

木薯自交后代疫霉根腐病抗性评价 及抗性材料遗传多样性分析

段春芳¹, 李月仙¹, 宋记明¹, 姜太玲¹, 肖明昆¹, 沈正松¹, 刘倩¹,
熊贤坤¹, 耿沙¹, 车彬¹, 张钦¹, 李林虹¹, 严炜¹, 刘光华²

(¹云南省农业科学院热带亚热带经济作物研究所/热带作物生物育种全国重点实验室, 保山 678000; ²云南省农业科学院国际农业研究所, 昆明 650205)

摘要: 通过室内离体接种方法对137份‘GR891’木薯自交后代进行了木薯疫霉根腐病抗性评价, 并对其中93份高抗和抗病材料的主要农艺性状进行了变异系数、遗传多样性指数等遗传多样性分析。结果表明, 137份材料中56份表现高抗(40.88%), 37份为抗病(27.01%), 33份为中感(24.09%), 9份为感病(6.57%), 2份为高感(1.46%)。在93份抗性材料中, 10个主要性状变异系数在14.46%~77.63%之间, 遗传多样性指数为0.60~2.04, 说明‘GR891’木薯自交后代中抗性材料具有丰富的遗传变异。相关性分析显示, 3对性状呈极显著相关, 3对性状呈显著相关, 其中单株鲜薯重与茎粗、单株鲜薯数量呈极显著正相关, 相关系数分别为0.490和0.680。主成分分析表明株高、茎粗、主茎高、单株鲜薯数量和单株鲜薯为木薯表型变异的主要特征, 3个主成分的累计贡献率达74.52%。聚类分析将93份抗性材料分为3大类, 第I类综合性状较差, 包含7份材料; 第II类综合性状优异, 在农艺性状和抗病性方面表现突出, 具有较高的利用价值, 包含4份材料; 第III类包含82份材料, 其中小群1在农艺性状和抗病性方面表现较好, 展现出显著的高产潜力, 包含9份材料。本研究结果为木薯抗疫霉根腐病种质的鉴定及抗性遗传分析提供了科学依据。

关键词: ‘GR891’木薯; 自交后代; 根腐病; 抗性评价

Evaluation of *Phytophthora* Root Rot Resistance and Genetic Diversity Analysis of Resistant Materials in Cassava Inbred Progeny

DUAN Chunfang¹, LI Yuexian¹, SONG Jiming¹, JIANG Tailing¹, XIAO Mingkun¹, SHEN Zhengsong¹, LIU Qian¹,
XIONG Xiankun¹, GENG Sha¹, CHE Bin¹, ZHANG Qin¹, LI Linhong¹, YAN Wei¹, LIU Guanghua²

(¹Tropical and Subtropical Cash Crops Research Institute, Yunnan Academy of Agricultural Sciences/National Key Laboratory for Tropical Crop Breeding, Baoshan 678000; ²International Agricultural Research Institute, Yunnan Academy of Agricultural Sciences, Kunming 650205)

Abstract: The excised root tissue inoculation method was used to evaluate resistance to cassava root rot caused by *Phytophthora* in 137 inbred progen ‘GR891’ cassava samples. Genetic diversity analysis, including the coefficient of variation and genetic diversity indices, was conducted on 93 samples with high or moderate resistance to assess key agronomic traits. Results showed that among the 137 samples, 56 exhibited high resistance (40.88%), 37 showed resistance (27.01%), 33 were moderately susceptible (24.09%), 9 were susceptible (6.57%), and 2 were highly susceptible (1.46%). In the 93 resistant samples, the coefficients of variation for 10 main agronomic traits ranged from 14.46% to 77.63%, with genetic diversity indices between 0.60 and 2.04, indicating abundant genetic variation in the resistant progeny of ‘GR891’ cassava. Correlation analysis revealed three pairs of traits with highly significant correlations and three pairs with significant correlations. Fresh tuber weight per plant was significantly positively correlated with stem

收稿日期: 2024-10-24

第一作者研究方向为木薯病虫害防控及抗病育种, E-mail: rjsdf2008@163.com; 宋记明为共同第一作者

通讯作者: 严炜, 研究方向为饲用植物遗传育种, E-mail: rjsyanwei@163.com

刘光华, 研究方向为木薯栽培及遗传育种, E-mail: rjsglh@vip.126.com

基金项目: 云南省农业基础研究联合专项项目(202301BD070001-222); 云南省技术创新人才培养项目(202105AD160041); 国家木薯产业技术体系保山综合试验站(CARS-11-YNLGH); 热带作物生物育种全国重点实验室科研项目(NKLTCB-YAAS-2024-B01); 云南省李开绵专家工作站(202305AF150004); 保山市科技计划项目(2023bskj019)

Foundation projects: Yunnan Fundamental Research Project(202301BD070001-222); Yunnan Province Talent Development Program for Technological Innovation(202105AD160041); The Baoshan Comprehensive Experimental Station of the National Cassava Industry Technology System(CARS-11-YNLGH); National Key Laboratory for Tropical Crop Breeding(NKLTCB-YAAS-2024-B01); Yunnan Li Kai Mian Expert Workstation(202305AF150004); Baoshan City Science and Technology Plan Project(2023bskj019)

diameter and tuber number per plant, with correlation coefficients of 0.490 and 0.680, respectively. Principal component analysis identified plant height, stem thickness, main stem height, tuber number per plant, and fresh tuber weight per plant as the primary features of phenotypic variation in cassava, with the cumulative contribution rate of the three principal components reaching 74.52%. Cluster analysis divided the 93 resistant materials into three major categories: Category I, which has relatively poor overall traits and includes 7 materials; Category II, characterized by superior overall traits with outstanding performance in agronomic traits and disease resistance, showing high potential for utilization and including 4 materials; and Category III, comprising 82 materials, with Subgroup 1 exhibiting good agronomic traits and disease resistance as well as significant potential for high yield, including 9 materials. This study provides scientific evidence for selecting cassava germplasm resistant to *Phytophthora* root rot and informs genetic analysis for resistance traits.

