

15 个参薯品种(品系)块茎花色苷、营养成分和矿质元素比较及综合评价

李明翰¹, 马喆晨¹, 王月¹, 汤洁², 逯欣宇¹, 孙小芹¹, 张艳梅^{1,①}

[1. 江苏省中国科学院植物研究所(南京中山植物园) 江苏省植物资源保护与利用重点实验室, 江苏 南京 210014;
2. 江西省农业科学院作物研究所, 江西 南昌 330200]

摘要: 为探索不同肉色参薯(*Dioscorea alata* Linn.) 品种(品系)的营养价值,收集了来自福建、广东、海南、江西、江苏、台湾、云南的 15 个参薯品种(品系),比较其块茎花色苷、营养成分和矿质元素含量,并采用相关性分析、熵权法、灰色关联度分析和 K-means 聚类分析对各品种(品系)进行评价。结果显示:紫色参薯的花色苷含量显著($P < 0.05$)高于白色参薯,其中,紫玉参薯(Ziyu Shenshu)的花色苷含量明显高于其他品种(品系)。各参薯品种(品系)的非淀粉多糖、淀粉、抗性淀粉、纤维素、粗蛋白质含量间无显著差异,含量分别为 4.61~20.47、544.89~796.85、94.63~127.69、19.24~37.23 和 54.81~99.95 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 。部分参薯品种(品系)的矿质元素含量存在显著差异,Na、Ca、Mg、Cu、Fe、Zn 和 Mn 含量最高的品种(品系)分别为紫皮白肉脚板薯(Zipibairou Jiaobanshu)、抚州脚板薯(Fuzhou Jiaobanshu)、系马桩脚板薯(Ximazhuang Jiaobanshu)、“阳明山山药”(‘Yangmingshan Yam’)、系马桩脚板薯、紫溪圆苕(Zixi Yuanshao)和海南杂紫(Hainan Zazi)。花色苷含量的变异系数最大(143.98%),非淀粉多糖含量、Zn 含量和 Mn 含量的变异系数较大,分别为 42.88%、46.98%和 42.06%。相关性分析结果显示:13 个指标间的相关性中有 15 对达显著水平,其中,花色苷含量与 Zn 含量呈显著负相关,与 Mn 含量呈极显著负相关($P < 0.01$)。供试 15 个参薯品种(品系)可分为 5 个 I 级、10 个 II 级,其中, I 级品种(品系)为系马桩脚板薯、紫玉参薯、紫溪圆苕、抚州脚板薯和海南杂紫,综合营养价值较高。综合分析结果显示:花色苷含量差异是各参薯品种(品系)肉色不同的主要原因;Fe 含量、非淀粉多糖含量、Mn 含量、纤维素含量和 Ca 含量可作为评价参薯品质的关键指标;紫玉参薯可作为优良的食药保健产品开发原料。

关键词: 参薯; 花色苷; 营养成分; 矿质元素; 综合评价

中图分类号: Q945.1; S632.1 文献标志码: A 文章编号: 1674-7895(2026)03-0024-09
DOI: 10.3969/j.issn.1674-7895.2026.03.03

Comparison and comprehensive evaluation of anthocyanin, nutritional components and mineral elements in tubers of 15 *Dioscorea alata* cultivars (lines) LI Minghan¹, MA Zhechen¹, WANG Yue¹, TANG Jie², LU Xinyu¹, SUN Xiaoqin¹, ZHANG Yanmei^{1,①} [1. Jiangsu Key Laboratory for Conservation and Utilization of Plant Resources, Institute of Botany, Jiangsu Province and Chinese Academy of Sciences (Nanjing Botanical Garden Mem. Sun Yat-Sen), Nanjing 210014, China; 2. Crop Research Institute of Jiangxi Academy of Agricultural Sciences, Nanchang 330200, China], *J. Plant Resour. & Environ.*, 2026, 35(3): 24-32

Abstract: To explore the nutritional value of different flesh-color cultivars (lines) of *Dioscorea alata* Linn., 15 *D. alata* cultivars (lines) were collected from Fujian, Guangdong, Hainan, Jiangxi, Jiangsu, Taiwan, and Yunnan, the contents of anthocyanin, nutritional components, and mineral elements in

收稿日期: 2025-11-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(32172089)

作者简介: 李明翰(2001—),男,四川成都人,硕士研究生,主要从事薯蓣种质资源收集与利用方面的研究。

①通信作者 E-mail: yanmeizhang@cnbg.net

引用格式: 李明翰, 马喆晨, 王月, 等. 15 个参薯品种(品系)块茎花色苷、营养成分和矿质元素比较及综合评价[J]. 植物资源与环境学报, 2026, 35(3): 24-32.

their tubers were compared, and the cultivars (lines) were evaluated by using correlation analysis, entropy weight method, grey relational analysis, and K-means cluster analysis. The results show that the anthocyanin contents of purple *D. alata* are significantly ($P < 0.05$) higher than those of white *D. alata*, among which, the anthocyanin content of Ziyu Shenshu is obviously higher than that of the other cultivars (lines). There are no significant differences in contents of non-starch polysaccharide, starch, resistant starch, cellulose, and crude protein among the *D. alata* cultivars (lines), and the contents are 4.61–20.47, 544.89–796.85, 94.63–127.69, 19.24–37.23, and 54.81–99.95 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$, respectively. There are significant differences in mineral element contents among some *D. alata* cultivars (lines), and the cultivars (lines) with the highest contents of Na, Ca, Mg, Cu, Fe, Zn, and Mn are Zipibairou Jiaobanshu, Fuzhou Jiaobanshu, Ximazhuang Jiaobanshu, ‘Yangmingshan Yam’, Ximazhuang Jiaobanshu, Zixi Yuanshao, and Hainan Zazi, respectively. The coefficient of variation of anthocyanin content is the largest (143.98%), that of non-starch polysaccharide content, Zn content, and Mn content are relatively large, which are 42.88%, 42.06%, and 41.85%, respectively. The correlation analysis result shows that among the 13 indexes, 15 pairs reach significant correlation levels, among which, anthocyanin content shows a significant negative correlation with Zn content and an extremely significant negative correlation ($P < 0.01$) with Mn content. The 15 *D. alata* cultivars (lines) tested can be classified into grade I with 5 cultivars (lines) and grade II with 10 cultivars (lines), among which, the grade I cultivars (lines) are Ximazhuang Jiaobanshu, Ziyu Shenshu, Zixi Yuanshao, Fuzhou Jiaobanshu, and Hainan Zazi, which have relatively high comprehensive nutritional value. The comprehensive analysis result indicates that the difference in anthocyanin content is the main reason for the different flesh colors among the *D. alata* cultivars (lines); Fe content, non-starch polysaccharide content, Mn content, cellulose content, and Ca content can be used as key indexes for evaluating *D. alata* quality; Ziyu Shenshu can be used as a raw material for the development of excellent edible and medicinal health products.

