

云南干热河谷 4 个番荔枝品种果实品质和初级代谢物分析

朱银潇^{1,2}, 张碧蓉¹, 丁海云⁴, 刘伟杰^{1,2}, 闫素云¹, 段敏仙¹, 程运江², 李健文⁴, 李健琪^{3*}, 周先艳^{1*}

1. 云南省农业科学院热带亚热带经济作物研究所, 云南保山 678000; 2. 华中农业大学, 湖北武汉 430000; 3. 元江哈尼族彝族傣族自治县农田农机管理服务中心, 云南元江 653300; 4. 元江哈尼族彝族傣族自治县种植业发展服务中心, 云南元江 653300

摘要: 为探究云南干热河谷 4 个番荔枝品种的果实品质, 以及果肉初级代谢物组分与含量差异, 筛选适宜在干热河谷区种植的高营养价值与高糖的番荔枝品种。本研究以云南干热河谷区的 4 个番荔枝品种[AP (African pride) 番荔枝、大目释迦、凤梨释迦、榴莲释迦]为试验材料, 测定其果实品质, 并运用气相色谱-质谱 (GC-MS) 联用技术测定果肉初级代谢物的组分与含量。通过单因素方差分析 (ANOVA)、主成分分析 (PCA) 和偏最小二乘法判别分析 (PLS-DA) 进行综合评价。结果显示, 在云南干热河谷区 4 个番荔枝品种中, AP 番荔枝的单果质量最大; 大目释迦的果形为扁圆形, 其余 3 个品种均为椭圆形; 凤梨释迦的果实偏斜度 (DD) 最小; 榴莲释迦的果实可溶性固形物 (TSS) 含量最高。4 个番荔枝品种的果肉共检出 43 种初级代谢物, 其中氨基酸 9 种, 有机酸 13 种, 肌醇 1 种及可溶性糖 20 种。通过主成分分析 (PCA), 榴莲释迦和大目释迦与其他品种明显分离; 偏最小二乘法判别分析 (PLS-DA) 以 $VIP \geq 1$ 筛选出 19 种初级代谢物为特征性差异代谢物。从基本品质和初级代谢物水平来看, 榴莲释迦的果实 TSS 及初级代谢物含量均最高, 凤梨释迦的 TSS 含量适中且外规最规整。因此, 这 2 个番荔枝品种可作为高营养价值和高糖品种在干热河谷区推广种植。

关键词: 番荔枝; 果实品质; 初级代谢物; 干热河谷

中图分类号: S667.9 文献标志码: A

Fruit Quality and Primary Metabolite Analysis of Four Custard Varieties in the Dry and Hot River Valley of Yunnan

ZHU Yinxiao^{1,2}, ZHANG Birong¹, DING Haiyun⁴, LIU Weijie^{1,2}, YAN Suyun¹, DUAN Minxian¹, CHENG Yunjiang², LI Jianwen⁴, LI Jianqi^{3*}, ZHOU Xianyan^{1*}

1. Institute of Tropical and Subtropical Cash Crops, Yunnan Academy of Agricultural Sciences, Baoshan, Yunnan 678000, China; 2. Huazhong Agricultural University, Wuhan, Hubei 430000, China; 3. Yuanjiang Hani Yi Dai Autonomous County Farmland and Agricultural Machinery Management Service Center, Yuanjiang, Yunnan 653300, China; 4. Yuanjiang Hani Yi Dai Autonomous County Cultivation Development Service Center, Yuanjiang, Yunnan 653300, China

Abstract: Fruit quality is the key indicator to measure the commodity value of fruit, and the indicators such as single fruit weight, fruit shape and fruit determination degree (DD) are particularly crucial, which directly affect consumers' desire to buy. In addition, primary metabolites are indispensable substances in the process of plant growth and development, which are widely present in all plants, providing basal metabolites and energy support for plant growth, development and reproduction. Primary metabolites such as sugars, organic acids, amino acids and inositol are the key factors affecting fruit quality, and they are also important criteria for measuring fruit flavor and texture. With the improvement

收稿日期 2025-05-27; 接受日期 2025-10-09

基金项目 云南省科技厅科技人才与平台计划项目 (No. 202105AD160049); 德宏州英才兴边计划项目 (No. 2022RC010, No. 2022RC015)。

作者简介 朱银潇 (2001—), 女, 本科生, 研究方向: 农产品加工贮藏。*通信作者 (Corresponding author): 周先艳 (ZHOU Xianyan), E-mail: lyfzhouxianyan@163.com; 李健琪 (LI Jianqi), E-mail: ljg6013250@163.com。

of consumers' living standards and the pursuit of healthy fruits, a large amount of data is needed to screen out *Annona squamosa* varieties with high nutritional value and high sugar. Yunnan's hot and dry valley climate provides an excellent environment for the fruit to thrive. In order to explore the differences in fruit quality and the composition and content of primary metabolites in the pulp of the four varieties of *A. squamosa* in the dry and hot river valley of Yunnan Province, the varieties with high nutritional value and high sugar were screened. Four varieties (AP, Damu, Fengli and Liulian) from the planting base of Yuanjiang County, Yuxi City, Yunnan Province were used as the test materials. Gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS) was used to determine the composition and content of primary metabolites per unit weight of fresh fruit pulp, and the one-way analysis of variance (ANOVA), principal component analysis (PCA) and partial least squares discriminant analysis (PLS-DA) were used for comprehensive analysis and evaluation. Among the four cultivars in the dry-hot valley area of Yunnan, AP *A. squamosa* had the largest single fruit weight. The content of soluble solids (TSS) in Liulian *A. squamosa* was the highest. The fruit shape of the Damu *A. squamosa* is oval, and the other three varieties are oblong; The fruit DD of Fengli *A. squamosa* was the smallest, and there was no significant difference among the other three cultivars. A total of 43 primary metabolites were detected in the pulp of the four cultivars, including 9 amino acids, 13 organic acids, inositol and 20 soluble sugars. Further analysis of the contents of various primary metabolites in the pulp of the four varieties showed that the contents of sucrose, fructose, glucose, allulose, citric acid and malic acid were the main among the 43 primary metabolites. The contents of glucose, allulose, citric acid and malic acid in Liulian *A. squamosa* were significantly higher than those of other varieties, and the contents of sucrose and fructose in AP *A. squamosa* were significantly higher than those of other varieties. In addition, some primary metabolites had significant cultivar specificity, among which leucine, acetamide acid, xylulose and threonate were only detected in AP *A. squamosa*. Trehalose is only detected in Liulian *A. squamosa*. Principal component analysis (PCA) showed that the variance contribution rate of PC1 was 48.3%, that of PC2 was 25.8%, and that of cumulative variance was 74.1%. Partial least squares discriminant analysis (PLS-DA) was used to screen 19 primary metabolites as the characteristic differential metabolites in $VIP \geq 1$, including 5 amino acids, serine, L-hydroxyproline, leucine, L-norvaline and L-glutamic acid. 2 organic acids, acetamide and 2-ketoglutarate; 7 soluble sugars, namely D-(+)-xylose, D-arabinose, hexapyranose, xylulose, L-threonose, L-(-)-fucose, sucrose, d-galactose, D-(+)-pinidisinose, maltose and D-(+)-cellobiose; and inositol. From the perspective of basic quality and primary metabolite level, the fruit TSS and primary metabolite content of Liulian *A. squamosa* were the highest, while the TSS of Fengli *A. squamosa* was moderate and the outer gauge was the most regular. Therefore, the two varieties can be promoted and planted as *A. squamosa* varieties with high nutritional value and high sugar in dry and hot river valleys.

