

30 份甘薯品种耐低磷能力评价及种质筛选

赵锦洋¹, 高福禄¹, 李玉斌¹, 鲍次次¹, 海 雪¹, 张金磊¹, 赵婧媛¹, 林延慧²,
邢会贤^{1*}, 司成成^{1*}

1. 海南大学热带农林学院/三亚南繁研究院, 海南三亚 572025; 2. 海南省农业科学院粮食作物研究所, 海南海口 571100

摘 要: 磷(P)是影响甘薯生长发育与生产力的关键营养元素之一。建立甘薯耐低磷能力评价体系并筛选耐低磷品种, 可为后续甘薯耐低磷资源的创制与育种利用奠定基础。本研究选取 30 个甘薯品种, 在低磷大田中设置不施磷(0 kg/hm²)和正常供磷(110 kg/hm²)处理, 测定甘薯收获期的纤维根鲜质量、块根侧根鲜质量、单个块根鲜质量、单株块根鲜质量、单株块根数、纤维根干质量、块根侧根干质量、块根干质量、叶鲜质量、茎鲜质量、叶干质量、茎干质量、叶绿素相对含量和根冠比 14 个性状表征值, 并计算各指标的耐低磷系数。在此基础上, 运用隶属函数法进行主成分分析、相关性分析和聚类分析, 评估各品种的耐低磷能力。研究结果表明: 通过主成分分析, 5 个主成分的累计方差贡献率达到了 80.36%, 表明这些指标能够全面反映甘薯品种的耐低磷能力。利用隶属函数法计算出综合耐低磷评价价值(D), D 值范围为 0.30~0.79, 据此将甘薯品种划分为高耐、中耐、低耐和不耐 4 个等级。经过系统聚类分析, 筛选出琼薯 4 号为高耐低磷型甘薯品种; 丝滑、福薯 8 号和山川紫等为中耐低磷型甘薯品种; 烟薯 25、泰薯 14 和徐紫薯 8 等为低耐低磷型甘薯品种; 安娜芋、金薯 17 和心香 3 个品种为低磷敏感型甘薯品种; 确定单株产量(即单株块根鲜质量)、纤维根鲜质量、块根侧根鲜质量、纤维根干质量、叶鲜质量、茎鲜质量、叶干质量和茎干质量可作为甘薯收获期耐低磷能力评价的指标。本研究可为耐低磷型甘薯新品种选育及利用提供理论依据。

关键词: 甘薯; 耐低磷; 筛选与鉴定; 综合评价; 隶属函数法

中图分类号: S531 文献标志码: A

Evaluation of Low-phosphorus Tolerance and Germplasm Screening of 30 Sweetpotato Varieties

ZHAO Jinyang¹, GAO Fulu¹, LI Yubin¹, BAO Cici¹, HAI Xue¹, ZHANG Jinlei¹, ZHAO Jingyuan¹, LIN Yanhui²,
XING Huixian¹, SI Chengcheng^{1*}

1. School of Tropical Agriculture and Forestry / Sanya Institute of Breeding and Multiplication, Hainan University, Sanya, Hainan 572025, China; 2. Institute of Food Crops, Hainan Academy of Agricultural Science, Haikou, Hainan 571100, China

Abstract: Phosphorus (P), a crucial nutrient, has a significant impact on the growth, development, and productivity of sweetpotato. Establishing an evaluation system for low-phosphorus tolerance in sweetpotato and screening for low-phosphorus tolerant sweetpotato varieties can provide essential foundational support for the further development, breeding, and utilization of low-phosphorus tolerant sweet potato resources. In this study, 30 sweet potato varieties were selected. Field experiments with phosphorus deficiency were conducted, involving two phosphorus treatment conditions, no phosphorus application (0 kg/hm²) and normal phosphorus supply (110 kg/hm²). At the harvest stage, 14 characteristic traits were measured, including fibrous root fresh weight, lateral root of storage root fresh weight, single storage root fresh weight, storage root fresh weight per plant, storage root number per plant, fibrous root dry weight, lateral root of

收稿日期 2025-09-09; 接受日期 2025-10-27

基金项目 海南省重点研发计划项目(No. ZDYF2025XDNY070); 三亚崖州湾科技城“崖州湾”菁英人才科技专项(No. SCKJ-JYRC-2023-24); 国家自然科学基金项目(No. 32560771)。

作者简介 赵锦洋(2000—), 男, 硕士研究生, 研究方向: 作物抗逆与养分高效利用的生理和分子机制。*通信作者(Corresponding author): 邢会贤(XING Huixian), E-mail: 995234@hainanu.edu.cn; 司成成(SI Chengcheng), E-mail: ccsi@hainanu.edu.cn。

storage root dry weight, storage root dry weight, leaf fresh weight, stem fresh weight, leaf dry weight, stem dry weight, relative chlorophyll content and root/shoot ratio. The low-phosphorus tolerance coefficient for each index was calculated. Principal component analysis, correlation analysis, and cluster analysis were performed using the comprehensive membership function method to evaluate the low-phosphorus tolerance of each sweet potato cultivar. Principal component analysis showed that the cumulative variance contribution rate of the five principal components reached 80.36%, indicating these indicators fully reflected the low-phosphorus tolerance of sweetpotato varieties. The comprehensive low-phosphorus tolerance evaluation value (D) was calculated via the membership function method, with D values ranging from 0.30 to 0.79. The varieties were classified into four grades, high tolerance, medium tolerance, low tolerance, and non-tolerance. Through systematic cluster analysis, Qiongsu4 was identified as a high-tolerance variety, Silky, Fushu8, and Shanchuanzi were classified as medium-tolerance varieties, Yanshu25, Taishu14, and Xuzishu8 were low-tolerance varieties, and Annayu, Jinshu17, and Xinxiang were low phosphorus-sensitive varieties. The key evaluation indicators for low-phosphorus tolerance in sweet potato at harvest stage were determined to be the yield per plant (storage root fresh weight per plant), fibrous root fresh weight, lateral root of storage root fresh weight, fibrous root dry weight, leaf fresh weight, stem fresh weight, leaf dry weight, and stem dry weight. This study would provide a theoretical basis for breeding and utilizing new low-phosphorus-tolerant sweetpotato varieties.

Keywords: sweet potato; low-phosphorus tolerance; screening and identification; comprehensive evaluation; membership function method

DOI: 10.3969/j.issn.1000-2561.2026.01.021

磷(P)是植物生长发育所需的大量营养元素之一^[1-2]。作为核酸、磷脂和蛋白质等物质的重要组成部分,磷对作物生长发育、抗逆性、产量和品质形成具有重要的调控作用^[3-5]。植物主要通过根系从土壤中吸收无机态磷酸盐(Pi)来获取磷元素,但磷在土壤中扩散系数小,施入土壤的磷肥大部分会被土壤吸附固定或沉淀转化为难溶性磷酸盐,难以被植物吸收利用^[6],从而限制了植物的生长发育^[7]。据统计,1961—2019年,全球磷肥(P₂O₅)施用量增加了3450万t,但同期作物磷利用效率(PUE)却由62.00%~60.00%降至20.00%~18.00%^[8-9]。在我国,约60%的耕地土壤存在有效磷不足问题,严重制约了农作物产量提升和品质改良^[10]。值得注意的是,磷作为一种不可再生战略资源,按当前消耗速率预计将在50~200年内面临枯竭危机^[11]。因此,研究低磷胁迫下作物的适应机制,筛选并鉴定优良的耐低磷种质资源是应对土壤磷素缺乏威胁的重要途径。

在植物耐低磷研究中,不同种类和基因型的植物对低磷胁迫的反应存在较大差异^[12-15]。目前,针对低磷耐受性品种的评价标准和方法并不统一,但采用多指标综合评价法能更全面地反映低磷胁迫对作物品种的影响及其耐低磷能力^[16-17]。近年来,结合多元分析的综合评价体系,如耐低磷胁迫指数、主成分分析、隶属函数法和逐步回归分析等,已被广泛应用于作物磷效率的评估^[18-19]。

例如,韩佳祺等^[20]测定了20份马铃薯品种(系)成株期15个指标,通过主成分分析、隶属函数法和聚类分析法筛选出6个耐低磷品种,并确定单株产量、植株总干质量、地下部干质量、最大荧光强度、最大光合效率5个指标,用于马铃薯成株期耐低磷种质的筛选;武海燕等^[21]对各指标的耐低磷系数进行多元分析,筛选出4个耐低磷型和8个低磷敏感型的玉米品种,并明确株高、地上鲜质量、地上干质量、根系鲜质量、根系干质量、SPAD、叶长和叶宽8个指标可用于玉米苗期耐低磷能力的评估;李敏等^[22]通过主成分分析,将8个指标降维至3个综合指标,对37份玉米种质资源进行耐低磷筛选。综上所述,多指标综合评价法和多元分析方法在植物耐低磷性研究具有重要意义。