Key words: ‘GR891’cassava; inbred progeny; root rot disease; resistance evaluation

木薯 (*Manihot esculenta* Crantz) 为大戟科木薯属灌木状多年生作物, 块根富含淀粉, 是与马铃薯、甘薯并列为世界三大薯类之一, 既是重要的粮食作物, 也是广泛应用工业原料。木薯原产于热带美洲, 于 19 世纪 20 年代传入中国, 目前主要分布在海南、广东、广西、云南和福建等省份, 湖南、四川和贵州等地也有少量种植^[1]。木薯根腐病是一种由多种病原引发的常见病害^[2], 广泛分布于全球各个木薯种植区, 特别是在拉丁美洲、亚洲和非洲的部分地区危害严重。在印度 Tamil Nadu 和 Kerala 地区, 根腐病可导致高达 70% 的产量损失^[3]。在巴西东北部地区, 根腐病也会造成 30%~70% 的木薯产量下降, 是限制木薯产业发展重要因素之一^[4]。2010 年, 我国首次在海南儋州的 ‘SC205’ 木薯上发现由棕榈疫霉(*Phytophthora palmivora*)引起的根腐病^[5]。此后, 该病害迅速蔓延至云南、广西、广东等木薯主产区, 特别是在 ‘SC205’ 品种上危害最尤为严重。畹町主要种植区的根腐病发病率高达 80%, 对木薯产量和品质造成了严重的影响^[6]。该病害已经成为我国木薯产业中需重点关注的新问题^[7-8]。

棕榈疫霉是一种对农林业危害极大的病原菌, 能够侵染橡胶树、胡椒、菠萝、可可、番木瓜、大豆等多种常见作物的根、茎、叶、花以及果实, 在潮湿气候条件发病尤为严重^[9-13], 针对该病原菌的防控, 许多研究者进行了研究与探索。郭涵等^[14]对棕榈疫霉引发的木薯根腐病防控药剂进行了筛选, 从 15 种药剂中发现杀毒砵、氟吗·乙铝和甲霜·霜霉威的抑菌效果最佳。然而, 化学药剂的使用不仅增加了木薯种植成本, 还造成环境污染和病原菌抗药性的增强。目前, 选育抗病品种被认为是最持久且有效的病害防控措施, 而优异抗病种质资源的挖掘及与创制, 不仅为抗病育种提供了重要材料, 还为深入研究抗病机制奠定了理论基础。纵观国内外抗根腐病育种现状, 抗棕榈疫霉根腐病的优良新品种仍较少。因此, 加大抗病资源的挖掘力度并推动新种质创制已成为当务之急。

木薯作为高度杂合的二倍体作物, 在自交过程中, 根据遗传规律会产生部分隐性基因纯合的子代。这些隐性基因的纯合能够使得某些性状得以显现, 从而产生丰富的基因变异和表型多样性^[15]。近年来, 关于木薯自交的相关研究逐渐收到关注。尚小红等^[16]对木薯品种 ‘新选 048’ 的自交系群体进行了遗传差异分析, 鉴定出一批具有重要育种价值的木薯中间材料, 研究成果不仅进一步丰富了我国木薯种质资源的遗传多样性, 还为木薯自

交系育种提供了重要的参考依据。研究表明,木薯自交后代在抗褐斑病和细菌性萎蔫病等叶部病害方面表现出更强的抗性^[17];Kawuki等^[18]还发现部分木薯自交株系的直链淀粉含量高于亲本,并基于自交成功选育出了糯质和小颗粒淀粉木薯品种,说明自交方法是创制木薯优异新种质和中间材料的有效途径。在前期对木薯抗棕榈疫霉根腐病的评价筛选基础上^[7],本研究以抗病优良品种‘GR891’为亲本,构建其自交后代材料。通过对这些后代材料进行木薯疫霉根腐病抗性评价,并以感病品种‘华南205’和抗病品种‘华南11号’为对照,分析‘GR891’自交后代材料在抗病方面的表现。对筛选出的抗性材料的主要农艺性状进行了变异系数、遗传多样性指数、主成分分析和聚类分析等遗传多样性研究,旨在筛选出抗性优良材料,为木薯抗病育种提供科学依据和理论支持。本研究旨在挖掘抗木薯疫霉根腐病的种质资源,并为抗病品种的选育及抗病遗传特性研究提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

1.1.1 木薯品种

通过亲本‘GR891’木薯隔离种植在保山市昌宁县卡斯镇(24°47'N, 99°26'E),使其进行自花授粉获得的自交后代材料,分别编号,并保存于保山市隆阳区潞江镇云南省农业科学院热带亚热带经济作物研究所木薯试验地(27°57'N, 98°53'E)。

1.1.2 菌种

本研究所用菌株为疫霉属的棕榈疫霉,在PDA培养基平板中28℃培养7d备用。

1.2 试验方法

1.2.1 木薯供试材料种植

木薯自交后代材料以及对照品种于2023年3月种于云南省农科院热带亚热带经济作物研究所木薯试验地,每份种质种10株,种植株行距为0.8 m×1.0 m,木薯种植前施底肥,常规管理。

1.2.2 木薯自交后代材料对根腐病的抗性评价

采用室内离体接种的方法^[19]。2024年2~3月份,木薯收获时,选取大小均一、无损伤鲜薯,用清水洗净鲜薯表皮土块,晾干后备用;用打孔器(孔径5 mm)在鲜薯中间部位纵向并排挖2~3 cm深的3个小孔,将备好的直径约为5 mm的菌块放入其中2个孔内(菌丝面朝下),第3个小孔放入PDA培养基作为对照,盖上打孔时留下的木薯表皮,用脱脂棉覆盖接种处,脱脂棉喷无菌水保湿,把接种好的薯块放入保鲜袋内密封保湿,28~30℃培养7 d。每份木薯自交后代材料以及对照品种‘华南205’和‘华南11号’按上述方法接种3条鲜薯,接种7 d后横切薯块接种点,观察接种薯块的发病情况,统计其病情指数。分级标准和抗性评价标准参考李超萍等^[7],各分级标准如下:

0级,发病面积占薯块横切面积的比例小于1/16;

- 1 级，发病面积占薯块横切面积的比例大于等于 1/16，小于 1/8；
- 2 级，发病面积占薯块横切面积的比例大于等于 1/8，小于 1/4；
- 3 级，发病面积占薯块横切面积的比例大于等于 1/4，小于 1/2；
- 4 级，发病面积占薯块横切面积的比例大于等于 1/2，小于 3/4；
- 5 级：发病面积占薯块横切面积的比例大于等于 3/4。

计算出病情指数，根据病情指数将木薯种质抗病性划分为 5 个等级， $DI \leq 20.0$ ：高抗（HR）； $20.1 \leq DI \leq 40.0$ ：抗病（R）； $40.1 \leq DI \leq 60.0$ ：中感（MS）； $60.1 \leq DI \leq 80.0$ ：感病（S）； $80.1 \leq DI$ ：高感（HS）。

