

芋头挥发性代谢物分析及其品质综合评价

郭巨先¹ 黄家昕² 李桂花¹ 符梅¹ 罗文龙¹ 王俊² 陆美莲²

(¹广东省农业科学院蔬菜研究所/广东省蔬菜新技术研究重点实验室, 510640, 广东广州; ²仲恺农业工程学院, 510225, 广东广州)

摘要 芋头是一种重要的蔬菜兼粮食作物,其营养丰富且药用价值高,然而对于芋头品质性状的评价及分子机理的研究较少。以来源于我国不同地区的18个芋头品种为例,运用生物信息学方法系统评价其外观和营养物质指标,并利用GC-MS气质联用法对挥发性代谢物进行定性和定量分析。结果表明,魁芋芋头的单芋重、干物质和淀粉含量相对高于多子芋。不同芋头品种的品质指标存在明显差异,主成分分析降维方法分析到了4个独立的综合指标,其累计贡献率达82.31%,解释了芋头品质的大部分变异信息。综合得分排名前5名的全部是魁芋。以炭步香芋和花都红芋芋为例的代谢组学分析,共鉴定到76种挥发性代谢物,其中香型中显著上调的代谢物包括1-甲基乙基-萜和4-甲基-6-庚烯-4-油化物,说明这2种代谢物很可能与香味生物学功能有关。

关键词 芋头; 营养成分; 品质评价; 主成分分析; 挥发性代谢物

芋头[*Colocasia esculenta* (L.) Schoot]属天南星科多年生草本植物,是一种粮菜兼用作物,其营养丰富,含有多种矿物质和维生素,球茎可食用,同时具有药用价值,能提高机体免疫力,入药能治疗多种疾病,且用途广泛,在人体内能不同程度地增强细胞免疫和体液免疫的功能^[1-3]。芋头在我国具有多年的栽培历史,且虫害较少,氮素利用效率高,是高产多能的作物。国内种植区域大部分集中在珠江流域及台湾省,因受自身生长习性影响,分布趋向南方^[4-5]。随着种植面积的扩大和产业化的形成,栽培芋头已经成为我国南方地区的重要经济作物^[6-7]。我国广东地区芋头栽培历史悠久,在长期发展中形成了具有一定地方特色和知名度的品种^[7]。芋头的研究多集中在资源评价^[8-11]、栽培^[12]和加工^[13-14]等方面。芋头品种的评价因素有抗病性、产量性状、耐贮存性和营养品质等^[8-11],其中营养品质和产量性状是品种评价的重要因素。芋头作为一种大众食品,大部分研究^[13,15-22]仅对槟榔芋的淀粉理化性质以及香沙芋、红芽芋和槟榔芋的常规营养成分进行了检测和基本定量分析,而对芋头资源品质相关性状的综合评价研究^[10-11]较少,并且缺乏有效的数学分析方法对其进行系统评价。

主成分分析法具有综合评分指标和简化评价程序的功能,能够表达待测品种的综合信息,是一种科学的统计评价法;聚类分析按照相似归类的原

则,将分析对象划分成若干类群。结合2种分析方法,能够将性状相似、营养水平相等的品种划为同类,进行优良排序,该方法已经广泛用于农作物的综合评价^[22-23]。但是利用主成分分析法对芋头品质进行综合评价的研究少见报道。

本研究收集了18个来源于我国不同地区的芋头资源,测定了13个农艺性状和常规营养指标以及黄酮和总酚等功能保健成分,运用主成分分析法和代谢组学方法对芋头品质进行综合评价,从而筛选出综合品质较佳的品种,为我国芋头现代品种的选育和资源开发利用提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

本研究引进了各地的多子芋品种7个和魁芋品种11个(表1),于2019年2月25日定植于广东省农业科学院钟落潭试验基地,株行距40cm×50cm,采用露地单行种植,常规肥水管理。2019年12月20日统一采收。

1.2 测定项目与方法

1.2.1 外观品质指标 用GY-1手持式硬度计测定硬度,参考《芋种质资源描述规范和数据标准》^[24]和《农作物种质资源鉴定评价技术规范》^[25]测量芋头的纵径、横径和单芋重等形态指标,每个品种设置3个重复。

作者简介:郭巨先,主要从事蔬菜作物种质资源方面研究, E-mail: guojuxian2021@163.com

陆美莲为通信作者,主要从事蔬菜栽培生理方面研究, E-mail: 761412436@qq.com

基金项目:广东省驻镇帮镇扶村科技特派员项目(KTP20210007);广东省蔬菜新技术重点实验室开放课题(201906)