甘薯(*Ipomoea batatas* L.)因具有高产、稳产、适应性强和营养丰富等特点,成为世界上主要的粮食作物之一,在粮食安全上扮演着重要角色。然而,土壤缺磷已成为限制甘薯生长发育和产量提高的重要因素^[23-24]。梁清干等^[25]研究发现,缺磷处理显著降低了甘薯根系的总根条数、根尖数、总根长和根系表面积;SI等^[26]通过田间试验表明,缺磷降低了单株贮藏根的平均数量,从而降低了产量;李春华等^[27]研究表明,不同基因型甘薯在应对低磷胁迫时表现各异,在低磷环境下苏薯11的根系和地上部生物量显著低于苏薯17。目前,虽有关于甘薯耐低磷基因型筛选的

研究报道^[28-29]，但针对甘薯种质资源的系统性耐低磷评价研究仍较为缺乏，难以全面反映我国甘薯资源的耐低磷潜力。因此，本研究以 30 份甘薯种质资源为试验材料，在低磷胁迫下筛选生长势和表型特征较好的种质，同时以叶鲜质量、叶干质量、茎鲜质量、茎干质量、单株块根数、单个块根鲜质量和单株块根鲜质量等为评价指标，利用主成分分析、相关性分析、隶属函数法和聚类

分析对不同基因型甘薯的耐低磷能力进行鉴定与评价，旨在筛选具有耐低磷特性的优异种质，为耐低磷甘薯新品种的培育提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 材料

本研究所用 30 份甘薯种质材料由海南省农业科学院粮食作物研究所提供（表 1）。

表 1 30 份甘薯种质编号及名称
Tab. 1 Germplasm numbers and names of 30 sweetpotato germplasms

编号 No.	种质资源 Germplasm name	来源 Source	编号 No.	种质资源 Germplasm name	来源 Source
1	琼紫薯 1 号 Qiongzhishu1	中国海南	16	苏薯 16 Sushu16	中国江苏
2	琼薯 1 号 Qiongshu1	中国海南	17	普薯 32 Pushu32	中国广东
3	琼薯 4 号 Qiongshu4	中国海南	18	五里香 Wulixiang	中国广东
4	琼薯 712 Qiongshu712	中国海南	19	广薯 87 Guangshu87	中国广东
5	三角宁 Sanjiaoning	中国海南	20	哈密 Hami	中国河北
6	白肚面 Baidumian	中国海南	21	心香 Xinxiang	中国浙江
7	一点红 Yidianhong	中国海南	22	商薯 19 Shangshu19	中国河南
8	济薯 25 Jishu25	中国山东	23	安娜芋 Annayu	日本
9	泰薯 14 Taishu14	中国山东	24	高系 14 Gaoxi14	日本
10	烟薯 25 Yanshu25	中国山东	25	日本红东 Ribenhongdong	日本
11	金薯 17 Jinshu17	中国福建	26	山川紫 Shanchuanzi	日本
12	福薯 604 Fushu604	中国福建	27	玛莎莉 Mashali	日本
13	福薯 8 号 Fushu8	中国福建	28	鸣门金时 Mingmenjinshi	日本
14	岩粉 1 号 Yanfen1	中国福建	29	丝滑 Sihua	日本
15	徐紫薯 8 Xuzishu8	中国江苏	30	越南紫薯 Yuenanzishu	越南

1.2 方法

1.2.1 试验设计 试验于 2024 年 11 月至 2025 年 4 月在海南省三亚市崖州区海南大学坝头基地（18°22′44.166″N，109°08′45.377″E）进行。试验地月平均温度为 22.2 ℃，月平均降雨量为 2 mm，试验区月平均温度和月总降雨量变化如图 1。田间土壤为沙壤土，土壤基本理化性质如下：pH 5.36、有机质含量为 0.89%、碱解氮含量为 66.44 mg/kg、速效磷含量为 8.65 mg/kg、速效钾含量为 223.34 mg/kg。采用两因素裂区设计，主区为磷肥施用量处理，设置无磷处理 P₀（0 kg/hm²）和正

常磷处理 P₁₁₀（110 kg/hm²）2 个水平。其中，将 P₁₁₀ 设定为正常磷处理，是基于本团队前期针对海南三亚地区沙壤土甘薯磷素需求的研究，该施磷量可使甘薯产量和外观品质达到最优水平^[22]。副区为品种因子，共 30 个甘薯品种。采用随机区组排列，3 次重复。氮肥（N）和钾肥（K₂O）作为基肥一次性施入，用量分别为 120 kg/hm² 和 240 kg/hm²。供试肥料：磷肥为过磷酸钙（P₂O₅ 16%，广东湛化集团有限公司），氮肥为尿素（N 46.00%，中石油化学股份有限公司），钾肥为氯化钾（K₂O 52%，国投新疆罗布泊钾盐有限公司）。

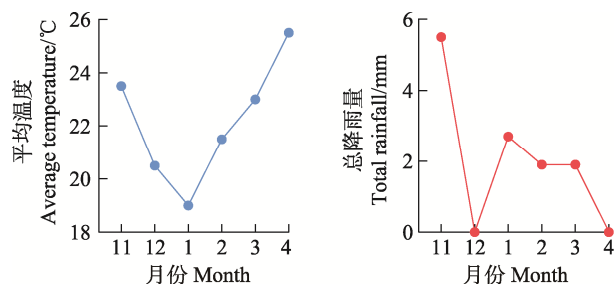


图 1 三亚崖州区月平均温度和月总降雨量变化

Fig. 1 Changes in monthly mean temperature and total monthly rainfall in Yazhou, Sanya

株距为 25 cm, 垄距为 80 cm, 小区面积为 20 m²。在试验田四周种植保护行, 田间管理同一般高产大田。

1.2.2 指标测定 在甘薯收获期, 从每个小区挑选 7 株生长状况良好且具有代表性的植株, 测量每株植株纤维根鲜质量 (fibrous root fresh weight, FRFW)、块根侧根鲜质量 (lateral root of storage root fresh weight, LSRFW)、单个块根鲜质量 (single storage root fresh weight, SRFW)、单株块根鲜质量 (storage root fresh weight per plant, SRFWPP)、单株块根数 (storage root number per plant, SRNPP)、纤维根干质量 (fibrous root dry weight, FRDW)、块根侧根干质量 (lateral root of storage root dry weight, LSRDW)、块根干质量 (storage root dry weight, SRDW)、叶鲜质量 (leaf fresh weight, LFW)、茎鲜质量 (stem fresh weight, SFW)、叶干质量 (leaf dry weight, LDW)、茎干质量 (stem dry weight, SDW)。计算根冠比 (root-shoot ratio, RTSR), 根冠比=地下部干质量/地上部干质量。叶绿素相对含量 (relative chlorophyll content, CC) 的测定使用便携式叶绿素仪 (SPAD-502, Minolta 公司, 日本), 在每个小区内测量 7 株, 以甘薯茎蔓顶端第 3 片完全展开叶为测试材料, 测量时避开叶片主叶脉 (图 2)。

1.3 数据处理

利用 Excel 2021 软件进行数据整理, 通过 IBM SPSS Statistics 26.0 软件进行正态性检验、单因素方差分析、主成分分析和聚类分析, 使用 Origin 2024 软件对数据进行相关性分析并绘图。采用隶属函数法对甘薯收获期进行耐低磷综合评价, 计算公式如 (1)~(4)。

$$LPTC = L_{pi} / N_{pi} \times 100\% \quad (1)$$

式中, LPTC 为耐低磷系数 (Low phosphorus

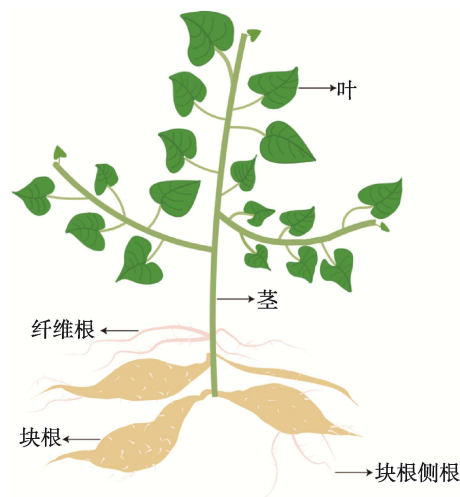


图 2 甘薯不同取样部位示意图

Fig. 2 Schematic diagram of different sampling parts of sweet potato

tolerance coefficient, LPTC, %), L_{pi} 和 N_{pi} 分别为第 i 个指标在低磷和正常磷处理下的测定值。

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

式中, $\mu(X_j)$ 为某个品种 j 指标的隶属函数值, X_j 为该品种 j 指标的测定值, $X_{\min}$ 、 $X_{\max}$ 分别为 j 指标在 30 个品种中的最小值和最大值。

$$W_j = P_j / \sum_{j=1}^m P_j \quad (3)$$

式中, W 为权重, 即 j 指标在所有指标中的重要性; P_j 为经主成分分析所得各品种 j 综合指标的方差贡献率。 M 的取值范围为 1~14 之间的整数 (下同)。

$$D = \sum_{j=1}^m [\mu(X_j) \times W_j] \quad (4)$$

式中, D 为某甘薯品种耐低磷能力的综合评价值。

2 结果与分析

2.1 不同磷处理的甘薯相关性状差异分析

由表 2 可知, 不同甘薯品种的各性状对 2 种磷水平的响应存在差异。在低磷处理下, 各项性状值相较于正常磷处理均有不同程度下降, 其中降幅最大的是单株块根鲜质量 (41.72%), 其次是块根干质量 (41.58%)、纤维根干质量 (34.83%)、茎鲜质量 (30.20%)、叶鲜质量 (28.57%)、叶干质量 (28.29%) 和单株块根数 (27.69%), 这表明低磷胁迫对影响甘薯的生长和产量形成的相关性状有显著的抑制作用。