Keywords: *Annona squamosa*; fruit quality; primary metabolites; hot river valley

DOI: 10.3969/j.issn.1000-2561.2025.12.011

番荔枝 (*Annona squamosa* L.) 又称释迦果、佛头果, 为番荔枝科 (Annonaceae) 番荔枝属 (*Annona*) 多年生半落叶小乔木植物^[1-2], 是著名的热带水果。我国海南、云南、广西、广东、台湾和福建等热带亚热带省 (区) 均有栽培。云南的番荔枝种植主要集中在元江、红河、永胜和元谋等县^[3]。番荔枝果实为聚生果, 成熟后果肉呈乳白色或淡黄色, 肉质软糯香甜, 具有独特的香甜味道, 口感如冰淇淋般丝滑, 食用价值极高^[4]。此外, 番荔枝果肉营养丰富, 兼具食疗功能, 富含大量蛋白质、氨基酸、维生素和糖类等营养物质, 具有增强免疫力、促进肠道蠕动和降低血糖等作用^[5-7]。尤其是番荔枝果实中的氨基酸、有机酸和可溶性糖, 赋予番荔枝独特的风味与口感, 在营养供给和促进健康方面具有显著价值。

番荔枝果实的单果质量、果形和果实偏斜度

(DD) 是衡量果实品质的重要指标, 不同品种间差异较大。同时, 不同番荔枝品种果肉中的初级代谢物组分和含量也存在明显差异。程志华等^[8]对番荔枝果实的生物学特性研究发现, 每 100 g 番荔枝果肉含 1.53~2.38 g 蛋白质和 101 mg 氨基酸, 其中人体必需氨基酸有 7 种。丁利君等^[9]通过斐林试剂滴定法测定番荔枝果肉中的含糖量, 结果表明其含糖量高达 18.15%, 比草莓和梨等水果均高。DOS SANTOS 等^[10]研究表明, 凤梨释迦每克果肉含 125.25 mg 蔗糖、50.75 mg 果糖和 49.36 mg 葡萄糖, 含糖量高达 32%。张福平等^[11]对番荔枝果肉的营养成分分析结果显示, 其果肉可溶性固形物含量可达到 30%。由此可见, 番荔枝果富含氨基酸和糖酸, 其种类因品种不同而有所差异。

近年来, 随着农业技术的发展和市场需求增加, 云南的番荔枝种植规模不断扩大, 已超过

3333 hm², 种植技术也日益成熟。云南种植番荔枝的区域主要集中在干热河谷区, 种植品种以凤梨释迦和 AP 番荔枝为主, 同时引进大目释迦和榴莲释迦进行区域试验, 但目前尚未推广种植。因此, 本研究通过对番荔枝果实的单果质量、果形指数、可溶性固形物 (TSS) 及果肉的初级代谢物差异进行分析, 旨在筛选适宜云南干热河谷区栽培的番荔枝品种。

1 材料与方法

1.1 材料

1.1.1 试验材料 4 个番荔枝品种 (AP 番荔枝、大目释迦、凤梨释迦和榴莲释迦) 均采自云南省玉溪市元江县典型的干热河谷区同一标准商业化种植基地, 树龄均为 5 a, 4 个品种均用普通番荔枝花粉进行人工授粉, 3 棵为 1 个重复, 每个品种 9 棵。采摘成熟度一致、无病虫害和机械伤的果实, 6 个果为一个重复, 共设 3 个生物学重复, 采后立即带回实验室, 将番荔枝果实脱皮取果肉, 立即用液氮研磨, 贮藏于 -80 °C 备用。

1.1.2 仪器与试剂 仪器: 气相色谱-质谱联用仪 (Trace1600-ISQ761)、电热恒温三用水箱 (SHHW.21) 超声波清洗机 (DTC-15J)、电子天平 (Q/SGYN 1003)。试剂: 吡啶、盐酸甲氧胺、甲醇、核糖醇、N-甲基-N-(三甲基硅烷基)三氟乙酰胺 (Sigma-Aldrich, 美国)。

1.2 方法

1.2.1 果实品质测定 利用游标卡尺分别测量果实的横径和纵径, 通过公式 (1) 计算果形指数; 参考蔡敏等^[12]的方法利用公式 (2) 计算 DD; 使用便携式糖酸仪测定番荔枝果汁的 TSS 含量, 结果以百分比 (%) 表示, 每组设置 3 个生物学重复, 每 3 个果实混合榨汁为一个生物学重复样本。

$$\text{果形指数} = \text{果实纵径} / \text{果实横径} \quad (1)$$

$$\text{DD} = 2(H \times R - h \times r) / (H \times R + h \times r) \quad (2)$$

式中, H 和 R 分别表示果实大面高度和果面至果心距离; h 和 r 分别表示果实小面高度和果面至果心距离。

1.2.2 代谢物提取 初级代谢物的提取参考周先艳^[13]的方法, 略有修改。将果肉液氮速冻后研磨成粉, 称取 300 mg 样品置于 10 mL 离心管中, 加入 2.7 mL 在 -20 °C 冰箱预冷的甲醇, 再加入 0.3 mL 含有 (0.2 mg/mL) 核糖醇 (内标) 作为定量的标准, 充分震荡混匀后放入 4 °C 超声波清洗

