源; 类群 II 为株型紧凑直立型、分枝角度小, 群体整齐, 主茎较细, 薯块干物率较高资源。在今后的育种工作中, 可选择同类资源中表型差异互补的种质为亲本, 聚合优良性状, 以达到育种期望目标。

**关键词:**木薯; 种质资源; 表型; 多样性

## Phenotypic Diversity Analysis of Cassava (*Manihot esculenta* Crantz) Germplasm from China and Abroad

XIAO Xin-hui, LI Kai-mian, XU Rui-li, ZHOU Jian-guo, ZHANG Jie, WANG Ming, WAN Zhong-qing, YE Jian-qiu  
(Tropical Crops Genetics Resources Institute, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences / Key Laboratory of Conservation and Utilization of Cassava Genetic Resources, Ministry of Agriculture, Danzhou Hainan 571737)

**Abstract:** A total of 228 accessions of cassava germplasm were collected from 19 regions of China and abroad. 22 morphological and agronomic characters including 15 descriptive morphological characters of stems and roots, as well as 7 quantitative characters related to yield, were evaluated. The aim of the study was to understand the genetic diversity of germplasm and provide a theoretical reference for germplasm innovation, as well as introduction and selection of parents for breeding. Results showed that the frequency and distribution of morphological characters of cassava resources from China and abroad were uniform. The majority were the types of open-branches with three bifurcation, 30 degrees to 45 degrees of branching angle, light-green endothelium, white fleshy roots with rough and brown epidermis, and yellow endothelium. Diversity indexes showed 1.895-2.073 and 0.435-1.889 for quantitative and morphological traits respectively. Broad range of variability from 8.91% -44.60% of quantitative characters was observed among the 228 accessions. Root diameter of China resources was significantly higher than that of foreign resources, while dry matter content of the foreign resources was significantly higher than that of China resources, indicated that the root diameter and the dry matter content of domestic and foreign re-

收稿日期: 2016-02-29 修回日期: 2016-04-28 网络出版日期: 2016-12-16

URL: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.4996.S.20161216.0928.004.html>

基金项目: 农业部物种资源保护项目 (2015NWB045、15RZZY-08); 现代农业产业技术体系建设专项资金资助 (CARS-12-hnlkm); 国家“十二五”科技计划 (2012AA101204-2)

第一作者研究方向为木薯种质资源鉴定评价研究。E-mail: xiaoxinhui1983@163.com

通信作者: 叶剑秋, 研究方向为木薯种质资源鉴定评价与创新利用研究。E-mail: yejianqiu2006@126.com

sources had obvious genetic differences. It was possible to choose high yield and good quality varieties from these germplasms. Two step cluster analysis obviously divided the resources into two similarity groups I and II. Group I was composed of open-branch types with medium to large branching angle, irregular population and thick stem, high tubers yield. Group II was composed of compact and upright plant types with small branching angle, regular population, thin stem and high dry matter content in the tuber. Future breeding work should integrate phenotypic differences of the parents into progenies by combination of elite characters to achieve expected objectives in breeding programs.

**Key words:** Cassava; germplasm; phenotypic; diversity

木薯(*Manihot esculenta* Crantz,  $2n = 36$ )是一年生或多年生直立灌木,分布区域位于南北纬  $30^\circ$  之间,海拔 2000m 以下。栽培木薯最初出现在公元前 5000-7000 年巴西亚马逊地区,18 世纪引入亚洲,19 世纪在南亚和东南亚地区广泛种植<sup>[1]</sup>。据 FAO 最新统计数据<sup>[2]</sup>表明,全世界约有 103 个国家生产木薯及其副产品,2013 年,全球种植面积达 2073 万  $\text{hm}^2$ ,年总产 27672 万 t 左右,成为解决饥饿和贫困的重要热带作物,是世界超过 8 亿人口的粮食保障<sup>[3]</sup>。中国于 1820 年开始引种栽培,现已广泛分布于华南地区,广东、广西、海南栽培面积最大,福建、云南、江西、湖南次之,四川、贵州等省亦有少量栽培。我国从 20 世纪初开始由华侨和有关机构陆续引进木薯种质,50 年代至今,已先后从引进的种质中选育出系列主栽品种,如热带农业科学院品种资源研究所选育的华南系列品种,在我国木薯生产中发挥了巨大作用。木薯是一种基因杂合度较高的作物,杂交后代具有丰富的遗传变异多样性,为选择提供良好的机会,但育种亲本选择上尚存在盲目性,种质资源

遗传多样性分析及优异资源的筛选对育种亲本选择有重要指导意义。有关木薯种质资源遗传多样性的研究多集中在少量资源分子水平分析<sup>[4-7]</sup>,形态学性状的鉴定和描述仍然是种质资源研究颇为有效的方法和途径<sup>[8-9]</sup>。目前国家种质资源圃中已保存木薯资源 609 份,引进及收集种质表型性状标记遗传多样性研究尚未系统报道,本研究通过对 228 份国内外不同地理来源的木薯资源进行表型性状遗传多样性分析,了解其遗传多样性程度,不同种质的遗传特性、生长发育规律和育种利用潜力,为挖掘优异种质资源、木薯品种改良和种质资源创新拓宽基础。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

以中国热带农业科学院热带作物种质资源研究所国家木薯种质资源圃保存的 228 份木薯种质资源为材料,其中国内资源 105 份,国外资源 123 份。这些种质原产地及名称见表 1。

表 1 木薯资源的来源、份数及名称

Table 1 Origin, number and name of cassava germplasm resources

	来源 Origin	份数 No.	名称 Name
国内资源 (105 份)	中国海南	82	华南 5 号、华南 6 号、华南 7 号、华南 8 号、华南 9 号、华南 10 号、华南 11 号、华南 12 号、华南 8013、华南 8002、华南 101、华南 102、华南 201、华南 205、华南 124、华南 6068、八-1、白沙 4 号、宝岛 9-1、宝岛 9-2、宝岛 9-3、宝岛 9-5、海南红心、海南细叶、琼中 1 号、文昌红心、兴隆 1 号、植灰、华南 205 多倍体、华南 124 多倍体、华南 6068 多倍体、ZM 7901、ZM 8229、ZM 8229 多倍体、ZM 8316、ZM 8337、ZM 8340、ZM 8625、ZM 8641、ZM 8701、ZM 8752、ZM 9036、ZM 9066、ZM 9079、ZM 9242、ZM 9244、ZM 93164、ZM 93236、ZM 93274、ZM 9419、ZM 9426、ZM 9495、ZM 94107、ZM 95027、ZM 95038、ZM 95111、ZM 95125、ZM 9679、ZM 96114、ZM 96135、ZM 9710、ZM 9713、ZM 9781、ZM 98173、ZM 98178、ZM 98243、ZM 98246、ZM 9928、ZM 9932、ZM 9936、ZM 99140、ZM 99200、ZM 99206、ZM 99229、ZM 99247、ZM 99250、ZMF 520、ZMF 701、B 3、E25、3555-6、4363
	中国广西	11	GR 891、GR 911、桂热 3 号、桂热 4 号、桂热 5 号、新选 048、广西 2 号、广西 3 号、广西 4 号、广西木薯、会仙白皮
	中国贵州	3	贵州 1 号、贵州 2 号、贵州 3 号
	中国福建	1	福建华安

表 1(续)