Key words: *Dioscorea alata* Linn.; anthocyanin; nutritional component; mineral element; comprehensive evaluation

参薯(*Dioscorea alata* Linn.),又称大薯、脚板薯、紫山药等,为薯蓣科(Dioscoreaceae)薯蓣属(*Dioscorea* Linn.)缠绕草质藤本植物,广泛分布于热带及亚热带地区^[1]。参薯块茎富含多种营养物质^[2],并具有耐旱、耐贫瘠和易于繁殖等特性,是西非和中非等热带地区重要的“饥荒作物”,在其传统农业中占据重要地位^[1-2]。此外,参薯在中国福建、广东、海南、江苏、江西等南方省份广泛栽培。相关研究结果^[3-5]表明:参薯块茎具有一定抗氧化、抗炎症特性,有助于缓解高血压、心脏病和维护肠道健康。

中国是参薯的主要产地之一,近年来各省的参薯种植面积不断扩大。目前,已有研究对中国部分参薯品种(品系)进行综合评价及遗传多样性统计,如陈阳等^[6]对22份参薯品种(品系)的农艺性状进行了综合评价,筛选出南昌紫山药(Nanchang purple yam)、贵港紫山药(Guigang purple yam)和‘紫玉淮山’(‘Ziyu Huaishan’)等抗炭疽病品种(品系);汪生林等^[7]对20份参薯品种(品系)进行了叶片和块茎相关表型性状的多样性分析,揭示了其表型性状的丰富变异;此外,中国的栽培参薯不仅在众多数量性状

上有所不同,其基因型和倍性也存在广泛的变异^[8]。

花色苷是植物中重要的黄酮类次生代谢产物,既参与器官着色,又在植物应对光照、氧化及其他逆境胁迫中发挥保护作用,同时具有较高的营养与功能价值^[9-11]。已有研究表明:作物中花色苷的积累水平与其遗传背景及营养品质密切相关,可作为作物品质评价和开发功能性利用的重要指标^[12]。不同参薯品种(品系)肉色存在较大变异,主要表现为不同程度的紫色和白色,其中紫色主要由花色苷形成^[13]。因此,了解不同颜色参薯品种(品系)中花色苷积累的差异,对于优化参薯的营养价值具有重要意义。

作物的营养成分常在不同品种(品系)之间存在显著差异,这种差异不仅受到遗传因子的影响,还与生长环境、栽培管理和采收季节等因子密切相关^[14]。对作物不同品种(品系)营养价值进行研究,能够为优质品种(品系)的选育、作物的多样性保护以及农产品的针对性开发提供科学依据^[15-17]。参薯种植范围广泛,不同地区之间参薯品种(品系)的营养成分差异很大^[3]。统计结果表明:印度部分地区参薯品种(品系)块茎中的蛋白质含量为2.56%~3.10%,膳

食纤维含量为 1.10%~4.10%;而中国部分地区参薯品种(品系)块茎中的蛋白质含量可达到 6.40%~9.70%,但膳食纤维含量仅为 0.67%~1.19%^[18-19]。此外,不同地区参薯品种(品系)中淀粉的溶解度、粗脂肪含量、糊化温度及诸多矿质元素含量也存在显著差异^[3]。中国现有的参薯营养成分和矿质元素含量研究主要关注特定地区的品种(品系),如孙志刚等^[20]从云南 24 份参薯品种(品系)中筛选出具有营养保健功能的品种(品系);张武君等^[21]对福建 45 份山药主栽品种(品系)的 9 项品质指标进行了测定和聚类分析,根据不同品种(品系)特征提出了鲜食和加工分类建议。

然而,现有的相关研究结果并未发现中国的栽培参薯存在显著的地理分化^[22],且难以追溯栽培历史;而参薯易无性繁殖^[1],进而导致其品种(品系)混杂。目前,复杂的遗传背景严重制约了参薯的育种改良与生产利用,且缺少对中国范围内不同参薯品种(品系)的花色苷、营养成分和矿质元素含量比较。因此,本研究以收集自中国南方多个省份的 15 份不同肉色参薯品种(品系)为研究对象,对其块茎花色苷、营养成分及矿质元素的含量进行了系统测定,综合熵权法、灰色关联度分析等对不同肉色的参薯品种(品系)进行系统的营养价值评价,以期参薯优良品种(品系)选育、功能性食品及药用资源开发提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 材料

15 份参薯品种(品系)均于 2023 年 3 月种植于江苏省中国科学院植物研究所种质资源圃(北纬 32°03'34"、东经 118°49'58",海拔 46 m),具体名称及来源地见表 1。该区域属于亚热带季风气候,区域内四季分明、雨量充沛,年平均气温 15.4 °C,年平均降水量约 1 200 mm。于同年参薯块茎成熟期(11 月下旬)收获块茎,记录块茎的肉色和形状(表 1)。每个品种(品系)选取长势相近的植株 3 株,去除块茎外皮及与其相连厚度约 1 cm 的块茎肉,将剩余新鲜块茎肉切成体积 3 cm×3 cm×5 mm 的方块样本。每株选取 5 个样本液氮速冻后保存于-80 °C 冰箱,另选 5 个样本于 37 °C 条件下烘干 24 h,粉碎、过筛(65 目)后置于防潮箱内,同一品种(品系)的样本混合保存、备用。

主要仪器:iCAP 7400 电感耦合等离子体发射光谱仪(美国 Thermo Fisher Scientific 有限公司),K9860 全自动凯氏定氮仪(海能未来技术集团股份有限公司),UV-6000PC 大屏幕扫描型紫外可见分光光度计(上海元析仪器有限公司)。

主要试剂:浓硝酸(批号 10014518)、苯酚(批号 10015318)、无水乙醇(批号 100092683)、氢氧化钠

表 1 供试参薯品种(品系)基本信息

Table 1 Basic information of tested cultivars (lines) of *Dioscorea alata* Linn.