收稿日期:2021-08-20;修回日期:2021-09-14;网络出版日期:2022-07-19

表 1 供试芋品种和来源
Table 1 The names and origins of tested taro varieties

| 品种编号 Variety number | 品种名称 Variety name | 来源 Origin | 品种类别 Variety clustering |
|------------------------|----------------------------|--------------|----------------------------|
| 1 | 江西白芽芋 Jiangxibaiya taro | 江西寻乌 | 多子芋 |
| 2 | 广西红芽芋 Guangxihongya taro | 广西天等 | 多子芋 |
| 3 | 山东小毛芋 Shandongxiaomao taro | 山东日照 | 多子芋 |
| 4 | 常德紫禾芋 Changdezihe taro | 湖南常德 | 多子芋 |
| 5 | 常德红禾芋 Changdehonghe taro | 湖南常德 | 多子芋 |
| 6 | 花都红芽芋 Huaduhongya taro | 广东广州 | 多子芋 |
| 7 | 连州岭芋 Lianzhouling taro | 广东连州 | 多子芋 |
| 8 | 长亨香芋 Changtingxiang taro | 福建长亨 | 魁芋 |
| 9 | 荔浦香芋 Lipuxiang taro | 广西荔浦 | 魁芋 |
| 10 | 张溪香芋 Zhangxixiang taro | 广东乐昌 | 魁芋 |
| 11 | 始兴香芋 Shixingxiang taro | 广东始兴 | 魁芋 |
| 12 | 乳源香芋 Ruyuanxiang taro | 广东乳源 | 魁芋 |
| 13 | 连州香芋 Lianzhouxiang taro | 广东连州 | 魁芋 |
| 14 | 江西香芋 Jiangxixiang taro | 江西南非 | 魁芋 |
| 15 | 永州香芋 Yongzhouxiang taro | 湖南永州 | 魁芋 |
| 16 | 龙岩香芋 Longyanxiang taro | 福建龙岩 | 魁芋 |
| 17 | 儋州香芋 Danzhouxiang taro | 海南儋州 | 魁芋 |
| 18 | 炭步香芋 Tanbuxiang taro | 广东广州 | 魁芋 |

1.2.2 总酚及黄酮含量 参考李静等^[26]的方法测定芋头中总酚含量。参考邓菊庆等^[32]的方法测定芋头总黄酮含量。称取芋头根部约 2.5g，80℃烘干 24h 后，研成粉末，并用 60%乙醇萃取待测。精确称取芦丁标准溶液 0.0、0.2、0.4、0.7、1.2、1.6 和 2.0mL，用 60%乙醇溶解相应浓度后，于 510nm 波长测定吸光度，并根据样品吸光度计算样液的总黄酮含量。以没食子酸标准品 25mg，定容后制定标准曲线浓度，在 760nm 的紫外光下测定吸光度，计算对应的总酚含量。

1.2.3 常规营养品质 参考王鸿飞等^[28]的方法测定芋头中维生素 C (V_c) 的含量。按照王春霞等^[29]的方法测定直链淀粉和支链淀粉的含量。参考宋萍等^[30]的方法测定粗纤维含量。按照《食用菌中总糖含量的测定：GB/T 15672-2009》^[31]测定还原糖含量。依照《食品安全国家标准食品中蛋白质的测定：GB 5009.5-2016》^[32]测定蛋白质含量。

1.2.4 挥发性代谢组学 挥发性代谢物分析以外观和芋香味差异较大的炭步香芋和花都红芽芋为材料。从-80℃冰箱中取出样品进行液氮研磨，涡旋混合均匀，每个样本称取约 1g（液体 1mL）于顶空瓶中。分别加入 1~2mL 饱和 NaCl 溶液，10μL 内标溶液。全自动顶空固相微萃取 HS-SPME 进行

样本萃取，以供 GC-MS（Agilent 8890-5977B）分析。SPME 进样参数：老化温度 250℃，老化时间 5min；加热温度 60℃，加热时间 10min；吸附时间 20min；解析时间 5min；进样后老化时间 5min。

1.3 数据处理

主成分分析采用初始因子载荷矩阵旋转处理，目的是剔除重复信息，让矩阵系数更加显著。运用软件 SPSS 23.0 和 Excel 进行数据分析和处理。GC-MS 分析获取的原始数据文件首先由 MassHunter 软件（Agilent）进行峰提取，获得特征峰的质荷比、保留时间和峰面积等信息，然后进行统计学分析。

2 结果与分析

2.1 不同芋品种的外观指标

本研究中大部分芋头外观大小存在较大的形态学变异（表 2）。供试芋头品种外观指标的变异系数介于 36.30%~94.54%，说明芋头品种的硬度、大小和单芋重等外观变异较大。其中，多子芋单芋重为 37.73~119.67g，而魁芋的单芋重为 530.03~1900.01g，多子芋和魁芋的变异系数均超过 90%，可知芋头品种对单芋重的影响最大。其中，单芋重最大值与最小值相差达到 1862.27g，约为 50 倍。魁芋的纵径、横径和单芋重普遍大于多子芋，而硬度差异不显著。相关性分析（表 3）表明，硬度与纵径和单芋重均呈负相关，而纵径与横径和单芋重之间存在极显著正相关，说明外观指标间存在较强的相关性。