1.2.3 木薯抗性材料农艺性状分析

对木薯抗性材料的株高、茎粗、鲜薯条数及鲜薯重等主要农艺性状进行了系统描述与测定分析，旨在筛选出抗性优良种质，为木薯抗病育种提供科学依据和理论支持。株高、茎粗、主茎高、鲜薯条数、鲜薯重均按常规方法进行测量。此外，参考标准《木薯种质资源描述规范》（NY1943-2010），对木薯种质的成熟主茎内外皮颜色、鲜薯外皮颜色、分叉习性等性状进行详细的描述并赋值（表1）。对于株高、茎粗、主茎高、鲜薯条数、鲜薯重等产量性状，参考贺晨帮等^[20]的方法进行10级分类。

表1 木薯抗性材料性状描述及数据标准

Table 1 Description and data standards of cassava resistance material traits

序号	性状	记录标准
Code	Traits	Criterion for recording
1	成熟主茎内皮颜色SEC	1: 浅绿色; 2: 深绿色; 3: 绿色; 4: 浅红色; 5: 紫红色
2	成熟主茎外皮颜色SOSC	1: 灰白色; 2: 灰绿色; 3: 红褐色; 4: 灰黄色; 5: 褐色; 6: 黄褐色; 7: 深褐色
3	块根外皮颜色TOC	1: 白色或乳黄色; 2: 淡褐色; 3: 深褐色; 4: 红褐色; 5: 黄褐色
4	分叉习性FH	0: 不分叉; 1: 分叉
5	分叉数量(个)NF	0: 不分叉; 1: 二分叉; 2: 三分叉; 3: 四分叉

SEC: Stem endodermis color; SOSC: Stem outer skin color; TOC: Tuber outer color; FH: Fork habit; NF: Number of fork

1.2.4 数据分析

病情指数、各农艺性状的标准差、平均值、变异系数^[21]、遗传多样性指数和频率分布^[22-23]使用Excel软件进行分析；试验数据进行相关性、主成分分析和因子分析则采用DPS7.5软件进行处理；聚类分析采用Chiplot (<https://www.chiplot.online/>) 在线软件进行分析。

2 结果与分析

2.1 木薯自交后代材料对根腐病的抗性评价

木薯薯块接种病原菌 7 d 后，横切接种点，薯块出现不同程度的变褐或软腐现象，接种 PDA 培养基的对照仅出现轻微的变色。根据薯块横切面发病面积进行分级，不同抗感种质表现详见图 1。137 份 ‘GR891’ 木薯自交后代材料的室内离体抗病性评价结果见表 2。其中，高抗种质 56 份，占参试种质的 40.88%；抗病

种质 37 份，占 27.01%；中感种质 33 份，占 24.09%；感病种质 9 份，占 6.57%；高感种质 2 份，占 1.46%。

‘GR891’木薯自交后代材料对疫霉根腐病出现出抗感分离，抗感比约为 2.1:1。抗病性结果表明，在抗木薯疫霉根腐病木薯品种‘GR891’的自交后代材料中存在丰富的疫霉根腐病抗源，可为抗病亲本的选育及品种改良提供依据。



左边薯块：接种病原菌后横切薯块接种点，观察接种薯块发病情况；右边薯块：接种 PDA 培养基的对照，其中 GG-23-183 和 GG-23-378 左边 2 个薯块均为接种薯块

Left tubers: Cross-sections of tubers at inoculation points after pathogen inoculation, observing disease development in inoculated tubers; Right tubers: Control inoculated with PDA medium, where the two left tubers of GG-23-183 and GG-23-378 are inoculated tubers

图 1 部分木薯材料室内离体接种和评价

Fig.1 Partial in vitro inoculation and evaluation of cassava germplasm materials

表 2 木薯自交后代材料对根腐病抗病性评价

Table 2 Evaluation of root rot resistance in cassava inbred progeny materials

序号 Code	抗性等级 Resistance	种质 Germplasm	所占比例 (%) Proportio
1	高抗 HR	GG-23-139, GG-23-141, GG-23-162, GG-23-176, GG-23-177, GG-23-20, GG-23-246, GG-23-270, GG-23-284, GG-23-350, GG-23-363, GG-23-373, GG-23-399, GG-23-408, GG-23-419, GG-23-433, GG-23-448, GG-23-451, GG-23-479, GG-23-490, GG-23-500, GG-23-508, GG-23-517, GG-23-528, GG-23-98, GG-23-203, GG-23-402, GG-23-121, GG-23-278, GG-23-357, GG-23-527, GG-23-175, GG-23-484, GG-23-248, GG-23-420,	40.88

		SC11, GG-23-197, GG-23-127, GG-23-131, GG-23-60, GG-23-125, GG-23-251, GG-23-128, GG-23-228, GG-23-106, GG-23-147, GG-23-200, GG-23-257, GG-23-342, GG-23-343, GG-23-355, GG-23-362, GG-23-409, GG-23-436, GG-23-446, GG-23-449, GG-23-572	
2	抗病 R	GG-23-214, GG-23-165, GG-23-279, GG-23-379, GG-23-253, GG-23-507, GG-23-520, GG-23-227, GG-23-524, GG-23-71, GG-23-366, GG-23-265, GG-23-281, GG-23-286, GG-23-146, GG-23-198, GG-23-134, GG-23-437, GG-23-560, GG-23-191, GG-23-116, GG-23-272, GG-23-353, GG-23-256, GG-23-282, GG-23-78, GG-23-483, GG-23-189, GG-23-486, GG-23-63, GG-23-68, GG-23-37, GG-23-493, GG-23-268, GG-23-277, GG-23-386, GG-23-413	27.01
3	中感 MS	GG-23-521, GG-23-16, GG-23-335, GG-23-523, GG-23-172, GG-23-258, GG-23-426, GG-23-12, GG-23-156, GG-23-368, GG-23-368, GG-23-285, GG-23-352, GG-23-359, GG-23-261, GG-23-334, GG-23-340, GG-23-283, GG-23-428, GG-23-522, GG-23-450, GG-23-174, GG-23-332, GG-23-531, GG-23-266, GG-23-88, GG-23-327, GG-23-288, GG-23-452, GG-23-383, GG-23-370, GG-23-372, GG-23-380	24.09
4	感病 S	GG-23-126, GG-23-255, GG-23-153, GG-23-491, GG-23-333, GG-23-620, GG-23-565, GG-23-231, GG-23-453, SC205	6.57
5	高感 HS	GG-23-183, GG-23-378	1.46