品种(品系) Cultivar (line)	来源地 Origin	块茎肉色 Tuber flesh color	块茎形状 Tuber shape
海南杂紫 Hainan Zazi	海南 Hainan	淡紫色 Whitish purple	脚掌状 Foot-shaped
苏蕻 2 号 Suyu 2	江苏 Jiangsu	紫色 Purple	圆柱形 Cylindrical
苏蕻 4 号 Suyu 4	江苏 Jiangsu	白色 White	圆柱形 Cylindrical
苏蕻 6 号 Suyu 6	江苏 Jiangsu	白色 White	圆柱形 Cylindrical
紫玉参薯 Ziyu Shenshu	广东 Guangdong	紫色 Purple	圆柱形 Cylindrical
阳明山山药 Yangmingshan Yam	台湾 Taiwan	白色 White	圆柱形 Cylindrical
周宁紫薯 Zhouning Zishu	福建 Fujian	紫色 Purple	圆柱形 Cylindrical
紫玉山药 Ziyu Shanyao	云南 Yunnan	淡紫色 Whitish purple	圆柱形 Cylindrical
抚州脚板薯 Fuzhou Jiaobanshu	江西 Jiangxi	白色 White	圆柱形 Cylindrical
紫皮白肉脚板薯 Zhibairou Jiaobanshu	江西 Jiangxi	白色 White	圆柱形 Cylindrical
紫溪圆苕 Zixi Yuanshao	江西 Jiangxi	白色 White	圆柱形 Cylindrical
赣州脚板薯 Ganzhou Jiaobanshu	江西 Jiangxi	紫色,具白斑 Purple, mottled with white	脚掌状 Foot-shaped
塘背脚板薯 Tangbei Jiaobanshu	江西 Jiangxi	紫色 Purple	圆柱形或脚掌状 Cylindrical or foot-shaped
万田紫薯 Wantian Zishu	江西 Jiangxi	紫色 Purple	圆柱形 Cylindrical
系马桩脚板薯 Ximazhuang Jiaobanshu	江西 Jiangxi	白色 White	圆柱形或脚掌状 Cylindrical or foot-shaped

(批号 10019762)、乙酸铅(批号 10015318)、硫酸钠(批号 10012418)、乙醇(批号 100092683)、蒽酮(批号 30015014)、乙酸乙酯(批号 10009418)、过氧化氢(批号 10011208)和硼酸(批号 10004818)购自国药集团化学试剂有限公司;浓硫酸(批号 1270320101600)购自西陇科学股份有限公司;3,5-二硝基水杨酸(DNS)(批号 BWZ6105-2016)、葡萄糖标准品(批号 BWJ4289-2016,纯度 99.7%) and 盐酸标准溶液[批号 GBW(E)083798,浓度为 $0.1006 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$]购自北京北方伟业计量技术研究院有限公司;甲基红(批号 M812770-25g)和溴甲酚绿(批号 B801810)均购自上海麦克林生化科技股份有限公司;抗性淀粉和非抗性淀粉含量(酶法)试剂盒(批号 ZK-0571F)购自上海臻科生物科技有限公司;微晶纤维素(批号 V32664,粒径 $20 \mu\text{m}$)购自上海源叶生物科技有限公司。

1.2 花色苷、营养成分和矿质元素含量测定

供试 15 个参薯品种(品系)块茎样本的营养成分含量交由南京申诺青生物科技有限公司进行测定,各指标均重复测定 3 次,结果以平均值计。采用分光光度法^[23]测定花色苷含量,以矢车菊素-3-葡萄糖苷当量表示^[24-25];参照 DB22/T 1685—2012 中的方法测定非淀粉多糖含量;采用酸水解 DNS 法^[26]测定淀粉含量;采用抗性淀粉和非抗性淀粉含量(酶法)试剂盒测定抗性淀粉含量;采用紫外分光光度法^[27]测定纤维素含量;参照 GB 5009.5—2016 中的方法测定粗蛋白质含量;参照 GB 5009.268—2016 中的方法测定各矿质元素(Na、Ca、Mg、Cu、Fe、Zn 和 Mn)含量。

1.3 数据处理和分析

数据处理和分析均在 R 语言(<https://www.r-project.org/>)环境下进行;使用 agricolae 包(<https://myaseen208.github.io/agricolae/>)对数据进行显著性检验;使用 cor 函数计算各指标间的 Spearman 相关系数。

由于花色苷属功能性次生代谢产物,其在样本间的极度变异会显著扭曲评价模型的权重分布,导致评价结果偏向于反映次生代谢水平而非营养价值。为合理比较不同参薯品种(品系)的综合营养价值,仅对花色苷含量以外的核心指标进行以下分析;使用熵权法和灰色关联度法^[28]对各核心指标进行权重计算,并对各品种(品系)进行综合营养价值排名;使用 R 语言内置函数对加权灰色关联度进行 K-means 聚类分析,确定综合营养价值较高的品种(品系)。

2 结果和分析

2.1 不同参薯品种(品系)中花色苷、营养成分和矿质元素含量的比较

2.1.1 花色苷及营养成分含量比较 15 个参薯品种(品系)中花色苷和营养成分含量的比较见表 2。结果显示:15 个参薯品种(品系)的花色苷含量为 $5.30 \sim 335.51 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$,其中紫玉参薯(Ziyu Shenshu)的花色苷含量最高,‘苏蒞 6 号’(‘Suyu 6’)的花色苷含量最低。供试参薯品种(品系)花色苷含量的变异系数高达 143.98%;紫色参薯的花色苷含量显著($P < 0.05$)高于白色参薯,淡紫色及具白斑紫色参薯的花色苷含量间无显著差异,紫色参薯或白色参薯的花色苷含量间大多无显著差异,说明各品种(品系)间的花色苷含量存在差异,尤其是不同肉色参薯品种(品系)间。

结果(表 2)还显示:15 个参薯品种(品系)的非淀粉多糖、淀粉、抗性淀粉、纤维素、粗蛋白质含量分别为 $4.61 \sim 20.47$ 、 $544.89 \sim 796.85$ 、 $94.63 \sim 127.69$ 、 $19.24 \sim 37.23$ 和 $54.81 \sim 99.95 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 。其中,非淀粉多糖、淀粉、抗性淀粉、纤维素、粗蛋白质含量最高的品种(品系)分别为紫玉参薯、赣州脚板薯(Ganzhou Jiaobanshu)、塘背脚板薯(Tangbei Jiaobanshu)、抚州脚板薯(Fuzhou Jiaobanshu)和紫溪圆苕(Zixi Yuanshao),最低的品种(品系)分别为周宁紫薯(Zhouning Zishu)、抚州脚板薯、赣州脚板薯、赣州脚板薯和‘苏蒞 2 号’(‘Suyu 2’)。淀粉是参薯中含量最高的营养成分,平均值为 $675.74 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$;参薯不同品种(品系)间的非淀粉多糖、淀粉、抗性淀粉、纤维素和粗蛋白质的含量差异均不显著。从变异系数看,非淀粉多糖含量的变异系数最大(42.88%),而抗性淀粉含量的变异系数最小(7.56%)。