来源	份数	名称
Origin	No.	Name
中国广东	3	南植 188、南植 199、广东 1 号
中国云南	5	云南 2、云南 7、云南 8、云南思茅、者东镇街兴社坡角
国外资源 (123 份)	39	COL 1050、COL 2436、哥伦比亚 1 号、哥伦比亚 2 号、CM 92-56-1、CM 385-6、CM 483-2、CM 523-7、CM 769-2、CM 837、CM 901、CM 965-3、CM 1210-10、CM 1585-13、CM 2399-4、CM 3970-8、CM 3993-9、CM 4040-1、CM 4054-40、CM 6740-7、CM 7595-1、CM 1732-15、CM 3327-4、CM 4031-2、COL 523-7、COL 141、SM 28-80-3、SM 610-1、SM 1406-1、SM 1433-3、SM 1568-2、SM 1747、SM 2300-1、SM 2323-6、M·COL 22、M·COL 1468、SG 424-19、CG 501-2、MCR 142
巴西	6	BRA 12、BRA 274、BRA 206、BRA 273、FLAxxx-12、FLAxxx-25
厄瓜多尔	3	ECU 81、ECU 83、ECU 84
秘鲁	1	PER 557
危地马拉	1	GUA 76
墨西哥	1	MEX 65
印度尼西亚	1	印尼细叶
老挝	2	老挝班拉绍、老挝食科
马来西亚	3	马来 2 号、马来 4 号、马来 5 号
缅甸	1	缅甸种
越南	7	KM 21-2、KM 94、KM 98-1、KM 98-6、KM 98-7、KM 937-7、SCT 104-264
泰国	35	KU 50、R 1、R 2、R 3、R 5、R 7、R 9、R 60、R 72、R 80、R 90、慧丰 60、Hanatee、OMR 32-29-1、OMR 32-29-4、OMR 35-2-6、OMR 36-34-1、OMR 36-34-6、OMR 36-40-1、OMR 36-63-6、CMR 26-07-15、CMR 34-11-3、CMR 35-22-196、CMR 35-70-1、CMR 35-70-6、CMR 36-40-9、CMR 36-40-12、CMR 36-60-12、CMR 36-63-4、CMR 37-14-9、CMR 38-136-1、CMR 38-136-4、泰引 1 号、泰引 2 号、花叶木薯变
瑞士	23	瑞士 13M、瑞士 B25、瑞士 C24、瑞士 D23、瑞士 F21、瑞士 G20、瑞士 H19、瑞士 J17、瑞士 L15、瑞士 M14、瑞士 N13、瑞士 NO12、瑞士 D12、瑞士 P11、Q 10、瑞士 R9、瑞士 S8、瑞士 88、瑞士 T7、瑞士 U16、瑞士 V5、瑞士 N4、瑞士 X3

## 1.2 试验地概况

试验地点位于海南省儋州市,中国热带农业科学院热带作物品种资源研究所试验基地,地处 109°30'E、19°30'N,年均气温 23.1 °C,年均降雨量 1823 mm,地势平坦,砖红壤,pH 5.9,有机质 1.34%、全氮 0.04%、全磷 0.03%、全钾 3.21%,速效磷 85.7 mg/kg、速效钾 27.5 mg/kg,硝态氮 62.9 mg/kg、铵态氮 7.3 mg/kg。

## 1.3 田间试验设计

木薯种质采用种茎无性繁殖方式种植,于 2012 年 3 月 12 日种植于国家木薯种质资源圃,每份种质种植 10 株,株行距为 0.8 m × 1.0 m,在生长期加强对试验地的管理,于 2013 年 3 月 8 日进行测产收获。

## 1.4 性状调查

根据《木薯种质资源形态图谱》<sup>[10]</sup>及《木薯种质资源描述规范》<sup>[11]</sup>的标准,于 2013 年 3 月份对供试

材料进行性状观测记录,测试性状包括:株型、整齐度、分枝角度、茎的分叉、成熟主茎内(外)皮颜色、块根分布、结薯集中度、烂根情况、块根形状、块根缢痕、块根表皮、块根内(外)皮颜色、块根肉质颜色 15 个描述型性状及单株薯块鲜重、收获指数、干物率、株高、主茎直径、主茎高度、块根直径 7 个数量性状。对木薯描述型性状予以赋值(表 2)。数量性状进行 10 级分类,1 级 ≤ X-2δ,10 级 > X+2δ,中间每级间差 0.5δ,X 为各性状平均值,δ 为标准差<sup>[12]</sup>。每一级的相对频率用于计算多样性指数。利用 Shannon-Weaver 遗传多样性指数来衡量群体遗传多样性大小。计算公式为:  $H' = -\sum_{i=1}^n p_i \ln(p_i)$  <sup>[13-14]</sup>。其中  $p_i$  为某一性状第  $i$  级别内材料份数占总份数的百分比,ln 为自然对数。用 POPGENE 1.32 软件<sup>[15]</sup>进行多样性指数计算<sup>[16]</sup>,SPSS 20.0 软件进行两步聚类分析<sup>[17]</sup>。

表 2 木薯种质资源描述型性状及其赋值描述

Table 2 Code designed for descriptive characters in cassava germplasm

部位	序号	性状	赋值
Part	No.	Characters	Code of traits
茎 Stem	1	株型	直立型=1;紧凑型=2;张开型=3
	2	整齐度	整齐=1;中等整齐=2;不整齐=3
	3	分枝角度	无分枝=1;小( $<30^\circ$ )=2;中( $30^\circ \sim 45^\circ$ )=3;大( $>45^\circ$ )=4
	4	茎的分叉	二分叉=1;三分叉=2;四分叉=3;五分叉=4
块根 Root	5	成熟主茎 外皮颜色	灰白=1;灰黄=2;灰绿=3;黄褐=4; 红褐=5;褐=6;深褐=7
	6	成熟主茎 内皮颜色	浅绿=1;绿=2;深绿=3;浅红=4; 紫红=5;其他=6
	7	块根分布	垂直=1;水平伸长=2;无规则=3
	8	结薯集中度	集中=1;分散=2
	9	烂根情况	低( $<5\%$ )=1;中( $5\% \sim 10\%$ )=2; 高( $>10\%$ )=3
	10	块根形状	圆锥形=1;圆锥—圆柱形=2;圆柱形=3;纺锤形=4;无规则=5
	11	块根缢痕	无=1;有=2
	12	块根表皮	光滑=1;粗糙=2
	13	块根外皮 颜色	白=1;乳黄=2;淡褐=3;黄褐=4; 红褐=5;深褐=6;其他=7
	14	块根内皮 颜色	白=1;乳黄=2;黄=3;粉红=4;浅 红=5;紫红=6
	15	块根肉质 颜色	白色=1;乳黄=2;黄=3;粉红=4; 其他=5

## 2 结果与分析

### 2.1 木薯茎和块根描述型性状频率分布及其多样性

参试国内外木薯种质资源茎部描述型性状频率分布见图 1,株型主要以张开型为主,占 62.2%;分枝角度多为  $30^\circ \sim 45^\circ$ ,占 48.8%;分叉多以三分叉为主,占 70.0%;国外 1 份资源(慧丰 60)为五分叉,国内木薯资源株型直立,群体整齐,无分枝或  $30^\circ \sim 45^\circ$  三分叉的频率稍高于国外资源。成熟主茎外皮颜色有 7 种,国外资源主要为灰白色,占国外资源的 22.7%;国内资源多为灰绿色,占国内资源的 20.6%;其余灰黄、黄褐、红褐、褐、深褐有均匀分布,国外资源中深褐色比例高于国内资源。内皮颜色有 6 种,国内外资源均以浅绿色为主,占各自资源频率分别为 48.5% 和 37.8%,国外资源中绿色和深绿色比例高于国内资源,国内资源中有 1 份(ZM9713)内皮颜色为紫红色,国外资源中有 4 份(老挝班拉绍、KM 98-7、KM 937-7、泰引 1 号)内皮颜色为其他颜色。6 个茎部描述型性