2.2 木薯抗性材料主要农艺性状的遗传变异分析

对93份木薯抗病材料的农艺性状进行调查发现，所有材料的块根内皮颜色和薯肉颜色均为白色，因此，这2个性状不进行遗传变异统计分析。其余5个性状表现出不同程度的遗传变异性（表3）。在这些性状中，成熟主茎外皮颜色主要为灰白色，其次是灰绿色，黄褐色最少；成熟主茎内皮颜色以浅绿色为主，其次是深绿色，绿色相对较少；块根外皮颜色主要为白色或乳黄色，其次是红褐色；分叉习性以三分叉为主，其次是二分叉，较少不分叉。成熟主茎外皮颜色的变异系数最高，达到77.63%；块根外皮颜色次之，为70.51%；而成熟主茎内皮颜色最低，仅为43.07%。5个农艺性状的遗传多样性指数范围在0.60至1.11，平均值为0.86。其中，成熟主茎外皮颜色遗传多样性指数最高，表明该性状的遗传多样性最为丰富；而分叉习性的遗传多样性指数最低，显示该性状的分布相对集中。

表3 木薯材料农艺性状的变异系数及遗传多样性分析

Table 3 Coefficient of variation and genetic diversity of agronomic characteristics of cassava materials

性状 Traits	最小值 Min.	最大值 Max.	平均值 Mean	标准差 SD	变异系数 (%) CV	遗传多样性指数 Genetic diversity	频率分布 (%) Ratio distribution							
							0	1	2	3	4	5	6	7
成熟主茎内皮颜色SEC	1	3	1.33	0.57	43.07	0.75	—	69.89	24.73	5.38	0	0	—	—
成熟主茎外皮颜色SOSC	1	7	2.11	1.64	77.63	1.11	—	62.37	21.51	4.30	3.22	7.53	0	1.08
块根外皮颜色TOC	1	4	1.71	1.21	70.51	0.82	—	72.04	4.30	4.30	19.35	0	—	—
分叉习性FH	0	1	0.71	0.45	63.93	0.60	29.03	70.97	—	—	—	—	—	—
分叉数量(个)NF	0	2	1.26	0.88	69.85	0.98	29.03	16.13	54.84	0	—	—	—	—

—表示记载标准不存在此分级

— indicates that this classification does not exist in the record standard

5个主要农艺性状表现出不同程度的遗传变异性(表4)。其中,鲜薯产量的变异系数最大,达到42.21%,其变幅为0.52~8.54 kg;其次是主茎高和鲜薯条数,其变异系数分别为39.33%和33.75%,变幅分别为16.80~335.00 cm和3.00~27.00条;株高和茎粗的变异系数分别为14.46%和16.32%,变幅分别为151.40~395.30 cm和21.20~49.70 mm。5个性状的遗传多样性指数范围在1.95至2.04,平均值为2.00。这些结果表明,木薯种质的株高、茎粗、主茎高、鲜薯条数和鲜薯产量等重要农艺性状的变异性较大,显示出较高的多样性,这为开展木薯优良种质的筛选与利用提供良好的基础,并为今后木薯新品种的改良和选育提供了依据。

表4 木薯材料主要产量性状遗传多样性

Table 4 Diversity analysis of yield characteristics of cassava materials

性状	最大值	最小值	平均值	标准差	变异系数 (%)	遗传多样性指数
Traits	Min.	Max.	Mean	SD	CV	Genetic diversity
株高 (cm) PH	395.30	151.40	298.74	43.21	14.46	1.95
茎粗 (mm) SD	49.70	21.20	30.73	5.02	16.32	1.99
主茎高 (cm) SH	335.00	16.80	200.89	79.02	39.33	2.03
单株鲜薯数量 (条) RNPP	27.00	3.00	12.37	4.17	33.75	2.04
单株鲜薯产量 (kg) RWPP	8.54	0.52	3.45	1.46	42.21	1.97

PH: Plant height; SD: Stem diameter; SH: Stem height; RNPP: Root number per plant; RWPP: Root weight per plant

2.3 木薯抗性材料主要农艺性状的相关性分析

对93份木薯抗病材料的6个主要农艺性状进行相关性分析(表5)。结果显示,株高与茎粗呈显著正相关,相关系数为0.250,单株鲜薯重与茎粗及单株鲜薯数量之间则呈极显著正相关,相关系数分别为0.490和0.680。上述结果表明,木薯‘GR891’自交后代材料的农艺性状与产量性状之间存在互相影响。在今后的抗病新种质创制过程中,应综合考虑农艺性状与产量性状的评估。

表5 木薯材料主要农艺性状的相关性分析

Table 5 Correlation analysis of agronomic characteristics of cassava materials

性状	株高(cm)	茎粗 (mm)	主茎高 (cm)	分枝数量	单株鲜薯数量	单株鲜薯重
Traits	PH	SD	SH	(个) NF	(条) RNPP	(kg) RWPP
株高/ (cm) PH	1					
茎粗 (mm) SD	0.250*	1				
主茎高 (cm) SH	0.110	0.050	1			
分枝数量 (个) NF	0.310**	0.180	-0.240*	1		
单株鲜薯数量 (条) RNPP	0.140	0.260*	-0.090	0.170	1	
单株鲜薯重 (kg) RWPP	0.170	0.490**	0.000	0.200	0.680**	1

*和**分别表示显著相关($P<0.05$)和极显著相关($P<0.01$)

* and ** indicate significant correlation ($P<0.05$) and highly significant correlation ($P<0.01$), respectively.