2.1.2 矿质元素含量的比较 15 个参薯品种(品系)中矿质元素含量的比较见表 3。结果显示:15 个参薯品种(品系)的 Na、Ca、Mg、Cu、Fe、Zn 和 Mn 含量分别为 $316.66 \sim 494.45$ 、 $337.16 \sim 627.88$ 、 $270.80 \sim 556.93$ 、 $76.96 \sim 105.29$ 、 $33.17 \sim 100.42$ 、 $3.61 \sim 28.50$ 和 $0.34 \sim 1.28 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。Na、Ca、Mg、Cu、Fe、Zn 和 Mn 含量最高的品种(品系)分别为紫皮白肉脚板薯(Zipibairou Jiaobanshu)、抚州脚板薯、系马桩脚板薯(Ximazhuang Jiaobanshu)和‘阳明山山药’(‘Yangmingshan Yam’)、

系马桩脚板薯、紫溪圆苕和海南杂紫(Hainan Zazi), 最低的品种(品系)分别为海南杂紫、赣州脚板薯、‘苏蒨6号’、塘背脚板薯(Tangbei Jiaobanshu)、万田紫薯(Wantian Zishu)、塘背脚板薯和周宁紫薯。参薯

部分品种(品系)间的Ca、Mg、Fe、Zn和Mn含量差异显著,而Na、Cu含量均无显著差异。从变异系数看,Zn和Mn含量的变异系数较大(分别为46.98%和42.06%),而Cu含量的变异系数(8.87%)最小。

表2 15个参薯品种(品系)中花色苷和营养成分含量的比较($\bar{X}\pm SD$)¹⁾

Table 2 Comparison on contents of anthocyanin and nutritional components in 15 *Dioscorea alata* Linn. cultivars (lines) ($\bar{X}\pm SD$)¹⁾

品种(品系) Cultivar (line)	$w_{An}/(\mu g \cdot g^{-1})$	营养成分含量/(mg · g ⁻¹) Content of nutritional components				
		Po	St	Rs	Ce	Cp
海南杂紫 Hainan Zazi	26.65±10.34de	12.45±4.62a	674.77±36.46a	120.81±13.18a	31.88±1.50a	59.61±2.49a
苏蒨2号 Suyu 2	48.83±15.62cd	7.29±1.73a	733.77±33.17a	120.46±12.95a	29.51±2.70a	54.81±3.10a
苏蒨4号 Suyu 4	7.25±1.34fg	9.91±1.35a	717.06±18.62a	119.12±5.62a	21.58±0.94a	69.54±1.66a
苏蒨6号 Suyu 6	5.30±1.62g	6.89±1.01a	769.93±11.47a	102.53±34.11a	19.38±0.13a	66.73±3.95a
紫玉参薯 Ziyu Shenshu	335.51±91.40a	20.47±8.99a	655.30±49.06a	117.27±15.33a	30.61±2.61a	70.98±4.68a
阳明山山药 Yangmingshan Yam	9.15±3.71f	8.20±0.91a	707.45±58.74a	110.97±9.26a	29.47±4.74a	67.42±2.31a
周宁紫薯 Zhouning Zishu	80.75±23.82bc	4.61±0.32a	711.95±44.83a	109.76±9.68a	24.87±1.18a	72.07±4.92a
紫玉山药 Ziyu Shanyao	38.07±12.90ede	10.41±2.97a	663.89±37.36a	111.14±14.46a	25.90±3.33a	65.91±2.68a
抚州脚板薯 Fuzhou Jiaobanshu	15.49±2.98e	9.75±1.43a	544.89±41.02a	118.93±17.55a	37.23±4.26a	64.73±1.45a
紫皮白肉脚板薯 Zipibairou Jiaobanshu	7.16±1.10fg	11.15±2.36a	564.32±40.06a	127.50±8.87a	30.39±3.46a	75.38±2.19a
紫溪圆苕 Zixi Yuanshao	5.70±0.91fg	7.94±0.63a	616.87±29.71a	123.79±12.40a	29.15±5.53a	99.95±12.23a
赣州脚板薯 Ganzhou Jiaobanshu	19.55±5.59de	4.71±0.72a	796.85±12.45a	94.63±10.24a	19.24±0.97a	62.04±1.09a
塘背脚板薯 Tangbei Jiaobanshu	145.75±25.52ab	5.49±0.27a	711.28±13.23a	127.69±8.19a	21.82±0.51a	63.30±1.02a
万田紫薯 Wantian Zishu	201.76±81.12ab	5.97±1.13a	662.84±18.43a	122.31±5.14a	20.77±0.94a	72.74±6.43a
系马桩脚板薯 Ximazhuang Jiaobanshu	7.18±0.53fg	8.72±1.50a	605.00±51.49a	117.84±9.51a	29.55±2.57a	75.70±2.81a
均值 Mean	63.61±91.58	8.93±3.83	675.74±68.76	116.32±8.79	26.76±5.13	69.39±9.92
变异系数/% Coefficient of variation	143.98	42.88	10.18	7.56	19.17	14.29

¹⁾ w_{An} : 花色苷含量 Anthocyanin content; Po: 非淀粉多糖 Non-starch polysaccharide; St: 淀粉 Starch; Rs: 抗性淀粉 Resistant starch; Ce: 纤维素 Cellulose; Cp: 粗蛋白质 Crude protein. 同列中不同的小写字母表示差异显著 ($P<0.05$) Different lowercases in the same column indicate the significant differences ($P<0.05$).