状按表 2 进行赋值,统计各性状的多样性指数,统计结果见表 3。228 份木薯资源茎部性状多样性指数变化范围为 0.837 ~ 1.889,茎的分叉多样性指数最低,为 0.837;成熟主茎外皮颜色多样性指数最高,为 1.889。国内资源株型、整齐度、分枝角度、主茎外皮颜色的多样性均高于国外资源。

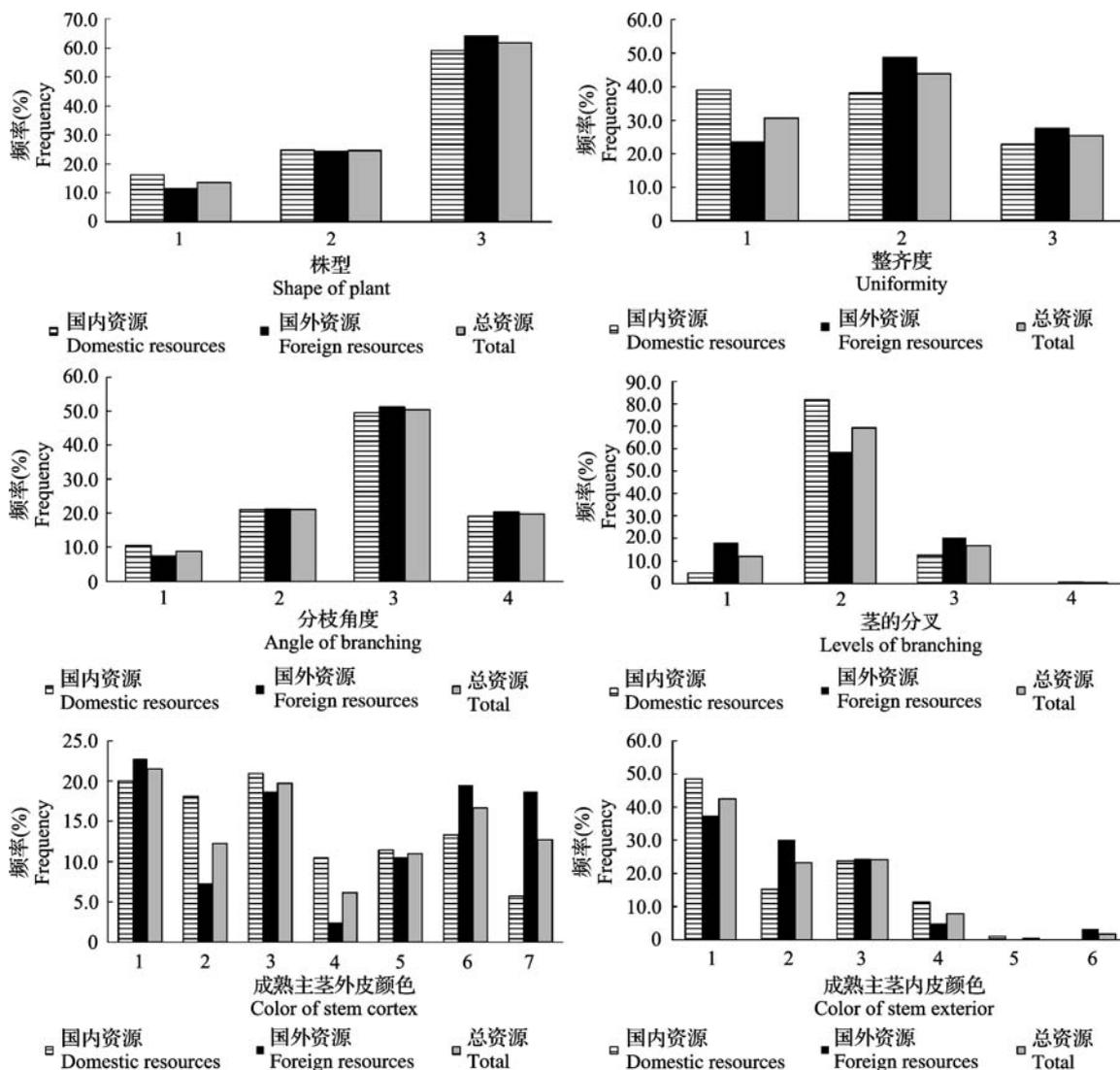
参试木薯种质资源块根描述型性状频率分布见图 2。块根分布多为水平伸长分布,约占参试资源的一半(49.1%),国内资源结薯集中度表现为集中与分散各占国内资源一半,集中占 51.5%,分散占 48.5%,烂根程度均表现为低( $<5\%$ ),国内资源块根形状多为圆锥—圆柱型,占国内资源的 58%,而国外资源圆锥型及圆锥—圆柱型居多,分别占国外资源的 43.1% 和 42.3%,块根无缢痕情况略多,占 53.1%,表皮多为粗糙,仅有 15.7% 资源块根表皮光滑。国内资源块根外皮颜色以淡褐(36.6%) 和 红褐(30.7%) 为主,内皮颜色以粉红、乳黄和浅红为主,占国内资源的 27.7%、24.8%、20.8%,肉质颜色主要为白色。国外资源块根外皮以淡褐色居多(46.3%),内皮以乳黄(48.4%) 为主,肉质颜色主要为白色,占有参试材料的 83.0%,其中有 3 份国外资源(哥伦比亚 2 号、R2、泰引 1 号)肉质颜色为黄色。9 个块根描述型性状按表 2 进行赋值,统计各性状的多样性指数,统计结果见表 4。228 份木薯资源块根性状多样性指数变化范围为 0.435 ~ 1.574,块根表皮多样性指数最低,为 0.435;块根内皮颜色多样性指数最高,为 1.574。国内资源结薯集中度、块根内外皮颜色的多样性高于国外资源。

### 2.2 木薯茎和块根数量性状频率分布及遗传多样性

228 份木薯种质资源 7 个与产量相关的数量性状(块根 4 个,主茎 3 个)的变异系数范围为 8.91% ~ 44.60%,各性状变异系数可以划分为 3 个等级:变异系数较高( $>30\%$ )的性状有单株薯块鲜重,其变异系数最大,为 44.60%;变异系数中等(10% ~ 30%)的性状有主茎高度、收获指数、主茎直径、株高和块根直径,变异系数依次为 29.70%、20.19%、16.69%、15.66% 和 14.79%;变异系数较低( $<10\%$ )性状有干物率,变异系数相对最小,仅为 8.91%(表 5)。国内资源的单株薯块鲜重、干物率、株高、主茎直径、块根直径变异程度均高于国外资源。国外资源的收获指数及主茎高度变异程度高于国内资源。显著性差异分析表明,国内资源块根直径极显著高于国外资源,国外资源干物率极显著高于国内资源,说明国内外资

源的块根直径和干物率具有明显的遗传差异。国内外资源单株薯块鲜重( $P=0.086$ )、收获指数、株高、主

茎直径及主茎高差异水平不显著,说明受到更复杂的遗传因素影响。



图中横坐标数值同表2中各性状赋值,下同

The labels of horizontal ordinates are the same as codes for descriptive characters of table 2. The same as below

图1 228份国内外木薯种质资源茎部描述型性状频率分布

Fig. 1 Frequency distribution of six descriptive characters of stem in 228 cassava germplasm

表3 228份国内外木薯种质资源茎部描述型性状多样性

Table 3 Diversity index of six descriptive characters of stem in 228 cassava germplasm

