

基于广泛靶向代谢组学分析不同生长发育时期莲雾果皮代谢物的差异

张雪芹, 欧阳海波*, 林丽霞, 赖瑞云, 林建忠, 钟赞华

福建省亚热带植物研究所/福建省亚热带植物生理生化重点实验室, 福建厦门 361006

摘要: 为了解不同生长发育时期莲雾果皮的代谢物差异, 本研究分别测定谢花后 15 d (S_1)、30 d (S_2)、45 d (S_3)、60 d (S_4) 莲雾果皮的广泛靶向代谢组, 筛选差异代谢物并进行代谢通路分析。结果表明: 莲雾果皮中共检测出 946 种代谢物, 其中氨基酸及其衍生物 177 种、类黄酮 140 种、糖类及其衍生物和有机酸及其衍生物各 96 种、脂质 89 种、核苷酸及其衍生物 65 种, 其他代谢物 283 种。 S_1 vs S_2 、 S_2 vs S_3 、 S_3 vs S_4 、 S_1 vs S_3 、 S_1 vs S_4 、 S_2 vs S_4 中分别有 65、88、59、88、112 和 103 种差异代谢物和 6 种共同差异代谢物, 其中 5 种属于氨基酸及其衍生物, 1 种属于类黄酮。在不同生长发育时期的莲雾果皮中, 前 4 类差异代谢物分别为氨基酸及其衍生物、类黄酮、糖类及其衍生物、脂质。随着莲雾果实生长发育, 果皮中的类黄酮、糖类及其衍生物差异代谢物种类先减少后增加, 脂质代谢物种类先增加后减少, 大多数类黄酮代谢物下调, 糖类及其衍生物代谢物上调。 S_2 vs S_3 中脂质差异代谢物种类较多, S_3 vs S_4 中只有 1 种脂质差异代谢物。莲雾果皮差异代谢物主要富集在淀粉和蔗糖生物合成、苯丙氨酸生物合成、D-氨基酸生物合成、半乳糖生物合成、萜类和类固醇生物合成等代谢通路上。本研究为莲雾果实品质调控和最佳采收时期确定提供理论支持和数据参考。

关键词: 莲雾; 代谢组学; 差异代谢物; 果实品质

中图分类号: S667.9

文献标志码: A

Metabolites Differential Analysis of Wax Apple Fruit Pericarp at its Different Growth and Development Stages Based on Widely Targeted Metabolomics

ZHANG Xueqin, OUYANG Haibo*, LIN Lixia, LAI Ruiyun, LIN Jianzhong, ZHONG Zanhua

Fujian Institute of Subtropical Botany / Fujian Key Laboratory of Subtropical Plant Physiology and Biochemistry, Xiamen, Fujian 361006, China

Abstract: The widely targeted metabolisms of fruit pericarp was determined, the differential metabolites were screened and the metabolic pathway was analyzed to understand the metabolomics difference of fruit pericarp at its different growth and development stages in wax apple (*Syzygium samarangense*). The samples were picked at 15 d (S_1), 30 d (S_2), 45 d (S_3) and 60 d (S_4) after flower respectively. A total of 946 metabolites were detected from wax apple fruit pericarp, including 177 amino acids and their derivatives, 140 flavonoids, 96 sugars and their derivatives, 96 organic acids and their derivatives, 89 lipids, 65 nucleotides and their derivatives, and 283 other metabolites. There were 65, 88, 59, 88, 112, and 103 differential metabolites in S_1 vs S_2 , S_2 vs S_3 , S_3 vs S_4 , S_1 vs S_3 , S_1 vs S_4 , and S_2 vs S_4 respectively. There were only 6 common differential metabolites in six groups, of which 5 metabolites belonged to amino acids and derivatives and 1 belonged to flavonoid. The differential metabolites of fruit pericarp at different growth and development stages mainly included amino acids and their derivatives, flavonoids, sugars and their derivatives, lipids. The number of

收稿日期 2025-08-25; 接受日期 2025-10-18

基金项目 厦门市重大科技计划项目 (No. 3502Z20191013); 福建省亚热带植物研究所基本科研项目 (市级) (No. 3502Z2024YZS08)。

作者简介 张雪芹 (1979—), 女, 博士, 副研究员, 研究方向: 果树产期调控及高效栽培关键技术。*通信作者 (Corresponding author): 欧阳海波 (OUYANG Haibo), E-mail: yrdzwkx@126.com。

differential metabolites of flavonoids, sugars and their derivatives decreased first and then increased, while the number of lipid metabolites increased first and then decreased with the growth and development of fruit. Most flavonoid metabolites were down-regulated, while sugars and their derivatives were up-regulated. There were more lipid differential metabolites in S_2 vs S_3 , and only 1 in S_3 vs S_4 . The most significant enrichment pathway of differential metabolites of wax apple fruit pericarp were biosynthesis of starch and sucrose, phenylalanine, D-amino acid, galactose, terpenoids and steroids. This study would provide theoretical support and data references for the regulation of fruit quality and harvest period of wax apple.

Keywords: wax apple (*Syzygium samarangense*); metabolomic; differential metabolite; fruit quality

DOI: 10.3969/j.issn.1000-2561.2026.03.002

莲雾 (*Syzygium samarangense*) 属桃金娘科 (Myrtaceae) 蒲桃属 (*Syzygium*), 是热带亚热带常绿果树, 原产于马来西亚、印度尼西亚, 在中国台湾、海南、福建、广东、广西和贵州等地引种栽培^[1-2]。莲雾的叶片、树皮、根和茎的提取物可用来治疗咳嗽、糖尿病、痢疾和炎症等, 具有一定的药用价值^[3-4]。莲雾果实的初级和次级代谢物大多属于氨基酸及其衍生物、黄酮类、糖类及其衍生物、酚类化合物、萜类和甾醇, 具有润津止咳、抗菌消炎、抗癌和免疫调节等作用^[5-6]。果实富含蛋白质、碳水化合物、维生素、纤维等营养物质, 是一种具有较高经济效益和发展前景的亚热带果树^[6-7]。

代谢组学主要研究生物体内源性代谢产物及其变化规律, 其主要研究对象为脂质、糖类、生物碱、黄酮、氨基酸等物质^[8]。氨基酸、糖类、有机酸、核苷酸等初生代谢物和黄酮、生物碱、酚酸、萜类等次生代谢产物的成分和含量影响果实的内在品质和营养价值^[9]。广靶代谢组学作为代谢组学的重要分支, 能兼顾靶向分析的精准性与非靶向分析的全面性, 凭借高通量、高灵敏度与高覆盖度的技术特性, 可以精准定性定量代谢物, 已在化合物定性、定量、鉴定及分类、植物品质改良、生长发育机制解析等领域中得到广泛应用^[10-11]。目前, 广靶代谢组学技术已成功运用于枸杞^[12-13]、软枣猕猴桃^[14]、桂葡萄柚 1 号^[15]、泰国红宝石柚^[16]等果实的营养价值研究和代谢物差异分析, 为枸杞、猕猴桃、桂葡萄柚、红宝石柚等果实功能性成分开发及综合利用提供科学的理论依据。

早期关于莲雾的研究主要集中在莲雾种苗繁育^[17]、产期调控^[2]、果实生长发育^[18-19]、果皮色泽和色素变化^[20]等方面, 基于广泛靶向代谢组学技术分析不同生长发育时期莲雾果皮中的代谢物差异尚未见报道。泰国紫红莲雾为台湾、福建等

地大面积种植的优良莲雾品种, 其果实大, 丰产性好, 成熟时果皮呈紫红色, 色泽光滑, 果肉脆嫩多汁, 甜度较高, 深受消费者喜欢。因此, 本研究以泰国紫红莲雾为研究对象, 运用广泛靶向代谢组学的方法筛选差异代谢物, 为泰国紫红莲雾果实功能性成分开发及综合利用提供一定的理论基础。