仪 FS60 中超声 15 min, 70 °C 水浴锅孵育 15 min 后放入 -20 °C 冰箱冷却, 然后在 4 °C, 5000× g 冷冻离心机离心 15 min, 取 0.1 mL 上清液于 2 mL 离心管中, 30 °C 真空浓缩至干燥后加入 80 μ L 的 N-三甲基硅烷三氟乙酰胺 (MSTFA), 30 °C 烘箱孵育 30 min。取出样品过膜, 进行 GC-MS 分析。

1.2.3 色谱、质谱方法 色谱柱: DB-5MS 毛细管色谱柱 (30 m×0.25 mm×0.25 μ m)。升温程序: 以 100 °C 开始, 保持 1 min; 以 3 °C/min 升至 184 °C; 再以 0.5 °C/min 升至 190 °C 保持 1 min, 最后以 15 °C/min 升至 280 °C 保持 5 min^[13]。

1.3 数据处理

基于 MWGC 数据库, 通过质谱分析对样本中的代谢物进行定量、定性分析后与内标的峰面积进行比较, 得到初级代谢物的含量 (μ g/g)。采用 Excel 2019 软件进行数据整理, 并结合 SPSS 24.0 软件进行单因素分析; 采用 Origin 2018 软件绘制柱形图; 采用 SIMCA 14.1 软件进行主成分分析 (PCA) 和偏最小二乘法判别分析 (PLS-DA), 计算预测变量重要性投影 (variable importance in projection, VIP), 以 VIP ≥ 1 为条件筛选差异初级代谢物成分, 结果提取可视化和作图。

2 结果与分析

2.1 果实品质分析

由表 1 可知, 4 个番荔枝品种的单果质量范围为 236.11~354.83 g, AP 番荔枝的单果质量最高, 为 354.83 g, 显著高于大目释迦, 大目释迦的单果质量最低, 为 236.11 g。大目释迦的果形为扁圆形, 其余 3 个品种的果形为椭圆形; 凤梨释迦的果实偏斜度最小, 其余 3 个品种之间差异不显著。4 个品种的 TSS 含量范围为 19.63%~30.40%, 榴莲释迦的 TSS 含量最高, 为 30.4%, 显著高于 AP 番荔枝和大目释迦; 其次为凤梨释迦; 大目释迦的 TSS 含量最低, 为 19.63%。

2.2 果肉初级代谢物分析

由表 2 和图 1 可知, 4 个番荔枝品种果肉的有机酸含量范围为 2967.22~4393.8 μ g/g, 变异系数为 20.46%, 榴莲释迦的有机酸含量最高, 显著高于其余 3 个品种。4 个品种的氨基酸含量范围为 357.36~1212.37 μ g/g, 变异系数为 58.22%, 4 个品种的氨基酸含量之间差异显著。4 个品种的可溶性糖含量范围为 36 328.17~41 926.91 μ g/g, 变异系数为 6.42%, 榴莲释迦的可溶性糖含量显著高

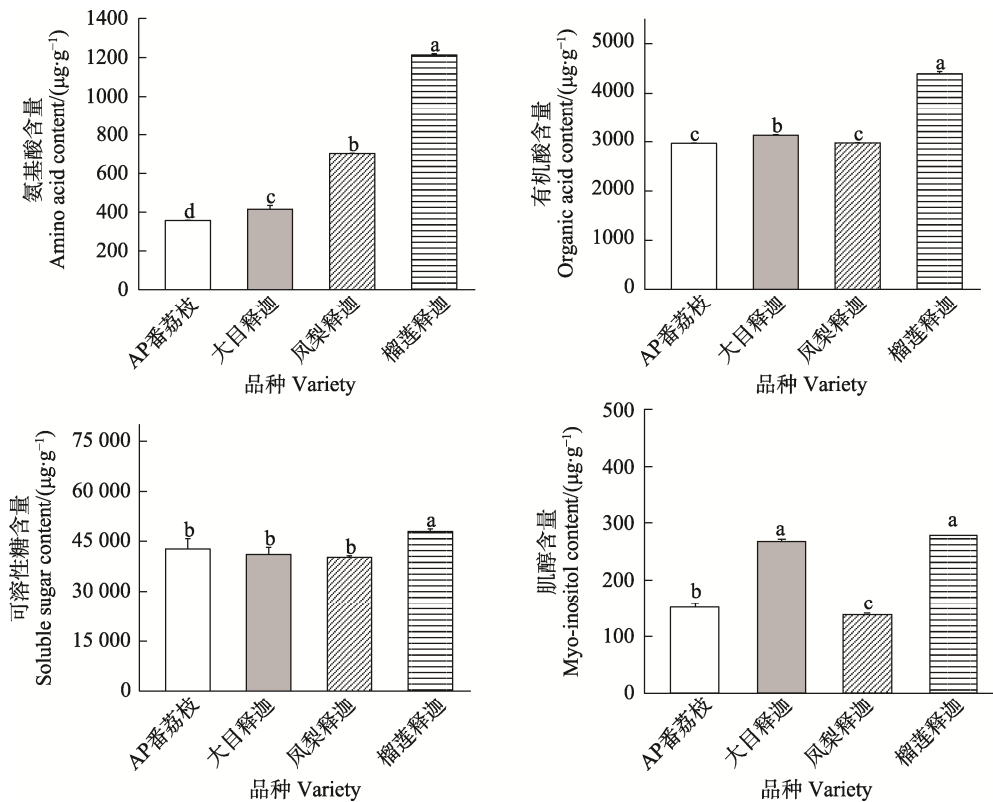
表 1 4 个番荔枝品种果实品质分析
Tab. 1 Fruit quality analysis of four *A. squamosa* cultivars