性状 Characters	多样性指数 Diversity index			性状 Characters	多样性指数 Diversity index		
	国内资源 Domestic resources	国外资源 Foreign resources	总计 Total		国内资源 Domestic resources	国外资源 Foreign resources	总计 Total
株型 Shape of plant	0.942	0.882	0.912	茎的分叉 Levels of branching	0.570	0.995	0.837
整齐度 Uniformity	1.077	1.066	1.086	成熟主茎外皮颜色 Color of stem exterior	1.883	1.803	1.889
分枝角度 Angle of branching	1.244	1.190	1.221	成熟主茎内皮颜色 Color of stem interior	1.278	1.319	1.342

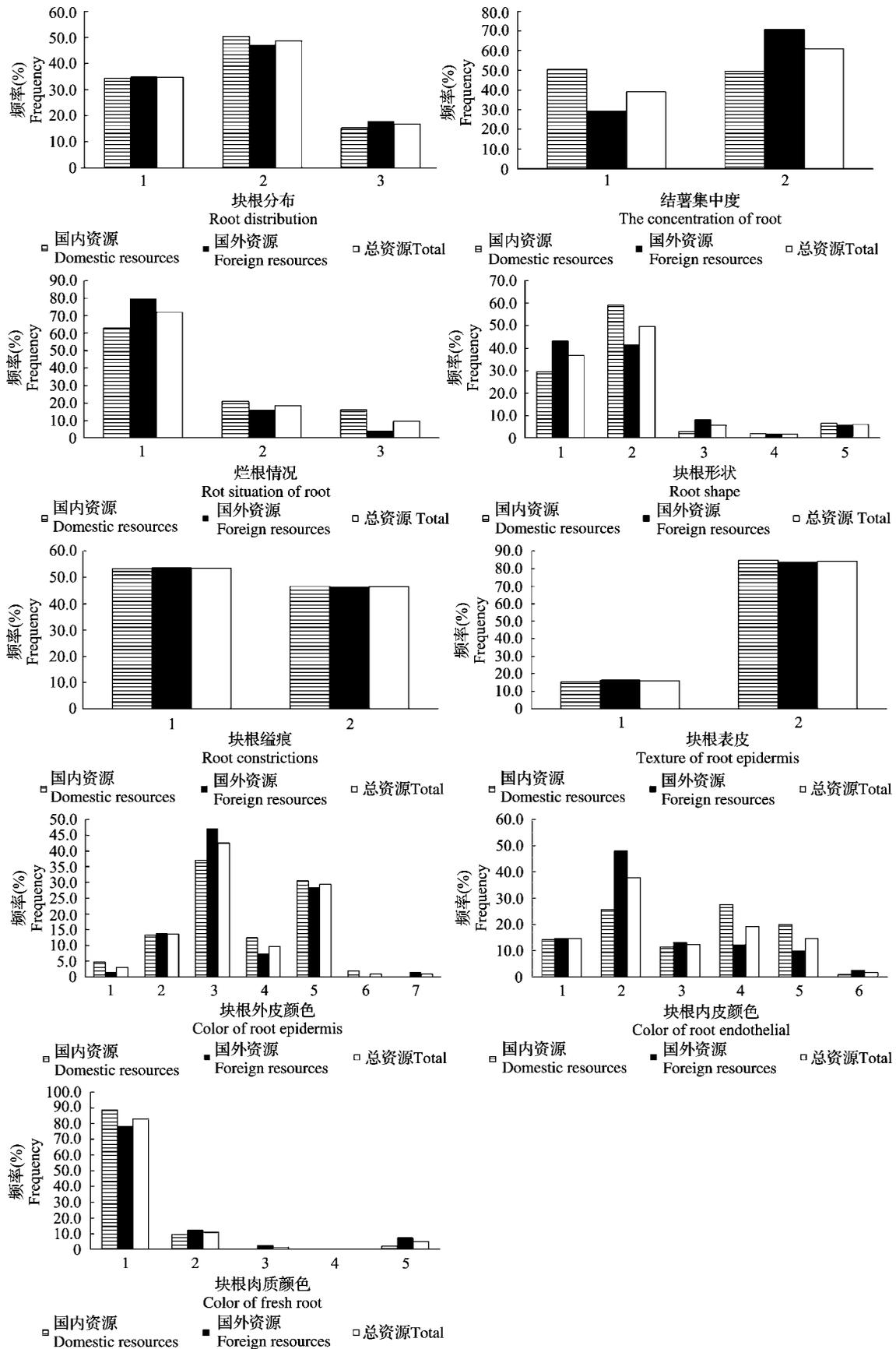


图 2 228 份木薯种质资源块根描述型性状频率分布

Fig. 2 Frequency distribution of nine descriptive characters of root in 228 cassava germplasm

表 4 228 份木薯种质资源块根描述型性状多样性

Table 4 Diversity index of nine descriptive characters of root in 228 cassava germplasm

性状 Characters	多样性指数 Diversity index			性状 Characters	多样性指数 Diversity index		
	国内资源 Domestic resources	国外资源 Foreign resources	总计 Total		国内资源 Domestic resources	国外资源 Foreign resources	总计 Total
	块根分布 Root distribution	0.999	1.031		1.017	块根表皮 Texture of root epidermis	0.427
结薯集中度 The concentration of root	0.693	0.606	0.670	块根外皮颜色 Color of root epidermis	1.478	1.325	1.419
烂根情况 Rot situation of root	0.914	0.606	0.776	块根内皮颜色 Color of root endothelial	1.597	1.468	1.574
块根形状 Root shape	1.034	1.158	1.118	块根肉质颜色 Color of fresh root	0.407	0.737	0.601
块根缢痕 Root constrictions	0.691	0.691	0.691				

表 5 228 份木薯种质资源数量性状变异

Table 5 Analysis of 7 agronomic quantitative characters in 228 cassava germplasm

性状 Characters	国内资源 Domestic resources			国外资源 Foreign resources			总体 Total		
	变异范围 Range	平均值 Mean ± SD	变异系数 (%) CV	变异范围 Range	平均值 Mean ± SD	变异系数 (%) CV	变异范围 Range	平均值 Mean ± SD	变异系数 (%) CV
	单株薯块 鲜重(kg) Weight of fresh root per plant	0.42 ~ 7.92	3.15 ± 1.43a	45.49	0.33 ~ 6.60	2.72 ± 1.14a	42.08	0.33 ~ 7.92	2.92 ± 1.30
收获指数 Harvest index	0.22 ~ 0.72	0.54 ± 0.10a	19.17	0.18 ~ 0.84	0.54 ± 0.11a	21.12	0.18 ~ 0.84	0.54 ± 0.11	20.19
干物率(%) Dry matter content	29.52 ~ 46.9	37.64 ± 3.42b	9.08	30.32 ~ 49.15	39.14 ± 3.28a	8.38	29.52 ~ 49.15	38.41 ± 3.42	8.91
株高(cm) Plant height	180 ~ 415	279.76 ± 44.72a	15.99	160 ~ 410	271.30 ± 41.47a	15.28	160 ~ 415	275.20 ± 43.11	15.66
主茎直径(cm) Stem diameter	1.80 ~ 4.40	2.84 ± 0.48a	17.00	1.15 ~ 4.40	2.85 ± 0.47a	16.48	1.15 ~ 4.40	2.84 ± 0.47	16.69
主茎高度(cm) Height to first branching	70 ~ 275	155.24 ± 41.40a	26.67	25 ~ 330	150.08 ± 48.39a	32.24	25 ~ 330	152.46 ± 45.28	29.70
块根直径(cm) Root diameter	3.66 ~ 7.63	5.31 ± 0.78a	14.72	3.04 ~ 6.45	4.84 ± 0.65b	13.33	3.04 ~ 7.63	5.06 ± 0.75	14.79