1 材料与方法

1.1 材料

本试验在福建省亚热带植物研究所设施大棚内进行, 以限根和矮化密植栽培模式下种植的 8 年生莲雾不同生长发育时期的果皮为试验材料。设施大棚内, 莲雾 3—4 月开花, 6 月中下旬至 7 月上旬果实成熟。2023 年 5 月开始, 对同一批次着果的果实挂牌标记, 选取不同生长发育时期的莲雾果皮[谢花后 15 d (S_1)、30 d (S_2)、45 d (S_3)、60 d (S_4)]用于广泛靶向代谢组学测序及分析, 每个时期 3 次重复。每次采 36 个 S_1 、 S_2 时期的幼果, 12 个 S_3 、 S_4 时期的大果, 取 1/4 个果实的果皮, 切成 1 mm×1 mm 小块, 混匀, 称取 5.00 g 装于冻存管, 立即用液氮速冻后保存于 -80 °C 冰箱备用。

1.2 方法

1.2.1 代谢物提取 称取 0.10 g 样品, 液氮研磨后装入 EP 管中, 加入 500 μ L 80%甲醇水溶液 (LC-MS 级), 涡旋振荡, 冰浴静置 5 min, 15 000 $\times g$ 、4 °C 离心 20 min, 取一定量的上清液加入质谱级水, 稀释至甲醇含量为 53%。15 000 $\times g$ 、4 °C 离心 20 min, 收集上清液, 备用。从每个样本中取等体积样本混匀作为 QC 样本, 空白对照为 53% 甲醇水溶液。

1.2.2 色谱-质谱分析条件 采用美国 Waters 公司的 Xselect HSS T3 (2.1 mm×150 mm, 2.55 μ m) 液相色谱仪分析。色谱柱: 流动相 A 相为 0.1%

甲酸水溶液，B 相为 0.1%甲酸-乙腈溶液。梯度洗脱：0 min，98% A，2% B；2 min，98% A，2% B；15 min，0% A，100% B；17 min，0% A，100% B；17.1 min，98% A，2% B；20 min，98% A，2% B。流速为 0.4 mL/min，进样体积为 2 μ L，样品盘温度为 10 $^{\circ}$ C，柱温为 50 $^{\circ}$ C。质谱条件分别为正离子模式和负离子模式，离子源气体比例分别为 1：60 和 2：60。参数如下：离子化电压+5500/-4500 V，气帘气为 35 psi，碰撞气体为中等气体，温度为 550 $^{\circ}$ C。样品随机进样，周期性地插入 QC 样品，进行质量控制和校正峰的漂移。

1.2.3 代谢组数据分析 代谢组样品上机、样本物质分离和鉴定由广州基迪奥生物科技有限公司完成。采用多反应监测模式（MRM）对实验样本进行检测，根据 Q3（子离子）对化合物进行定量，以 Q1（母离子）、Q3（子离子）、RT（保留时间）、DP（去簇电压）以及 CE（碰撞能）进行定性分析。使用 SCIEX OSV 1.4 软件，打开下机质谱文件，进行色谱峰的积分和校正工作，根据设置的最小峰高 500、信噪比 5、平滑点数 1 等信息，筛选色谱峰。每个色谱峰的峰面积（area）代表对应物质的相对含量，导出所有色谱峰面积积分数据，得到代谢物的定性和定量结果。采用多元统计分析，对采集到的数据进行 UV（unit variance scaling）标准化处理、主成分分析（PCA）和聚类分析（HCA）。将 Fold Change（FC）和 OPLS-DA 模型的 VIP 值相结合，以 $VIP \geq 1$ 、 $FC \geq 2$ 或 ≤ 0.5 为筛选条件，有效筛选差异代谢物。利用 TBtools-II 软件和 R 包的 Cluster Profiler 工具对筛选的差异代谢物进行聚类分析和 KEGG 富集分析^[21]，精准确定与差异代谢物表现紧密相关的关键通路。使用 Excel 2023 软件进行数据整理和分析，利用 Omicshare（<https://www.omicshare.com>）云平台制作图表，使用 PowerPoint 2023 软件进行图形布局排版。

2 结果与分析

2.1 代谢组样本质控及统计分析

2.1.1 各组样品与质控样本的主成分分析 采用多元统计分析，对各组样品和质控样品开展主成分分析（PCA）。由图 1 可知，S₁、S₂、S₃、S₄、QC 重复在主成分 PC1 和 PC2 上密集分布，PC1 和 PC2 的贡献率分别为 44.9%和 11.7%，表明莲雾果皮代谢组数据可靠，各样品数据重复性较好，其结果可信度高，总体上反映不同生长发育时期莲雾果皮的代谢物差异。

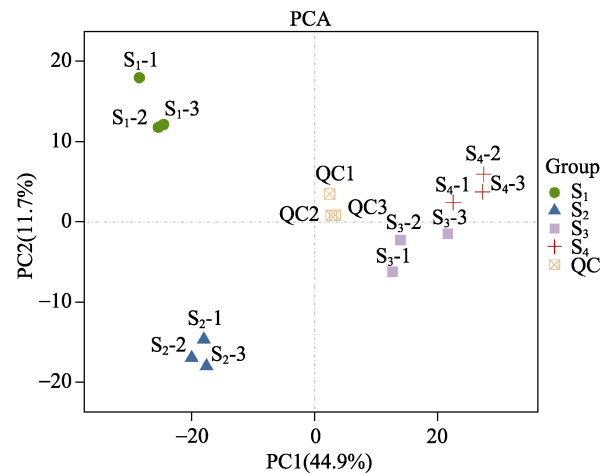


图 1 代谢物主成分分析

Fig. 1 Principal component analysis (PCA) of metabolites

2.1.2 各组样品的多元统计分析 采用多元统计分析方法，对各组样品进行偏最小二乘法判别分析（PLS-DA）和正交偏最小二乘法判别分析（OPLS-DA）。对建立在 PLS-DA、OPLS-DA 模型上的 R^2 和 Q^2 模型进行分析（表 1），结果表明，PLS-DA 中所有比较组的 $R^2X \geq 0.671$ ， $R^2Y \geq 0.998$ ， $Q^2 \geq 0.923$ ，OPLS-DA 模型中所有比较组的 $R^2X \geq 0.671$ ， $R^2Y \geq 0.998$ ， $Q^2 \geq 0.975$ 。OPLS-DA 模型的 Q^2 均大于 0.975，数据可靠，可根据代谢组数据的 VIP 值来分析筛选差异代谢物。

表 1 样品分组比较的 R^2 值和 Q^2 值

Tab. 1 Calculated R^2 and Q^2 values of different groups

组别 Group	模型 Model	R^2X	R^2Y	Q^2	组别 Group	模型 Model	R^2X	R^2Y	Q^2
S ₁ vs S ₂	PLS-DA	0.671	1.000	0.975	S ₁ vs S ₃	PLS-DA	0.918	0.999	0.997
	OPLS-DA	0.671	1.000	0.984		OPLS-DA	0.918	0.999	0.993
S ₂ vs S ₃	PLS-DA	0.879	0.999	0.993	S ₁ vs S ₄	PLS-DA	0.919	0.999	0.996
	OPLS-DA	0.879	0.999	0.982		OPLS-DA	0.919	0.999	0.995
S ₃ vs S ₄	PLS-DA	0.673	0.998	0.923	S ₂ vs S ₄	PLS-DA	0.895	0.998	0.989
	OPLS-DA	0.673	0.998	0.975		OPLS-DA	0.895	0.998	0.987