2.4 木薯抗性材料主要性状主成分分析

对93份木薯抗病材料的6个农艺性状进行了主成分分析(表6)。以特征值大于1为标准,共提取出3个主成分,累计贡献率达74.52%,涵盖了木薯抗病材料6个主要农艺性状的绝大部分信息。这表明该结果可用

于木薯品种选育过程中的性状指标评价。第1主成分的特征值为2.200，贡献率为36.67%。在该主成分中，单株鲜薯重的特征向量正值最大，为0.8464，表明单株鲜薯重对第1主成分的影响最大，其次是单株鲜薯数量（0.7542）和茎粗（0.6761）。第2主成分的特征值为1.1766，贡献率为36.67%，其中主茎高的特征向量正值最大，为0.8453。第3主成分的特征值为1.0942，贡献率为18.24%，其中株高的特征向量正值最大，为0.7413。在主成分分析中，每个主成分因子客观地反映了各品质性状之间的关系。株高、茎粗、主茎高、单株鲜薯数量和单株鲜薯是木薯表型变异的主要特征，为今后的木薯育种提供理论基础。

表6 木薯材料主要农艺性状主成分分析

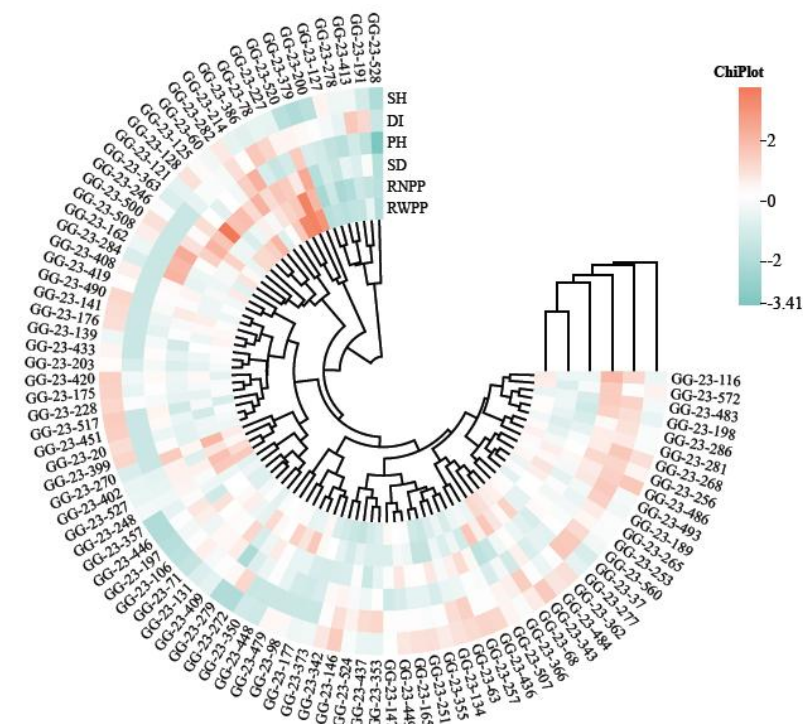
Table 6 Principal component analysis of agronomic characteristics of cassava materials

性状 Traits	主成分 Principal component		
	1	2	3
株高 (cm) PH	0.4640	0.0039	0.7413
茎粗 (mm) SD	0.6761	0.2334	0.1072
主茎高 (cm) SH	-0.0844	0.8453	0.3417
分枝数量 (个) NF	0.4853	-0.6065	0.3848
单株鲜薯数量 (条) RNPP	0.7542	0.0605	-0.4179
单株鲜薯重 (kg) RWPP	0.8464	0.1896	-0.3062
特征值 Characteristic value	2.2003	1.1766	1.0942
贡献率 (%) Contribution rate	36.67	19.61	18.24
累计贡献率 (%) Cumulative contribution rate	36.67	56.28	74.52

2.5 木薯抗性材料聚类分析

依据株高、茎粗、主茎高、单株鲜薯条数、单株鲜薯重以及病情指数对抗性材料进行聚类分析，将93份材料划分为3大类。从图2和表7可知，各类群特征如下：第I类包含7份材料（GG-23-528、GG-23-191、GG-23-413、GG-23-278、GG-23-127、GG-23-200、GG-23-379），主要特征：株高较矮（平均226.24 cm），茎较细（平均25.29 mm），平均主茎高94.00 cm，单株鲜薯条数最少（5.00条），单株鲜薯产量较低（1.21 kg），平均病情指数为20.97。与其他类群相比，该类群的茎粗、主茎高、单株鲜薯条数和单株鲜薯重的变异系数均最高，分别为12.86%、89.41%、32.07%、54.77%。第II类包含4份材料（GG-23-520、GG-23-227、GG-23-78、GG-23-386），主要特征：株高适中（平均277.75 cm），茎最粗（平均38.65 mm），平均主茎高105.00 cm，单株鲜薯条数最多（21.25条），单株鲜薯产量最高（7.61 kg），平均病情指数为31.58。与其他类群相比，该类的株高变异系数最高（17.91%），但茎粗、单株鲜薯条数和单株鲜薯重平均值最大，且变异系数最低，分别为7.62%、16.435%和14.94%。第III类包含82份材料，主要特征：株高最高（平均312.61 cm），平均茎粗为33.22 mm，主茎高最高（平均194.52 cm）。平均单株鲜薯条数为12.65条，平均鲜薯重为3.70 kg。该类中株高平均值最大，但变异系数最低（12.05%）。图2中显示，第II类4份材料在农艺性状和抗病性方面表现突出，对今后抗病育种具有较高的利用价值；此外，第III大类群可进一步细分为3个小群，表明该类材料

仍存在显著差异，具体分析如下，小群1（GG-23-214~GG-23-500），包含9份材料，其平均株高、主茎粗、主茎高、单株鲜薯条数、单株鲜薯产量和病情指数分别为325.00 cm、40.27 mm、193.89 cm、12.78条、4.44 kg、13.22，该小群材料表现出显著的高产量潜力，可重点关注为高产量种质的筛选和改良对象。小群2（GG-23-508~GG-23-409），包含29份材料，表现为性状的综合性较强，兼具有一定的产量和抗病性，可作为后续筛选和改良的核心材料。小群3（GG-23-279~GG-23-279），包含44份材料，其性状在产量和抗病性之间表现出均衡性，可作为平衡产量与抗病性的重要备选材料。通过聚类分析，有效筛选出具备抗病性、适应性和高产潜力的材料，为自交后代筛选优良种质以及后续育种工作提供依据。



材料编号同于表1；聚类图由外向内依次是主茎高、病情指数、株高、茎粗、单株鲜薯条数、单株鲜薯重
The code is same as table 1;The index of this chart from outside to inside is SH,DI,PH,SD,RNPP and RWPP