不同磷处理下，各性状在品种间的变异系数（CV）均普遍较高，表明不同甘薯品种对低磷的响应存在较大遗传差异，适合耐低磷甘薯基因型的筛选。正常磷处理组的变异系数为 10.40%~68.66%，由高到低依次为纤维根干质量、块根侧根干质量、块根侧根鲜质量、纤维根鲜质量、根冠比、茎干质量、茎鲜质量、叶鲜质量、叶干质量、单株块根鲜质量、块根干质量、单个块根鲜质量、单株块根数和叶绿素相对含量。其中，纤维根干质量、块根侧根干质量、块根侧根鲜质量和纤维根鲜质量变异程度较高；低磷处理组的变异系数为 10.86%~64.76%，由高到低依次为纤维

根干质量、根冠比、纤维根鲜质量、块根侧根干质量、块根侧根鲜质量、单株块根鲜质量、茎干质量、茎鲜质量、块根干质量、叶鲜质量、叶干质量、单个块根鲜质量、单株块根数和叶绿素相对含量。其中，纤维根干质量、根冠比、纤维根鲜质量和块根侧根干质量变异程度较高。纤维根鲜质量、根冠比、单株块根鲜质量和块根干质量等变异系数较正常磷处理组均提高；同时，根冠比、纤维根干质量、块根干质量和块根侧根鲜质量在耐低磷系数上表现出较大离散程度，说明这些性状在品种间对低磷胁迫的响应差异明显，对磷素供应较为敏感。

表 2 2 种磷处理下甘薯性状值及耐低磷系数在品种间的平均值、标准差和变异系数
Tab. 2 Mean, standard deviation and coefficient of variation of traits values and low phosphorus tolerance coefficient among sweet potato varieties under different phosphorus treatments

性状 Trait	低磷处理 Low phosphorus			正常磷处理 Normal phosphorus			LPTC/%		
	平均值 Mean	标准差 SD	CV/%	平均值 Mean	标准差 SD	CV/%	平均值 Mean	标准差 SD	CV/%
纤维根鲜质量/g	1.18 ^b	0.73	62.24	1.53 ^a	0.83	54.02	77.56	13.72	17.69
块根侧根鲜质量/g	0.89 ^b	0.52	58.29	1.18 ^a	0.75	63.18	78.72	22.33	28.37
单个块根鲜质量/g	132.81 ^b	44.22	33.30	173.45 ^a	49.09	28.30	76.66	15.50	20.22
单株块根鲜质量/g	474.89 ^b	207.22	43.64	814.91 ^a	248.08	30.44	57.12	14.73	25.79
单株块根数	3.50 ^b	1.04	29.74	4.84 ^a	1.23	25.44	72.94	15.61	21.40
纤维根干质量/g	0.22 ^b	0.14	64.76	0.33 ^a	0.23	68.66	70.86	22.42	31.63
块根侧根干质量/g	0.18 ^b	0.11	58.57	0.22 ^a	0.14	63.41	84.83	22.02	25.96
块根干质量/g	141.05 ^b	60.17	42.66	241.43 ^a	73.43	30.41	58.09	18.22	31.37
叶鲜质量/g	160.76 ^b	62.34	38.78	225.04 ^a	81.58	36.25	71.88	17.68	24.60
茎鲜质量/g	140.69 ^b	60.06	42.69	201.55 ^a	78.45	38.93	72.72	17.66	24.28
叶干质量/g	25.68 ^b	9.66	37.60	35.81 ^a	12.90	36.03	72.34	15.79	21.83
茎干质量/g	24.22 ^b	10.55	43.56	33.14 ^a	13.85	41.79	75.61	20.27	26.81
叶绿素相对含量	36.49 ^b	3.96	10.86	39.15 ^a	4.07	10.40	93.23	4.41	4.73
根冠比	3.34 ^b	2.15	64.54	3.96 ^a	1.87	47.31	82.77	29.23	35.31

注：不同小写字母表示处理间差异显著（ $P<0.05$ ）。
Note: Different lowercase letters indicated significant difference between treatments ($P<0.05$).

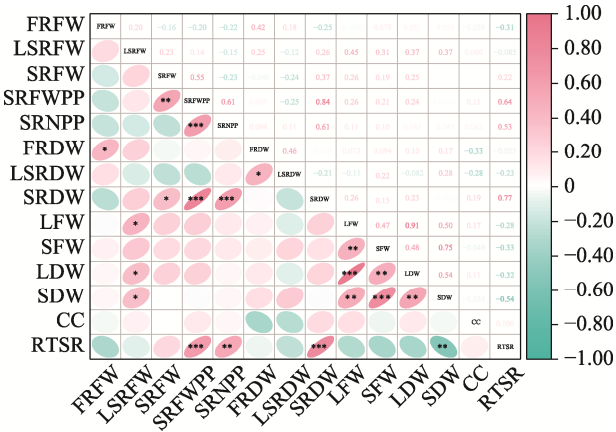
2.2 各性状耐低磷系数间的相关性分析

通过测定收获期甘薯不同磷素处理下的各个性状指标，计算出相应指标的 LPTC，并对这些 LPTC 进行相关性分析，结果显示多数 LPTC 间的相关性达到显著或极显著水平（图 3）。如单株块根鲜质量与单株块根数、块根干质量和根冠比呈极显著正相关，与单个块根鲜质量呈显著正相关。纤维根鲜质量与纤维根干质量呈显著正相关。块根侧根鲜质量与叶鲜质量、叶干质量和茎干质量呈显著正相关。纤维根干质量与块根侧根干质量呈显著正相关。叶鲜质量与叶干质量呈极显著正相关，与茎鲜质量和茎干质量呈显著正相关。茎

鲜质量与茎干质量呈极显著正相关，与叶干质量呈显著正相关。叶干质量与茎干质量呈显著正相关。茎干质量与根冠比呈显著负相关。这表明各性状的 LPTC 间可能存在信息重叠，通过单一指标进行甘薯耐低磷种质评价存在局限性。因此，为消除误差需要采用主成分分析法对各品种甘薯的耐低磷性进行综合评价。

2.3 各性状耐低磷系数的主成分分析

对甘薯 14 个性状的 LPTC 进行主成分分析，共提取到 5 个主成分（表 3），贡献率分别为 25.71%、23.94%、13.32%、9.65%和 7.74%，累计贡献率为 80.36%，能代表原始数据的大部分信



*表示差异显著 ($P<0.05$), **, ***表示差异极显著 ($P<0.01$, $P<0.001$)。
* indicates significant difference ($P<0.05$), **, *** indicates extremely significant difference ($P<0.01$, $P<0.001$).

图 3 甘薯种质各性状耐低磷系数间的相关性分析
Fig. 3 Correlation analysis on low phosphorus tolerance coefficient of various traits of sweet potato germplasm

表 3 30 份甘薯各性状耐低磷系数载荷矩阵、指标特征值及贡献率
Tab. 3 Loading matrix, eigenvalues, and contribution rates of low phosphorus tolerance coefficients for various traits in 30 sweetpotato varieties

LPTC/%	主成分 Principle component				
	1	2	3	4	5
纤维根鲜质量	-0.03	0.13	0.13	0.36	0.44
块根侧根鲜质量	0.15	0.09	-0.05	0.34	0.19
单个块根鲜质量	0.14	-0.06	-0.16	0.35	-0.48
单株块根鲜质量	0.20	-0.17	0.09	0.07	-0.08
单株块根数	0.11	-0.14	0.29	-0.34	0.21
纤维根干质量	0.03	0.09	0.38	0.34	0.11
块根侧根干质量	-0.04	0.12	0.37	-0.12	-0.12
块根干质量	0.20	-0.18	0.10	0.04	0.07
叶鲜质量	0.22	0.11	-0.12	-0.06	0.12
茎鲜质量	0.17	0.14	0.07	-0.17	-0.20
叶干质量	0.21	0.12	-0.10	-0.06	0.08
茎干质量	0.14	0.20	0.06	-0.23	-0.10
叶绿素相对含量	0.05	-0.06	-0.25	-0.14	0.56
根冠比	0.04	-0.28	0.12	0.10	0.04
特征值	3.60	3.35	1.87	1.35	1.08
方差贡献率	25.71	23.94	13.32	9.65	7.74
累计贡献率	25.71	49.65	62.97	72.62	80.36