2.2 不同生长发育时期莲雾果皮代谢物分类

从不同生长发育时期莲雾果皮中共检测出 946 种代谢物（图 2），其中，氨基酸及其衍生物 177 种（18.71%）、类黄酮 140 种（14.80%）、糖类及其衍生物 96 种（10.15%）、有机酸及其衍生物 96 种（10.15%）、脂质 89 种（9.41%）、核苷酸及其衍生物 65 种（6.87%）、有机杂环化合物 54 种（5.71%）、萜类 44 种（4.65%）、酚酸类 33 种（3.49%）、酚类及其衍生物 31 种（3.28%）、其他代谢物共 121 种（12.78%）。

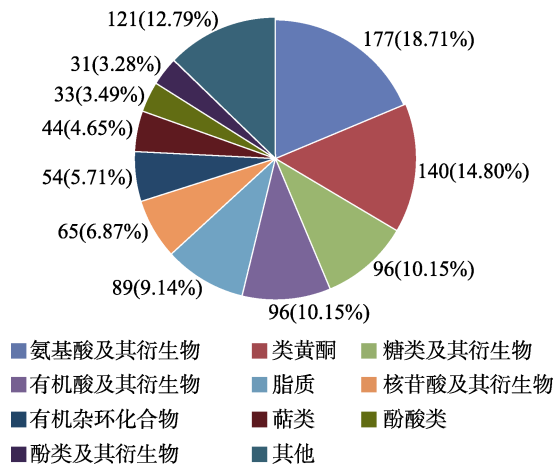


图 2 广泛靶向代谢组学检测的代谢物种类和数量
Fig. 2 Classification and quantity of metabolites detected by widely targeted metabolomics

2.3 不同生长发育时期莲雾果皮差异代谢物分析

由表 2 可知，随着果实生长发育与成熟，S₁ vs S₂ 中下调的差异代谢物数量高于上调，S₃ vs S₄ 中上调与下调数量基本持平。S₁ vs S₂、S₂ vs S₃、S₃ vs S₄、S₁ vs S₃、S₁ vs S₄、S₂ vs S₄ 中差异代谢物总数分别为 65、88、59、88、112 和 103，其中，上调的差异代谢物数量分别为 19、76、29、

表 2 差异代谢物总体分析

组别 Group	代谢物数量 Metabolite quantity		总计 Total
	上调	下调	
	Up-regulated	Down-regulated	
S ₁ vs S ₂	19	46	65
S ₂ vs S ₃	76	12	88
S ₃ vs S ₄	29	30	59
S ₁ vs S ₃	67	21	88
S ₁ vs S ₄	86	26	112
S ₂ vs S ₄	86	17	103

67、86、86，下调的差异代谢物数量分别为 46、12、30、21、26、17。

2.4 不同生长发育时期莲雾果皮共同差异代谢物分析

以 $VIP \geq 1$ 、 $FC \geq 2$ 或 ≤ 0.5 为筛选条件，有效筛选不同生长发育时期莲雾果皮的共同差异代谢物。由表 3 可知，6 个比较组之间共有 6 个共同的差异代谢物，其中，DL-苯甘氨酸、DL-丙氨酰甘氨酸、L-丙氨酰甘氨酸、赖氨酸、3-氨基丙酸甲酯等属于氨基酸及其衍生物代谢物，杨梅苷属于类黄酮代谢物。各个比较组中，DL-苯甘氨酸和杨梅苷均下调，DL-丙氨酰甘氨酸、L-丙氨酰甘氨酸、赖氨酸等代谢物在 S₁ vs S₂、S₃ vs S₄ 中下调，在 S₂ vs S₃、S₁ vs S₃、S₁ vs S₄、S₂ vs S₄ 中上调。S₂ vs S₃、S₃ vs S₄、S₁ vs S₃、S₁ vs S₄、S₂ vs S₄ 中 3-氨基丙酸甲酯上调，S₁ vs S₂ 中 3-氨基丙酸甲酯下调。

2.5 不同生长发育时期莲雾果皮差异代谢物分类

由表 4 可知，按照物质一级分类，S₁ vs S₂、S₂ vs S₃、S₃ vs S₄、S₁ vs S₃、S₁ vs S₄、S₂ vs S₄ 中的差异代谢物均以氨基酸及其衍生物、类黄酮、糖类及其衍生物、脂质为主。除 S₁ vs S₂ 外，

表 3 不同生长发育时期莲雾果皮共同差异代谢物

Tab. 3 Common differential metabolites of wax apple fruit pericarp at different growth and development stages							
序号 No.	代谢物 Metabolite	log ₂ FC					
		S ₁ vs S ₂	S ₂ vs S ₃	S ₃ vs S ₄	S ₁ vs S ₃	S ₁ vs S ₄	S ₂ vs S ₄
1	DL-苯甘氨酸	-0.37	-0.79	-0.35	-1.16	-1.52	-1.15
2	DL-丙氨酰甘氨酸	-0.45	1.51	-0.43	1.06	0.63	1.08
3	L-丙氨酰甘氨酸	-0.34	1.40	-0.39	1.06	0.66	1.01
4	赖氨酸	-0.35	1.41	-0.30	1.06	0.76	1.11
5	3-氨基丙酸甲酯	-0.25	0.52	0.51	0.27	0.78	1.03
6	杨梅苷	-0.41	-0.67	-0.77	-1.08	-1.84	-1.44

注：负数代表下调，正数代表上调。
Note: Negative represents down-regulated, positive presents up-regulated.

表 4 不同生长发育时期莲雾果皮差异代谢物分类
Tab. 4 Classification statistics of differential metabolites of wax apple fruit pericarp at different growth and development stages

代谢物种类 Kinds of metabolites	S ₁ vs S ₂	S ₂ vs S ₃	S ₃ vs S ₄	S ₁ vs S ₃	S ₁ vs S ₄	S ₂ vs S ₄
氨基酸及其衍生物	16	45	21	39	43	45
类黄酮	14	10	12	11	14	11
糖类及其衍生物	12	2	10	6	15	14
脂质	8	9	1	9	9	4
有机酸及其衍生物	4	5	4	5	8	7
有机杂环化合物	3	6	3	4	6	7
核苷酸及其衍生物	2	3	2	4	5	4
萜类		2	3	3	3	3
生物碱及其衍生物	1	2		2	2	2
胺类	2	2		2	2	2
酚类及其衍生物	1			1	1	
维生素		2		2	2	2
有机氧化合物			1		1	1
植物激素			2		1	1
苯及其取代衍生物	1					
多胺	1					
总计	65	88	59	88	112	103

其他 5 个组中均有核苷酸及其衍生物差异代谢物；除 S₃ vs S₄ 外，其他 5 个组别中均有生物碱及其衍生物和胺类差异代谢物；除 S₂ vs S₃、S₃ vs S₄ 外，其他 4 个组中均有酚类及其衍生物差异代谢物；除 S₁ vs S₂、S₃ vs S₄ 外，其他 4 个组中均维生素类差异代谢物；有机氧化合物和植物激素等 2 类差异代谢物只在 S₃ vs S₄、S₁ vs S₄、S₂ vs S₄ 中，苯及其取代衍生物和多胺等 2 类差异代谢物只在 S₁ vs S₂ 中。

2.5.1 不同生长发育时期莲雾果皮氨基酸及其衍生物差异代谢物 2.4 的结果表明，共同差异代谢物以氨基酸及其衍生物差异代谢物为主。由表 5 可知，S₁ vs S₂、S₂ vs S₃、S₃ vs S₄、S₁ vs S₃、S₁ vs S₄、S₂ vs S₄ 中分别有 16、45、21、39、43 和 45 种氨基酸及其衍生物差异代谢物，其中，分别有 0、44、8、37、41、43 种代谢物上调。