表中同行数据后小写英文字母不同者表示差异显著,下同

Values within a column followed by small letters are significantly different, the same as below

木薯种质资源数量性状等级见表 6。从木薯种质资源各数量性状在 10 个级别中的分布频率(图 3)可以看出,7 个数量性状均近似正态分布,其中,主茎直径在 4 级的分布频率最大,为 22.8%,主茎

高度、株高、收获指数、单株薯块鲜重和块根直径在 5 级的分布频率最大,分别为 30.3%、29.0%、20.1%、20.4%、21.3%,干物率在 6 级的分布频率最大,为 19.8%。

表 6 数值型性状划分等级标准

Table 6 Grouping criterion of quantitative characters

	单株薯块鲜重 (kg/株) Weight of fresh root per plant	收获指数 Harvest index	干物率(%) Dry matter content	株高(cm) Plant height	主茎直径(cm) Stem diameter	主茎高度(cm) Height to first branching	块根直径(cm) Root diameter
1	$X \leq 0.32$	$X \leq 0.32$	$X \leq 31.56$	$X \leq 188.98$	$X \leq 1.89$	$X \leq 61.90$	$X \leq 3.56$
2	$0.32 < X \leq 0.97$	$0.32 < X \leq 0.38$	$31.56 < X \leq 33.28$	$188.98 < X \leq 210.53$	$1.89 < X \leq 2.13$	$61.90 < X \leq 84.54$	$3.56 < X \leq 3.94$
3	$0.97 < X \leq 1.62$	$0.38 < X \leq 0.43$	$33.28 < X \leq 34.99$	$210.53 < X \leq 232.09$	$2.13 < X \leq 2.37$	$84.54 < X \leq 107.18$	$3.94 < X \leq 4.31$
4	$1.62 < X \leq 2.27$	$0.43 < X \leq 0.49$	$34.99 < X \leq 36.70$	$232.09 < X \leq 253.64$	$2.37 < X \leq 2.61$	$107.18 < X \leq 129.82$	$4.31 < X \leq 4.69$
5	$2.27 < X \leq 2.92$	$0.49 < X \leq 0.54$	$36.70 < X \leq 38.41$	$253.64 < X \leq 275.20$	$2.61 < X \leq 2.84$	$129.82 < X \leq 152.46$	$4.69 < X \leq 5.06$
6	$2.92 < X \leq 3.57$	$0.54 < X \leq 0.59$	$38.41 < X \leq 40.12$	$275.20 < X \leq 296.75$	$2.84 < X \leq 3.08$	$152.46 < X \leq 175.10$	$5.06 < X \leq 5.44$
7	$3.57 < X \leq 4.22$	$0.59 < X \leq 0.65$	$40.12 < X \leq 41.83$	$296.75 < X \leq 318.31$	$3.08 < X \leq 3.32$	$175.10 < X \leq 197.74$	$5.44 < X \leq 5.81$
8	$4.22 < X \leq 4.88$	$0.65 < X \leq 0.70$	$41.83 < X \leq 43.54$	$318.31 < X \leq 339.86$	$3.32 < X \leq 3.56$	$197.74 < X \leq 220.38$	$5.81 < X \leq 6.18$
9	$4.88 < X \leq 5.53$	$0.70 < X \leq 0.76$	$43.54 < X \leq 45.26$	$339.86 < X \leq 361.42$	$3.56 < X \leq 3.79$	$220.38 < X \leq 243.02$	$6.18 < X \leq 6.56$
10	$X > 5.53$	$X > 0.76$	$X > 45.26$	$X > 361.42$	$X > 3.79$	$X > 243.02$	$X > 6.56$

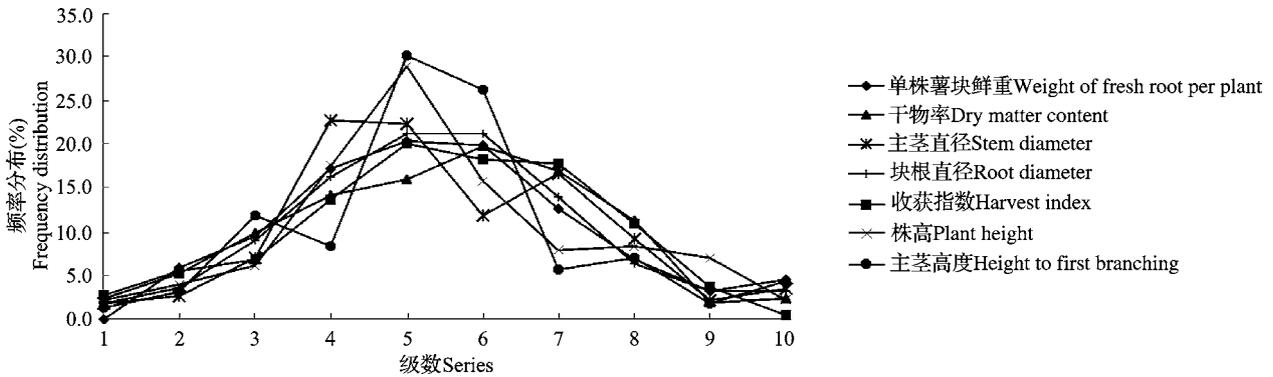


图 3 228 份木薯种质资源 7 个数量性状在 10 个级别中的分布频率

Fig. 3 Frequency distribution of 7 agronomic quantitative characters among 10 levels in 228 cassava germplasm

数量性状的多样性指数变化范围为 1.895 ~ 2.073, 总资源多样性指数为 2.013, 主茎高最小, 为 1.895, 干物率最大, 为 2.073。数量性状普遍高于描述型性状的多样性指数, 表明木薯块根数量性状

多样性更丰富(表 7)。国内资源的单株薯块鲜重、干物率、株高、主茎直径、主茎高及块根直径多样性指数均高于国外资源, 国外资源收获指数的多样性高于国内资源。

表 7 228 份木薯种质资源数量性状多样性指数

Table 7 Diversity index of seven agronomic quantitative characters in 228 cassava germplasm

性状 Characters	国内资源 Domestic resources	国外资源 Foreign resources	总资源 Total	性状 Characters	国内资源 Domestic resources	国外资源 Foreign resources	总资源 Total
单株薯块鲜重(kg) Weight of fresh root per plant	2.080	1.954	2.032	主茎直径(cm) Stem diameter	1.964	1.946	1.997
收获指数 Harvest index	1.991	2.063	2.042	主茎高(cm) Height to first branching	1.881	1.847	1.895
干物率(%) Dry matter content	2.068	2.000	2.073	块根直径(cm) Root diameter	2.010	1.931	2.033
株高(cm) Plant height	2.041	1.952	2.016	分组内多样性指数 Diversity index among groups	2.005	1.956	2.013