2.2 不同芋品种营养品质指标

各供试芋头品种基础营养指标存在较大变异（图 1），变异系数介于 11.10%~52.50%，说明芋头品种对营养品质的影响较大。变异系数排序为直链淀粉>支链淀粉>黄酮>还原糖>总酚>粗纤维>蛋白质>V_c>干物质。其中干物质的变异系数最小，为 11.10%。直链淀粉的变异系数最大，为 52.50%。其中，多子芋的干物质、直链淀粉和支链淀粉含量要普遍低于魁芋，有 5 个多子芋和 1 个魁芋的总酚含量相对较高，而 10 个魁芋品种的黄酮类物质相对含量较高。相关分析结果（表 4）显示，关键营养成分 V_c和直链淀粉含量均与总酚、黄酮和还原糖含量呈显著负相关。其中还原糖、直链淀粉和支链淀粉含量之间存在显著正相关，而该 3 个参数与粗纤维、还原糖和蛋白质含量呈显著负相关。

| 表 2 不同芋头品种的硬度、纵径、横径和单芋重的比较分析 | | | | |
|---|-----------------------------------|-------------------------------|-----------------------------|-------------------------|
| Table 2 Variation of hardness, longitudinal diameter, transverse diameter and weight per taro of different taro varieties | | | | |
| 品种编号 Variety number | 硬度 Hardness (kg/cm ²) | 纵径 Longitudinal diameter (cm) | 横径 Transverse diameter (cm) | 单芋重 Weight per taro (g) |
| 1 | 1.17±0.64de | 5.50±0.50h | 4.50±0.50fg | 58.33±13.09g |
| 2 | 2.40±1.23abcd | 7.00±0.50gh | 3.67±0.58gh | 68.33±13.48g |
| 3 | 2.20±0.20abcde | 5.33±0.58h | 3.01±0.01h | 39.17±11.18g |
| 4 | 2.60±0.79abc | 5.33±0.29h | 4.67±0.29fg | 81.23±7.43g |
| 5 | 2.17±0.91abcde | 5.33±1.26h | 4.51±0.50fg | 68.11±9.95g |
| 6 | 1.21±0.58de | 8.01±1.00gh | 4.67±0.29f | 119.67±16.44g |
| 7 | 1.61±0.26cde | 5.51±0.87h | 3.01±0.51h | 37.73±6.22g |
| 8 | 1.80±0.98abcde | 12.33±0.58ef | 8.00±0.01e | 590.71±71.05f |
| 9 | 1.03±0.35e | 11.01±1.12f | 8.02±0.01e | 635.00±36.40def |
| 10 | 1.63±1.31bcde | 22.00±1.73b | 10.33±0.58a | 1280.33±62.38c |
| 11 | 1.97±0.38abcde | 15.67±2.08c | 8.33±0.58de | 762.61±128.62def |
| 12 | 0.91±0.10e | 25.67±0.58a | 9.17±0.29bcd | 1614.63±156.18b |
| 13 | 2.57±0.93abc | 14.33±0.58cd | 8.33±0.58de | 734.50±58.34def |
| 14 | 3.13±0.12a | 13.01±1.01de | 9.54±0.51abc | 616.33±74.70ef |
| 15 | 2.80±0.36abc | 10.67±0.58f | 8.67±0.29cde | 644.41±14.86def |
| 16 | 2.97±0.42ab | 14.33±0.58cd | 9.33±0.58bc | 614.03±55.43ef |
| 17 | 0.90±0.10e | 11.00±0.50f | 7.83±0.76e | 530.03±28.47f |
| 18 | 0.91±0.10e | 27.33±0.58a | 9.67±0.29ab | 1900.01±100.01a |
| 平均值 Average | 1.89 | 12.19 | 6.95 | 577.51 |
| 变异系数 CV (%) | 48.94 | 55.91 | 36.30 | 94.54 |

不同字母代表 0.05 水平下差异显著，下同
Different letters represent the significant difference at $P < 0.05$, the same below

| 表 3 不同芋头品种各外观品质指标的皮尔森相关性分析 | | | | |
|--|-------------|--------------------------|------------------------|---------------------|
| Table 3 Pearson correlation analysis on appearance quality indexes of different taro varieties | | | | |
| 指标 Index | 硬度 Hardness | 纵径 Longitudinal diameter | 横径 Transverse diameter | 单芋重 Weight per taro |
| 硬度 Hardness | 1.000 | | | |
| 纵径 Longitudinal diameter | -0.303 | 1.000 | | |
| 横径 Transverse diameter | 0.000 | 0.815** | 1.000 | |
| 单芋重 Weight per taro | -0.326 | 0.987** | 0.823** | 1.000 |

“**” 代表 0.01 水平下相关性显著，下同
“**” represents the significant correlation at $P < 0.01$, the same below