2.5.2 不同生长发育时期莲雾果皮类黄酮差异代谢物 由表 6 可知，S₁ vs S₂、S₂ vs S₃、S₃ vs S₄、S₁ vs S₃、S₁ vs S₄、S₂ vs S₄ 中分别有 14、10、12、11、14 和 11 种类黄酮差异代谢物，上调和下调的代谢物数量相近，其中杨梅苷均下调。S₁ vs S₂、S₂ vs S₃、S₁ vs S₃、S₁ vs S₄、S₂ vs S₄ 中矢车菊素

表 5 不同生长发育时期氨基酸及其衍生物差异代谢物

Tab. 5 Differential metabolites of amino acids and its derivatives of wax apple fruit pericarp at different growth and development stages

组别 Group	代谢物数量 Metabolite quantity		
	上调 Up-regulated	下调 Down-regulated	总计 Total
S ₁ vs S ₂	0	16	16
S ₂ vs S ₃	44	1	45
S ₃ vs S ₄	8	13	21
S ₁ vs S ₃	37	2	39
S ₁ vs S ₄	41	2	43
S ₂ vs S ₄	43	2	45

3-O-葡萄糖苷、橙皮苷 O-葡萄糖苷、矢车菊素 O-丁香酸、矢车菊素-3-半乳糖苷、木犀草素-4'-O-葡萄糖苷等 5 种代谢物上调。S₁ vs S₂、S₂ vs S₃、S₁ vs S₃、S₁ vs S₄ 矢车菊素上调。S₂ vs S₃、S₃ vs S₄、S₁ vs S₃、S₁ vs S₄、S₂ vs S₄ 中槲皮素 3-β-D-葡萄糖苷和异槲皮甙差异显著且均下调，S₁ vs S₂ 中差异不显著。S₂ vs S₃、S₃ vs S₄、S₁ vs S₄、S₁ vs S₄ 中绣线菊甙下调，S₁ vs S₂、S₁ vs S₃ 中差异不显著。S₁ vs S₂、S₁ vs S₃、S₁ vs S₄ 中表没食子儿茶素和乔松素下调，S₂ vs S₃、S₃ vs S₄、S₂ vs S₄ 中差异不显著。S₃ vs S₄、S₁ vs S₄、S₂ vs S₄ 中槲皮素-5-O-己糖苷和橙皮素 5-O-葡萄糖甙下调，S₁ vs S₂、S₂ vs S₃、S₁ vs S₃ 中差异不显著。S₁ vs S₂ 中五羟黄酮 O-邻己糖苷上调，紫云英苷、三叶豆甙、山奈酚-7-O-β-D-吡喃葡萄糖苷、木犀草素 7-O-葡萄糖苷下调，其他分组中差异不显著。S₃ vs S₄ 中丁香亭 5-O-己糖苷、异金丝桃苷、柠檬素 O-己糖苷、表儿茶素上调，槲皮苷、扁蓄苷下调。

2.5.3 不同生长发育时期莲雾果皮糖类及其衍生物差异代谢物 由表 7 可知，S₁ vs S₂、S₂ vs S₃、S₃ vs S₄、S₁ vs S₃、S₁ vs S₄、S₂ vs S₄ 中分别有 12、2、10、6、15 和 14 种糖类及其衍生物差异代谢物，其中 0、2、9、2、12、14 种代谢物上调，12、0、1、4、3、0 种代谢物下调。S₁ vs S₂ 中 D-葡萄糖-6-磷酸、海藻糖-6-磷酸、D-阿拉伯糖 5-磷酸酯等 12 种差异代谢物下调。S₂ vs S₃ 中差异代谢物最少，只有烟酸-己苷和阿拉伯糖醇 2 种上调差异代谢物。S₃ vs S₄ 海藻糖、异麦芽酮糖、蜜二糖等 9 种上调代谢物，只有烟酸-己苷下调。S₁ vs S₃ 中烟酸-己苷和阿拉伯糖醇等 2 种代谢物上调，D-半乳糖二酸、D-甘露糖-6-磷酸、D-葡萄糖-6-磷酸、α-D-半乳糖-1-磷酸等 4 种代谢物下调。S₁ vs S₄

表 6 不同生长发育时期类黄酮差异代谢物
Tab. 6 Differential metabolites of flavonoids of wax apple fruit pericarp at different growth and development stages

代谢物 Metabolite	log ₂ FC					
	S ₁ vs S ₂	S ₂ vs S ₃	S ₃ vs S ₄	S ₁ vs S ₃	S ₁ vs S ₄	S ₂ vs S ₄
杨梅苷	-0.41	-0.67	-0.77	-1.08	-1.84	-1.44
矢车菊素 3-O-葡萄糖苷	1.73	0.67	/	2.40	2.48	0.75
橙皮苷 O-葡萄糖苷	1.85	0.68	/	2.52	2.58	0.74
矢车菊素 O-丁香酸	1.85	0.80	/	2.65	2.66	0.81
矢车菊素-3-半乳糖苷	1.75	0.66	/	2.41	2.46	0.71
木犀草素-4'-O-葡萄糖苷	0.31	0.30	/	0.61	0.68	0.37
矢车菊素	1.23	0.83	/	2.06	1.98	/
槲皮素 3-β-D-葡萄糖苷	/	-1.20	-1.29	-1.08	-2.37	-2.49
异槲皮甙	/	-1.12	-1.29	-0.98	-2.28	-2.41
绣线菊甙	/	-1.09	-1.29	/	-2.28	-2.38
乔松素	-1.31	/	/	-1.35	-1.25	/
表没食子儿茶素	-1.09	/	/	-1.84	-2.07	/
橙皮素 5-O-葡萄糖甙	/	/	-1.52	/	-2.49	-2.37
槲皮素 5-O-己糖苷	/	/	-0.99	/	-2.23	-2.04
五羟黄酮 O-邻己糖苷	1.25	/	/	/	/	/
紫云英苷	-0.71	/	/	/	/	/
三叶豆甙	-1.09	/	/	/	/	/
山奈酚-7-O-β-D-吡喃葡萄糖苷	-1.12	/	/	/	/	/
木犀草素 7-O-葡萄糖苷	-1.09	/	/	/	/	/
丁香亭 5-O-己糖苷	/	/	1.44	/	/	/
异金丝桃苷	/	/	1.20	/	/	/
柠檬黄素 O-己糖苷	/	/	1.11	/	/	/
表儿茶素	/	/	0.70	/	/	/
槲皮苷	/	/	-1.15	/	/	/
扁蓄苷	/	/	-2.40	/	/	/
总计	14	10	12	11	14	11

注：/代表差异代谢物不显著；负数代表下调，正数代表上调。
Note: / stands that the difference metabolite is not significant; Negative represents down-regulated, positive represents up-regulated.