### 2.3 不同国家地区木薯表型性状聚类分析

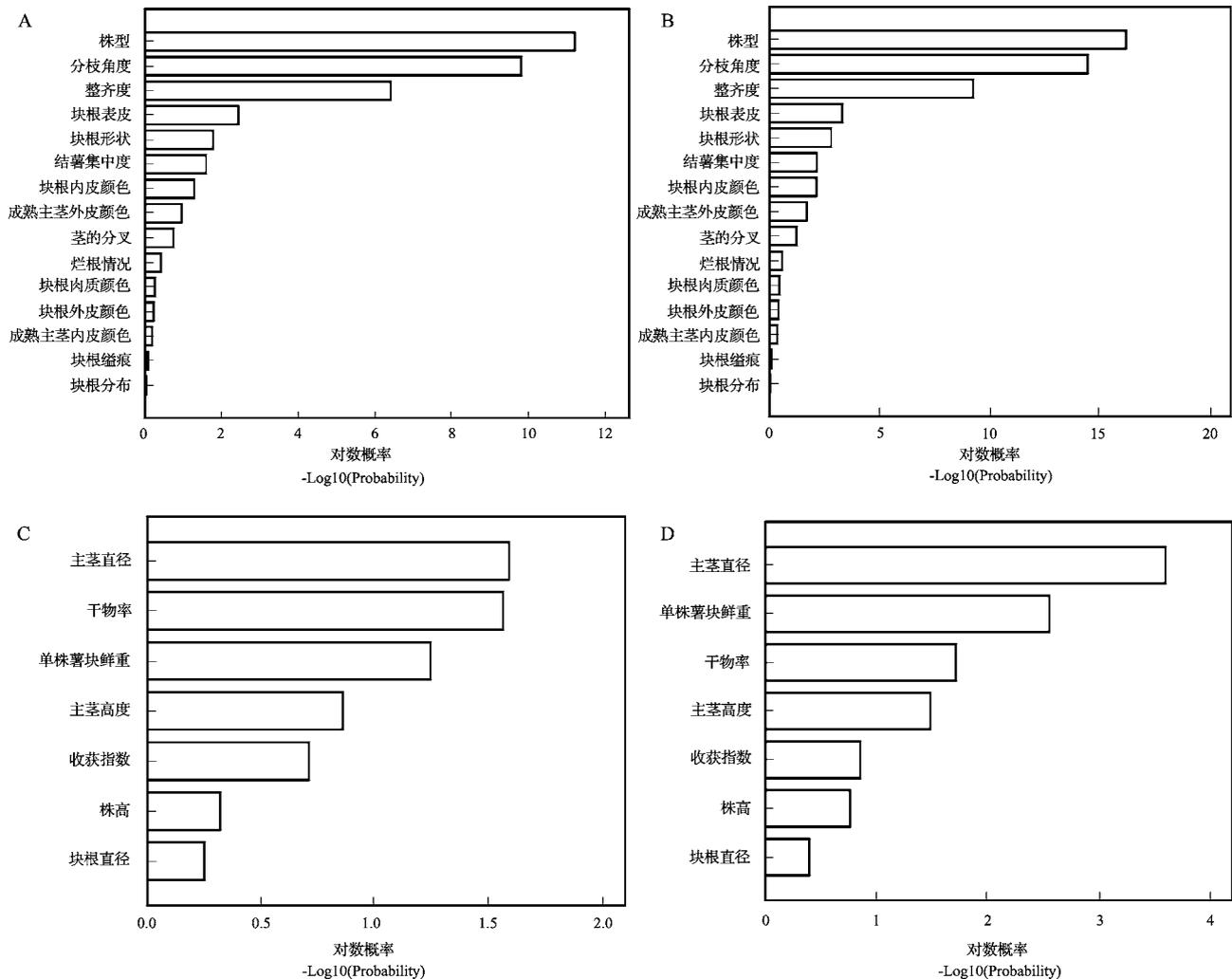
用调查的 22 个表型性状对不同国家地区的 228 份木薯种质资源进行两步聚类分析,结果显示,资源间遗传相似性较高,木薯供试资源分为两大类群(表 8),类群 I 包含 135 份资源,占有种质的 59.2%,其中国内资源为 63 份,该类群资源主要特征为产量较高,平均单株薯块鲜重为 3.19 kg,显著高于类群 II,植株株型多为张开型,主茎直径较粗,平均为 2.94 cm,群体不整齐或中等整齐,分枝角度 30°~45°,成熟主茎外皮颜色褐色,分散结薯,块根为圆锥—圆柱形。类群 II 为 93 份,占有种质的 40.8%,其中国内资源为 42 份,最为明显特征为收获指数、干物率均显著高于类群 I,平均分别为 0.56,39.20%,植株株型多为紧凑型,主茎较高,平均为 161.40 cm,群体整齐,分枝角度小于 30°,成熟主茎外皮灰白色,集中结薯,块根为圆锥形。两类

群在茎的分叉,成熟主茎内皮颜色,块根分布、缢痕、表皮、内外皮及肉质颜色主要特征类似,均为三分叉,主茎内皮浅绿色,块根水平伸长,无缢痕,表皮粗糙,外皮淡褐色,内皮乳黄色,肉质白色。除主要特征外,类群 I 中分枝角度 >45°资源比例高于类群 II,主茎外皮灰黄、黄褐、红褐色,内皮绿、深绿及浅红色的资源丰富,块根外皮黄褐及红褐色,内皮黄色及粉红色,肉质乳黄色资源丰富(表 9)。通过性状重要性预测分析(图 4),结果表明描述型性状中株型、分枝角度及整齐度最为重要,数量性状主茎直径、干物率及单株薯块鲜重重要性较高,通过两步聚类分析,能较好的对参试资源进行分类,类群 I 概括为株型张开、分枝角度中等偏大,群体不整齐,主茎较粗,鲜薯产量较高资源,类群 II 为株型紧凑直立型、分枝角度小,群体整齐,主茎较细,薯块干物率较高资源。

表 8 228 份木薯资源 22 个性状两步聚类结果

Table 8 Cluster results using TwoStep based on 22 traits of 228 cassava germplasm

类群 Group	种质 Germplasms	份数(国内/国外) No. (Domestic/Foreign)
I	华南 5 号、华南 7 号、华南 9 号、华南 102、华南 201、八-1、宝岛 9-1、宝岛 9-3、宝岛 9-5、海南红心、海南细叶、文昌红心、ZM 7901、ZM 8316、ZM 8337、ZM 8340、ZM 8625、ZM 8641、ZM 8701、ZM 8752、ZM 9036、ZM 9242、ZM 9244、ZM 93164、ZM 93236、ZM 93274、ZM 9419、ZM 9426、ZM 9495、ZM 94107、ZM 95027、ZM 95038、ZM 95111、ZM 95125、ZM 96114、ZM 9710、ZM 9713、ZM 9781、ZM 98173、ZM 98178、ZM 98246、ZM 9928、ZM 9932、ZM 9936、ZM 99140、ZM 99200、ZM 99206、ZM 99229、ZM 99247、ZM 99250、ZMF 520、ZMF 701、E25、4363、广西 4 号、广西木薯、贵州 2 号、贵州 3 号、广东 1 号、云南 2、云南 7、云南 8、云南思茅、COL 1050、COL 2436、哥伦比亚 1 号、哥伦比亚 2 号、CM 92-56-1、CM 483-2、CM 769-2、CM 837、CM 901、CM 965-3、CM 1210-10、CM 1585-13、CM 3970-8、CM 3993-9、CM 4040-1、CM 6740-7、CM 7595-1、CM 1732-15、COL 523-7、SM 610-1、SM 1406-1、SM 1433-3、SM 1568-2、SM 1747、SM 2300-1、SM 2323-6、M·COL 22、SG 424-19、CG 501-2、MCR 142、BRA 206、FLAxxx-25、ECU 81、ECU 84、GUA 76、老挝食科、马来 2 号、马来 5 号、KM 21-2、KM 98-6、KM 98-7、KM 937-7、R 1、R 2、R 3、R 90、OMR 32-29-4、OMR 36-34-1、OMR 36-40-1、CMR 26-07-15、CMR 35-70-6、CMR 36-40-9、CMR 38-136-1、CMR-38-136-4、泰引 1 号、瑞士 13M、瑞士 B25、瑞士 C24、瑞士 D23、瑞士 F21、瑞士 G20、瑞士 J17、瑞士 L15、瑞士 N13、瑞士 P11、瑞士 Q10、瑞士 R9、瑞士 S8、瑞士 88、瑞士 U6、瑞士 V5、瑞士 X3	135(63/72)
II	华南 6 号、华南 8 号、华南 10 号、华南 11 号、华南 12 号、华南 8013、华南 8002、华南 101、华南 205、华南 124、华南 6068、白沙 4 号、宝岛 9-2、琼中 1 号、兴隆 1 号、植灰、华南 205 多倍体、华南 124 多倍体、华南 6068 多倍体、ZM 8229、ZM 8229 多倍体、ZM 9066、ZM 9079、ZM 9679、ZM 96135、ZM 98243、B 3、3555-6、GR 891、GR 911、桂热 3 号、桂热 4 号、桂热 5 号、新选 048、广西 2 号、广西 3 号、会仙白皮、贵州 1 号、福建华安、南植 188、南植 199、者东镇街兴社坡角、CM 385-6、CM 523-7、CM 2399-4、CM 4054-40、CM 3327-4、CM 4031-2、COL 141、SM 28-80-3、M? COL 1468、BRA 12、BRA 273、BRA 274、FLAxxx-12、ECU 83、PER 557、MEX 65、印尼细叶、老挝班拉绍、马来 4 号、缅甸种、KM 94、KM 98-1、SCT 104-264、KU 50、R 5、R 7、R 9、R 60、R 72、R 80、慧丰 60、Hanatee、OMR 32-29-1、OMR 35-2-6、OMR 36-34-6、OMR 36-63-6、CMR 34-11-3、CMR 35-22-196、CMR 35-70-1、CMR 36-40-12、CMR 36-60-12、CMR 36-63-4、CMR 37-14-9、泰引 2 号、花叶木薯变、瑞士 H19、瑞士 M14、瑞士 NO12、瑞士 O12、瑞士 T7、瑞士 W4	93(42/51)