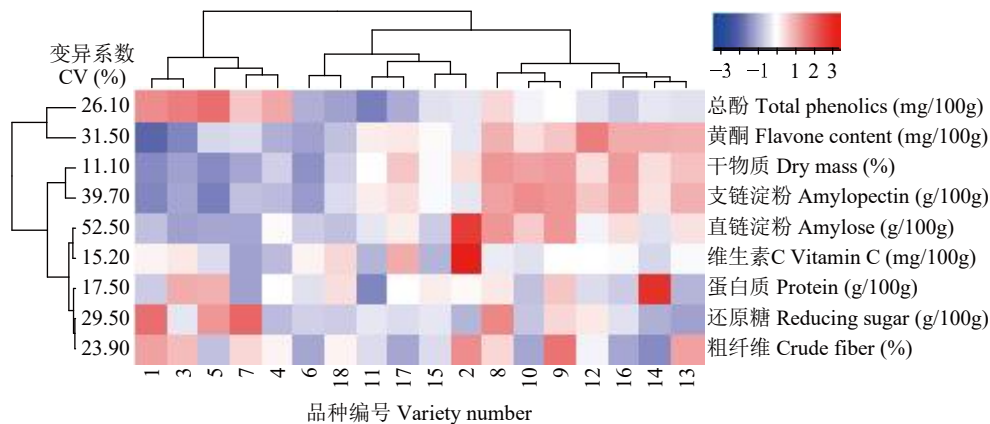


图 1 18 个芋头品种的营养品质相关参数的变异
Fig.1 Variation of quality indexes in 18 taro varieties

2.3 芋头品种性状的主成分分析

由表 5 可知，前 4 个主成分累计贡献率达 82.31%，能反映芋头营养品质参数变异的大部分信息，因此选取前 4 个主成分进行芋头品种综合分

析。第 1 主成分贡献率达到 41.42%，主要代表横径、支链淀粉、干物质、黄酮、纵径和单芋重等特征；第 2 主成分贡献率达到 16.96%，主要代表直链淀粉、V_c和粗纤维的特征信息；第 3 主成分贡

表 4 9 个营养品质相关指标的皮尔森相关性分析
Table 4 Pearson correlation analysis on the nine quality related indexes

| 指标 Index | V _c | 总酚 Total phenolics | 黄酮 Flavone | 直链淀粉 Amylose | 支链淀粉 Amylopectin | 粗纤维 Crude fiber | 还原糖 Reducing sugar | 蛋白质 Protein | 干物质 Dry mass |
|--------------------|----------------|-----------------------|---------------|-----------------|---------------------|--------------------|-----------------------|----------------|-----------------|
| V _c | 1.000 | | | | | | | | |
| 总酚 Total phenolics | -0.153 | 1.000 | | | | | | | |
| 黄酮 Flavone | -0.106 | -0.455 | 1.000 | | | | | | |
| 直链淀粉 Amylose | 0.602** | -0.246 | 0.430 | 1.000 | | | | | |
| 支链淀粉 Amylopectin | -0.029 | -0.490* | 0.868** | 0.588* | 1.000 | | | | |
| 粗纤维 Crude fiber | 0.320 | 0.213 | 0.341 | 0.338 | -0.057 | 1.000 | | | |
| 还原糖 Reducing sugar | -0.285 | 0.548* | -0.191 | -0.255 | -0.273 | 0.254 | 1.000 | | |
| 蛋白质 Protein | 0.098 | 0.244 | 0.034 | -0.036 | -0.089 | -0.119 | -0.144 | 1.000 | |
| 干物质 Dry mass | 0.220 | -0.872 | 0.853 | 0.698 | 0.809 | -0.510 | -0.782 | -0.469 | 1.000 |

表 5 4 个主成分的特征值、贡献率及累计贡献率
Table 5 The eigenvalues, contribution rates and the accumulative contribution rates of four principal components

| 品质指标 Quality index | 主成分 1 PC1 | 主成分 2 PC2 | 主成分 3 PC4 | 主成分 4 PC4 |
|--|--------------|--------------|--------------|--------------|
| 硬度 Hardness | -0.02 | 0.24 | -0.85 | 0.06 |
| 纵径 Longitudinal diameter | 0.81 | -0.37 | 0.26 | -0.13 |
| 横径 Transverse diameter | 0.91 | -0.27 | -0.10 | 0.06 |
| 单芋重 Weight per taro | 0.79 | -0.39 | 0.27 | -0.10 |
| V _c | 0.03 | 0.68 | 0.28 | -0.56 |
| 总酚 Total phenolics | -0.72 | 0.11 | -0.10 | 0.43 |
| 黄酮 Flavone | 0.83 | 0.09 | -0.18 | 0.36 |
| 直链淀粉 Amylose | 0.45 | 0.84 | 0.11 | 0.02 |
| 支链淀粉 Amylopectin | 0.89 | 0.22 | -0.02 | 0.33 |
| 粗纤维 Crude fiber | -0.25 | 0.56 | 0.49 | 0.21 |
| 干物质 Dry mass | -0.85 | -0.40 | 0.06 | -0.26 |
| 还原糖 Reducing sugar | -0.46 | -0.15 | 0.37 | 0.67 |
| 蛋白质 Protein | -0.06 | 0.11 | -0.56 | -0.11 |
| 特征值 Eigenvalue | 5.38 | 2.20 | 1.74 | 1.37 |
| 贡献率 Contribution rate (%) | 41.42 | 16.96 | 13.41 | 10.52 |
| 累计贡献率 Accumulative contribution rate (%) | 41.42 | 58.38 | 71.79 | 82.31 |

献率达到 13.41%，主要代表粗纤维、蛋白质和 V_c 的特征信息；第 4 个主成分贡献率达到 10.52%，主要代表还原糖和总酚的特征信息。

2.4 不同芋品种的综合评价

根据主成分得分结果，构建了 4 个主成分的函数表达式，并得出各自的得分，根据方差贡献率对各个主成分进行赋值，得出公式 $F=0.4142\times F_1+0.1696\times F_2+0.1341\times F_3+0.1052\times F_4$ ，由此求出各芋头品种主成分得分（表 6）。对 18 个芋头品种的品质性状进行综合评价。由表 6 可知，第 1 主成分中除龙岩香芋外，其余 10 个魁芋品种得分都较高，而 7 个多子芋品种在第 1 主成分中得分均为负值。炭步香芋、张溪香芋和乳源香芋的第 1 主成分大于 1，说明魁芋品种的优势在单芋重和淀粉等质量性状和黄酮等功能成分含量上。广西红芽芋和荔浦香芋在第 2 主成分得分较高，说明这 2 个品种在粗纤维和 V_c 含量上具有优势。江西白芽