图2 93份抗性材料聚类分析

Fig.2 Cluster analysis of 93 resistant materials

表 7 不同类群农艺性状和病情指数的统计结果

Table 7 Statistical results of agronomic traits and disease index for different group

s性状 Traits	项目 Item	类群 Group		
		I	II	III
株高 (cm) PH	平均值	226.24	277.75	303.59
	变异系数 (%)	14.75	17.91	12.05
茎粗 (mm) SD	平均值	25.29	38.65	29.64
	变异系数 (%)	12.86	7.62	10.70
主茎高 (cm) SH	平均值	94.00	105.00	196.41
	变异系数 (%)	89.41	44.54	45.29
单株鲜薯条数(条)RNPP	平均值	5.00	21.25	12.53
	变异系数 (%)	32.07	16.43	26.18

单株鲜薯重(kg)(RWPP)	平均值	1.21	7.61	3.31
	变异系数(%)	54.77	14.94	27.50
病情指数 <i>DI</i>	平均值	20.97	31.58	18.07
	变异系数(%)	60.13	20.81	76.86

3 讨论

本研究通过室内离体接种方法对137份‘GR891’木薯自交后代材料进行了木薯疫霉根腐病抗性评价。结果显示, 56份材料表现为高抗, 37份表现为抗病, 33份表现为中感, 9份表现为感病, 2份表现为高感。

‘GR891’木薯自交后代对疫霉根腐病的抗性表现出一定的抗感分离, 分离的主要原因可能是抗病基因的杂合性及其分离规律, 此外, 抗病性状还受数量性状基因和环境因素的影响。木薯对不同病害的抗性基因控制机制有所不同, Maruthi等^[24]从坦桑尼亚的木薯地方品种中筛选出了对木薯褐条病的隐性抗性基因, 揭示了木薯对褐条病的隐性抗性控制的遗传机制; 而Akano等^[25]的研究则表明, 木薯花叶病的抗病和感病分离符合经典的显性基因控制模式, 即控制木薯抗花叶病的抗病基因是显性基因。有研究发现, 在甘薯和马铃薯中, 抗病性状也存在偏离经典3:1分离比的情况, 且甘薯的抗病性与环境交互作用密切相关, 这表明抗病性状的表现不仅由基因控制, 还受到环境和基因之间复杂关系的影响^[26-27]。在本研究中的抗疫霉根腐病评价结果表明, ‘GR891’木薯自交后代材料中包含丰富的抗疫霉根腐病种质, 本研究筛选出一批材料可作为抗根腐病育种的抗源材料, 未来的研究重点将是其抗病机制的进一步解析。

93份木薯抗病材料主要农艺性状的变异系数、遗传多样性指数等方面遗传多样性分析结果得出, ‘GR891’木薯自交后代材料中木薯抗性材料在农艺性状上均有较大程度的遗传变异, 而且成熟主茎外皮颜色的变异系数和遗传多样性指数均为最高, 产量性状中木薯种质的株高、茎粗、主茎高、鲜薯条数和鲜薯产量等重要主要农艺性状变异较大, 其中, 性状中鲜薯产量变异系数最大, 其次是主茎高和鲜薯条数。相关性分析得出, 木薯‘GR891’自交后代材料的农艺性状和产量性状之间互相影响, 在今后的抗病选育中要综合评价各农艺性状和产量性状。主成分分析得出, 3个主成分的累计贡献率达74.52%, 株高、茎粗、主茎高、单株鲜薯数量和单株鲜薯为木薯表型变异的主要特征。

农作物表型性状的遗传多样性分析研究, 是检测遗传变异最直观且简便的方法, 可为育种利用、遗传分析、基因挖掘研究提供非常精准的信息^[28]。变异系数用于衡量性状的离散程度, 变异系数越大, 离散程度越高, 表明该性状在群体中差异较大。而遗传多样性指数则反映了种质资源的丰富度和均匀度, 指数越高, 说明材料在遗传层面上更具多样性, 表现出更高的基因丰度和均衡分布^[29]。前人在对木薯种质资源进行遗传多样性分析时发现, 各性状的变异系数与多样性指数的高低不完全一致, 这表明不同性状之间的遗传变异模式存在差异, 这种差异可能受多种因素的共同影响, 如环境条件、基因型与表型的互作等^[16,30-31]。

木薯是基因组高度杂合的二倍体, 自交是一种快速有效的获得隐性性状、培育新种质和新品种的方法^[16]。由于木薯是以种茎作为繁殖材料的无性繁殖作物, 获得的优异自交材料可以通过无性繁殖稳定的遗传

下来,进而在生产中使用。本研究结果中,‘GR891’木薯自交后代种质对根腐病的抗感比也验证了自交系在抗病育种中的应用价值。随着分子生物学技术的进步,自交系在木薯育种中的研究逐渐展开,尤其是在抗病性方面。通过基因编辑和选择自交容忍的木薯材料,研究者在抗木薯褐条病和木薯花叶病等病害的育种中,尝试使用自交系来稳定传递抗性基因^[32]。一些育种计划还探索了将自交系与现代分子标记技术相结合,通过标记辅助选择来加速抗病木薯新品种的培育。这种方法提高了木薯抗病育种的效率,并解决了传统育种中面临的世代时间较长的问题^[33-35]。本研究对筛选出的抗病材料主要性状进行遗传多样性分析,结果显示‘GR891’木薯自交后代表现出不同程度的性状分离。亲本‘GR891’木薯株型紧凑,顶端分叉角度小,分枝较低,主茎高一般40 cm以下,成熟主茎外皮呈灰白色,薯块外皮浅黄色,内皮和薯肉均为白色^[36]。其自交后代中,成熟主茎内皮颜色主要为浅绿色,外皮颜色以灰白色为主,块根外皮颜色多为白色或乳黄色,分叉习性以三分叉为主,内皮和薯肉仍为白色。尽管‘GR891’亲本的性状具有一定的稳定性(块根外皮浅黄色、内皮和薯肉颜色),但其自交后代在主茎颜色、块根外皮颜色、分叉习性等方面展现了多样性。这些性状的分离为选育具有特定优良性状的新品种提供了可能性,进一步支持了自交在作物育种中的应用价值。从木薯新品种选育的目标来看,除了选育高产、高淀粉含量、高支链淀粉专用型、燃料乙醇专用型、抗病虫、食用型、饲用型以及抗逆性木薯品种以外,具有良好株型和高位分枝的木薯表型也是选育的重点之一,高位分枝的株型有利于密植和间作,可充分利用地面空间,从而提高单位面积的产出效益^[37]。在‘GR891’木薯自交后代中,主茎高度平均值达到200.89 cm,较亲本表现为高位分枝。这进一步说明通过自交系可获得性状优良的目标材料。