品种 Variety	单果质量 Fruit weight/g	横径 Fruit length/mm	纵径 Fruit width/mm	果形指数 Fruit shape index	果实偏斜度 Fruit determination degree/%	可溶性固形物含量 Soluble solids content/%
AP 番荔枝	354.83±9.42 ^a	82.35±4.07 ^a	96.35±0.37 ^a	1.17±0.06 ^a	25.00 ^a	23.00±3.01 ^{bc}
大目释迦	236.11±8.28 ^b	87.35±1.22 ^a	82.19±5.00 ^a	0.94±0.06 ^a	24.00 ^a	19.63±0.21 ^c
凤梨释迦	246.20±0.17 ^{ab}	79.58±8.86 ^a	94.47±1.63 ^a	1.20±0.14 ^a	18.33 ^b	27.23±0.67 ^{ab}
榴莲释迦	308.35±112.42 ^{ab}	81.11±1.49 ^a	96.58±24.74 ^a	1.19±0.31 ^a	25.00 ^a	30.40±3.86 ^a

注：同行不同小写字母表示差异显著（ $P<0.05$ ）。
Note: Different small letters in peers indicate significant difference ($P<0.05$).

表 2 4 个番荔枝品种果肉中初级代谢物变异情况
Tab. 2 Variation of primary metabolites in pulp of four *A. squamosa* varieties

指标 Index	最大值 Maximum/($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)	最小值 Minimum/($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)	平均值 Mean/($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)	标准差 Standard deviation/($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)	变异系数 Coefficient of variation/%
有机酸	4393.80	2967.22	3366.56	688.86	20.46
氨基酸	1212.37	357.36	671.55	390.95	58.22
可溶性糖	41 926.91	36 328.17	38 677.90	2481.94	6.42
肌醇	279.97	138.11	210.40	74.40	35.36



注：不同小写字母表示差异显著（ $P<0.05$ ）
Different lowercase letters indicate significant difference among treatments ($P<0.05$).
图 1 4 个番荔枝品种果肉中氨基酸、有机酸、可溶性糖和肌醇含量分析
Fig. 1 Analysis of content of amino acids, organic acids, myo-inositol, and soluble sugars in pulp of four *A. squamosa* cultivars

于其他 3 个品种。4 个品种的肌醇含量范围为 138.11~279.97 $\mu\text{g/g}$ ，榴莲释迦和大目释迦的肌醇含量显著高于 AP 番荔枝和凤梨释迦。

2.3 4 个番荔枝品种果肉氨基酸、有机酸和可溶性糖种类与含量分析

由表 3 可知，4 个番荔枝品种果肉中均检出

43 种初级代谢物质, 其中氨基酸 9 种, 有机酸 13 种, 肌醇 1 种和可溶性糖 20 种。43 种初级代谢物中以蔗糖、D-果糖、d-葡萄糖、D-阿洛糖、柠檬酸和苹果酸含量为主, 榴莲释迦的 d-葡萄糖、D-阿洛糖、柠檬酸和苹果酸含量最高, 分别为 13 681.92、6072.54、1411.78、1346.59 $\mu\text{g/g}$, AP 番荔枝的蔗糖和 D-果糖含量最高, 分别为 8937.34、13 429.52 $\mu\text{g/g}$, 大目释迦的 d-葡萄糖和 D-阿洛糖含量仅次于榴莲释迦, 分别为 12 702.91、5305.67 $\mu\text{g/g}$, 凤梨释迦的柠檬酸和苹果酸含量也仅次于榴莲释迦, 为 1270.15、960.62 $\mu\text{g/g}$, 蔗糖含量仅次于 AP 番荔枝, 为 8861.57 $\mu\text{g/g}$ 。4 个品种的蔗糖含量为 4745.10~8937.34 $\mu\text{g/g}$, AP 番荔枝、凤梨释迦和榴莲释迦的蔗糖含量显著高于大目释迦, 但三者之间差异不显著。4 个品种的 D-果糖含量为 10 540.40~13 429.52 $\mu\text{g/g}$, AP 番荔枝的 D-果糖含量最高, 其他 3 个品种之间差异不显著。4 个品种的 d-葡萄糖含量为 9186.03~13 681.92 $\mu\text{g/g}$, 榴莲释迦的 d-葡萄糖含量最高, 与大目释迦之间差异不显著, 二者显著高于凤梨释迦。4 个品种的 D-阿洛糖含量为 4398.21~6072.54 $\mu\text{g/g}$, 榴莲释迦的 D-阿洛糖含量显著高于其他 3 个品种, 大目释迦的 D-阿洛糖含量显著高于 AP 番荔枝和大目释迦。4 个品种的柠檬酸含量为 1144.43~1411.78 $\mu\text{g/g}$, 榴莲释迦的柠檬酸含量显著高于其他 3 个品种。4 个品种的苹果酸含量为 843.27~1346.59 $\mu\text{g/g}$, 榴莲释迦显著高于其他 3 个品种。苯丙氨酸是人体必需氨基酸, 4 个品种的苯丙氨酸含量为 11.87~14.12 $\mu\text{g/g}$, AP 番荔枝和大目释迦中的苯丙氨酸含量较高, 显著高于榴莲释迦。对人体健康有益的氨基酸主要有 L-脯氨酸和 L-苏氨酸, 4 个品种中, 榴莲释迦的 L-脯氨酸含量最高, 其次是凤梨释迦, 二者含量分别为 983.23、536.34 $\mu\text{g/g}$; L-苏氨酸含量最高的是榴莲释迦, 其次是大目释迦, 二者含量分别为 39.92、31.34 $\mu\text{g/g}$ 。部分初级代谢物存在显著的品种特异性, 其中亮氨酸、乙酰胺酸、木酮糖、L-(+)-苏糖仅在 AP 番荔枝中检出; D-海藻糖仅在榴莲释迦中检出; D-(+)-木糖仅在大目释迦和凤梨释迦中检出; 除大目释迦外, 其余 3 个品种均检出 2-酮戊二酸; 榴莲释迦未检出 4-氨基丁酸。