表 6 供试芋品种的主成分得分及其排序
Table 6 The scores of the principal components and the ranking of the excellent degree of the quality of taro varieties

| 品种编号 Variety number | 主成分 1 PC1 | 主成分 2 PC2 | 主成分 3 PC3 | 主成分 4 PC4 | 前 4 名 PC Top 4 of PC | 排序 Ranking |
|------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|-------------------------|---------------|
| 1 | -1.76 | -0.15 | 1.31 | 0.46 | -0.78 | 14 |
| 2 | -0.15 | 3.02 | 0.41 | -1.59 | 0.08 | 8 |
| 3 | -1.70 | 0.21 | -0.48 | -0.47 | -0.95 | 16 |
| 4 | -1.40 | 0.27 | -0.88 | -0.06 | -0.66 | 13 |
| 5 | -2.01 | -0.64 | -0.78 | 0.53 | -0.98 | 17 |
| 6 | -1.13 | -0.68 | 0.20 | -1.65 | -1.19 | 18 |
| 7 | -2.14 | -0.65 | 0.71 | 1.38 | -0.80 | 15 |
| 8 | 0.36 | 0.80 | 0.25 | 1.86 | 0.88 | 3 |
| 9 | 0.30 | 1.19 | 0.84 | 1.22 | 0.75 | 4 |
| 10 | 2.37 | -0.42 | 0.18 | 0.15 | 1.15 | 1 |
| 11 | 0.51 | -0.83 | 0.23 | -0.13 | 0.04 | 9 |
| 12 | 2.32 | -0.85 | 1.16 | 0.34 | 1.09 | 2 |
| 13 | 0.69 | 0.64 | -0.13 | 0.27 | 0.56 | 7 |
| 14 | 0.24 | -0.28 | -2.58 | -0.26 | -0.01 | 10 |
| 15 | 0.83 | 0.17 | -1.00 | 0.38 | 0.57 | 6 |
| 16 | -0.34 | -0.59 | -1.09 | 0.09 | -0.26 | 12 |
| 17 | 0.28 | 0.14 | 0.36 | -0.87 | -0.07 | 11 |
| 18 | 2.70 | -1.34 | 1.27 | -1.70 | 0.58 | 5 |

芋、炭步香芋和乳源香芋在第 3 主成分得分较高，说明这些品种在 V_c 、膳食纤维和直链淀粉含量上都有较强的优势。龙岩香芋和连州岭芋在第 4 主成分得分最高，说明这 2 个品种还原糖和酚类物质具有优势。

2.5 差异性挥发性代谢物分析

通过 GC-MS 气质联用法，进一步分析了炭步香芋（魁芋）和花都红芽芋（多子芋）的差异挥发

性代谢物。相对于花都红芽芋，炭步香芋具有更长根茎（图 2a）。主成分分析（图 2b）证明了 2 种芋头品种之间的差异比较明显。共鉴定到 76 种挥发性代谢物，这些代谢物丰度差异不同（图 2c）。通过差异丰度代谢物分析，共发现了 2 种极显著上调的代谢物（图 2d）。这 2 种代谢物包括 1-甲基乙基-萘和 4-甲基-6-庚烯-4-油化物（表 7）。因此，这 2 种显著上调的代谢物很可能与炭步香芋香味