本研究从137份‘GR891’木薯自交后代中筛选出93份对木薯疫霉根腐病具有抗性的材料,并对其主要农艺性状进行了遗传多样性分析。通过计算变异系数、遗传多样性指数等参数,系统评估了这些抗性材料的遗传差异性和变异情况。结合疫霉根腐病的抗性评价及农艺性状的聚类分析,筛选出第II类群4份优异材料和第III类中部分材料,尤其是小群1的9份材料,作为未来育种的重点材料。本研究为进一步优选具有潜在推广价值的木薯品种提供了科学依据。筛选出的抗性优良材料下一步可进行品种比较试验,还可在不同生态区域进行区试试验,以验证其在不同环境下的稳定性和适应性,从而为木薯抗病育种奠定基础,助力木薯品种改良及推广应用。

参考文献

[1] 刘光华,杨秀峰.云南木薯.北京:中国农业出版社,2017

Liu G H, Yang X F. Yunnan Cassava. Beijing: China Agriculture Press, 2017

[2] Onyeka T J, Dixon A G O, Ekpo E J A. Field evaluation of root rot disease and relationship between disease severity and yield in cassava. *Experimental Agriculture*, 2005, 41(3): 357-363

- [3] Ambe J T. Effect of harvesting time on cassava fresh root yield in Cameroon. *Discovery Innovation*, 1994, 6(3): 315 - 317
- [4] Teixeira J H D S, Guimarães M A S, Cardoso S C, Brito A D S, Peixoto Y S, Ribeiro S O, Oliveira D E J, Saulo A S D O. Distribution of resistance of cassava genotypes to dry, soft and black root diseases and correlation to yield parameters. *Journal of Phytopathology*, 2021, 169(6): 350 - 359
- [5] Guo H, Li C P, Shi T, Fan C.J, Huang G X. First report of *Phytophthora palmivora* causing root rot of cassava in China. *Plant Disease*, 2012, 96(7): 1072
- [6] 郭涵.木薯疫霉根腐病原鉴定及其侵染抗感种质后差异基因表达分析.海口:海南大学, 2013
- Guo H. Pathogen identification of root rot disease and differential expression gene analysis of disease-resistant and susceptible cassava varieties after infection. Haikou: Hainan University, 2013
- [7] 李超萍,时涛,段春芳,蔡吉苗,黄贵修.木薯疫霉根腐病在我国的发生调查及 59 份种质的抗性评价. *热带农业科学*, 2015, 35(06):29 - 32
- Li C P, Shi T, Duan C F, Cai J M, Huang G X. Survey on Cassava Root Rot of *Phytophthora palmivora* and Resistance Evaluation on 59 Cassava Germplasm, *Chinese Journal of Tropical Agriculture*, 2015, 35(06): 29 - 32
- [8] 李超萍,刘先宝,时涛,蔡吉苗,郭涵,黄贵修.木薯根腐病棕榈疫霉病菌的分子检测. *热带作物学报*, 2013, 34(07):1314 -1318
- Li C P, Liu X B, Shi T, Cai J M, Guo H, Huang G X. Molecular Detection of *Phytophthora palmivora* from the Cassava Root Rot, *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2013, 34(07):1314 -1318
- [9] 黄贵修,徐灿光.中国天然橡胶病虫害识别与防治.北京:中国农业出版社, 2012
- Huang G X, Xu C G. Identification and Control of Diseases, Pests, and Weeds in Natural Rubber in China. Beijing: China Agriculture Press, 2012
- [10] 杨雄飞,李加智.云南热带作物疫霉属真菌的研究. *云南热作科技*, 1996(03): 2-7
- Yang X F, Li J Z. The Study of *Phytophthora* Fungi in Tropical Crops of Yunnan. *Yunnan Tropical Crop Science and Technology*, 1996(03): 2-7
- [11] Crouzillat D, Phillips W, Fritz P J, Pétiard V. Quantitative trait loci analysis in *Theobroma cacao* using molecular markers. Inheritance of polygenic resistance to *Phytophthora palmivora* in two related cacao populations. *Euphytica*, 2000, 114, 25-36
- [12] 王帅,张子戎,齐广勋,王英男,赵洪轶,刘晓冬,袁翠平,王玉民,朴世领.基于 SSR 标记分析大豆疫霉根腐病抗源的遗传多样性. *植物遗传资源学报*, 2020, 21(02):394 - 402
- Wang S, Zhang Z X, Qi G X, Wang Y N, Zhao H K, Liu X D, Yuan C P, Wang Y M, Piao S L. Genetic Diversity of Resistance to *Phytophthora* Root Rot Based on SSR Markers, *Journal of Plant Genetic Resource*, 2020, 21(02): 394 - 402
- [13] 戴婷婷,吴小芹.等温扩增技术快速检测棕榈疫霉. *林业科学*, 2016, 52(10):161-166
- Dai T T, Wu X Q. A Method for Rapidly Identifying *Phytophthora palmivora* Using the LAMP Technique. *Scientia Silvae Sinicae*, 2016, 52(10): 161-166.
- [14] 郭涵,祝天成,李超萍,时涛,黄贵修.由棕榈疫霉引起的木薯根腐病防控药剂的筛选. *湖北农业科学*, 2013, 52(11):2552 - 2555
- Guo H, Zhu T C, Li C P, Shi T, Huang G X. Screening for Fungicides Against *Phytophthora palmivora* of Cassava Root Rot, *Hubei Agricultural Sciences*, 2013, 52(11): 2552 - 2555
- [15] 严华兵,叶剑秋,李开绵.中国木薯育种研究进展. *中国农学通报*, 2015, 31(15): 63-70
- Yan H B, Ye J Q, Li K M. Progress of Cassava Breeding in China, *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2015, 31(15): 63-70
- [16] 尚小红,谢向誉,曹升,严华兵,肖亮,王颖,曾文丹,陆柳英,陈会鲜.木薯‘新选 048’自交系群体表型鉴定评价及遗传多样性分析. *植物生理学报*, 2019, 55(09):1277-1290.
- [17] Freitas J P X, Diniz R P, Oliveira V S, Oliveira E J. Inbreeding depression for severity caused by leaf diseases in cassava. *Euphytica*, 2017, 213: 205
- [18] Kawuki R S. Segregation of selected agronomic traits in six S1 cassava families. *Journal of Plant Breeding & Crop Science*, 2011, 3 (8): 154-160