表3 15个参薯品种(品系)中矿质元素含量的比较($\bar{X}\pm SD$)¹⁾

Table 3 Comparison on content of mineral elements in 15 *Dioscorea alata* Linn. cultivars (lines) ($\bar{X}\pm SD$)¹⁾

品种(品系) Cultivar (line)	矿质元素含量/(mg · kg ⁻¹) Content of mineral elements						
	Na	Ca	Mg	Cu	Fe	Zn	Mn
海南杂紫 Hainan Zazi	316.66±168.29a	395.86±38.37de	416.20±8.44fg	90.46±25.78a	46.39±7.64ab	26.78±14.97a	1.28±0.22ab
苏蒨2号 Suyu 2	435.70±51.51a	461.57±25.02bcde	343.96±23.52hi	86.75±35.03a	37.21±6.87ab	14.23±0.09ab	0.41±0.08c
苏蒨4号 Suyu 4	407.56±32.47a	587.52±81.73ab	397.46±13.07gh	88.37±22.03a	42.41±6.31ab	11.73±1.67ab	0.57±0.03abc
苏蒨6号 Suyu 6	490.87±136.85a	337.21±15.50e	270.80±9.58i	88.34±32.08a	36.42±7.00ab	19.85±7.30ab	0.81±0.33abc
紫玉参薯 Ziyu Shenshu	469.33±115.72a	603.13±36.98a	330.74±7.06hi	104.70±42.51a	49.58±6.03ab	23.50±5.24a	0.48±0.15bc
阳明山山药 Yangmingshan Yam	436.92±32.59a	484.40±41.62abcd	458.79±27.29de	105.29±22.65a	37.09±6.38ab	22.70±9.79a	0.54±0.02abc
周宁紫薯 Zhouning Zishu	442.75±38.80a	587.00±32.92ab	495.24±1.13bc	89.56±16.86a	44.06±1.47ab	11.52±0.03ab	0.34±0.07c
紫玉山药 Ziyu Shanyao	452.82±31.58a	592.01±82.60ab	487.78±4.66cd	89.29±15.89a	52.49±15.53ab	12.02±8.75ab	0.46±0.09c
抚州脚板薯 Fuzhou Jiaobanshu	437.57±19.61a	627.88±34.78a	527.26±24.43ab	102.43±1.89a	34.28±7.50ab	10.10±1.89ab	0.62±0.13abc
紫皮白肉脚板薯 Zipibairou Jiaobanshu	494.45±115.11a	485.69±24.47abcd	431.60±3.45ef	103.17±16.80a	34.03±2.17b	15.23±16.39ab	0.63±0.27abc
紫溪圆苕 Zixi Yuanshao	441.81±35.82a	530.79±74.86abc	553.11±16.10a	95.99±13.79a	42.94±1.56ab	28.50±16.06a	0.63±0.17abc
赣州脚板薯 Ganzhou Jiaobanshu	354.26±17.74a	337.16±36.93e	427.38±6.08f	85.79±11.01a	39.61±7.60ab	6.42±0.95ab	0.52±0.01abc
塘背脚板薯 Tangbei Jiaobanshu	427.44±31.49a	472.95±14.82abcde	468.89±11.11d	76.96±14.64a	42.49±6.27ab	3.61±0.83b	0.47±0.15c
万田紫薯 Wantian Zishu	407.15±36.71a	421.52±83.71cde	417.85±12.74fg	89.99±9.84a	33.17±5.72b	8.95±3.13ab	0.58±0.04abc
系马桩脚板薯 Ximazhuang Jiaobanshu	460.17±33.51a	460.45±63.84bcde	556.93±11.49a	103.41±21.22a	100.42±10.45a	24.17±13.38ab	1.25±0.30a
均值 Mean	431.70±45.35	492.34±91.29	438.93±78.94	93.37±8.28	44.84±15.85	15.95±7.50	0.64±0.27
变异系数/% Coefficient of variation	10.50	18.54	17.98	8.87	35.35	46.98	42.06

¹⁾ 同列中不同的小写字母表示差异显著 ($P<0.05$) Different lowercases in the same column indicate the significant differences ($P<0.05$).

2.2 参薯品种(品系)中花色苷、营养成分及矿质元素含量间的相关性分析

参薯品种(品系)中花色苷、营养成分及矿质元素含量间的相关系数见表 4。结果显示:15 个参薯品种(品系)13 个指标间有 15 对达显著水平。其中,花色苷含量与 Zn 含量呈显著负相关($P < 0.05$),与 Mn 含量呈极显著负相关($P < 0.01$)。非淀粉多糖含量与

淀粉含量呈极显著负相关,与纤维素含量呈极显著正相关;淀粉含量与抗性淀粉含量、纤维素含量、粗蛋白质含量和 Mg 含量呈显著或极显著负相关;抗性淀粉含量与 Zn 含量呈显著负相关;纤维素含量与 Mg 含量和 Cu 含量呈显著正相关;粗蛋白质含量与 Ca 含量呈显著正相关;Na 含量与 Cu 含量呈极显著正相关;Ca 含量与 Mg 含量呈显著正相关;Cu 含量与 Fe

表 4 参薯品种(品系)中花色苷、营养成分及矿质元素含量间的相关系数¹⁾

Table 4 Correlation coefficients between contents of anthocyanin, nutritional components and mineral elements in *Dioscorea alata* Linn. cultivars (lines)¹⁾

指标 Index	相关系数 Correlation coefficient												
	w_{An}	w_{Po}	w_{St}	w_{Rs}	w_{Ce}	w_{Cp}	w_{Na}	w_{Ca}	w_{Mg}	w_{Cu}	w_{Fe}	w_{Zn}	w_{Mn}
w_{An}	1.00												
w_{Po}	0.06	1.00											
w_{St}	0.07	-0.51 **	1.00										
w_{Rs}	0.10	0.13	-0.37 *	1.00									
w_{Ce}	0.02	0.43 **	-0.47 **	0.06	1.00								
w_{Cp}	-0.22	0.18	-0.57 **	0.04	0.08	1.00							
w_{Na}	-0.03	0.02	0.11	-0.04	0.27	-0.16	1.00						
w_{Ca}	0.19	0.26	-0.24	-0.11	0.23	0.33 *	0.14	1.00					
w_{Mg}	-0.14	-0.06	-0.37 *	-0.08	0.36 *	0.28	0.29	0.36 *	1.00				
w_{Cu}	-0.07	-0.11	0.19	-0.14	0.31 *	-0.21	0.77 **	-0.01	0.21	1.00			
w_{Fe}	0.06	0.27	-0.09	-0.21	0.15	0.17	-0.15	0.28	0.20	-0.34 *	1.00		
w_{Zn}	-0.31 *	0.16	-0.05	-0.30 *	0.17	0.06	-0.12	0.06	-0.11	-0.20	0.23	1.00	
w_{Mn}	-0.40 **	-0.03	-0.06	-0.01	0.11	-0.03	0.03	-0.28	0.09	0.00	0.19	0.17	1.00

¹⁾ w_{An} : 花色苷含量 Anthocyanin content; w_{Po} : 非淀粉多糖含量 Non-starch polysaccharide content; w_{St} : 淀粉含量 Starch content; w_{Rs} : 抗性淀粉含量 Resistant starch content; w_{Ce} : 纤维素含量 Cellulose content; w_{Cp} : 粗蛋白质含量 Crude protein content; w_{Na} : Na 含量 Na content; w_{Ca} : Ca 含量 Ca content; w_{Mg} : Mg 含量 Mg content; w_{Cu} : Cu 含量 Cu content; w_{Zn} : Zn 含量 Zn content; w_{Mn} : Mn 含量 Mn content. *: $P < 0.05$; **: $P < 0.01$.