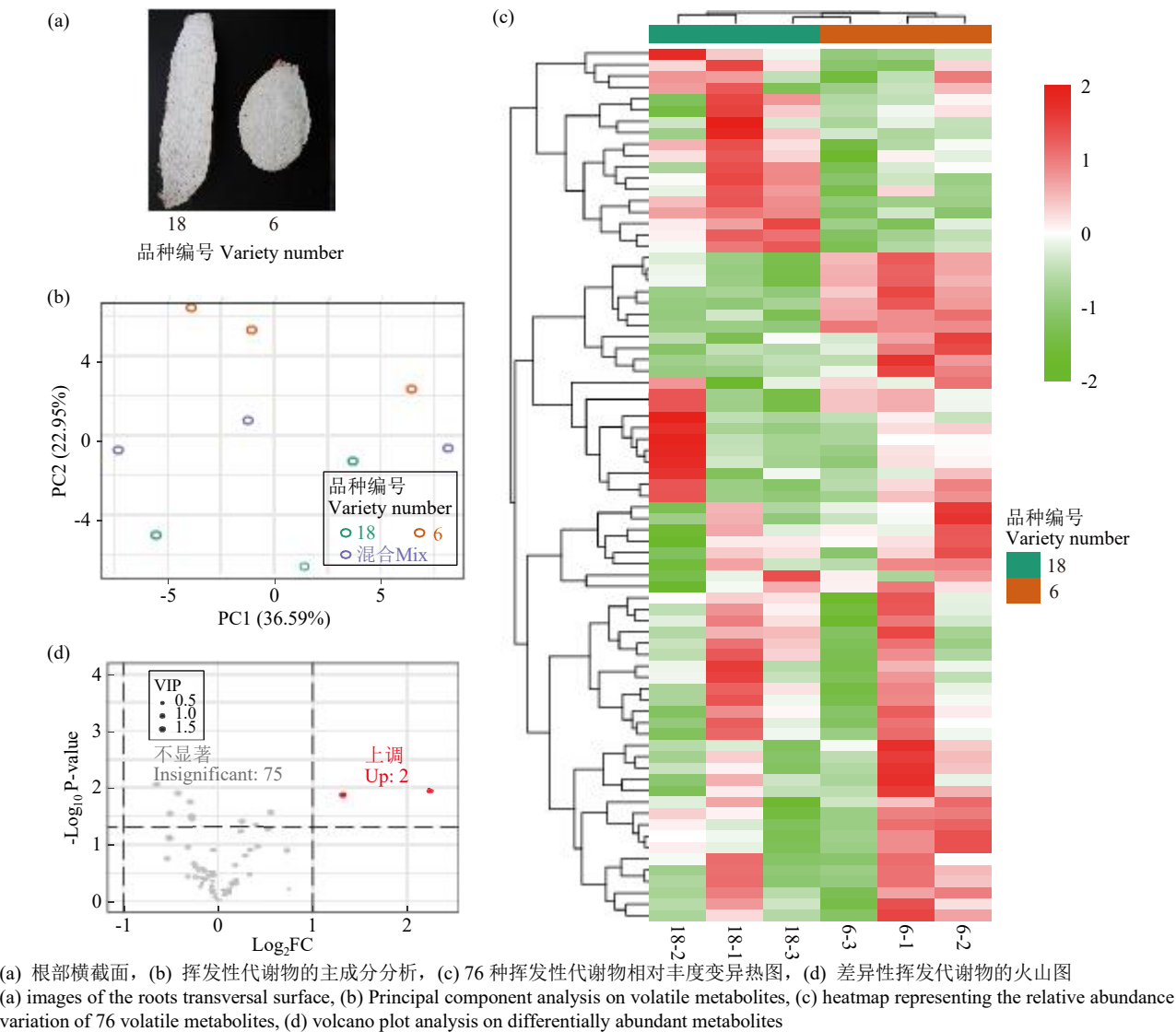


图 2 炭步香芋和花都红芽芋的差异挥发性代谢物比较

Fig.2 Comparison on quality related traits and correlation analysis in Tanbuxiang taro and Huaduhongya taro

表 7 芋头的 2 种差异性挥发性代谢物

Table 7 Two significantly enriched metabolites in two taro varieties

| 物质 Compound | 保留时间 Retention time (min) | 品种编号 Variety number | | P 值 P value | Log ₂ FC | 调控 Regulation |
|---|------------------------------|---------------------|---------------|----------------|---------------------|------------------|
| | | 6 | 18 | | | |
| 4-甲基-6-庚烯-4-油化物 4-methyl-6-hepten-4-olide | 24.7097 | 30.10±7.24a | 156.10±30.68a | 0.015214 | -2.37471 | 上调 |
| 1-甲基乙基-萘 1-methylethyl-naphthalene | 22.0401 | 3.45±1.34b | 8.61±0.50b | 0.013334 | -1.31847 | 上调 |

的生物学特性有关。

3 讨论

芋头是一种重要的蔬菜兼粮食作物,提高芋头的经济价值一直是我国芋头高产优质育种的核心。对于芋头经济价值的评估,首先要系统调查芋头相关经济性状的自然变异,对于开展芋头的分子设计育种亦至关重要^[33-35],然而国内外对该方面相关报道很少。本研究通过整合各项形态学指标、生理生化参数以及代谢组学分析,系统阐述了芋头不同品种间的遗传变异,揭示了影响芋头香气的关键小分子代谢物。

3.1 芋头感观与营养品质分析

种质资源是进行育种、科研和生产的重要物质基础。目前国内芋头种质资源最丰富的是国家种质武汉水生蔬菜资源圃,该资源圃共收集并保存了来自全国各地的芋头种质资源 400 多份^[33]。如何对芋头的种质资源进行系统评价是芋头现代育种的重要科学问题。本研究以来自我国不同生态区收集的 18 个芋头品种为例,系统分析了各形态学指标及生理学参数,并证明了各品质性状存在着遗传差异,且变异范围广,尤其是单芋重、纵径、直链淀粉和支链淀粉,说明供试品种中这些营养指标蕴含着巨大的改良潜力。

3.2 芋头香气品质相关代谢物分析

香气是芋头食味品质最重要的指标之一。前人^[34-36]根据芋头的食味品质进行了分级,然而并没有一个量化的指标。随着代谢组学的发展,挥发性代谢物的检测已经成为经济作物品质评价的重要手段之一^[37-38]。本研究利用 GC-MS 气质联用的方法,对炭步香芋和花都红芽芋的挥发性代谢物进行系统分析,共鉴定到了 76 种挥发性代谢物,其中炭步香芋 1 甲基乙基-萘和 4-甲基-6-庚烯-4-油化物较花都红芽芋显著上调,这 2 种代谢物的生理学功能目前并没有相关报道,推测这 2 种代谢物与芋头香气的分子调控有关,对于多子芋和魁芋的香气相关代谢物仍需要分子生物学研究。