2.4 果肉初级代谢物 PCA 和 PLS-DA 分析

为了更好地了解果肉初级代谢物组分的差

异, 使用 PCA 分析对初级代谢物数据进行降维处理, 得到得分散点图 (图 2)。其中 PC1 的方差贡献率为 48.3%, PC2 的方差贡献率为 25.8%, 累计方差贡献率达到 74.1%, 因此认为用 PC1 和 PC2 分析样本具有较强的可靠性。PC1 方向上, 榴莲释迦与 AP 番荔枝、大目释迦和凤梨释迦明显分离, AP 番荔枝、大目释迦和凤梨释迦分布比较集中, 榴莲释迦位于正轴, 大目释迦位置居中, 而其他 2 个品种位于负轴; PC2 方向上, 大目释迦位于负轴, 与 AP 番荔枝、凤梨释迦和榴莲释迦明显分离, 其他 3 个品种没有分离。

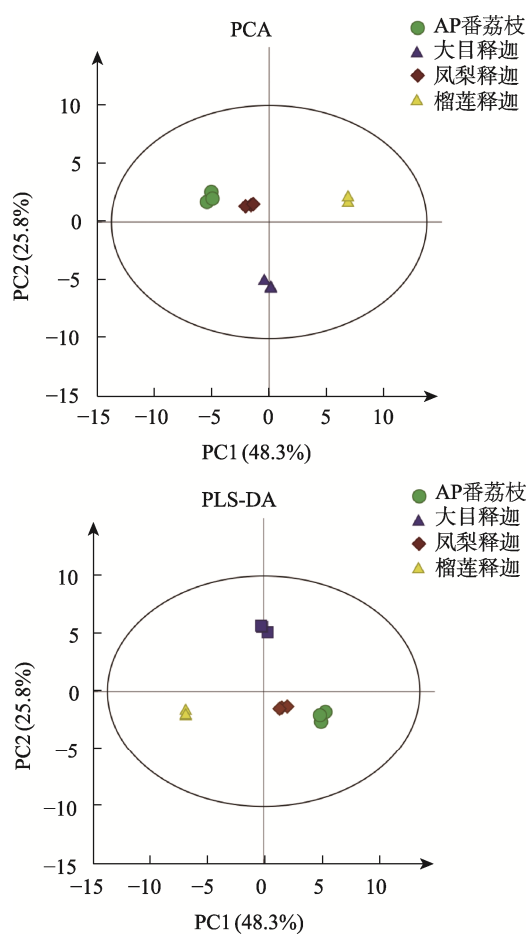


图 2 4 个番荔枝品种果肉初级代谢物含量
PCA 和 PLS-DA 分析

Fig. 2 PCA and PLS-DA analysis of content of primary metabolites in pulp of four *A. squamosa* cultivars

为进一步探究不同初级代谢物对区分 4 个番荔枝品种中的作用, 对这 4 个品种的 43 种初级代谢物进行 PLS-DA 分析。结果显示, 以 $VIP \geq 1$ 为筛选标准, 共识别出 19 种具有特征性的初级代谢物 (表 4), 其中亮氨酸、木酮糖、乙酰胺

表 3 4 个番荔枝品种果肉初级代谢物种类及含量分析

Tab. 3 Analysis of types and contents of primary metabolites in pulp of four *A. squamosa* varieties

物质 Compounds	AP 番荔枝 African pride	大目释迦 Annona squamosal (damu)	凤梨释迦 Pineapple sugar apple	榴莲释迦 Durian sugar apple
肌醇	154.60±4.66 ^b	268.94±3.10 ^a	138.11±2.38 ^c	279.97±8.99 ^a
柠檬酸	1208.94±10.72 ^c	1144.43±7.62 ^d	1270.15±6.13 ^b	1411.78±51.74 ^a
奎宁酸	28.15±0.21 ^c	96.14±7.12 ^b	33.22±0.85 ^c	177.49±2.36 ^a
硬脂酸	23.69±0.56 ^a	21.52±1.46 ^a	20.12±2.23 ^b	19.62±0.96 ^b
亮氨酸	4.92±0.03 ^a	—	—	—
丁二酸	21.67±0.36 ^a	15.03±4.38 ^b	10.44±0.19 ^b	4.13±0.62 ^c
丝氨酸	32.24±0.10 ^a	17.49±2.01 ^c	21.05±0.59 ^b	22.23±0.49 ^b
苹果酸	883.97±4.89 ^c	843.27±23.26 ^d	960.62±1.31 ^b	1346.59±11.59 ^a
苯丙氨酸	14.12±0.33 ^a	13.76±1.65 ^{ab}	12.42±0.20 ^{ab}	11.87±0.21 ^b
半乳糖酸	297.07±3.64 ^c	643.68±24.19 ^a	335.53±1.92 ^b	643.10±11.45 ^a
乙酰胺酸	53.86±0.84 ^a	—	—	—
戊酸	28.75±0.75 ^b	21.94±0.66 ^c	30.28±0.16 ^a	18.39±0.30 ^d
考尔-16-烯-18-酸	136.78±2.19 ^b	91.25±1.45 ^c	132.88±4.50 ^b	664.50±5.64 ^a
2-酮戊二酸	23.04±0.73 ^b	—	12.71±0.41 ^c	37.23±0.79 ^a
4-氨基丁酸	208.68±0.65 ^a	183.56±3.31 ^b	115.60±0.57 ^c	—
氨基己酸	20.28±0.85 ^{ab}	18.26±1.90 ^b	21.71±0.97 ^a	21.08±0.12 ^{ab}
D-葡萄糖酸	32.35±0.27 ^b	50.25±0.99 ^a	32.64±7.05 ^b	49.88±7.57 ^a
DL-焦谷氨酸	65.93±0.95 ^b	59.16±8.90 ^b	56.51±1.50 ^b	105.51±3.28 ^a
L-正缬氨酸	10.83±0.10 ^a	6.39±0.51 ^c	8.15±0.06 ^b	8.08±0.13 ^b
L-脯氨酸	163.58±1.54 ^d	250.04±11.57 ^c	536.34±0.26 ^b	983.23±10.30 ^a
L-苏氨酸	24.59±0.44 ^c	31.34±0.42 ^b	23.24±0.42 ^d	39.92±0.05 ^a
L-羟脯氨酸	12.80±0.17 ^b	10.82±0.90 ^c	30.85±1.03 ^a	32.09±0.43 ^a
L-谷氨酸	28.33±1.07 ^a	24.93±1.58 ^b	13.98±0.70 ^c	9.45±0.17 ^d
木酮糖	12.18±0.14 ^a	—	—	—
麦芽糖	491.13±4.85 ^b	455.96±27.72 ^b	355.14±18.34 ^c	701.83±19.47 ^a
古洛糖	482.09±238.89 ^a	1083.95±30.18 ^a	772.68±162.47 ^a	1105.85±572.45 ^a
六吡喃糖	8.54±0.60 ^b	9.57±0.54 ^b	13.30±1.41 ^a	12.66±0.32 ^a
蔗糖	8937.34±520.97 ^a	4745.10±35.84 ^b	8861.57±673.61 ^a	8326.53±270.46 ^a
帕拉金糖	119.42±1.60 ^b	131.64±27.19 ^b	102.38±1.56 ^b	171.67±2.69 ^a
l-吡喃半乳糖	29.08±2.10 ^a	12.98±1.70 ^c	24.91±7.58 ^{ab}	15.34±3.63 ^{bc}
d-甘露糖	24.70±1.06 ^b	144.11±18.85 ^a	61.76±17.19 ^b	174.14±58.79 ^a
乳糖	93.51±34.49 ^{ab}	169.42±53.10 ^a	61.20±1.93 ^b	103.12±12.03 ^{ab}
D-阿拉伯糖	27.66±3.74 ^b	16.98±2.33 ^c	14.37±0.95 ^c	35.24±0.59 ^a
D-(+)-木糖	—	25.98±6.89 ^a	19.52±0.36 ^a	—
d-半乳糖	171.90±1.46 ^b	143.96±5.44 ^c	177.81±1.77 ^{ab}	186.23±5.21 ^a
D-(+)-松二糖	371.10±11.63 ^b	216.63±12.85 ^c	391.36±6.99 ^b	483.58±12.88 ^a
D-果糖	13 429.52±1365.37 ^a	11 796.01±784.03 ^{ab}	11 827.06±411.12 ^{ab}	10 540.40±314.59 ^b
d-葡萄糖	10 828.82±2468.72 ^{ab}	12 702.91±1295.00 ^a	9186.03±98.19 ^b	13 681.92±368.47 ^a
D-阿洛糖	4086.62±299.65 ^c	5305.67±124.62 ^b	4398.21±54.98 ^c	6072.54±138.96 ^a
D-(+)-纤维二糖	97.39±19.32 ^b	262.80±50.17 ^a	42.98±0.87 ^b	295.24±11.63 ^a
D-海藻糖	—	—	—	14.07±0.64 ^a
L-(-)-岩藻糖	10.50±3.09 ^b	4.97±0.59 ^b	17.87±0.73 ^a	6.54±4.52 ^b
L-(+)-苏糖	6.36±0.72 ^a	—	—	—