中上调的代谢物多于下调的，其中阿拉伯糖醇、海藻糖等 12 种代谢物上调，D-葡萄糖-6-磷酸、D-半乳糖二酸、α-D-半乳糖-1-磷酸等 3 种代谢物下调。S₂ vs S₄ 中阿拉伯糖醇、海藻糖、异麦芽酮糖等 14 种差异代谢物均上调。

2.5.4 不同生长发育时期莲雾果皮脂质差异代谢物

由表 8 可知，S₁ vs S₂、S₂ vs S₃、S₃ vs S₄、S₁ vs S₃、S₁ vs S₄、S₂ vs S₄ 中分别有 8、9、1、9、9 和 4 种脂质差异代谢物，且以上调的为主，分别有 7、9、1、8、8、4 种代谢物上调，仅仅只有十七烷酸 1 种代谢物下调。S₁ vs S₂、S₁ vs S₃、S₁ vs S₄ 中十七烷酸下调，LPC(1-酰基 18:3、16:0、18:2)、溶血磷脂酰胆碱 18:3、16:0 (2n 异构)、18:2 (2n 异构) 和 SN-甘油-3-磷酸胆碱等 7 种代谢物上调。

S₂ vs S₃ 中 SN-甘油-3-磷酸胆碱、LPC (1-酰基 16:0、18:1、18:2、18:3)、溶血磷脂酰胆碱 16:0 (2n 异构)、18:1 (2n 异构)、18:2 (2n 异构) 和柠康酸等 9 种代谢物上调。S₃ vs S₄、S₂ vs S₄ 中差异代谢数量较少，S₃ vs S₄ 中只有棕榈酸甲酯 1 种差异代谢物，S₂ vs S₄ 中仅有溶血磷脂酰胆碱 18:3、18:2 (2n 异构)、SN-甘油-3-磷酸胆碱和戊二酸二乙酯等 4 种差异代谢物。

2.6 不同生长发育阶段的莲雾果皮的差异代谢物通路分析

不同生长发育阶段的莲雾果皮的差异代谢物通路分析显示 (图 3)，S₁ vs S₂ 中共有 65 条差异代谢物通路，主要注释和富集到淀粉和蔗糖代谢 (starch and sucrose metabolism)，苯丙氨酸代谢

表 7 不同生长发育时期糖类及其衍生物差异代谢物

Tab. 7 Differential metabolite of sugars and its derivatives of wax apple fruit pericarp at different growth and development stages

代谢物 Metabolite	log ₂ FC					
	S ₁ vs S ₂	S ₂ vs S ₃	S ₃ vs S ₄	S ₁ vs S ₃	S ₁ vs S ₄	S ₂ vs S ₄
D-葡萄糖-6-磷酸	-0.54	/	0.17	-0.43	-0.26	0.27
烟酸-己苷	/	1.54	-0.36	1.47	1.11	1.18
阿拉伯糖醇	/	2.07	/	2.23	2.29	2.13
海藻糖-6-磷酸	-0.64	/	0.76	/	1.26	1.90
异麦芽酮糖	/	/	1.54	/	1.98	1.75
松二糖	/	/	1.08	/	1.11	1.00
D-果糖-6-磷酸	-0.46	/	/	/	/	0.65
D(+)-松三糖	-0.43	/	0.99	/	1.29	1.72
D-半乳糖二酸	-0.39	/	/	-0.73	-0.72	/
α-D-半乳糖-1-磷酸	-0.46	/	/	-0.48	-0.43	/
D-甘露糖-6-磷酸	-0.59	/	/	-0.61	/	/
蜜二糖	/	/	1.38	/	1.81	1.42
2-脱氧-D-半乳糖	-0.12	/	/	/	0.28	0.40
海藻糖	/	/	1.58	/	2.23	1.99
D(+)-蔗糖	/	/	/	/	1.77	1.38
肌醇半乳糖苷	/	/	/	/	1.69	1.22
松柏苷	/	/	/	/	1.76	1.25
D-赤藓糖-4-磷酸	-0.56	/	/	/	/	/
D-阿拉伯糖 5-磷酸酯	-0.64	/	/	/	/	/
D-木酮糖-5-磷酸	-0.68	/	/	/	/	/
核糖 1-磷酸	-0.63	/	/	/	/	/
葡萄糖	/	/	0.46	/	/	/
D-半乳糖	/	/	0.42	/	/	/
总计	12	2	10	6	15	14

注：/代表差异代谢物不显著；负数代表下调，正数代表上调。
Note: / stands that the difference metabolite is not significant; Negative represents down-regulated, positive represents up-regulated.

表 8 不同生长发育时期脂质差异代谢物

Tab. 8 Differential metabolites of lipids of wax apple fruit pericarp at different growth and development stages

代谢物 Metabolite	log ₂ FC					
	S ₁ vs S ₂	S ₂ vs S ₃	S ₃ vs S ₄	S ₁ vs S ₃	S ₁ vs S ₄	S ₂ vs S ₄
十七烷酸	-0.74	/	/	-0.71	-0.83	/
SN-甘油-3-磷酸胆碱	0.69	0.84	/	1.52	1.52	0.83
LPC (1-酰基 18:2)	0.84	0.79	/	1.63	1.71	/
溶血磷脂酰胆碱 16:0 (2n 异构)	1.09	1.44	/	2.53	2.72	/
LPC (1-酰基 18:3)	1.29	1.19	/	2.48	2.56	/
溶血磷脂酰胆碱 18:3	1.18	/	/	2.21	2.39	1.21
LPC (1-酰基 16:0)	1.24	1.42	/	2.66	2.88	/
溶血磷脂酰胆碱 18:2 (2n 异构)	1.09	0.99	/	2.08	2.10	1.01
棕榈酸甲酯	/	/	0.39	/	/	/
戊二酸二乙酯	/	/	/	/	0.29	0.43
溶血磷脂酰胆碱 18:1 (2n 异构)	/	1.67	/	1.94	/	/
柠康酸	/	0.24	/	/	/	/
LPC (1-酰基 18:1)	/	1.68	/	/	/	/
总计	8	9	1	9	9	4

注：/代表差异代谢物不显著；负数代表下调，正数代表上调。
Note: / stands that the difference metabolite is not significant; Negative represents down-regulated, positive represents up-regulated.