息, 后续将利用这 5 个指标对供试材料耐低磷能力进行综合分析。其中, 第 1 主成分特征值为 3.60, 其对应 3 个较大的荷载量为叶鲜质量 (0.22)、叶干质量 (0.21) 和单株块根鲜质量 (0.20), 上述性状的 LPTC 平均值分别为

71.88%、72.34%和 57.12%; 第 2 主成分特征值为 3.35, 其对应 3 个较大的荷载量为茎干质量 (0.20)、茎鲜质量(0.14)和纤维根鲜质量(0.13), 上述性状的 LPTC 平均值分别为 75.61%、72.72%和 77.56%; 第 3 主成分特征值为 1.87, 其对应 3 个较大的荷载量为纤维根干质量 (0.38)、块根侧根干质量 (0.37) 和单株块根数 (0.29), 上述性状的 LPTC 平均值分别为 70.86%、84.83%和 72.84%; 第 4 主成分特征值为 1.35, 其对应 3 个较大的荷载量为纤维根鲜质量 (0.36)、单个块根鲜质量 (0.35) 和块根侧根鲜质量 (0.34), 上述性状的 LPTC 平均值分别为 77.56%、76.66%和 78.72%; 第 5 主成分特征值为 1.08, 其对应 3 个较大的荷载量为叶绿素相对含量 (0.56)、纤维根鲜质量 (0.44) 和单株块根数 (0.21), 上述性状的 LPTC 平均值分别为 93.23%、77.56%和 72.94%。根据各主成分的贡献率情况, 说明甘薯耐低磷性与生物量、干物质积累量、产量等指标密切相关。

2.4 甘薯收获期耐低磷性的综合评价

通过主成分分析将 14 个单项指标重构为 5 个独立的综合指标 $F_1\sim F_5$, 之后根据 5 个综合指标 F 值, 利用公式 (2), 计算对应隶属函数值 $\mu(x)$ 。权重 W_j 由公式 (3) 计算, 5 个独立的综合指标权重分别为 0.32、0.30、0.17、0.12 和 0.10。从表 4 可知, D 值越大表明甘薯品种耐低磷性越强, 30 份甘薯品种的耐低磷性综合评价值为 (0.30~0.79), 差异较大 ($CV=20.47\%>10.00\%$)。

因此, 以 D 值为评价指标, 采用最短平方欧氏距离系统聚类法, 对甘薯耐低磷性进一步分类 (图 4)。结果表明, 供试甘薯可被分为 4 个类群, 第 I 类共 1 个甘薯品种, 占 3.00%, 为高耐低磷品种, 是琼薯 4 号; 第 II 类共 16 个甘薯品种, 占 53.00%, 为中耐低磷品种, 分别是日本红东、越南紫薯、山川紫、玛莎莉、鸣门金时、哈密、福薯 604、福薯 8 号、岩粉 1 号、济薯 25、丝滑、白肚面、五里香、琼紫薯 1 号、琼薯 1 号和琼薯 712; 第 III 类共 10 个甘薯品种, 占 33.00%, 为低耐低磷品种, 分别是高系 14、普薯 32、烟薯 25、商薯 19、徐紫薯 8、广薯 87、苏薯 16、泰薯 14、一点红和三角宁; 第 IV 类共 3 个甘薯品种, 占 10.00%, 为不耐低磷品种, 分别是安娜芋、金薯 17 和心香。

表 4 30 份甘薯的综合指标值 (F)、权重、隶属函数值[$\mu(x)$]及综合评价值(D)

Tab. 4 Values of F -index, weight, $\mu(x)$, and comprehensive evaluation value (D) for comprehensive traits of 30 sweetpotato varieties

种质资源 Germplasm name	综合指标值 Comprehensive indicator value					隶属函数值 Membership function value					D 值 D -value	排序 Order
	F_1	F_2	F_3	F_4	F_5	$\mu(x_1)$	$\mu(x_2)$	$\mu(x_3)$	$\mu(x_4)$	$\mu(x_5)$		
琼紫薯 1 号	0.15	1.49	0.20	-1.40	0.19	0.57	0.86	0.65	0.09	0.54	0.61	11
琼薯 1 号	1.03	-0.21	0.10	0.52	-0.51	0.77	0.51	0.62	0.56	0.40	0.61	9
琼薯 4 号	1.98	0.66	-0.32	2.35	0.41	1.00	0.68	0.54	1.00	0.58	0.79	1
琼薯 712	0.14	0.83	-0.32	1.22	-0.26	0.56	0.72	0.54	0.73	0.45	0.61	8
三角宁	-0.15	-1.42	-0.33	0.64	-0.25	0.50	0.26	0.53	0.59	0.45	0.44	25
白肚面	-0.46	2.20	0.32	-0.81	-0.02	0.42	1.00	0.67	0.24	0.50	0.62	6
一点红	-2.22	0.54	-0.06	0.07	1.45	0.00	0.66	0.59	0.45	0.78	0.42	27
济薯 25	1.53	-0.45	-2.84	-1.11	2.59	0.89	0.46	0.00	0.16	1.00	0.54	17
泰薯 14	0.18	0.52	-1.28	0.45	-2.59	0.57	0.65	0.33	0.54	0.00	0.50	19
烟薯 25	0.11	-0.90	0.50	-0.67	1.43	0.56	0.36	0.71	0.27	0.78	0.51	18
金薯 17	-1.81	0.06	-1.34	0.19	-0.53	0.10	0.56	0.32	0.48	0.40	0.35	28
福薯 604	0.49	-0.01	1.01	0.44	0.25	0.65	0.55	0.82	0.54	0.55	0.62	5
福薯 8 号	1.17	0.44	-0.32	0.14	-0.59	0.81	0.64	0.53	0.46	0.38	0.63	3
岩粉 1 号	0.44	0.12	0.36	0.67	0.02	0.63	0.57	0.68	0.59	0.50	0.61	10
徐紫薯 8	-0.54	-0.01	-1.28	1.57	-0.13	0.40	0.55	0.33	0.81	0.48	0.49	20
苏薯 16	-1.04	-1.02	0.68	1.43	0.02	0.28	0.34	0.75	0.78	0.50	0.46	23
普薯 32	0.22	-0.56	-0.79	-0.21	-0.57	0.58	0.43	0.43	0.38	0.39	0.47	22
五里香	0.47	-0.30	1.27	0.63	0.18	0.64	0.49	0.87	0.58	0.53	0.62	7
广薯 87	0.30	-0.65	-1.54	-0.86	-0.16	0.60	0.42	0.27	0.22	0.47	0.43	26
哈密	-0.21	-0.71	1.87	-0.13	0.23	0.48	0.40	1.00	0.40	0.54	0.54	16
心香	-2.24	-0.35	-0.62	-0.24	-0.80	0.00	0.48	0.47	0.37	0.34	0.30	30
商薯 19	0.19	-0.42	0.28	-1.34	-0.43	0.57	0.46	0.66	0.11	0.42	0.48	21
安娜芋	0.15	-2.68	0.07	-1.78	-0.64	0.57	0.00	0.62	0.00	0.38	0.32	29
高系 14	-0.83	-1.39	0.75	1.02	0.04	0.33	0.26	0.76	0.68	0.51	0.44	24
日本红东	-0.44	1.08	0.59	-1.24	0.80	0.43	0.77	0.73	0.13	0.65	0.57	14
山川紫	0.93	0.19	0.13	0.18	0.27	0.75	0.59	0.63	0.47	0.55	0.63	4
玛莎莉	-0.77	1.84	-0.21	0.05	0.11	0.35	0.93	0.56	0.44	0.52	0.58	12
鸣门金时	-0.63	0.41	0.68	-0.04	1.44	0.38	0.63	0.75	0.42	0.78	0.56	15
丝滑	1.03	0.06	1.69	-0.10	0.41	0.78	0.56	0.96	0.41	0.58	0.68	2
越南紫薯	0.83	0.64	0.77	-1.65	-2.35	0.73	0.68	0.77	0.03	0.05	0.57	13
权重						0.32	0.30	0.17	0.12	0.10		

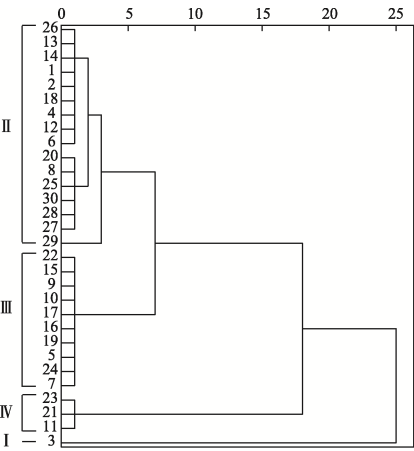


图 4 不同甘薯品种耐低磷能力系统聚类

Fig. 4 Systematic clustering of low phosphorus tolerance of different sweet potato varieties