A: 类群 I 描述型性状; B: 类群 II 描述型性状; C: 类群 I 数量性状; D: 类群 II 数量性状

A: Descriptive characters of group I, B: Descriptive characters of group II,

C: Quantitative characters of group I, D: Quantitative characters of group II

图 4 性状重要性预测

Fig. 4 Prediction of the importance of descriptive and quantitative characters

### 3 讨论

#### 3.1 木薯种质资源表型性状多样性变异

种质资源是作物育种的基础, 育种材料的遗传多样性能提高育种水平<sup>[18-19]</sup>。木薯在中国已经历 200 年演化历程, 原始资源引进后为适应生长环境的变化发生变异, 经过多次无性繁殖, 变异效果发生累积产生不同的表型性状<sup>[20]</sup>。本研究对 228 份国内外木薯资源的表型性状进行了分析, 结果表明, 参试资源形态特征主要集中在张开型, 三分叉, 30°~45°分枝角度, 成熟主茎内皮浅绿色, 块根表皮粗糙, 外皮淡褐色, 内皮乳黄色, 肉质白色, 其他形态性状频率分布都较为分散, 国内资源直立型, 群体整齐, 无分枝或

30°~45°三分叉, 块根垂直分布, 结薯集中, 圆锥—圆柱型块根的频率稍高于国外资源, 可能与国内育种家对育种材料的选择多注重群体株型整齐, 块根粗壮, 结薯集中有关。成熟主茎外皮颜色和内皮颜色、块根外皮颜色和内皮颜色遗传多样性指数较高, 依次为 1.889、1.342、1.419、1.574。国内资源参试性状的平均遗传多样性水平高于国外资源, 引进资源在国内经过遗传改良后多样性依然保留并有所提升。

参试资源的表型数量性状遗传多样性丰富, 多样性指数为 2.013, 资源间存在较大差异, 变异范围为 8.91%~44.60%, 单株薯块鲜重变异最大, 其次为主茎高度、收获指数、主茎直径、株高和块根直径, 干物率变异最小。性状变异情况与薛月寒等<sup>[20]</sup>研究

表 9 228 份木薯种质资源各类群形态特征  
Table 9 The average traits in different clusters of 228 cassava germplasm

类群 Group	株型 Shape of plant			整齐度 Uniformity			分枝角度 Angle of branching			茎分叉 Stem branching				
	直立型	紧凑型	张开型	整齐	中等整齐	不整齐	无分枝	小(<30°)	中(30°~45°)	大(>45°)	二分叉	三分叉	四分叉	五分叉
类群I	3(9.7%)	8(15.1%)	122(88.4%)	15(22.7%)	54(65.1%)	56(98.2%)	0	4(8.5%)	84(79.2%)	43(95.6%)	10(40.0%)	95(67.9%)	26(76.5%)	0
类群II	28(90.3%)	45(84.9%)	16(11.6%)	51(77.3%)	29(34.9%)	1(1.8%)	19(100.0%)	43(91.5%)	22(20.8%)	2(4.4%)	15(60.0%)	45(32.1%)	8(23.5%)	1(100.0%)
类群	成熟主茎外皮颜色 Color of stem exterior													
Group	灰白	灰黄	灰绿	黄褐	红褐	褐	深褐色	浅绿	绿	深绿	浅红	紫红	褐色	
类群I	21(45.7%)	15(53.6%)	20(46.5%)	11(78.6%)	22(91.7%)	24(62.2%)	21(72.4%)	58(62.4%)	28(53.8%)	28(54.9%)	14(82.4%)	1(100.0%)	3(75.0%)	
类群II	25(54.3%)	13(46.4%)	23(53.5%)	3(21.4%)	2(8.3%)	14(37.8%)	8(27.6%)	35(37.6%)	24(46.2%)	23(45.1%)	3(17.6%)	0	1(25.0%)	
类群	块根分布 Root distribution													
Group	垂直	水平伸长	无规则	集中	分散	低(<5%)	中(5%~10%)	高(>10%)	圆锥形	圆锥—圆柱形	圆柱形	纺锤形	无规则	
类群I	47(61.8%)	64(58.2%)	22(57.9%)	40(45.5%)	93(68.4%)	90(55.9%)	30(73.2%)	13(59.1%)	34(41.5%)	82(73.9%)	6(50.0%)	0	10(71.4%)	
类群II	29(38.2%)	46(41.8%)	16(42.1%)	48(54.5%)	43(31.6%)	71(44.1%)	11(26.8%)	9(40.9%)	48(58.5%)	29(26.1%)	6(50.0%)	4(100.0%)	4(28.6%)	
类群	块根表皮 Texture of root epidermis													
Group	无	有	光滑	粗糙	白	乳黄	淡褐	黄褐	红褐	深褐	其他			
类群I	70(58.8%)	63(60.0%)	9(25.7%)	123(65.4%)	4(57.1%)	13(41.9%)	54(57.4%)	14(63.6%)	47(71.2%)	0	1(50%)			
类群II	49(41.2%)	42(40.0%)	26(74.3%)	65(34.6%)	3(42.9%)	18(58.1%)	40(42.6%)	8(36.4%)	19(28.8%)	2(100.0%)	1(50%)			
类群	块根肉质颜色 Color of fresh root													
Group	白	乳黄	黄	粉红	浅红	紫红色	白色	乳黄	黄	粉红	其他			
类群I	11(33.3%)	41(48.8%)	20(74.1%)	33(76.7%)	24(75.0%)	3(75.0%)	109(58.9%)	17(70.8%)	3(100.0%)	0	4(36.4%)			
类群II	22(66.7%)	43(51.2%)	7(25.9%)	10(23.3%)	8(25.0%)	1(25.0%)	76(41.1%)	7(29.2%)	0	0	7(63.6%)			
类群	单株薯块鲜重(kg/株)													
Group	收获指数	干物质含量	株高(cm)	主茎直径(cm)	主茎高(cm)	块根直径(cm)	块根直径(cm)							
类群I	3.19 ± 1.41a	0.53 ± 0.11b	278.26 ± 49.54a	2.94 ± 0.51a	146.30 ± 47.92b	5.02 ± 0.80a								
类群II	2.62 ± 1.06b	0.56 ± 0.11a	270.75 ± 31.26a	2.70 ± 0.37b	161.40 ± 39.73a	5.12 ± 0.68a								