注：同行不同小写字母表示差异显著（ $P<0.05$ ）；—表示未检出。
Note: Different small letters in the same line indicate significant difference ($P<0.05$); — indicates that this item is not detected.

表 4 4 个番荔枝品种果肉初级代谢物差异 PLS-DA 分析
Tab. 4 PLS-DA analysis of differences in primary metabolites in pulp of four *A. squamosa* cultivars

物质 Compounds	编号 ID	预测变量重要性投影 VIP	物质 Compounds	编号 ID	预测变量重要性投影 VIP
D-(+)-木糖	1	1.20	蔗糖	11	1.12
D-阿拉伯糖	2	1.18	2-酮戊二酸	12	1.11
六吡喃糖	3	1.15	L-正缬氨酸	13	1.11
丝氨酸	4	1.14	d-半乳糖	14	1.10
L-羟脯氨酸	5	1.14	D-(+)-松二糖	15	1.09
亮氨酸	6	1.13	麦芽糖	16	1.08
木酮糖	7	1.13	L-谷氨酸	17	1.04
乙酰胺酸	8	1.13	(+)-纤维二糖	18	1.01
L-苏糖	9	1.12	肌醇	19	1.01
L-(-)-岩藻糖	10	1.12			

酸和 L-苏糖仅在 AP 番荔枝中被检出;D-(+)-木糖仅在大目释迦和凤梨释迦中被检出;除大目释迦外,其余 3 个品种均检出 2-酮戊二酸;而 4-氨基丁酸在榴莲释迦中未被检出,这些物质对区分番荔枝品种具有较大贡献。

3 讨论

果实品质是衡量果实商品价值的重要指标,其中单果质量、果形和 DD 等指标尤为关键,直接影响消费者的购买欲望^[14]。云南干热河谷区种植的 4 个番荔枝品种均采自同一果园,且均用普通番荔枝花粉进行人工授粉,受外界气候因素如光照和昼夜温差等因素影响一致,因此,果实品质的差异主要与遗传因素密切相关。本研究的番荔枝单果质量范围为 236.11~354.83 g,其中 AP 番荔枝的单果质量最高,为 354.83 g,而大目释迦的单果质量最低,为 236.11 g;大目释迦的果形为扁圆形,其余 3 个品种为椭圆形;凤梨释迦的果实偏斜度最小,其余 3 个品种之间无显著性差异。劳素婵等^[15]对凤梨释迦的研究结果表明,其果形指数约 1.12,这与本研究结果一致。

初级代谢物是植物生长发育过程中不可或缺的物质,广泛存在于所有植物中,为植物的生长、发育和繁殖提供基础代谢产物和能量支持^[16]。糖类、有机酸、氨基酸和肌醇等初级代谢物是影响果实品质的关键因素,也是衡量果实风味和口感的重要标准^[17]。本研究从云南种植的 4 个番荔枝品种中共检出 43 种初级代谢物,其中氨基酸 9 种,有机酸 13 种,可溶性糖 20 种及肌醇 1 种,说明番荔枝果肉中含有丰富的生物活性物质,营养价值极高。