2.5 不同类群甘薯品种性状评价

对不同类群甘薯品种性状指标的 LPTC 进行统计。高耐低磷型 (I) 甘薯品种的纤维根鲜质量、块根侧根鲜质量、单个块根鲜质量、单株块根鲜质量、纤维根干质量、块根干质量、叶鲜质量、茎质量、叶干质量和茎干质量高于其他 3 种类型 (II 、 III 、 IV)；而单株块根数、块根侧根干质量和叶绿素相对含量低于其他 3 种类型 (II 、 III 、 IV)；根冠比高于中耐低磷型 (II)，但是低于低耐低磷型 (III) 和低磷敏感型 (IV) (图 5)。结果验证了聚类结果的正确性。

2.6 14 个性状指标、综合评价值的多元回归分析

为了探究 D 值与性状指标间的关系，使用 30

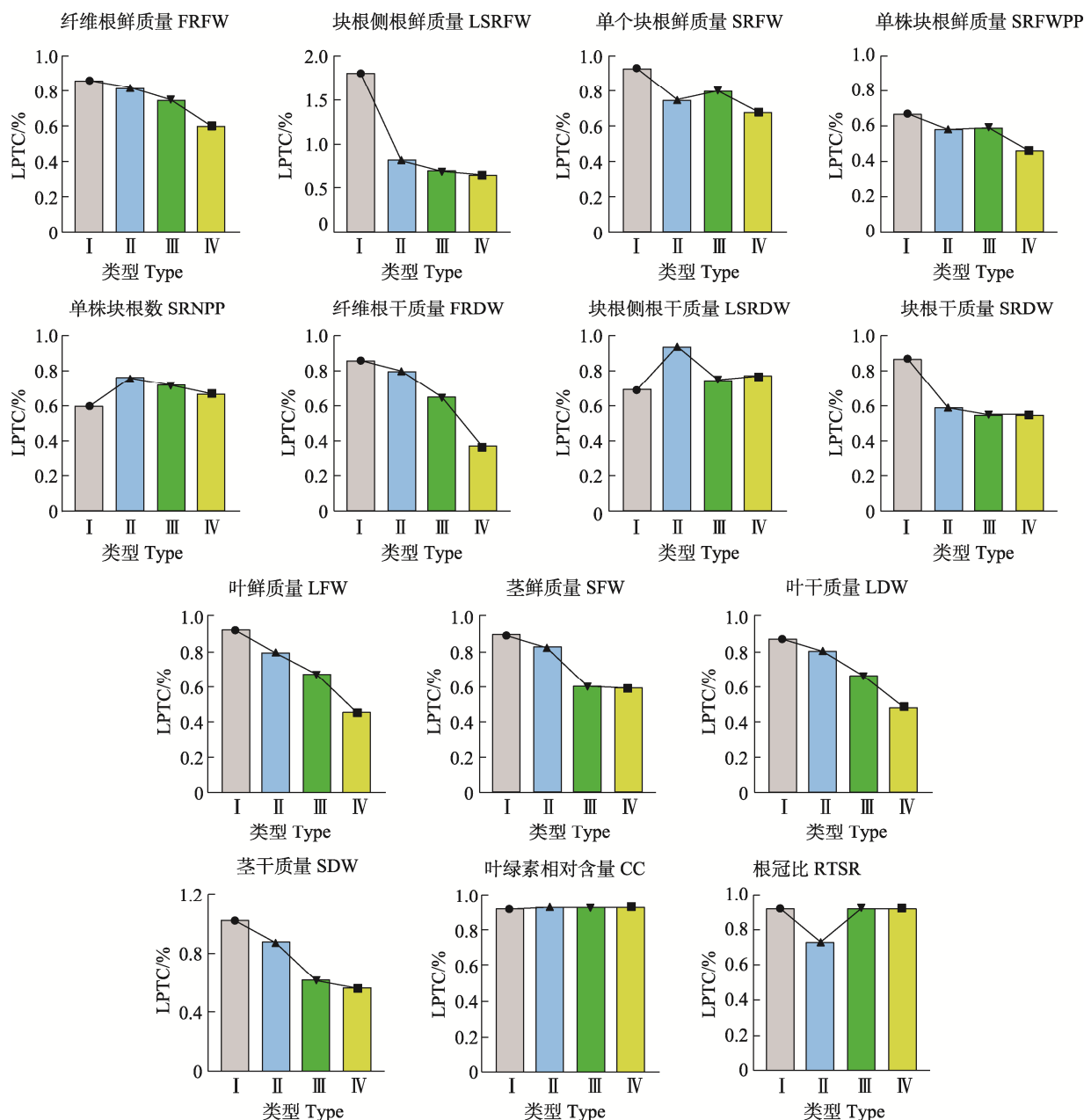


图 5 不同类群甘薯品种性状的平均值

Fig. 5 Average values of traits in different groups of sweet potato varieties

份甘薯的 14 个性状指标分别与 D 值进行了拟合回归分析 (图 6)。结果显示 14 个性状指标与 D 值间的决定系数具有明显差异, 决定系数最高的为叶干质量 ($R^2=0.448\ 86$), 最低的为叶绿素相对含量 ($R^2=-0.029\ 25$)。拟合结果显示, 单株块根鲜质量、纤维根鲜质量、块根侧根鲜质量、纤维根干质量、叶鲜质量、茎鲜质量、叶干质量和茎干质量共 8 个性状指标与 D 值间均为正相关关系, 且 $P<0.05$, 可以作为甘薯收获期耐低磷性的鉴定指标。其中, 单株块根鲜质量是收获期直接反映甘薯经济产量的核心指标, 能够直观体现

低磷胁迫下收获期的产量形成能力。此外, 这些指标均直接反映生物量积累, 表明在低磷胁迫下, 维持相对较高的根系和地上部生长能力, 是甘薯耐低磷的关键表型特征, 这很可能与其在低磷环境下仍能有效捕获和利用有限磷素资源的能力密切相关。