含量呈显著负相关。

2.3 不同参薯品种(品系)的综合营养价值评价

为进一步确定各核心指标在参薯综合营养价值评价过程中的重要程度,对其权重进行计算,结果(表 5)显示:权重排名前 5 的指标分别为 Fe 含量、非淀粉多糖含量、Mn 含量、纤维素含量和 Ca 含量,权重分别为 0.204 2、0.123 3、0.115 6、0.097 8 和 0.077 3;抗性淀粉含量和 Na 含量的权重较小,分别为 0.039 4、0.038 1。

15 个参薯品种(品系)综合营养价值核心指标的灰色关联度分析及 K-means 聚类分析见表 6。结果显示:15 个参薯品种(品系)可分为 I、II 2 个等级,分别包含 5 和 10 个品种(品系)。I 级中,系马桩脚板薯排名第 1,加权灰色关联度为 0.709 8;其他 I 级品种(品系)为紫玉参薯、紫溪圆苕、抚州脚板薯和海南杂紫,加权灰色关联度分别为 0.597 7、0.572 9、0.553 4、0.552 1,综合营养价值较高。

表 5 参薯品种(品系)核心指标的信息熵、效用值及权重

Table 5 Information entropy, utility value and weight of core indexes of *Dioscorea alata* Linn. cultivars (lines)

指标 ¹⁾ Index ¹⁾	信息熵 Information entropy	效用值 Utility value	权重 Weight
w_{Fe}	0.775 2	0.224 8	0.204 2
w_{Po}	0.864 2	0.135 8	0.123 3
w_{Mn}	0.872 8	0.127 2	0.115 6
w_{Ce}	0.892 4	0.107 6	0.097 8
w_{Ca}	0.914 9	0.085 1	0.077 3
w_{Cp}	0.919 1	0.080 9	0.073 4
w_{Zn}	0.921 1	0.078 9	0.071 6
w_{St}	0.934 2	0.065 8	0.059 7
w_{Cu}	0.943 5	0.056 5	0.051 3
w_{Mg}	0.946 9	0.053 1	0.048 2
w_{Rs}	0.956 7	0.043 3	0.039 4
w_{Na}	0.958 1	0.041 9	0.038 1

¹⁾ w_{Po} : 非淀粉多糖含量 Non-starch polysaccharide content; w_{St} : 淀粉含量 Starch content; w_{Rs} : 抗性淀粉含量 Resistant starch content; w_{Ce} : 纤维素含量 Cellulose content; w_{Cp} : 粗蛋白质含量 Crude protein content; w_{Na} : Na 含量 Na content; w_{Ca} : Ca 含量 Ca content; w_{Mg} : Mg 含量 Mg content; w_{Cu} : Cu 含量 Cu content; w_{Fe} : Fe 含量 Fe content; w_{Zn} : Zn 含量 Zn content; w_{Mn} : Mn 含量 Mn content.

表6 15个参薯品种(品系)综合营养价值核心指标的灰色关联度分析及K-means聚类分析

Table 6 Grey relational analysis and K-means cluster analysis of core indexes of comprehensive nutritional values of 15 *Dioscorea alata* Linn. cultivars (lines)

品种(品系) Cultivar (line)	加权灰色 关联度 Weighted grey relational grade	排名 Ranking	等级 Grade
系马桩脚板薯 Ximazhuang Jiabanshu	0.709 8	1	I
紫玉参薯 Ziyu Shenshu	0.597 7	2	I
紫溪圆苕 Zixi Yuanshao	0.572 9	3	I
抚州脚板薯 Fuzhou Jiabanshu	0.553 4	4	I
海南杂紫 Hainan Zazi	0.552 1	5	I
紫皮白肉脚板薯 Zipibairou Jiabanshu	0.506 7	6	II
阳明山药 Yangmingshan Yam	0.488 0	7	II
紫玉山药 Ziyu Shanyao	0.477 4	8	II
苏黄4号 Suyu 4	0.461 3	9	II
周宁紫薯 Zhouning Zishu	0.458 0	10	II
苏黄6号 Suyu 6	0.455 4	11	II
苏黄2号 Suyu 2	0.436 5	12	II
塘背脚板薯 Tangbei Jiabanshu	0.429 1	13	II
万田紫薯 Wantian Zishu	0.412 8	14	II
赣州脚板薯 Ganzhou Jiabanshu	0.404 4	15	II

3 讨论和结论

近年来,作物的功能基因研究日益丰富,为作物育种改良和开发利用提供了极大帮助。将表型与基因型关联,从表型差异入手发掘功能基因是常见的研究思路^[29-30],这需要丰富的表型数据支撑。本研究比较了中国多个地理来源的不同肉色参薯品种(品系)中花色苷、营养成分和矿质元素含量,补充了中国参薯的营养品质信息。供试不同参薯品种(品系)中花色苷含量差异较大,且紫色参薯的花色苷含量显著($P<0.05$)高于白色参薯,说明参薯肉色变异与花色苷积累密切相关。花色苷是苯丙烷代谢途径的重要产物,其积累受遗传背景、关键结构基因表达水平以及转录因子调控等多因子共同影响^[31-33]。已有研究指出,紫色参薯中花色苷合成相关基因表达水平显著高于白色参薯,这是造成肉色差异的主要原因之一^[34]。参薯中含量最高的花色苷为矢车菊素的衍生物参薯素,也存在锦葵素和芍药素的衍生物^[11],这些成分不仅赋予参薯独特的外观性状,还具有较强的抗氧化、抗炎和延缓衰老等生物活性^[35-36]。本研究中,紫玉参薯、万田紫薯和塘背脚板薯中花色苷含量(分别为335.51、201.76和145.75 $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)总体显著高于其他品种(品系),表明这些品种在功能性食品开