氨基酸是构成蛋白质的基本单位,其不仅是营养物质,在风味品质方面也起着重要作用^[18]。4 个番荔枝品种的果肉共检出 9 种氨基酸,分别是丝氨酸、苯丙氨酸、DL-焦谷氨酸、L-正缬氨酸、L-脯氨酸、L-苏氨酸、L-羟脯氨酸、L-谷氨酸和亮氨酸。其中榴莲释迦的氨基酸含量显著高于其他 3 个品种,其次是凤梨释迦;9 种氨基酸中含量最高的是 L-脯氨酸,其次是 DL-焦谷氨酸。有研究表明,L-脯氨酸可作为营养补充剂和风味剂^[19],它还是人体合成蛋白质所必需的 20 种氨基酸之一,补充一定量的 L-脯氨酸能够改善因缺少视网膜色素上皮引起的视力障碍^[20]。可溶性糖既可以参与植物光合作用、呼吸作用等重要的生理过程^[21],又是评价果实风味的重要指标。本研究结果表明,云南种植的 4 个番荔枝品种中可溶性糖的含量最高,与黄伟雄等^[22]的研究结果一致,其研究结果表明番荔枝果实的含糖量较高,100 g 果肉中的 TSS 含量为 20%。本研究中番荔枝所含的可溶性糖主要为果糖、葡萄糖、蔗糖和阿洛糖,果糖和葡萄糖的含量分别高达 13429.52 μg/g 和 13681.92 μg/g。不同品种含糖量存在较大差异,4 个番荔枝品种中,含糖量最高的是榴莲释迦,其次是 AP 番荔枝。另一影响番荔枝风味品质的重要因素是有机酸的组分和含量^[23],本研究主要检出的有机酸为柠檬酸、苹果酸和半乳糖酸。郭文场等^[24]对不同番荔枝品种的有机酸分析结果表明,不同品种间有机酸含量存在差异,AP 番荔枝的总酸为 0.37%,而虎门番荔枝的总酸为 0.1%。本研究中,大目释迦和榴莲释迦的有机酸含量与其他 2 个品种之间差异显著。通过 PLS-DA 分析,以 VIP≥1 筛选出 19 种初级代谢物,说明这 19

种初级代谢物是这 4 个品种的主要差异代谢物。其中亮氨酸、木酮糖、乙酰胺酸和蔗糖仅在 AP 番荔枝中被检出; 木糖仅在大目释迦和凤梨释迦中被检出; 除大目释迦外, 其余 3 个品种均检出 2-酮戊二酸; 而榴莲释迦中未检出 4-氨基丁酸, 这几种物质的分布特点对区分这 4 种番荔枝品种具有重要参考价值。

4 结论

云南干热河谷区 4 个番荔枝品种中, AP 番荔枝的单果质量最大; 大目释迦的果形为扁圆形, 其余 3 个品种均为椭圆形; 凤梨释迦的 DD 最小, 外观最规整; 榴莲释迦的果实 TSS、氨基酸、有机酸、肌醇及可溶性糖含量均最高。因此, 从果实品质和初级代谢物水平来看, 榴莲释迦的含糖量和初级代谢物含量均最高, 凤梨释迦的 TSS 含量适中, 外观最规整, 这 2 个品种可作为高营养价值、高糖和果形好的品种在干热河谷区推广种植。

参考文献

- [1] 杨涛华, 张晴雯, 龚霄, 李积华, 周伟. 基于顶空气相-离子迁移色谱的不同品种番荔枝挥发性成分比较[J]. 食品工业科技, 2021, 42(16): 249-254.
YANG T H, ZHANG Q W, GONG X, LI J H, ZHOU W. Comparison of volatile components of different annona varieties based on headspace phase-ion mobility chromatography[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(16): 249-254. (in Chinese)
- [2] 刘欢. 你不知道的珍稀水果 3[J]. 中国果菜, 2014, 34(9): 28-30.
LIU H. Rare fruits you don't know 3[J]. China Fruit & Vegetable, 2014, 34(9): 28-30. (in Chinese)
- [3] 蒙真铖, 张建春, 李春, 高梅, 张光勇, 岳建伟. 云南省番荔枝科资源植物多样性研究[J]. 热带农业科学, 2023, 43(1): 25-30.
MENG Z C, ZHANG J C, LI C, GAO M, ZHANG G Y, YUE J W. Studies on plant diversity of Annonaceae in Yunnan province[J]. Chinese Journal of Tropical Agriculture, 2023, 43(1): 25-30. (in Chinese)
- [4] 侯雪宁. 酶转化番荔枝蔗糖及改善果汁品质研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2023.
HOU X N. Enzymatic conversion of sucrose from *Annona squamosa* and juice quality improvement[D]. Tianjin: Tianjin University of Science and Technology, 2023. (in Chinese)
- [5] 李晨晨. 复合涂膜对采后番荔枝品质及生理代谢影响[D]. 天津: 天津科技大学, 2023.
LI C C. Effects of composite coating on quality and physiological metabolism of postharvest *Annona squamosa*[D]. Tianjin: Tianjin University of Science and Technology, 2023. (in Chinese)
- [6] HERNÁNDEZ-FUENTES L M, MONTALVO G E, GARCÍA-MAGAÑA M L, ANAYA-ESPARZA L M, NOLASCO G Y, VILLAGRÁN Z, GONZÁLEZ-TORRES S, VELÁZQUEZ-MONREAL J J, MORELOS-FLORES D A. Current situation and perspectives of fruit Annonaceae in Mexico: biological and agronomic importance and bioactive properties[J]. Plants, 2021, 11(1): 7.
- [7] MOUSSA Y A, SIDDIQUI A S, ELHAWARY A E, GUO K, ANWAR S, XU B. Phytochemical constituents, bioactivities, and applications of custard apple (*Annona squamosa* L.): a narrative review[J]. Food Chemistry, 2024, 459: 140363.
- [8] 程志华, 龚霄, 刘洋洋, 周伟, 魏晓奕, 李积华, 林茂. 番荔枝生物学特性及其研究进展[J]. 农产品加工, 2018(15): 85-88, 93.
CHENG Z H, GONG X, LIU Y Y, ZHOU W, WEI X Y, LI J H, LIN M. Review of biological characteristics and research progress of *Annona squamosa*[J]. Agricultural Product Processing, 2018(15): 85-88, 93. (in Chinese)
- [9] 丁利君, 任乃林, 周燕芳, 张亮鹏, 谢世江, 张木生. 番荔枝果肉营养成分分析[J]. 营养学报, 2006, 28(3): 275-276.
DING L J, REN N L, ZHOU Y F, ZHANG L P, XIE S J, ZHANG M S. Analysis of the nutritional composition of custard apple flesh[J]. Acta Nutrimenta Sinica, 2006, 28(3): 275-276. (in Chinese)
- [10] DOS SANTOS W N L, SAUTHIER M C S, CAVALCANTE D D, BENEVIDES C M J, DIAS F S, SANTOS D C M B. Mineral composition, nutritional properties, total phenolics and flavonoids compounds of the atemoya fruit (*Annona squamosa* L. x *Annona cherimola* Mill.) and evaluation using multivariate analysis techniques[J]. Science Letter, 2016, 88(3): 1243-1252.
- [11] 张福平, 陈蔚辉, 林建新. 番荔枝的营养成分分析[J]. 食品研究与开发, 2002(1): 47-48.
ZHANG F P, CHEN W H, LIN J X. Nutrient composition analysis of *Annona squamosa*[J]. Food Research and Development, 2002(1): 47-48. (in Chinese)
- [12] 蔡敏, 孙鲁龙, 赵政阳, 王娇娇, 何肖肖, 郭雄雄, 王丽, 梁俊. 不同花粉授粉对瑞香红苹果果个、果形和硬度的影响[J]. 果树学报, 2023, 40(12): 2548-2561.
CAI M, SUN L L, ZHAO Z Y, WANG J J, HE X X, GUO X X, WANG L, LIANG J. Effects of different types of pollens on fruit size, shape and hardness in Ruixianghong apple[J]. Journal of Fruit Tree, 2023, 40(12): 2548-2561. (in Chinese)
- [13] 周先艳. 云南和西藏地区枸橼资源香气评价及柠檬果实外观缺陷的成因研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2020.