3 讨论

我国土壤缺磷形势严峻, 约 2/3 的耕地存在磷素匮乏问题, 直接导致作物生长受阻和产量显著下降, 成为农业可持续发展的核心制约因素^[30]。

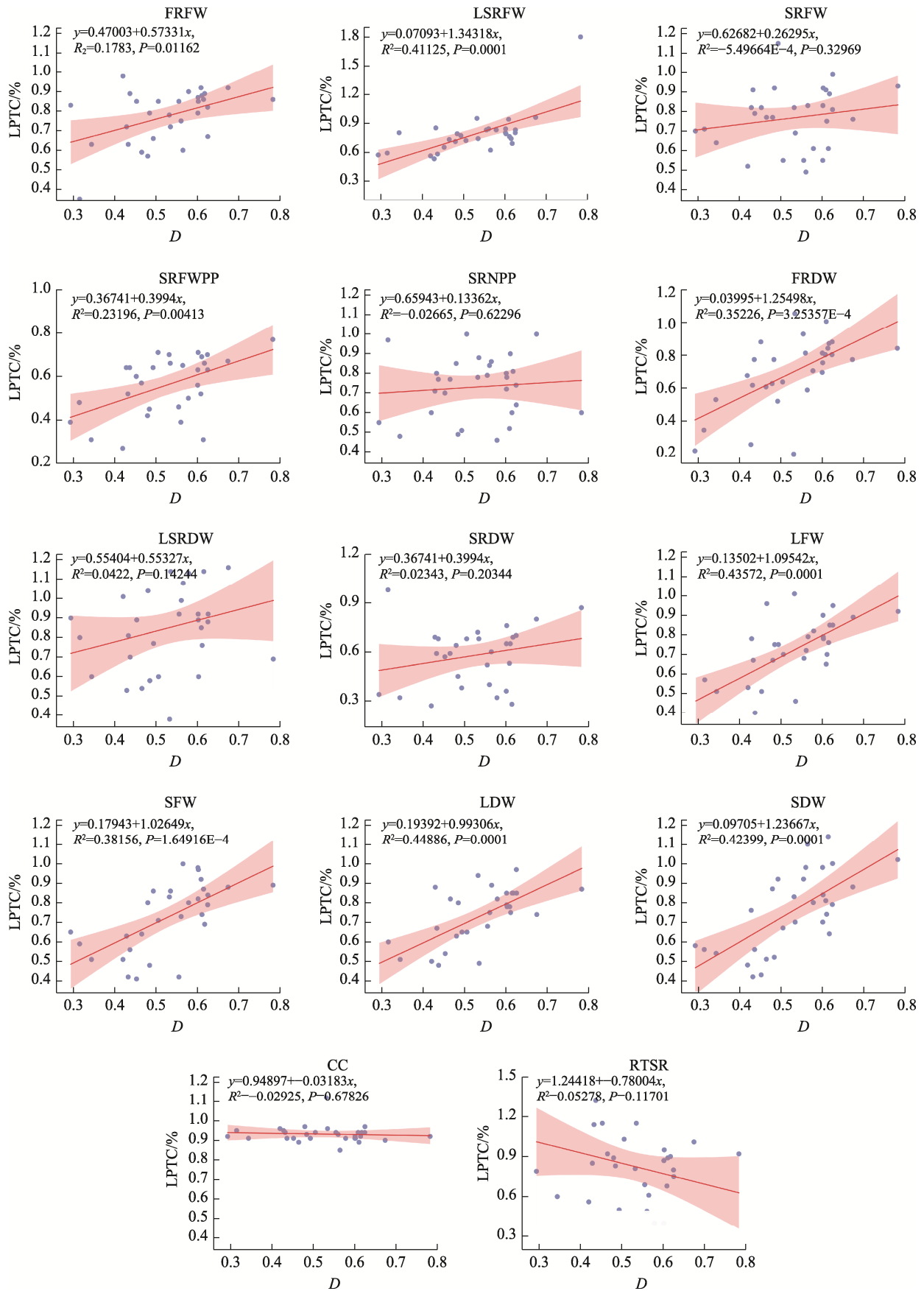


图 6 14 个性状指标与 D 值间拟合回归分析

Fig. 6 Fitting regression analysis between 14 trait indexes and D values

海南岛地处中国南部,以酸性至强酸性土壤为主,土壤中的铁氧化物和铝氧化物会与磷酸根离子结合,形成难溶性的磷酸铁、磷酸铝沉淀,导致土壤有效磷含量降低,进一步加剧了当地农业生产压力,土壤磷素匮乏问题亟待解决^[31]。磷是植物生长发育的关键营养元素之一,在能量代谢、糖代谢和光合作用等过程中起重要作用,其缺乏会显著抑制植物的生长与产量^[2-5]。分析不同基因型甘薯的耐低磷性状变化并筛选出耐低磷甘薯种质,可为选育耐低磷、磷高效的甘薯品种提供理论基础和实践参考。目前关于耐低磷品种筛选方法的选择,在不同的作物中常采用水培试验^[32]、沙培试验^[33]和田间试验^[34],或者两两结合的方法筛选耐低磷种质资源^[35]。前人采用水培试验,筛选出徐薯 34、红优、坦桑尼亚和苏薯 8 号 4 个耐低磷甘薯基因型,以及龙岗、桂经薯 8 号、广薯 72 和商薯 19 等 11 份不耐低磷甘薯基因型^[28]。本研究针对海南地区的生态条件开展试验,以 30 份甘薯品种为材料,于收获期对其进行耐低磷种质资源的系统鉴定与筛选,明确甘薯耐低磷的评价指标体系,为当地甘薯耐低磷育种与栽培提供参考。

3.1 低磷对甘薯的影响

有研究表明,同一作物对低磷胁迫的响应存在显著品种间差异^[36]。李敏等^[22]的研究结果表明,玉米幼苗在低磷胁迫下株高、SPAD 值、叶长和叶宽等指标上升,但地上部鲜质量、干质量及根系干质量呈下降趋势;韩佳祺等^[20]研究表明,马铃薯的植株形态、产量及生物量指标在低磷处理下显著降低;武海燕等^[21]的研究结果表明,大豆低磷处理组株高、地上部生物量及根系磷含量低于适磷组,而根长、根鲜(干)质量、根冠比及根系磷利用率则高于适磷组;低磷处理下棉花的地上部干质量、总干物质质量和总磷含量等 10 项指标均下降^[37]。前人研究结果表明,低磷胁迫下甘薯的地上部干质量、总干物质增加量、蔓长、根冠比及磷素相关指标均显著低于正常磷处理^[28]。本研究结果表明,在低磷处理下,甘薯的各项性状指标值相较于正常磷处理均有不同程度的下降,其中单株块根鲜质量的降幅最大,达 41.72%,这可能与甘薯对土壤磷素供应水平要求相对较高有关,在低磷胁迫下缺乏足够的生态适应性,难以维持正常的生长发育,最终导致性状指标全面下降。

3.2 甘薯耐低磷型分类与综合评价

不同品种间性状的变异系数,能直观反映品种对低磷胁迫的响应差异^[18]。米热扎提江·喀由木等^[37]研究结果表明,棉花低磷处理组的比根尖密度、根尖数、比根长等指标的变异系数显著高于正常磷处理组。本研究通过变异分析表明,除块根侧根鲜质量、纤维根干质量和块根侧根干质量外,单个块根鲜质量、单株块根鲜质量、块根干质量和根冠比等 11 个指标变异系数均高于正常磷处理。由此可见,低磷处理时甘薯单项指标低磷系数离散度较大,在耐低磷品种的筛选上存在一定差异,可作为筛选指标,进行耐低磷甘薯品种的筛选,这与前人在甘薯耐低磷种质资源筛选中的研究结果一致^[28]。大量研究表明,植物耐低磷鉴定指标尚未统一,仅凭单一指标难以全面精准地鉴定植物的耐低磷特性,需通过多个指标综合分析才能得到相对可靠的结论^[12, 16-17]。主成分分析法可以通过正交变换将原始变量转换成彼此无关的主成分,在减少变量个数的同时保留关键信息,从而提高模型的计算效率和准确性^[38]。因此,本研究采用主成分分析法,将甘薯收获期 14 个指标分别转化为 5 个新的相互独立的综合指标,其贡献率分别为 25.71%、23.94%、13.32%、9.65%和 7.74%,累计贡献率达 80.36%,可覆盖原始数据的大部分信息。为进一步评价 30 份甘薯品种的耐低磷能力,本研究利用隶属函数法和聚类分析法对供试品种进行分类,明确了各个品种的耐低磷特性。隶属函数法可将定性指标定量化,将多个指标综合成单一隶属函数值,实现对不同种质材料的综合评价,从而更客观地筛选出优良种质^[39-41];聚类分析法则能依据多种性状指标将种质材料分组,提升筛选效率^[42-43]。吴敏等^[16]通过 Ward 法对耐低磷综合评价值聚类,将 28 个南酸枣家系划分为耐低磷型、中间型、低磷敏感型 3 类;高金秋等^[32]基于综合评价值,将 40 份甜菜品种划分为高耐低磷型、耐低磷型、较耐低磷型、低磷较敏感型和低磷敏感型 5 类。因此,本研究将 30 份甘薯品种的耐磷性综合评价值进行聚类分析,将其划分为高耐低磷型(琼薯 4 号)、中耐低磷型(丝滑、福薯 8 号 and 山川紫等)、低耐低磷型(烟薯 25、泰薯 14 和徐紫薯 8 等)和低磷敏感型(安娜芋、金薯 17 和心香) 4 种类型。随后,通过分析不同类群甘薯品种性状的平均值,验证了甘薯耐低磷聚类结果的准确性。

3.3 甘薯耐低磷指标的筛选

不同指标的结果只能反映适应性的一个方面, 评价和筛选作物耐低磷性尚无统一的标准。吕立军等^[44]通过逐步回归分析, 确定根干质量、根鲜质量、根冠比、叶长、地上部鲜质量和茎粗的相对值为大葱苗期耐低磷鉴定指标; 张议文等^[45]采用相关性分析和主成分分析, 将地上/根部长、地上/根部鲜(干)质量、叶面积及磷吸收效率作为甘蓝型油菜苗期鉴定指标; 本研究通过拟合回归分析, 筛选出单株块根鲜质量、纤维根鲜质量、块根侧根鲜质量、纤维根干质量、叶鲜质量、茎鲜质量、叶干质量和茎干质量作为有效的耐低磷鉴定指标, 其中单株块根鲜质量作为核心指标, 可以直观体现低磷胁迫下收获期的产量形成能力。

4 结论

低磷处理不同程度地降低了甘薯收获期的各项性状指标值, 其中单株产量即单株块根鲜质量、纤维根鲜质量、块根侧根鲜质量、纤维根干质量、叶鲜质量、茎鲜质量、叶干质量和茎干质量是评价甘薯耐低磷性的重要指标。30 份甘薯种质资源划分为 4 种类型, 高耐低磷型、中耐低磷型、低耐低磷型和低磷敏感型, 其中琼薯 4 号耐低磷性最强, 可作为甘薯耐低磷品种选育的参考资源。该研究结果对甘薯耐低磷品种筛选有重要的参考价值, 但由于试验仅在热带气候的海南地区开展, 无法体现其他地区的适应性, 具有一定的局限性。后续应选择不同气候、土壤类型的地区开展多点试验。此外, 本研究仅评价了 30 份甘薯种质, 未来可进一步扩大筛选范围, 发掘更多优异的耐低磷资源。