- [19] 段春芳,李月仙,刘倩,宋记明,易怀锋,熊贤坤,张林辉,沈绍斌,严炜,刘光华.32份木薯种质对疫霉根腐病的抗性评价和农艺性状分析.植物保护,2017,43(01):148-152
- Duan C F, Li Y X, Liu Q, Song J M, Yi H F, Xiong X K, Zhang L H, Shen S B, Yan W, Liu G H. Comprehensive assessment of 32 cassava germplasms for resistance to root rot disease(*Phytophthora palmivora*) and agronomic traits. Plant Protection, 2017, 43(01):148 - 152
- [20] 贺晨帮,宗绪晓.豌豆种质资源形态标记遗传多样性分析.植物遗传资源学报,2011,12(01):42-48
- He C B, Zong X X. Genetic Diversity of Pea(*Pisum sativum* L.) Germplasm Resources Revealed by Morphological Traits, Journal of Plant Genetic Resource, 2011, 12(01):42-48
- [21] 牛雪婧,王新栋,王金萍,孙娟,郝彦敏,王丽娜,耿立格.高粱地方种质资源表型多样性分析及综合评价.植物遗传资源学报,2024,25(4):562-575
- Niu X J, Wang X D, Wang J P, Sun J, Qie Y M, Wang L N, Geng L G. Genetic diversity and comprehensive evaluation of sorghum germplasm based on phenotypic traits. Journal of Plant Genetic Resource, 2023, 25(4): 562-575
- [22] Shannon C E, Weaver W. The mathematical theory of communication. Chicago: The University of Illinois, Urbana, 1949: 3-14
- [23] 孟珊,徐婷婷,朱小品,狄佳春,朱银,杨欣,邹淑琼,杨雪,覃翠华,颜伟.江苏大豆地方种质资源表型多样性分析.植物遗传资源学报,2023,24(2):419-436
- Meng S, Xu T T, Zhu X P, Di J C, Zhu Y, Yang X, Zou S Q, Yang X, Qin C H, Yan W. Diversity analysis of soybean landraces collected from Jiangsu province using phenotypic traits. Journal of Plant Genetic Resources, 2023, 24(2):419 - 436
- [24] Maruthi M N, Jeremiah S. C, Mohammed I, Kanju E. Recessive resistance to cassava brown streak disease identified in a screening of Tanzanian cassava landraces. Plant Pathology, 2014, 63(4): 1117-1127
- [25] Akano A O, Dixon A G O, Mba C, Barrera E, Fregene M. Genetic mapping of adominant gene conferring resistance to cassava mosaic disease. Theoretical and Applied Genetics, 2002, 105: 521-525
- [26] Okogbenin E, Porto M C M, Egesi C, Mba C, Espinosa E, Santos L G, Iglesias C. Marker-Assisted Introgression of Resistance to Cassava Mosaic Disease into Elite Cassava Cultivars. African Journal of Biotechnology, 2007, 6(3): 152-158
- [27] Van der Plank J E. Disease Resistance in Plants. New York: Academic Press, 1968
- [28] 王晓鸣,邱丽娟,景蕊莲,任贵兴,李英慧,李春辉,秦培友,谷勇哲,李龙.作物种质资源表型性状鉴定评价:现状与趋势.植物遗传资源学报,2022,23(1):12-20
- Wang X M, Qiu L J, Jing R L, Ren G X, Li Y H, Li C H, Qin P Y, Gu Y Z, Li L. Evaluation on phenotypic traits of crop germplasm: Status and development. Journal of Plant Genetic Resources, 2022, 23(1): 12-20
- [29] 董承光,王娟,周小凤,马晓梅,李生秀,余渝,李保成.基于表型性状的陆地棉种质资源遗传多样性分析.植物遗传资源学报,2016,17(03):438-446
- Dong C G, Wang J, Zhou X F, Ma X M, Li S X, Yu Y, Li B C. Evaluation on Genetic Diversity of Cotton Germplasm Resources(*Gossypium hirsutum* L.) on Morphological Characters. Journal of Plant Genetic Resources, 2016, 17(03): 438 - 446
- [30] 谢向誉,尚小红,严华兵,曹升,王颖,肖亮,陆柳英,曾文丹.广西地方食用木薯种质资源遗传多样性分析.核农学报,2020,34(11):2397-2406
- Xie X Y, Shang X H, Yan H B, Cao S, Wang Y, Xiao L, Lu L Y, Zeng W D. Genetic Diversity Analysis of Edible Cassava Landraces in Guangxi. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2020, 34(11): 2397-2406
- [31] 谢向誉,陆柳英,曾文丹,赖大欣,严华兵.31份木薯种质资源的鉴定评价及遗传多样性分析.南方农业学报,2017,48(03):393-400
- Xie X Y, Lu L Y, Zeng W D, Lai D X, Yan H B. Identification, evaluation and genetic diversity analysis of 31 cassava germplasm resources. Journal of Southern Agriculture, 2017, 48(03):393 - 400

- [32] Tadeo K, Vincent K, Yona B, Robert K, Ferguson M. Inbreeding enhances field resistance to cassava brown streak viruses. *Journal of Plant Breeding and Crop Science*, 2016, 8 (8): 138-149
- [33] Kawuki R S, Ferguson M, Labuschagne M, Herselman L, Orone J, Ralimanana I, Bua A, Baguma Y. Variation in self- and cross-pollination success in cassava: Implications for breeding. *Euphytica*, 2011, 181(1): 319 - 327
- [34] Ceballos H, Kawuki R S, Gracen V E, Yench G C, Hershey C H. Conventional breeding, marker-assisted selection, genomic selection and inbreeding in clonally propagated crops: A case study for cassava. *Theoretical and Applied Genetics*, 2015, 128(9): 1647-1667
- [35] Wolfe M D, Rabbi I Y, Egesi C, Hamblin M, Kawuki R, Kulakow P, Jannink J L. Genome-wide association and prediction reveals multiple QTL for cassava resistance to cassava mosaic disease. *The Plant Genome*, 2016, 9(2):1-14
- [36] 田益农,李军,盘欢.木薯新品种GR891的选育.广西农业科学,1998,(03):21-22
Tian Y N, Li J, Pan H. Breeding of the New Cassava Variety GR891. *Guangxi Agricultural Sciences*, 1998, (03): 21-22
- [37] 叶剑秋.木薯种质资源遗传多样性评价与创新利用.海口:海南大学, 2014
Ye J Q. *Genetic Diversity evaluation, innovation and utilization of cassava germplasms*. Haikou: Hainan University, 2014