3.3 基于主成分分析的芋头品种综合评价

主成分分析法具有简化评价指标的功能。前人^[22-23]对于园艺经济作物的果实品质方面已有大量研究。本研究通过主成分降维的方法,将 13 项评价指标简化成 4 个互相独立的综合指标(主成分),其特征值均大于 1,累积贡献率高达 82.31%,

说明 4 个主成分反映了品质性状的大部分特征信息。结果显示,魁芋综合排名前 5 位依次是张溪香芋>乳源香芋>长亭香芋>荔浦香芋>炭步香芋;多子芋以广西红芽芋综合得分最高。

4 结论

从综合评分排序来看,魁芋排名较前的 5 个品种分别是张溪香芋、乳源香芋、长亭香芋、荔浦香芋和炭步香芋,排名较前的几个品种分别从广东、广西和福建收集而来,说明这几个地区是芋头生长的优势产区。广西红芽芋综合排名第 8 位,在多子芋中排名第 1 位,是优质的多子芋品种。相对于花都多子芋,炭步香芋中显著上调的代谢物包括 1-甲基乙基-萘和 4-甲基-6-庚烯-4 油化物,说明这 2 种代谢物很可能是槟榔芋品种产生芋香味的主要原因。

参考文献

- [1] 金有景. 抗癌食药本草(上卷). 北京: 中国食品出版社, 1989.
- [2] 赵国华, 陈宗道, 王斌. 芋头多糖的理化性质及体内免疫调节活性研究. 中国食品学报, 2002, 2(3): 22-25.
- [3] Riberiro P P, Bertozzi A M, Nitzsche T F, et al. Anticancer and immunomodulatory benefits of taro (*Colocasia esculenta*) corms, an underexploited tuber crop. International Journal of Molecular Sciences, 2020, 22(1): 265-265.
- [4] 吴征镒, 李恒. 中国植物志: 第 13 卷·第 2 分册. 北京: 科学出版社, 1979.
- [5] 刘珍环, 杨鹏, 吴文斌, 等. 近 30 年中国农作物种植结构时空变化分析. 地理学报, 2016, 71(5): 840-851.
- [6] 杨建国, 皮向红, 李倩, 等. 湖南香芋产业现状、问题及发展建议. 湖南农业科学, 2020(3): 103-105.
- [7] 戴修纯, 罗燕羽, 黄绍力, 等. 广东省芋头产业现状与发展对策. 广东农业科学, 2021, 48(6): 126-135.
- [8] Alexandra S, Jamora N, Smale M, et al. The tale of taro leaf blight: a global effort to safeguard the genetic diversity of taro in the Pacific. Food Security, 2020, 12(5): 1005-1016.
- [9] Irwin S V, Kaufusi P, Banks K, et al. Molecular characterization of taro (*Colocasia esculenta*) using RAPD markers. Euphytica, 1998, 99(3): 183-189.
- [10] 黄新芳, 彭静, 柯卫东, 等. 206 份芋种质资源品质性状分析. 植物遗传资源学报, 2014, 15(3): 519-525.
- [11] Dong W Q, He F L, Wei S L, et al. Identification and characterization of SSR markers in taro [*Colocasia esculenta* (L.) Schott] by RAD sequencing. Genetic Resources and Crop Evolution, 2021, 19(6): 1-9.
- [12] Huang D F, Luo T. Yuetian soil conditioner can enhance the output, decrease the concentration of heavy metals of areca taro and reduce soil acidity. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 1732(1): 12-19.
- [13] 郭华, 周建平, 彭丽君. 槟榔芋淀粉理化特性初探. 食品科学, 2003, 24(1): 51-55.
- [14] Wongsagonsup R, Nateelardpaisan T, Gross C, et al. Physicochemical properties and in vitro digestibility of flours and