参考文献

- [1] ASHLEY K, CORDELL D, MAVINIC D. A brief history of phosphorus: from the philosopher's stone to nutrient recovery and reuse[J]. *Chemosphere*, 2011, 84(6): 737-746.
- [2] CORDELL D, DRANGERT J O, WHITE S. The story of phosphorus: global food security and food for thought[J]. *Global Environmental Change*, 2009, 19(2): 292-305.
- [3] LAMBERS H. Phosphorus acquisition and utilization in plants[J]. *Annual Review of Plant Biology*, 2022, 73(1): 17-42.
- [4] 刘浩, 李玉龙, 汤萌萌, 雷凯健. 拟南芥 miR156 与 miR399 在低磷胁迫中的对话机制初探[J]. *河南农业科学*, 2019, 48(7): 54-58.
- [5] LIU H, LI Y L, TANG M M, LEI K J. Initial exploration of cross talk between miR156 and miR399 of *Arabidopsis thaliana* under low phosphorus stress[J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2019, 48(7): 54-58. (in Chinese)
- [6] 王峻, 宋科, 薛永, 潘剑君. 小麦氮、磷胁迫响应基因研究进展[J]. *河南农业科学*, 2018, 47(6): 1-6.
- [7] WANG J, SONG K, XUE Y, PAN J J. Research progress on response genes of wheat to nitrogen, phosphorus stresses[J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2018, 47(6): 1-6. (in Chinese)
- [8] RODRÍGUEZ H, FRAGA R. Phosphate solubilizing bacteria and their role in plant growth promotion[J]. *Biotechnology Advances*, 1999, 17(4/5): 319-339.
- [9] BÜNEMANN E K. Assessment of gross and net mineralization rates of soil organic phosphorus: a review[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2015, 89: 82-98.
- [10] ZOU T, ZHANG X, DAVIDSON E A. Global trends of cropland phosphorus use and sustainability challenges[J]. *Nature*, 2022, 611(7934): 81-87.
- [11] YUAN Z, JIANG S, SHENG H, LIU X, HUA H, LIU X, ZHANG Y. Human perturbation of the global phosphorus cycle: changes and consequences[J]. *Environmental Science & Technology*, 2018, 52(5): 2438-2450.
- [12] 丁广大, 陈水森, 石磊, 蔡红梅, 叶祥盛. 植物耐低磷胁迫的遗传调控机理研究进展[J]. *植物营养与肥料学报*, 2013, 19(3): 733-744.
- [13] DING G D, CHEN S S, SHI L, CAI H M, YE X S. Advances in genetic regulation mechanism of plant tolerance to phosphorus deficiency[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2013, 19(3): 733-744. (in Chinese)
- [14] VANCE C P, UHDE-STONE C, ALLAN D L. Phosphorus acquisition and use: critical adaptations by plants for securing a nonrenewable resource[J]. *New Phytologist*, 2003, 157(3): 423-447.
- [15] 卫乃翠, 陶金博, 苑名杨, 张彧, 开梦想, 乔玲, 武棒棒, 郝宇琼, 郑兴卫, 王娟玲, 赵佳佳, 郑军. 山西小麦苗期耐低磷特性及遗传分析[J]. *中国农业科学*, 2024, 57(5): 831-845.
- [16] WEI N C, TAO J B, YUAN M Y, ZHANG Y, KAI M X, QIAO L, WU B B, HAO Y Q, ZHENG X W, WANG J L, ZHAO J J, ZHENG J. Seedling characterization and genetic analysis of low phosphorus tolerance in Shanxi varieties[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2024, 57(5): 831-845. (in Chinese)
- [17] 李银银, 许更文, 李俊峰, 郭佳蓉, 王志琴, 杨建昌. 水稻品种的耐低磷性及其农艺生理性状[J]. *中国水稻科学*, 2018, 32(1): 51-66.
- [18] LI Y Y, XU G W, LI J F, GUO J R, WANG Z Q, YANG J C.

- Tolerance to low phosphorus and its agronomic and physiological characteristics of rice cultivars[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2018, 32(1): 51-66. (in Chinese)
- [14] 刘灵, 廖红, 王秀荣, 严小龙. 不同根构型大豆对低磷的适应性变化及其与磷效率的关系[J]. *中国农业科学*, 2008(4): 1089-1099.
- LIU L, LIAO H, WANG X R, YAN X L. Adaptive changes of soybean genotypes with different root architectures to low phosphorus availability as related to phosphorus efficiency[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2008(4): 1089-1099. (in Chinese)
- [15] 林海建, 张志明, 高世斌, 潘光堂. 玉米耐低磷研究现状及磷高效育种策略的探讨[J]. *中国农学通报*, 2008(1): 181-185.
- LIN H J, ZHANG Z M, GAO S B, PAN G T. The research actuality of maize (*Zea mays* L.) tolerance to low phosphorus and the strategy of high phosphorus efficiency breeding[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2008(1): 181-185. (in Chinese)
- [16] 吴敏, 陈瑞, 李贵, 童琪, 童方平, 杨文海, 谢沛源, 邓莞礼, 熊振宇. 南酸枣苗期耐低磷家系筛选及磷效率评价[J]. *中南林业科技大学学报*, 2025, 45(3): 107-117.
- WU M, CHEN R, LI G, TONG Q, TONG F P, YANG W H, XIE P Y, DENG W L, XIONG Z Y. Screening of low phosphorus tolerant families and phosphorus efficiency of *Choerospondias axillaris* at seedling stage[J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2025, 45(3): 107-117. (in Chinese)
- [17] TANTRIANI, CHENG W G, TAWARAYA K. Screening for low phosphorus-tolerant soybean cultivars from the Japanese core collection[J]. *Euphytica*, 2023, 219(1): 13.
- [18] 白羿雄, 胡秦桢, 张正社, 王小利, 牛娜, 马守才, 张改生, 张小红, 王军卫. 耐低磷山羊草基因型的筛选与鉴定[J]. *植物遗传资源学报*, 2015, 16(3): 588-593.
- BAI Y X, HU Q L, ZHANG Z S, WANG X L, NIU N, MA S C, ZHANG G S, ZHANG X H, WANG J W. Screening and identification for tolerance to low phosphorus stress of *Aegilops* genotype germplasm resources[J]. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2015, 16(3): 588-593. (in Chinese)
- [19] 魏亚宵, 汪军成, 姚立蓉, 司二静, 杨轲, 孟亚雄, 李葆春, 王化俊, 尚勋武, 马小乐. 小麦耐低磷基因型的鉴定和筛选[J]. *甘肃农业大学学报*, 2023, 58(2): 51-57, 67.
- WEI Y X, WANG J C, YAO L R, SI E J, YANG K, MENG Y X, LI B C, WANG H J, SHANG X W, MA X L. Identification and screening of low phosphorus tolerance genotypes in wheat[J]. *Journal of Gansu Agricultural University*, 2023, 58(2): 51-57, 67. (in Chinese)
- [20] 韩佳祺, 赵自仙, 郭华春. 光合参数结合形态指标评价马铃薯响应低磷胁迫的品种间差异[J]. *植物遗传资源学报*, 2024, 25(10): 1713-1725.
- HAN J Q, ZHAO Z X, GUO H C. Evaluation of differences among potato cultivars in response to low P stress by combining photosynthetic parameters with morphological indices[J]. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2024, 25(10): 1713-1725. (in Chinese)
- [21] 武海燕, 李喜焕, 李文龙, 孔佑宾, 杜汇, 张彩英. 大豆耐低磷性状鉴定及优异种质筛选[J]. *河南农业科学*, 2020, 49(1): 61-67.
- WU H Y, LI X H, LI W L, KONG Y B, DU H, ZHANG C Y. Identification of low phosphorus tolerant traits and selection of elite genotypes in soybean[J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2020, 49(1): 61-67. (in Chinese)
- [22] 李敏, 时振坤, 晁召飞, 袁天宇, 陈士林, 吴向远. 玉米苗期耐低磷种质筛选及综合评价[J]. *河南科技学院学报(自然科学版)*, 2024, 52(6): 9-15, 22.
- LI M, SHI Z K, CHAO Z F, YUAN T Y, CHEN S L, WU X Y. Screening and comprehensive evaluation of maize germplasm with low phosphorus tolerance during seedling stage[J]. *Journal of Henan Institute of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2024, 52(6): 9-15, 22. (in Chinese)
- [23] XIAO Y, ZHU M, GAO S. Genetic and genomic research on sweetpotato for sustainable food and nutritional security[J]. *Genes*, 2022, 13(10): 1833.
- [24] VILLORDON A, LABONTE D, SOLIS J, FIRON N. Characterization of lateral root development at the onset of storage root initiation in 'Beauregard' sweetpotato adventitious roots[J]. *Hort Science*, 2012, 47(7): 961-968.
- [25] 梁清干, 陈艳丽, 刘永华, 王建伟, 王宁, 曾丽萍, 朱国鹏, 司成成. 磷素对甘薯生长前期源库关系建立和平衡的影响[J]. *热带作物学报*, 2021, 42(10): 2915-2923.
- LIANG Q G, CHEN Y L, LIU Y H, WANG J W, WANG N, ZENG L P, ZHU G P, SI C C. Effects of phosphorus application on the establishment of source-sink balance at the initial stage of sweetpotato root development[J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2021, 42(10): 2915-2923. (in Chinese)
- [26] SI C C, LIANG Q G, LIU H J, WANG N, KUMAR S, CHEN Y L, ZHU G P. Response mechanism of endogenous hormones of potential storage root to phosphorus and its relationship with yield and appearance quality of sweetpotato[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2022, 13: 872422.
- [27] 李春华, 汪吉东, 张辉, 张永春. 磷缺乏对不同甘薯品种根系生长及磷素吸收的影响[J]. *江苏农业学报*, 2019, 35(1): 91-95.
- LI C H, WANG J D, ZHANG H, ZHANG Y C. Responses of root growth and phosphorus uptake for sweetpotatoes un-