( ) 表示各类群中该性状资源所占比例

( ) represents the proportion of the traits in each group

结果类似,而本研究种质数量及来源较丰富,除干物率外其余性状变异程度均高于前人选择的育种优良品系。国内资源平均单株薯块鲜重是国外资源约 1.15 倍,块根直径极显著高于国外资源,国外资源干物率极显著高于国内资源,说明国内外资源的块根直径和干物率具有明显的遗传差异,但两者单株薯块鲜重( $P=0.086$ ),收获指数、株高、主茎直径及主茎高差异水平不显著,可能与国内外对品种育种目标的选择或加工利用的习惯有关,有待进一步分地区研究。数量性状变异除了受遗传因素影响,环境因素影响也较大,今后需要对其进行多年际和多环境的鉴定评价,以提高表型性状鉴定的准确率,能够更直接地应用于育种改良及生产。

### 3.2 木薯种质资源表型性状聚类分析

基于表型性状的聚类分析,在一定程度上能反映出基因型上的变异,聚类结果能够初步反映出各类群的相似性及亲缘关系<sup>[21-22]</sup>。本研究对不同国家地区的 228 份木薯种质资源 22 个表型性状进行两步聚类分析,较好的对参试资源进行分类,结果显示,资源间遗传相似度较高,划分 2 个类群中,第 I 类所含资源主要特征为株型张开,分枝角度中等偏大,群体不整齐,主茎较粗,结薯分散,鲜薯产量较高资源,类群 II 为株型紧凑直立型,分枝角度小,群体整齐,主茎较细,结薯集中,薯块干物率及收获指数较高资源。从聚类结果中可发现,遗传相似性越高,种质资源的数量越密集,可见供试种质的遗传基础比较狭窄。国内外相关研究均表明木薯群体遗传背景普遍狭窄,造成这种现象可能与种质的引进或优质育种材料的多次利用有关<sup>[6,23]</sup>。

性状重要性预测分析表明,描述型性状中株型、分枝角度及整齐度最为重要,数量性状中主茎直径、干物率及单株薯块鲜重重要性较高,这些性状也是在育种工作中普遍重视筛选的性状。研究发现,林木干形及分枝变异与木材出材率及风害断倒率显著相关,通过资源筛选可为定向育种提供物质基础<sup>[24-25]</sup>。木薯中张开型、紧凑型、直立型资源种植密度可依次增加,理论上,种植密度增加单株产量也随之增高,在实际生产中还应根据立地条件、水肥管理水平和品种特性等因素,做到合理密植,发挥品种的生产潜力,此外,张开型、紧凑型资源因分枝角度较大,种植行距较宽,生长前期可考虑与其他作物间作,增加效益<sup>[26]</sup>,直立型资源因无分枝或高位分枝,株型整齐,利于机械化种植及收获。育种时应根据育种目标,在具有突出育种特性的类群间进行选择,在类群内选择特定变

异的同时,加强多性状的综合选择。

### 参考文献

- [1] 王文泉,刘国道. 热带作物种质资源学[M]. 北京:中国农业出版社,2008:327-329
- [2] FAO. Statistical database [R]. Rome: Food and Agriculture Organization (FAO) of the United Nations, 2014
- [3] 付海天,卢赛清,罗燕春,等. 木薯的综合利用价值[J]. 现代农业科技,2010(8):116-118
- [4] 周建国,李开绵,叶剑秋,等. 应用 SRAP 标记研究木薯种质资源的遗传多样性[J]. 现代农业科学,2009,16(5):45-47,55
- [5] 张振文,姚庆群,许瑞丽,等. 我国主要木薯品种 AFLP 多态性分析[J]. 西南农业学报,2010,23(5):1606-1609
- [6] 彭靖茹,马增风,黎萍,等. 木薯种质资源遗传多态性 SSR 分子标记的研究[J]. 中国农学通报,2012,28(6):58-62
- [7] 齐兰,王文泉,张振文,等. 木薯种质资源的遗传多样性分析与评价[J]. 热带作物学报,2010,31(10):1661-1668
- [8] Dotlacil L, Hermuth J, Stehno Z, et al. Diversity in European winter wheat landraces and obsolete cultivars [J]. Czech J Genet Plant, 2000, 36(2):29-36
- [9] 孙亚东,梁燕,吴江敏,等. 番茄种质资源的遗传多样性和聚类分析[J]. 西北农业学报,2009,18(5):297-301
- [10] 叶剑秋. 木薯种质资源形态图谱[M]. 北京:中国农业出版社,2011:1-13,31-40
- [11] 李开绵,闫庆祥,叶剑秋,等. NY/T 1943-2010 木薯种质资源描述规范[S]. 中国热带农业科学院热带作物品种资源研究所,2010
- [12] 贺晨帮,宗绪晓. 豌豆种质资源形态标记遗传多样性分析[J]. 植物遗传资源学报,2011,12(1):42-48
- [13] 王海平,李锡香,沈镛,等. 基于表型性状的中国大蒜资源遗传多样性分析[J]. 植物遗传资源学报,2014,15(1):24-31
- [14] 纪海波,张玉鑫,李玉明,等. 西瓜种质资源主要性状的表型多样性[J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版,2013,41(8):155-160
- [15] Yeh F C, Boyle T J B. Population genetic analysis of co-dominant and dominant markers and quantitative traits [J]. Belg J Bot, 1997, 129:157
- [16] 赵香娜. 国内外甜高粱品种资源遗传多样性研究[D]. 北京:中国农业科学院,2008:19
- [17] Bacher J, Wenzig K, Vogler M. SPSS Twostep Cluster-A First Evaluation [C]//RC33 Sixth International Conference on Social Science Methodology. Netherlands: University of Amsterdam, 2004
- [18] 王述民,李立会,黎裕,等. 中国粮食和农业植物遗传资源状况报告[1][J]. 植物遗传资源学报,2011,12(1):1-12
- [19] 王述民,李立会,黎裕,等. 中国粮食和农业植物遗传资源状况报告[2][J]. 植物遗传资源学报,2011,12(2):167-177
- [20] 薛月寒,吴文婧,叶剑秋,等. 木薯种质的遗传多样性评价及高产种质初级筛选[J]. 植物遗传资源学报,2014,15(1):74-83
- [21] 李峰,李双梅,黄新芳,等. 慈姑种质资源表型性状多样性分析[J]. 植物遗传资源学报,2012,13(3):473-477
- [22] Oliveira E J, Oliveira Filho O S, Santos V S. Classification of cassava genotypes based on qualitative and quantitative data [J]. Genet Mol Res, 2015, 14(1):906-924
- [23] 罗霆,杨守臻,韦民政,等. 24 份木薯 (*Manihot esculenta*) 种质的遗传多样性研究[J]. 热带作物学报,2010,31(1):65-71
- [24] 黄华孙. 橡胶树育种五十年[M]. 北京:中国农业出版社,2005:86-87
- [25] 张凤良,毛常丽,胡永华,等. 云南保存橡胶树部分种质资源干形及分枝变异分析[J]. 植物遗传资源学报,2014,15(3):534-539
- [26] 张林辉,宋记明,李月仙,等. 不同株型木薯品种的不同种植密度试验[J]. 中国热带农业,2015(2):69-71