- starches from taro cultivated in different regions of Thailand. *International Journal of Food Science and Technology*, 2020, 56(5): 2395-2406.
- [15] Anwer M, McConnell M, Bekhit A E. New freeze-thaw method for improved extraction of water-soluble non-starch polysaccharide from taro (*Colocasia esculenta*): optimization and comprehensive characterization of physico-chemical and structural properties. *Food Chemistry*, 2021, 349(4): 219-210.
- [16] 姜绍通, 程元珍, 郑志, 等. 红芋芽营养成分分析及评价. *食品科学*, 2012, 33(11): 269-272.
- [17] 朱苗, 李刚凤, 詹露菲, 等. 铜仁芋食用部位营养成分测定与分析. *铜仁学院学报*, 2018, 20(3): 20-23.
- [18] 蔡建荣, 林金虎, 陈红玉, 等. 槟榔芋新品种‘汀芋 1 号’选育研究. *福建农业学报*, 2015, 30(8): 789-792.
- [19] 戴南火. 槟榔芋品种比较试验. *福建农业科技*, 2013 (增 1): 53-54.
- [20] 汪敏, 赵永富, 胡广玲, 等. 辐照处理对芋头发芽及食用品质的影响. *核农学报*, 2016, 30(8): 1534-1539.
- [21] 黄新芳, 孙亚林, 柯卫东, 等. 绿柄红芽多子芋品种比较筛选试验. *长江蔬菜*, 2020(8): 36-38.
- [22] 宋江峰, 刘春泉, 姜晓青, 等. 基于主成分与聚类分析的菜用大豆品质综合评价. *食品科学*, 2015, 36(13): 12-17.
- [23] 林蝉蝉, 何舟阳, 单文龙, 等. 基于主成分与聚类分析综合评价杨凌地区红色鲜食葡萄果实品质. *果树学报*, 2020, 37(4): 520-532.
- [24] 黄新芳, 柯卫东. 芋种质资源描述规范和数据标准. 北京: 中国农业出版社, 2006.
- [25] 中华人民共和国农业部. 农作物优异种质资源鉴定评价技术规范 芋: NY/T 2327-2013. 北京: 中国标准出版社, 2013.
- [26] 李静, 聂继云, 李海飞, 等. Folin-酚法测定水果及其制品中总多酚含量的条件. *果树学报*, 2008, 25(1): 126-131.
- [27] 邓菊庆, 柏春玲, 杨学芳, 等. 紫外可见分光光度法测定不同品种柑橘皮中总黄酮含量. *安徽农业科学*, 2020, 48(9): 210-211, 252.
- [28] 王鸿飞, 邵兴峰. 果品蔬菜贮藏与加工实验指导. 北京: 科学出版社, 2012.
- [29] 王春霞, 孙领霞, 刘满英. 双波长分光光度法测定河北省多种粮豆作物中直、支链淀粉含量. *光谱实验室*, 1999, 18(3): 36-38.
- [30] 宋萍, 蔡义民, 兰庆瑜, 等. 青海不同地区青稞秸秆中粗纤维含量的测定. *化学世界*, 2009, 6(11): 336-338.
- [31] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 食用菌中总糖含量的测定: GB/T 15672-2009. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- [32] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. 食品安全国家标准 食品中蛋白质的测定: GB 5009.5-2016. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- [33] 黄新芳, 柯卫东, 刘义满, 等. 芋优异种质资源鉴定评价研究. *长江蔬菜*, 2013, 37(18): 85-91.
- [34] Yin J, Jiang L, Wang L, et al. A high-quality genome of taro [*Colocasia esculenta* (L.) Schott], one of the world's oldest crops. *Molecular Ecology Resources*, 2021, 21(15): 68-77.
- [35] Donkor E F, Nyadanu D, Akromah R, et al. Genotype-by-environment interaction and stability of taro [*Colocasia esculenta* (L.) Schott.] genotypes for yield and yield components. *Ecological Genetics and Genomics*, 2020, 17(21): 100-107.
- [36] 殷剑美, 张培通, 王立, 等. 芋头食味品质评价方法的建立与应用. *长江蔬菜*, 2017, 24(7): 11-17.
- [37] 汪甚彤, 王丽, 孙敏, 等. 芋头叶柄泡菜泡制工艺优化及其香气物质研究. *湖北农业科学*, 2021, 60(2): 137-143, 179.
- [38] Bouwmeester H, Schuurink R C, Bleeker P M, et al. The role of volatiles in plant communication. *The Plant Journal*, 2019, 13(5): 124-135.

Volatiles Metabolites Analysis and Evaluation on Quality Traits of Different Taro Varieties

Guo Juxian¹, Huang Jiaxin², Li Guihua¹, Fu Mei¹, Luo Wenlong¹, Wang Jun², Lu Meilian²

(¹Vegetable Research Institute, Guangdong Academy of Agricultural Sciences/Guangdong Key Laboratory for New Technology Research of Vegetables, Guangzhou 510640, Guangdong, China;

²Zhongkai University of Agriculture and Engineering, Guangzhou 510225, Guangdong, China)

Abstract Taro is an important vegetable as well as a staple crop, which is abundant in nutrition and drugs components. However, the studies on the evaluation of taro quality traits and its molecular mechanism were less reported. We systematically evaluated the appearance and nutrient indexes of 18 taro varieties derived from different ecological regions of China by bioinformatics methods, and quantitatively and qualitatively determined the relative abundance of volatiles metabolites with GC-MS approach. The results showed that weight per taro, dry mass and starch contents were relatively higher in Kui taro than that in Duozi taro. The quality traits in different taro varieties exert huge variation. Principal component analysis (PCA) revealed the four independent indexes from the determined quality traits, with 82.31% accumulative contribution rates, which reflected the majority variation information. The top five comprehensive scores were found to belong to Kui taro. Furthermore, we analyzed the differentially abundant volatiles metabolites in Tanbu xiang taro and Huaduhongya taro, and identified 76 volatiles metabolites, including two extremely upregulated metabolites, 4-methyl-6-hepten-4-olide and 1-methylethyl-naphthalene, especially in Tanbuxiang taro. The two key metabolites are very likely related to the biological function of aromatic profiles.

Key words Taro; Nutritional components; Quality evaluation; Principal component analysis; Volatiles metabolites