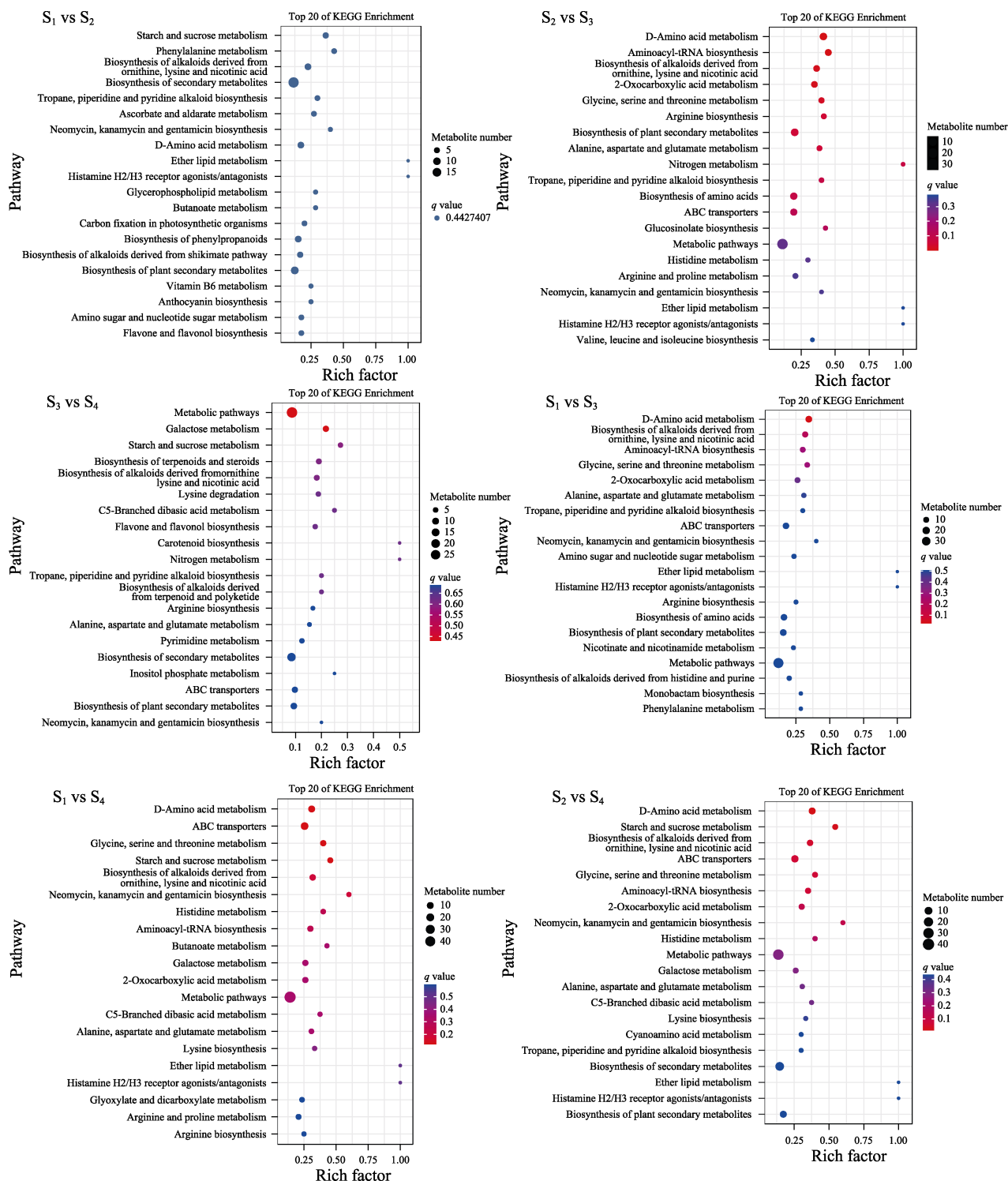


图 3 差异代谢物 KEGG 富集图

Fig. 3 KEGG enrichment map of differential metabolites

(phenylalanine metabolism), 鸟氨酸、赖氨酸和烟酸生物碱的生物合成通路 (biosynthesis of alkaloids derived from ornithine, lysine and nicotinic acid), 次级代谢物的生物合成通路 (biosynthesis of secondary metabolites) 以及丙烷、哌啶和吡啶

生物碱的生物合成 (tropane, piperidine and pyridine alkaloid biosynthesis)。S₂ vs S₃ 中共有 71 条差异代谢物通路, 主要注释和富集到 D-氨基酸代谢 (D-amino acid metabolism), 氨基酰-tRNA 的生物合成 (aminoacyl-tRNA biosynthesis), 鸟氨酸、

赖氨酸和烟酸生物碱的生物合成通路, 2-氧代羧酸代谢 (2-Oxocarboxylic acid metabolism), 甘氨酸、丝氨酸和苏氨酸的代谢 (glycine, serine and threonine metabolism)。S₃ vs S₄中共有 48 条差异代谢物通路, 主要注释和富集到新陈代谢途径 (metabolic pathways), 半乳糖代谢 (galactose metabolism), 淀粉和蔗糖代谢, 萜类和类固醇的生物合成 (biosynthesis of terpenoids and steroids), 鸟氨酸、赖氨酸和烟酸生物碱的生物合成通路。S₁ vs S₃中共有 67 条差异代谢物通路, KEGG 富集的前 5 个代谢通路与 S₂ vs S₃一致。S₁ vs S₄中共有 68 条差异代谢物通路, 注释和富集到 D-氨基酸代谢, ABC 转运体 (ABC transporters), 甘氨酸、丝氨酸和苏氨酸的新陈代谢, 淀粉和蔗糖代谢, 鸟氨酸、赖氨酸和烟酸生物碱的生物合成通路。S₂ vs S₄中鉴定出的 71 条差异代谢物通路, KEGG 富集的前 5 个代谢通路与 S₁ vs S₄的一致。

3 讨论

莲雾果实富含氨基酸及其衍生物、类黄酮、糖类及其衍生物、酚类化合物、萜类和甾醇等初级和次级代谢物^[5-6], 具有较高的营养和保健价值。本研究基于广泛靶向代谢组学, 从不同生长发育时期莲雾果皮中共检测出 946 种代谢物, 其中氨基酸及其衍生物、类黄酮、糖类及其衍生物、有机酸及其衍生物、脂质等代谢物的种类较多, 这些代谢物影响莲雾果实色泽、品质及风味, 与阮赞誉等^[22]的研究结果一致。莲雾果皮代谢物种类以氨基酸及其衍生物、类黄酮、糖类及其衍生物和有机酸及其衍生物为主, 与软枣猕猴桃^[14]、桂葡萄柚 1 号果肉^[15]、泰国红宝石柚^[16]、李^[23]、小米辣^[24]等果实的代谢物种类一致。

氨基酸是植物中最重要的初级代谢产物之一, 是评价果实综合品质和营养价值的重要指标, 同时也具有一定的呈味特性, 对果实口感、风味和香气具有一定影响^[25-26]。莲雾果皮差异代谢物中氨基酸及其衍生物的种类和数量较多, 其共同的差异代谢物以氨基酸为主。随着莲雾果实的生长发育和成熟, 氨基酸的组成和含量不断发生变化, 影响着莲雾果实品质和风味, 这与桂葡萄柚 1 号果实^[15]、刺梨果实^[25]的氨基酸变化规律一致。

类黄酮化合物含量和种类不仅与植物果实颜色变化和色泽有关, 而且具有抗氧化、抗炎、降

低胆固醇、抗菌及抗癌等功效^[27-30]。刘浩然等^[14]对不同品种软枣猕猴桃的黄酮类化合物进行比较研究, 发现花色苷类黄酮物质调控猕猴桃果实颜色, 黄酮醇类、花青素类等物质赋予果实抗癌辅助、血糖调节、神经细胞防护等多元营养价值。胡华冉等^[24]对小米辣果实成熟过程中的代谢物比较分析发现, 小米辣中富含花青素 (如天竺葵、矢车菊、芍药花素、飞燕草素等), 具有抗水肿、抗氧化、抗炎和抗癌等保护作用, 这些研究结果说明类黄酮化合物会影响果实颜色, 且具有一定的抗氧化、抗炎、抗菌及抗癌等功效, 本研究结果与上述研究结果相符。莲雾果皮中含有抗氧化特性强的橙皮苷 O-葡萄糖苷、杨梅苷、槲皮苷、异金丝桃苷、表儿茶素、柠檬素 O-己糖苷、丁香亭 5-O-己糖苷等类黄酮代谢物, 其组分和含量变化规律与番石榴^[30]、桑葚相似^[31]。

甜度是水果感官质量评估中的一个重要特征, 由果实的代谢物组成决定, 如糖类及其衍生物和有机酸^[31-32]。本研究结果表明, 随着果实的生长发育和成熟, 莲雾果皮中糖类及其衍生物等代谢物上调, 果实的甜度增加, 品质升高, 与芒果^[32]、桑葚^[33]中糖类的变化规律一致。莲雾果实生长发育前期, 脂质差异代谢物较多, 果实成熟时期, S₃ vs S₄中只有棕榈酸甲酯一种差异代谢物。随着果实的成熟, 脂质代谢物减少, 果实品质提升。

莲雾果实不同生长发育时期, 差异代谢物富集通路不断发生变化, 主要代谢通路富集到半乳糖代谢、淀粉和蔗糖代谢、萜类和类固醇的生物合成以及氨基酸生物合成等代谢通路, 这些代谢通路不仅与氨基酸代谢、糖类代谢以及固形物含量密切相关, 也与果实的挥发性香气成分密切相关, 它们共同作用, 影响果实品质和果实香气。