发方面具有明显优势。另外,花色苷含量与Zn含量和Mn含量呈显著或极显著($P<0.01$)负相关,这可能是花色苷与金属离子络合所致^[37-38]。

此外,供试各品种(品系)在营养成分含量方面均表现出一定程度的变异。其中,淀粉及抗性淀粉含量的变异系数相对较小(分别为10.18%和7.56%),这与其他块茎类作物的情况相似^[39]。对非洲白山药(*D. rotundata* Poir.)的研究结果^[40]表明:其驯化过程中存在受选择作用的基因,包括淀粉生物合成和储存早期阶段的相关基因以及与光合作用和向光性相关的基因,这可能是参薯各品种(品系)淀粉含量相近的主要原因。非淀粉多糖含量的变异系数较大(42.88%)。非淀粉多糖是细胞壁的主要成分,还参与细胞信号传导等多种途径,其合成调控网络十分庞大^[41-42]。在驯化过程中,淀粉含量作为与产量和储藏直接相关的性状受到相似的强选择^[40,43],而非淀粉多糖含量则与抵御胁迫密切相关^[44-45]。非淀粉多糖的交联和生物合成的增加可以显著提升细胞壁的机械强度^[46-47]。本研究发现,参薯各品种(品系)的非淀粉多糖含量与淀粉含量呈极显著负相关,而与纤维素含量呈极显著正相关,这可能与驯化过程中的人工选择有关。

权重分析结果显示:权重排名前5的指标分别为Fe含量、非淀粉多糖含量、Mn含量、纤维素含量和Ca含量。其中,Fe含量最高的是系马桩脚板薯,非淀粉多糖含量最高的是紫玉参薯,Mn含量最高的海南杂紫,纤维素含量和Ca含量最高的均是抚州脚板薯。相关性结果显示Ca含量与粗蛋白质含量和Mg含量均呈显著正相关;粗蛋白质含量最高的是紫溪圆苕,Mg含量最高的是系马桩脚板薯。灰色关联度分析结果显示:系马桩脚板薯、紫玉参薯、紫溪圆苕、抚州脚板薯和海南杂紫的综合营养价值较高。上述结果说明Fe含量、非淀粉多糖含量、Mn含量、纤维素含量和Ca含量5个指标是评价参薯品质的关键指标。在植物体内,部分MYB和bHLH转录因子可通过影响IRT和FER基因的表达调控Fe含量的积累^[48];Mn在植物体内主要以 Mn^{2+} 形式存在,NRAMP1蛋白介导植物根部对 Mn^{2+} 的吸收,IRT和YSL则可能参与调控 Mn^{2+} 的吸收和转运^[49];CNGC、TPCI、CAX等多个基因参与Ca含量的调控^[50]。未来可结合代谢组学和分子生物学手段确认不同参薯品种(品系)间矿质元素差异积累的原因,从而针对特定矿质元素进行品

种改造。

综上所述,系马桩脚板薯、紫玉参薯、紫溪圆苕、抚州脚板薯和海南杂紫的综合营养价值较高,其中,紫玉参薯的花色苷含量明显高于其他品种(品系),适宜作为优良的食药保健产品开发原料。Fe含量和非淀粉多糖含量等5个指标是评价参薯品质的关键指标。栽培参薯遗传背景复杂,后续还需进行遗传多样性研究及营养成分合成和矿质元素运输的分子机制研究,以进一步为参薯育种提供参考。

参考文献:

- [1] ORKWOR G C, ASADU C L A. Agronomy[M]//ORKWOR G C, ASIEDU R, EKANAYAKE I J. Food yams: advances in research. Ibadan: International Institute of Tropical Agriculture, 1998: 105-142.
- [2] LEBOT V, LAWAC F, LEGENDRE L. The greater yam (*Dioscorea alata* L.): a review of its phytochemical content and potential for processed products and biofortification [J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2023, 115: 104987.
- [3] DEY P, ROY CHOWDHURI S, SARKAR M P, et al. Evaluation of anti-inflammatory activity and standardisation of hydro-methanol extract of underground tuber of *Dioscorea alata* [J]. Pharmaceutical Biology, 2016, 54(8): 1474-1482.
- [4] HSU C-C, HUANG Y-C, YIN M-C, et al. Effect of yam (*Dioscorea alata* compared to *Dioscorea japonica*) on gastrointestinal function and antioxidant activity in mice[J]. Journal of Food Science, 2006, 71(7): S513-S516.
- [5] KAUR B, KHATUN S, SUTTEE A. Current highlights on biochemical and pharmacological profile of *Dioscorea alata*: a review [J]. Plant Archive, 2021, 21(1): 552-559.
- [6] 陈阳, 林永胜, 李金贵. 22份紫山药种质资源的鉴定与评价[J]. 亚热带农业研究, 2024, 20(1): 23-29.
- [7] 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.
- [8] WU W, CHEN C, ZHANG Q, et al. A comparative assessment of diversity of greater yam (*Dioscorea alata*) in China [J]. Scientia Horticulturae, 2019, 243: 116-124.
- [9] KONG J M, CHIA L S, GOH N K, et al. Analysis and biological activities of anthocyanins [J]. Phytochemistry, 2003, 64(5): 923-933.
- [10] HE J, GIUSTI M M. Anthocyanins: natural colorants with health-promoting properties [J]. Annual Review of Food Science and Technology, 2010, 1(1): 163-187.
- [11] VISHNU V R, JYOTHI A N, SHEELA M N, et al. Identification of anthocyanins in a purple yam (*Dioscorea alata*) accession and their *in vitro* antiproliferative activity [J]. Journal of Plant Biochemistry and Biotechnology, 2023, 32(3): 467-477.
- [12] MATTOO A K, DWIVEDI S L, DUTT S, et al. Anthocyanin-rich vegetables for human consumption: focus on potato, sweetpotato and tomato [J]. International Journal of Molecular Sciences, 2022, 23(5): 2634.
- [13] SRIVICHAI S, HONGSPRABHAS P. Profiling anthocyanins in Thai purple yams (*Dioscorea alata* L.) [J]. 2020, 2020(1): 1594291.
- [14] ANIM A O, LUTTERODT H E, OFORI C W, et al. The impact of agricultural practices on food composition: a systematic review [J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2025, 148: 108388.
- [15] 杨婷, 沈石妍, 王智能, 等. 100份甘蔗种质资源营养成分分析及评价[J]. 热带作物学报, 2023, 44(3): 484-493.
- [16] MATHEW S E, SUMI M S, SHAKAPPA D. Comparative nutritional analysis of improved and local chickpea (*Cicer arietinum*) cultivars [J]. Plant Foods for Human Nutrition, 2024, 79: 539-544.
- [17] PANKAJ P, POONIA A, PHOGAT D S, et al. Comprehensive analysis of nutritional parameters and elemental diversity in oat genotypes: opportunities for crop improvement and food industry utilization [J]. Food Production, Processing and Nutrition, 2025, 7: 70.
- [18] WU Z G, JIANG W, NITIN M, et al. Characterizing diversity based on nutritional and bioactive compositions of yam germplasm (*Dioscorea* spp.) commonly cultivated in China [J]. Journal of Food and Drug Analysis, 2016, 24: 367-375.
- [19] PATEL K S, KARMAKAR N, DESAI K D, et al. Exploring of greater yam (*Dioscorea alata* L.) genotypes through biochemical screening for better cultivation in south Gujarat zone of India [J]. Physiology and Molecular Biology of Plants, 2019, 25: 1235-1249.
- [20] 孙志刚, 陈强, 苏俊武, 等. 云南24个紫山药品系的营养保健功能成分分析 [J]. 安徽农业科学, 2024, 52(6): 185-189, 254.
- [21] 张武君, 刘保财, 陈菁瑛, 等. 福建省山药种质资源品质比较与综合评价 [J]. 食品研究与开发, 2024, 45(9): 75-85.
- [22] LU R S, HU K, ZHANG F J, et al. Pan-plastome of greater yam (*Dioscorea alata*) in China: intraspecific genetic variation, comparative genomics, and phylogenetic analyses [J]. International Journal of Molecular Sciences, 2023, 24: 3341.
- [23] PROCTOR J T A. Color stimulation in attached apples with supplementary light [J]. Canadian Journal of Plant Science, 1974, 54: 499-503.
- [24] ALEXANDRE A M R C, MATIAS A A, BRONZE M R, et al. Phenolic compounds extraction of *Arbutus unedo* L.: process intensification by microwave pretreatment [J]. Processes, 2020, 8: 298.
- [25] RAPISARDA P, FANELLA F, MACCARONE E. Reliability of analytical methods for determining anthocyanins in blood orange juices [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2000, 48: 2249-2252.
- [26] 代立刚, 何煜, 王浩, 等. 谷物中总淀粉含量的测定方法