- der low phosphorus supply[J]. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences*, 2019, 35(1): 91-95. (in Chinese)
- [28] 朱晓亚, 张强强, 于永超, 赵鹏, 刘明, 王静, 靳容, 唐忠厚. 甘薯苗期耐低磷基因型筛选及磷效率综合评价[J]. *江苏师范大学学报(自然科学版)*, 2023, 41(1): 27-31, 2.
- ZHU X Y, ZHANG Q Q, YU Y C, ZHAO P, LIU M, WANG J, JIN R, TANG Z H. Screening of low phosphorus tolerance genotypes and comprehensive evaluation of phosphorus efficiency in sweetpotato at seedling stage[J]. *Journal of Jiangsu Normal University (Natural Science Edition)*, 2023, 41(1): 27-31, 2. (in Chinese)
- [29] 杨刘斌. 甘薯耐低磷种质的筛选与其对磷肥的响应[D]. 福州: 福建农林大学, 2023.
- YANG L B. Screening of low phosphorus tolerant germplasm of sweetpotato and its response to phosphorus fertilization[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2023. (in Chinese)
- [30] 王燕, 张谦, 董明, 王树林, 冯国艺, 梁青龙, 王香茹, 祁虹. 减磷改变了土壤微生物群落结构和功能, 促进棉花根系生长[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2025, 33(5): 913-925.
- WANG Y, ZHANG Q, DONG M, WANG S L, FENG G Y, LIANG Q L, WANG X R, QI H. Reducing phosphorus alters the soil microbial community structure and function, promoting cotton root growth[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2025, 33(5): 913-925. (in Chinese)
- [31] 易杰祥, 吕亮雪, 刘国道. 土壤酸化和酸性土壤改良研究[J]. *华南热带农业大学学报*, 2006(1): 23-28.
- YI J X, LYU L X, LIU G D. Research on soil acidification and acidic soil's melioration[J]. *Journal of South China University of Tropical Agriculture*, 2006(1): 23-28. (in Chinese)
- [32] 高金秋, 杨舒涵, 柯伟宁, 邵景洋, 王媛. 40 份甜菜苗期耐低磷性评价及种质筛选[J]. *农技服务*, 2024, 41(10): 9-13.
- GAO J Q, YANG S H, KE Y N, SHAO J Y, WANG Y. Evaluation of low phosphorus tolerance and germplasm screening of 40 sugar beet seedlings[J]. *Agricultural Technology Service*, 2024, 41(10): 9-13. (in Chinese)
- [33] 许兰杰, 梁慧珍, 余永亮, 谭政委, 杨红旗, 董薇, 芦海灵, 夏伟. 不同基因型红花种质耐低磷筛选指标的鉴定及评价[J]. *安徽农业科学*, 2017, 45(33): 128-131.
- XU L J, LIANG H Z, YU Y L, TAN Z W, YANG H Q, DONG W, LU H L, XIA W. Identifying and evaluation of different genotypes safflower with low-phosphorus tolerance[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2017, 45(33): 128-131. (in Chinese)
- [34] 张吉海, 高世斌, 杨克诚, 张志明, 林海建, 黄宁, 郑溟, 徐克成, 陈义轩, 潘光堂. 玉米耐低磷种质资源的筛选与鉴定[J]. *植物遗传资源学报*, 2008(3): 335-339.
- ZHANG J H, GAO S B, YANG K C, ZHANG Z M, LIN H J, HUANG N, ZHENG M, XU K C, CHEN Y X, PAN G T. Screening and identification for tolerance to low phosphorus stress of maize germplasm resources[J]. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2008(3): 335-339. (in Chinese)
- [35] 刘露露, 汪军成, 姚立蓉, 孟亚雄, 李葆春, 杨轲, 司二静, 王化俊, 马小乐, 尚勋武, 李兴茂. 不同春小麦品种耐低磷性评价及种质筛选[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2020, 28(7): 999-1009.
- LIU L L, WANG J C, YAO L R, MENG Y X, LI B C, YANG K, SI E J, WANG H J, MA X L, SHANG X W, LI X M. Evaluation of low phosphorus tolerance and germplasm screening of spring wheat[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2020, 28(7): 999-1009. (in Chinese)
- [36] KERRIDGE P C, RATCLIFF D. Comparative growth of four tropical pasture legumes and Guinea grass with different phosphorus sources[J]. *Tropical Grasslands*, 1982, 16: 33-40.
- [37] 米热扎提江·喀由木, 西尔艾力·吾麦尔江, 李晓瞳, 王香茹, 贵会平, 张恒恒, 张西岭, 董强, 宋美珍. 棉花苗期耐低磷种质筛选及耐低磷综合评价[J]. *中国农业科学*, 2023, 56(21): 4150-4162.
- KEYOUMU M, WUMAIERJIANG X, LI X T, WANG X R, GUI H P, ZHANG H H, ZHANG X L, DONG Q, SONG M Z. Screening of low phosphorus tolerant germplasm in cotton at seedling stage and comprehensive evaluation of low phosphorus tolerance[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2023, 56(21): 4150-4162. (in Chinese)
- [38] 张亚琦, 何云, 李洪立, 洪青梅, 濮文辉, 李琼, 胡文斌, 刘平武. 33 份火龙果种质果实性状主成分分析及综合评价[J]. *热带作物学报*, 2024, 45(8): 1560-1571.
- ZHANG Y Q, HE Y, LI H L, HONG Q M, PU W H, LI Q, HU W B, LIU P W. Principal component analysis and comprehensive evaluation of fruit traits of 33 pitaya germplasms[J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2024, 45(8): 1560-1571. (in Chinese)
- [39] 张欣, 钟延平, 贺龙, 鲍红春, 曹春玲, 张悦. 基于隶属函数法综合评价 10 个酿酒葡萄品种的抗寒性[J]. *北方果树*, 2024(5): 5-7, 11.
- ZHANG X, ZHONG Y P, HE L, BAO H C, CAO C L, ZHANG Y. Comprehensive evaluation of cold resistance of 10 wine grapes varieties based on membership function method[J]. *Northern Fruits*, 2024(5): 5-7, 11. (in Chinese)
- [40] LIAO G L, JIANG Z Q, HE Y Q, ZHONG M, HUANG C H, QU X Y, XU X B. The Comprehensive evaluation analysis of the fruit quality in *Actinidia eriantha* pollinated with different pollen donors based on the membership function method[J]. *Erwerbs-Obstbau*, 2022, 64(1): 91-96.

- [41] 李月仙, 段春芳, 宋记明, 熊贤坤, 周迎春, 严炜, 肖明昆, 车彬, 姜太玲, 刘倩, 刘光华. 30 份木薯种质资源表型性状遗传多样性分析及综合评价[J]. 植物遗传资源学报, 2025, 26(11): 2164-2180.
- LI Y X, DUAN C F, SONG J M, XIONG X K, ZHOU Y C, YAN W, XIAO M K, CHE B, JIANG T L, LIU Q, LIU G H. Genetic diversity analysis and comprehensive evaluation of phenotypic traits in 30 cassava germplasm resources[J]. Journal of Plant Genetic Resources, 2025, 26(11): 2164-2180. (in Chinese)
- [42] 沈升法, 项超, 吴列洪, 李兵, 罗志高. 浙江省甘薯种质资源的品质鉴定与聚类分析[J]. 植物遗传资源学报, 2021, 22(1): 247-259.
- SHEN S F, XIANG C, WU L H, LI B, LUO Z G. Quantification and cluster analysis of quality-related traits in sweetpotato germplasm resources in Zhejiang province[J]. Journal of Plant Genetic Resources, 2021, 22(1): 247-259. (in Chinese)
- [43] LIU J, CHEN X F, YANG W Y, ZHANG S P, WANG F, TANG Z X. Chemical fingerprinting of wild germplasm resource of *Ophiopogon japonicus* from Sichuan basin, China by RP-HPLC coupled with hierarchical cluster analysis[J]. Analytical Letters, 2010, 43(15): 2411-2423.
- [44] 吕立军, 安进军, 袁瑞江, 李衍素, 闫妍, 王君, 贺超兴. 大葱苗期耐低磷品种的筛选[J]. 农业科技通讯, 2023(1): 139-144.
- LYU L J, AN J J, YUAN R J, LI Y S, YAN Y, WANG J, HE C X. Screening for low-phosphorus tolerant varieties of welsh onion at seedling stage[J]. Bulletin of Agricultural Science and Technology, 2023(1): 139-144. (in Chinese)
- [45] 张议文, 吴婧怡, 李玥颖, 陈兴波, 李根泽, 董相书. 云南地区主栽油菜品种苗期耐低磷能力评价[J]. 云南大学学报(自然科学版), 2025, 47(3): 573-581.
- ZHANG Y W, WU J Y, LI Y Y, CHEN X B, LI G Z, DONG X S. Evaluation of seedling low phosphorus tolerance of main *Brassica napus* varieties in Yunnan region[J]. Journal of Yunnan University (Natural Sciences Edition), 2025, 47(3): 573-581. (in Chinese)