- ZHOU X Y. Study on the aroma evaluation of citron resources in Yunnan and Tibet region of China and the causes of lemon fruit appearance defects[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2020. (in Chinese)
- [14] 罗旭婷, 刘伟, 张群, 王春发, 付复华, 杨明之. 湖南 23 个桃品种果实品质分析及综合评价[J]. 食品科学, 2025, 46(20): 36-46.
- LUO X T, LIU W, ZHANG Q, WANG C F, FU F H, YANG M Z. Quality analysis and comprehensive evaluation of 23 varieties of peach fruits in Hunan[J]. Food Science, 2025, 46(20): 36-46. (in Chinese)
- [15] 劳素婵, 安振宇, 黄伟雄, 潘贞珍, 李健琪, 周春衡, 陈科文, 方仁. “吉夫纳”番荔枝生物学特性及栽培技术[J]. 广西农学报, 2024, 39(3): 148-152.
- LAO S C, AN Z Y, HUANG W X, PAN Z Z, LI J Q, ZHOU C H, CHEN K W, FANG R. Biological characteristics and cultivation techniques of “Givner” Annona[J]. Guangxi Journal of Agriculture, 2024, 39(3): 148-152. (in Chinese)
- [16] 赵状军, 胡龙兴, 胡涛, 傅金民. 不同品系高羊茅应答高温胁迫的初级代谢产物分析[J]. 草业学报, 2015, 24(3): 58-69.
- ZHAO Z J, HU L X, HU T, FU J M. Differential metabolic responses of two tall fescue genotypes to heat stress[J]. Journal of Grass Industry, 2015, 24(3): 58-69. (in Chinese)
- [17] 尚乐乐, 宋建文, 王嘉颖, 张余洋, 叶志彪. 番茄果实品质形成及其分子机理研究进展[J]. 中国蔬菜, 2019(4): 21-28.
- SHANG L L, SONG J W, WANG J Y, ZHANG Y Y, YE Z B. Research progress on quality formation and molecular mechanism of tomato fruit[J]. Chinese Vegetables, 2019(4): 21-28. (in Chinese)
- [18] CHOI S H, KIM D S, KOZUKUE N, KIM H J, NISHITANI Y, MIZUNO M, LEVIN C E, FRIEDMAN M. Protein, free amino acid, phenolic, β -carotene, and lycopene content, and antioxidative and cancer cell inhibitory effects of 12 greenhouse-grown commercial cherry tomato varieties[J]. Journal of food composition & analysis, 2014, 34(2): 115-127.
- [19] 李忠义. L-脯氨酸的化学合成[J]. 大连化工, 1993(12): 27-31.
- LI Z Y. Chemical synthesis of L-proline[J]. Dalian Chemical Industry, 1993(12): 27-31. (in Chinese)
- [20] 陆佳杰. 产 L-脯氨酸大肠杆菌工程菌的构建及其发酵条件的优化[D]. 杭州: 浙江工商大学, 2024.
- LU J J. Construction of L-proline-producing *Escherichia coli* engineering bacteria and optimization of its fermentation conditions[D]. Hangzhou: Zhejiang Gongshang University, 2024. (in Chinese)
- [21] 邱靖一. 外源物质对采后番荔枝品质及糖代谢的影响研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2021.
- QIU J Y. Effects of exogenous substances on quality and sugar metabolism of postharvest *Annona squamosa*[D]. Tianjin: Tianjin University of Science and Technology, 2021. (in Chinese)
- [22] 黄伟雄, 方仁, 安振宇, 尧金艳. 番荔枝果实发育进程中糖分累积机制分析[J]. 分子植物育种 2021, 19(15): 5120-5128.
- HUANG W X, FANG R, AN Z Y, YAO J Y. Identification analysis of sugar accumulation during *Annona squamosa* fruit development[J]. Molecular Plant Breeding, 2021, 19(15): 5120-5128. (in Chinese)
- [23] FAN F Y, HUANG C S, TONG Y L, GUO H W, ZHOU S J, YE J H, GONG S Y. Widely targeted metabolomics analysis of white peony teas with different storage time and association with sensory attributes[J]. Food Chemistry, 2021, 362: 130257. (in Chinese)
- [24] 郭文场, 刘佳贺, 李悦. 热带水果番荔枝的品种与特性[J]. 特种经济动植物, 2017, 20(3): 46-48.
- GUO W C, LIU J H, LI Y. Varieties and characteristics of the tropical fruit *Annona squamosa*[J]. Special Economic Animals and Plants, 2017, 20(3): 46-48. (in Chinese)