- [J]. 中国食物与营养, 2013, 19(6): 38-42.
- [27] 王学奎, 黄见良. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 3版. 北京: 高等教育出版社, 2015: 222-223.
- [28] 轩瑞瑞, 陈艳萍, 刘春菊, 等. 基于熵权法和灰色关联度法的鲜食糯玉米品质评价[J]. 食品工业科技, 2021, 42(14): 241-248.
- [29] BERNAL-GALLARDO J J, DE FOLTER S. Plant genome information facilitates plant functional genomics[J]. *Planta*, 2024, 259: 117.
- [30] YAN Q, ZHANG G, ZHANG X, et al. A review of transcriptomics and metabolomics in plant quality and environmental response: from bibliometric analysis to science mapping and future trends[J]. *Metabolites*, 2024, 14: 272.
- [31] XU W, DUBOS C, LEPINIEC L. Transcriptional control of flavonoid biosynthesis by MYB-bHLH-WDR complexes[J]. *Trends in Plant Science*, 2015, 20(3): 176-185.
- [32] MENCONI J, PERATA P, GONZALI S. In pursuit of purple: anthocyanin biosynthesis in fruits of the tomato clade[J]. *Trends in Plant Science*, 2024, 29(5): 589-604.
- [33] WU X, XIA M, SU P, et al. MYB transcription factors in plants: a comprehensive review of their discovery, structure, classification, functional diversity and regulatory mechanism [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2024, 282: 136652.
- [34] WANG Y, LU R S, LI M H, et al. Unraveling the molecular basis of color variation in *Dioscorea alata* tubers: integrated transcriptome and metabolomics analysis[J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2024, 25: 2057.
- [35] 肖杰, 刘曼露, 刘丹芳, 等. 紫山药花青素的提纯及其抗氧化性测定[J]. 食品工业, 2015, 36(3): 121-125.
- [36] 谭辉, 耿耘, 杨洋, 等. 紫山药花青素提取工艺及抗肿瘤活性筛选[J]. 现代中药研究与实践, 2018, 32(2): 41-44.
- [37] FEDENKO V S, LANDI M, SHEMET S A. Metallophenomics: a novel integrated approach to study complexation of plant phenolics with metal/metalloid ions[J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2022, 23: 11370.
- [38] TORRINI F, RENAI L, SCARANO S, et al. Colorimetric selective quantification of anthocyanins with catechol/pyrogallol moiety in edible plants upon zinc complexation [J]. *Talanta*, 2022, 240: 123156.
- [39] RINALDO D. Carbohydrate and bioactive compounds composition of starchy tropical fruits and tubers, in relation to pre and postharvest conditions: a review [J]. *Journal of Food Science*, 2020, 85(2): 249-259.
- [40] AKAKPO R, SCARCELLI N, CHAIR H, et al. Molecular basis of African yam domestication: analyses of selection point to root development, starch biosynthesis, and photosynthesis related genes [J]. *BMC Genomics*, 2017, 18: 782.
- [41] SOMERVILLE C, BAUER S, BRININSTOOL G, et al. Toward a systems approach to understanding plant cell walls[J]. *Science*, 2004, 306(5705): 2206-2211.
- [42] COSGROVE D J. Growth of the plant cell wall[J]. *Nature Reviews Molecular Cell Biology*, 2005, 6: 850-861.
- [43] MEYER R S, PURUGGANAN M D. Evolution of crop species: genetics of domestication and diversification[J]. *Nature Reviews Genetics*, 2013, 14: 840-852.
- [44] HAMANN T. Plant cell wall integrity maintenance as an essential component of biotic stress response mechanisms[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2012, 3: 77.
- [45] GALL H L, PHILIPPE F, DOMON J-M, et al. Cell wall metabolism in response to abiotic stress [J]. *Plants*, 2015, 4: 112-166.
- [46] HUANG W, SHI Y, YAN H, et al. The calcium-mediated homogalacturonan pectin complexation in cell walls contributes the firmness increase in loquat fruit during postharvest storage [J]. *Journal of Advanced Research*, 2023, 49: 47-62.
- [47] LIU X, ZHU Z, CHEN L, et al. Exogenous calcium-mediated reinforcement of cell wall represents a pivotal mechanism in rice's primed defense response against brown planthopper reproduction [J]. *Rice*, 2025, 18: 87.
- [48] LIANG G. Iron uptake, signaling, and sensing in plants[J]. *Plant Communications*, 2022, 3: 100349.
- [49] ALEJANDRO S, HÖLLER S, MEIER B, et al. Manganese in plants: from acquisition to subcellular allocation[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2020, 11: 300.
- [50] DEMIDCHIK V, SHABALA S, ISAYENKOV S, et al. Calcium transport across plant membranes: mechanisms and functions[J]. *New Phytologist*, 2018, 220: 49-69.

(责任编辑: 郭严冬)