综上, 不同生长发育时期的莲雾果皮的差异代谢物以氨基酸及其衍生物、类黄酮、糖类及其衍生物、脂质为主。S₂ vs S₃中的差异代谢物数量较多, S₃ vs S₄中的上调和下调差异代谢物数量相近。S₂ vs S₃中以氨基酸及其衍生物和脂质类差异代谢物为主, S₃ vs S₄中以类黄酮和糖类及其衍生物类差异代谢物为主。S₂ vs S₃中以与色泽相关的类黄酮差异代谢物为主, S₃ vs S₄中以与抗氧化、抗炎活性相关的差异代谢物为主。谢花后 30 d (S₂) 和 45 d (S₃) 是莲雾生长发育和色泽变化的关键时期, 45 d (S₃) 和 60 d (S₄) 是莲雾的抗

氧化、抗炎活性相关类黄酮代谢物、糖类及其衍生物类合成的关键时期,影响莲雾果实品质和营养价值。后续可深入开展氨基酸及其衍生物、类黄酮、糖类及其衍生物的合成和积累相关研究,为莲雾功能性成分开发及综合利用奠定基础。

参考文献

- [1] WEI X Q, CHEN M, ZHANG X J, WANG Y H, LI L, XU L, WANG H H, JIANG M W, WANG C H, ZENG L H, XU J H. The haplotype-resolved autotetraploid genome assembly provides insights into the genomic evolution and fruit divergence in wax apple [*Syzygium samarangense* (Bl.) Merr. et Perry][J]. *Horticulture Research*, 2023, 10(12): 214-225.
- [2] 郑加协, 周红玲, 张少平, 郑云云. 漳州莲雾产期调节技术研究[J]. *果树学报*, 2016, 33(12): 1517-1522.
ZHENG J X, ZHOU H L, ZHANG S P, ZHENG Y Y. A study on the techniques for producing off-season wax apples in Zhangzhou[J]. *Journal of Fruit Science*, 2016, 33(12): 1517-1522. (in Chinese)
- [3] KHANDAKER M M, SARWAR J M, MAT N, BOYCE A N. Bioactive constituents, antioxidant and antimicrobial activities of three cultivars of wax apple (*Syzygium samarangense* L.) fruits[J]. *Research Journal of Biotechnology*, 2015, 10(1): 7-16.
- [4] AUNG E E, ALFINDA N K, NANIK S A, YOSHIKI T, RICO R. Plant description, phytochemical constituents and bioactivities of *Syzygium* genus: a review[J]. *Open Chemistry*, 2020, 18(1): 1256-1281.
- [5] TARIGAN C, PRAMASTYA H, INSANU M F I. *Syzygium samarangense*: review of phytochemical compounds and pharmacological activities[J]. *Biointerface Research in Applied Chemistry*, 2022, 12(2): 2084-2107.
- [6] AKSHATHA B, NARASIMHA S W, JAMEEL M A, PRAVEEN N. The role of *Syzygium samarangense* in nutrition and economy: an overview[J]. *South African Journal of Botany*, 2022(145): 481-492.
- [7] NURULJANNAH S I, SITI Z I, NASHRIYAH M, MOHAMMAD M K. Comparative physiological response of three wax apple (*Syzygium samarangense*) tree cultivars at flower bud development stage[J]. *Bioscience Research*, 2018, 15(1): 402-411.
- [8] YANG Q, ZHANG A H, MIAO J H, SUN H, HAN Y, YANG G L, WU F F, WANG X J. Metabolomics biotechnology, applications, and future trends: a systematic review[J]. *Royal Society of Chemistry Advances*, 2019, 9(64): 37245-37257.
- [9] 王梦迪, 雍旭红, 印敏, 王奇志. 代谢组学技术在植物次生代谢调控研究中的应用[J]. *植物科学学报*, 2023, 41(2): 269-278.
- WANG M D, YONG X H, YIN M, WANG Q Z. The application of metabolomics technology in the research of secondary metabolism regulation in plants[J]. *Plant Science Journal*, 2023, 41(2): 269-278. (in Chinese)
- [10] CHEN L, ZHONG F Y, ZHU J J. Bridging targeted and untargeted mass spectrometry-based metabolomics via hybrid approaches[J]. *Metabolites*, 2020, 10(9): 348-366.
- [11] XIAO Q, MU X L, LIU J S, LI B, LIU H T, ZHANG B G, XIAO P G. Plant metabolomics: a new strategy and tool for quality evaluation of Chinese medicinal materials[J]. *Chinese Medicine*, 2022, 17(1): 45-63.
- [12] 兰天, 段国珍, 祁有朝, 樊光辉, 白春燕, 张叶德. 红果枸杞和黄果枸杞广泛靶向代谢组学分析[J]. *食品工业科技*, 2024, 45(24): 9-20.
LAN T, DUAN G Z, QI Y C, FAN G H, BAI C Y, ZHANG Y D. Extensively targeted metabolomics analysis of red and yellow wolfberries[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2024, 45(24): 9-20. (in Chinese)
- [13] 兰天, 段国珍, 祁有朝, 樊光辉. 黑果枸杞和黄果枸杞的广泛靶向代谢组学分析[J]. *食品科学*, 2024, 45(12): 52-58.
LAN T, DUAN G Z, QI Y C, FAN G H. Widely targeted metabolomic analysis of *Lycium ruthenicum* Murr and *Lycium barbarum* L. var. *auranticarpum* K. F. Ching fruits[J]. *Food Science*, 2024, 45(12): 52-58. (in Chinese)
- [14] 刘浩然, 刘赫宣, 任达华, 杨玉红, 王虹玲. 基于广靶代谢组学的不同品种软枣猕猴桃黄酮类化合物的比较分析[J/OL]. *食品工业科技*, (2025-09-26)[2025-09-28]. <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2025060136>.
LIU H R, LIU H X, REN D H, YANG Y H, WANG H L. Comparative analysis of flavonoids in different varieties of *Actinidia arguta* based on widely targeted metabolomics[J/OL]. *Food Industry Technology*, (2025-09-26)[2025-09-28]. <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2025060136>. (in Chinese)
- [15] 刘福平, 廖惠红, 王茜, 陈东奎, 韦持章, 黄宏明, 黄其椿, 汪妮娜. 基于广泛靶向代谢组学分析不同成熟度桂葡萄柚 1 号果肉成分差异[J]. *热带作物学报*, 2024, 45(12): 2487-2499.
LIU F P, LIAO H H, WANG X, CHEN D K, WEI C Z, HUANG H M, HUANG Q C, WANG N N. Differential analysis of flesh compounds of grapefruit of Guipuyou No. 1 at different maturation stages based on widely targeted metabolomics[J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2024, 45(12): 2487-2499. (in Chinese)
- [16] 刘承浪, 杨帆, 周先艳, 高俊燕, 赵东兴, 顾进楼, 王绍华, 郭莉娜, 毕光林, 赵爱秋, 岳建强, 董美超. 基于代谢组学分析泰国红宝石柚果肉差异代谢物[J/OL]. *果树学报*, (2025-07-27)[2025-08-20]. <https://doi.org/10.13925/j.cnki.gsxh>.

20250234.
LIU C L, YANG F, ZHOU X Y, GAO J Y, ZHAO D X, GU J L, WANG S H, GUO L N, BI G L, ZHAO A Q, YUE J Q, DONG M C. Metabolomics analysis of differential metabolites *Citrus grandis* 'Taiguohongbaoshiyou' pummelo fruit pulp[J/OL]. Journal of Fruit Science, (2025-07-27) [2025-08-20]. <https://doi.org/10.13925/j.cnki.gsxb.20250234>. (in Chinese)
- [17] 张雪芹, 欧阳海波, 赖瑞云, 钟赞华, 林建忠, 谢志南. 缓释复合肥对扦插莲雾叶绿素荧光参数的影响[J]. 南方农业学报, 2016, 47(2): 191-195.
ZHANG X Q, OUYANG H B, LAI R Y, ZHONG Z H, LIN J Z, XIE Z N. Effects of slow-release compound fertilizer on chlorophyll fluorescence parameters of *Syzygium samarangense* cuttings[J]. Journal of Southern Agriculture, 2016, 47(2): 191-195. (in Chinese)
- [18] 许丹勇, 王远铭, 林思鸿, 王宇洋, 李华东, 邢军, 马亚龙, 林电. '南鹿一号'莲雾果实生长发育与品质的形成[J/OL]. 热带生物学报, 2025, 16(4): 580-589.
XU D Y, WANG Y M, LIN S H, WANG Y Y, LI H D, XING J, MA Y L, LIN D. Growth and quality formation of 'Nanlu No. 1' wax apple fruit[J/OL]. Journal of Tropical Biology, 2025, 16(4): 580-589. (in Chinese)
- [19] 刘永霞, 吴斌, 王安邦, 李川, 王丽霞, 何应对, 鞠俊杰, 王必尊. 有机无机肥配施对莲雾生长发育、产量及品质的影响[J]. 中国南方果树, 2017, 46(3): 92-94.
LIU Y X, WU B, WANG A B, LI C, WANG L X, HE Y D, JU J J, WANG B Z. Effects of combined application of organic and inorganic fertilizers on the growth and development, yield and quality of wax apple[J]. South China Fruits, 2017, 46(3): 92-94. (in Chinese)
- [20] 魏秀清, 章希娟, 余东, 许玲, 陈志峰, 许家辉. 莲雾农科二号果实发育过程中果皮色泽和色素的变化[J]. 热带作物学报, 2012, 33(11): 1985-1990.
WEI X Q, ZHANG X J, YU D, XU L, CHEN Z F, XU J H. Changes of color and pigments in Nongke 2 wax jambu pericarp at different developmental phase[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2012, 33(11): 1985-1990. (in Chinese)
- [21] CHEN C J, CHEN H, ZHANG Y, THOMAS H R, FRANK M H, HE Y H, XIA R. TBtools: an integrative toolkit developed for interactive analyses of big biological data[J]. Molecular Plant, 2020, 13(8): 1194-1202.
- [22] 阮赞誉, 金菊, 范晓凌. 黑珍珠莲雾果实不同发育阶段挥发物成分分析[J]. 华南农业大学学报, 2013, 4(2): 182-186.
RUAN Z Y, JIN J, FAN X L. Volatile constituent of black pearl wax apple fruit at different developmental stages[J]. Journal of South China Agricultural University, 2013, 34(2): 182-186. (in Chinese)
- [23] 常晓晓, 彭程, 陈慧琼, 邱继水, 陆育生. 基于广泛代谢组学解析不同品种李果实代谢物的差异[J]. 食品科学, 2024, 45(16): 151-160.
CHANG X X, PENG C, CHEN H Q, QIU J S, LU Y S. Non-targeted metabolomics analysis of differences in fruit metabolites of different plum varieties[J]. Food Science, 2024, 45(16): 151-160. (in Chinese)
- [24] 胡华冉, 钟秋月, 杜磊, 张芮豪, 李卫芬, 刘发万, 桂敏. 2种云南特色小米辣果实成熟过程中代谢物比较分析[J]. 热带作物学报, 2025, 46(2): 343-358.
HU H R, ZHONG Q Y, DU L, ZHANG R H, LI W F, LIU F W, GUI M. Comparative analysis of metabolites in two kinds of yunnan xiaomila fruits during ripening[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2025, 46(2): 343-358. (in Chinese)
- [25] 鲁敏, 安华明, 赵小红. 无籽刺梨与刺梨果实中氨基酸分析[J]. 食品科学, 2015, 36(14): 118-121.
LU M, AN H M, ZHAO X H. Analysis of amino acids in *Rosa sterilis* and *Rosa roxburghii* fruits[J]. Food Science, 2015, 36(14): 118-121. (in Chinese)
- [26] 李文云, 罗恽, 柏自琴, 王小柯, 李金强. 柠檬和宽皮柑橘果肉的氨基酸组成特征分析[J]. 贵州农业科学, 2019, 47(7): 100-104.
LI W Y, LUO Y, BAI Z Q, WANG X K, LI J Q. Study on composition characteristics of amino acids in pulp of lemon and loose-skin mandarin[J]. Guizhou Agricultural Sciences, 2019, 47(7): 100-104. (in Chinese)
- [27] TRANG D T, HOANG N H, BANG N A, YEN P H, DUNG D T, HUYEN L T, HUONG P T T, HAI YEN D T, TAI B H, KIEM P V. Discovery of undescribed triterpenoids and flavonoids from the fruits of *Syzygium attopuense* with their α -glucosidase and α -amylase inhibitory activity[J]. Chemistry Biodiversity, 2025, 22(8): e202403233.
- [28] ZHANG X L, ZHANG D N, LI W H, LI J C, LI S X, ZHANG W X, ZHANG P, CUI K J, HUO J W, GANG H X, QIN D. Transcriptome profiling reveals the regulatory mechanisms of AsA (ascorbic acid) and flavonoid synthesis and metabolic processes in fruit development of *Ribes nigrum* L[J]. Molecular Genetics and Genomics, 2025, 300(1): 62
- [29] 王岳, 钱井, 曹锦萍, 孙崇德. 柑橘 35 个品种果实黄酮类物质组分和含量分析[C]//中国园艺学会. 中国园艺学会 2018 年学术年会, 2018.
WANG Y, QIAN J, CAO J P, SUN C D. Analysis of flavonoids composition and content in the fruits of 35 citrus varieties[C]//Chinese Horticultural Society. Abstracts of the 2018 Annual Academic Conference of the Chinese Horticultural Society, 2018. (in Chinese)
- [30] 邵雪花, 赖多, 肖维强, 刘传和, 贺涵, 匡石滋. 番石榴果实品质评价及黄酮类化合物合成相关基因挖掘[J]. 华南

- 农业大学学报, 2023, 44(2): 245-253.
- SHAO X H, LAI D, XIAO W Q, LIU C H, HE H, KUANG S Z. Evaluation of guava fruit quality and mining of genes related to flavonoid synthesis[J]. Journal of South China Agricultural University, 2023, 44(2): 245-253. (in Chinese)
- [31] 钟秋珍, 林旗华, 张泽煌. 桑葚不同果实发育阶段的代谢组学分析[J]. 福建农业学报, 2024, 39(9): 1069-1075.
- ZHONG Q Z, LIN Q H, ZHANG Z H. Metabolomics of mulberry fruits at developmental stages[J]. Fujian Journal of Agricultural Sciences, 2024, 39(9): 1069-1075. (in Chinese)
- [32] LI L, WU H X, MA X W, XU W T, LIANG Q Z, ZHAN R L, WANG S B. Transcriptional mechanism of differential sugar accumulation in pulp of two contrasting mango (*Mangifera indica* L.) cultivars[J]. Genomics, 2020, 112(6): 4505-4515.
- [33] 张若彤, 李蒙, 齐一鸣, 王晓萍, 孙志超. 转录组和代谢物联合分析桑葚发育过程中可溶性糖和有机酸代谢的变化[J]. 果树学报, 2021, 41(4): 690-702.
- ZHANG R T, LI M, QI Y M, WANG X P, SUN Z C. Transcriptome and metabolome combined analysis metabolism change of soluble sugars and organic acids in mulberry fruit during development stages[J]. Journal of Fruit Science, 2021, 41(4): 690-702. (in Chinese)