

3种百香果基本营养成分及代谢组分析

吴佩玲, 李霞, 陆佳慧, 陆焕钊, 李静, 董新红, 邱福荣, 姜铁民*
(桂林理工大学化学与生物工程学院, 广西桂林 541006)

摘要: 为探究广西不同产区钦蜜9号营养组分、植物化学物质组成与其他品种百香果的差异, 对比分析了钦州、桂林钦蜜9号和钦州紫果的基本成分、矿物质和代谢物组成。结果表明, 不同产区钦蜜9号和紫果的营养成分差异显著, 其中钦州钦蜜9号总糖(10.03 g/100 g)、粗蛋白(2.28 g/100 g)、K(0.93 g/100 g)含量最丰富, 桂林钦蜜9号Ca(52.48 mg/100 g)、Se(1.19 μg/100 g)含量更丰富, 而粗脂肪和膳食纤维含量以紫果最高。3种百香果果浆均检测到470种代谢物, 多酚类(80种)、萜类(27种)和生物碱(24种)等次生代谢物种类丰富, 其中桂林钦蜜9号多酚类含量(9.20%)显著高于钦州钦蜜9号(5.45%)和紫果(6.43%), 而紫果含更高的黄酮类和生物碱。差异分析发现, 钦州与桂林钦蜜9号、钦州钦蜜9号与紫果、桂林钦蜜9号与紫果的显著差异代谢物分别为73、96和114种, 通过参与果糖和甘露糖代谢、氨基酸代谢等途径影响百香果口感和营养特性。该文结果可为指导百香果消费、深加工和定向育种提供参考。

关键词: 钦蜜9号; 紫果百香果; 营养成分; 非靶代谢组学
文章编号: 1673-9078(2025)10-152-163 **DOI:** 10.13982/j.mfst.1673-9078.2025.10.1046

Basic Nutrient Composition and Metabolomic Analysis of Three Varieties of Passion Fruit

WU Peiling, LI Xia, LU Jiahui, LU Huanzhao, LI Jing, DONG Xinhong, KHOO HOCK ENG, JIANG Tiemin*
(College of Chemistry and Bioengineering, Guilin University of Technology, Guilin 541006, China)

Abstract: To investigate the differences in the nutritional components and phytochemical compositions of Qinmi No. 9 passion fruit from different regions of Guangxi, the basic components, minerals, and metabolites of Qinmi No. 9 from Qinzhou and Guilin and purple passion fruit from Qinzhou were compared. The results revealed significant differences in nutritional components among the different passion fruit varieties. Specifically, Qinzhou Qinmi No. 9 showed the highest contents of total sugars (10.03 g/100 g), crude protein (2.28 g/100 g), and potassium (0.93 g/100 g). Guilin Qinmi No. 9 exhibited the highest levels of calcium (52.48 mg/100 g) and selenium (1.19 μg/100 g), whereas purple passion fruit had the highest contents of crude fat and dietary fiber. A total of 470 metabolites were detected in the fruit pulps of the three passion fruit varieties. Secondary metabolites included a rich variety of polyphenols (80 types), terpenes (27 types), and alkaloids (24 types). Notably, the content of polyphenols in Guilin Qinmi No. 9 (9.20%) was significantly higher than that in Qinzhou Qinmi No. 9 (5.45%) and purple passion fruit (6.43%), whereas purple passion fruit contained higher levels of flavonoids and alkaloids than the other two varieties. Differential analysis revealed significant differences in metabolites, with 73, 96, and 114 differential metabolites between Qinzhou vs. Guilin

引文格式:
吴佩玲,李霞,陆佳慧,等.3种百香果基本营养成分及代谢组分析[J].现代食品科技,2025,41(10):152-163.
WU Peiling, LI Xia, LU Jiahui, et al. Basic nutrient composition and metabolomic analysis of three varieties of passion fruit [J]. Modern Food Science and Technology, 2025, 41(10): 152-163.

收稿日期: 2024-07-21; 修回日期: 2024-09-12; 接受日期: 2024-09-13
基金项目: 中央引导地方科技发展专项资金(桂科ZY22096025); 广西科技计划项目(桂科AD20297088); 广西自然科学基金项目(2021GXNSFAA220072); 国家自然科学基金地区基金(31860251)
作者简介: 吴佩玲(1999-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 生物大分子, E-mail: plwu@glut.edu.cn
通讯作者: 姜铁民(1971-), 女, 硕士, 教授级高工, 研究方向: 食品营养与健康, E-mail: jtm@glut.edu.cn

Qinmi No. 9, Qinzhou Qinmi No. 9 vs. purple passion fruit, and Guilin Qinmi No. 9 vs. purple passion fruit, respectively. These differences influenced the taste and nutritional characteristics of passion fruit through pathways involving fructose and mannose metabolism and amino acid metabolism. These findings provide a valuable reference for passion fruit consumption, deep processing, and targeted breeding.

Key words: Qinmi No. 9; purple passion fruit; nutritional composition; non-target metabolomics

百香果 (*Passiflora edulis* Sims) 又称“鸡蛋果”、“西番莲”，是西番莲科、西番莲属的多年生常绿藤本植物^[1]。西番莲属的植物超 400 种，但能食用的仅有 60 多种，统称为百香果^[2]，其中商业栽培的百香果有 6 种，以紫果百香果和黄金百香果为最常见品种和经济价值最大^[3]。广西作为目前我国最大的百香果产区，种植品种主要为紫果百香果（台农 1 号、紫香）和芭乐味黄金百香果等^[2]。“钦蜜 9 号”是 2019 年由广西钦赐农业科技有限公司与广西农业科学院联合选育的黄金百香果新品种，因具有高产、耐热、甜度高、抗病能力强等优势，在百香果产业得到蓬勃发展^[4]。百香果是氨基酸、维生素、酚类、类黄酮、糖类、膳食纤维和矿物质等营养物质的丰富来源，百香果具有抗氧化^[5,6]、神经保护^[7]、抑菌^[8]、抗癌^[9]、抗炎^[10]、治疗骨关节炎^[11]、抗焦虑^[12]等功效，成为重要的药食两用植物。但百香果的化学组分因品种、种植环境、成熟度、检测部位等不同而存在差异^[13-16]，如广西容县的黄金百香果、台农、紫果 1 号百香果果肉中的蛋白质、总糖及矿物质等营养成分存在显著差异^[14]，贵州、福建、广西的黄金百香果果肉的挥发性成分主要是酯类和萜类^[15]，而福建龙岩市的“台农”、“紫香”、“芭乐味黄金百香果”、“实生株系紫果”和“满天星”百香果果汁（含果籽）中挥发性成分则以酯类和酮类为主^[16]。因此，研究不同百香果的化学组成及其形成途径，有助于改善百香果的风味和营养健康品质，提升百香果的商业价值。

“钦蜜 9 号”作为新品种，目前研究大部分集中在栽培技术方面，对其营养成分，特别是活性成分研究甚少^[13,17]。为探究广西不同产区“钦蜜 9 号”基本营养成分和植物化学物质组成，本文选取钦州市和桂林市生产的“钦蜜 9 号”为研究对象，采用食品安全国家标准食品营养成分检测方法和非靶代谢组学，分析其营养成分、次生代谢物和代谢通路的差异，同时对比紫果百香果，以期为百香果资源的深加工利用和定向育种、栽培提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料和仪器

百香果果实：于 2023 年 9 月购自广西钦州市浦北

县张黄镇（109°46'E, 22°00'N）和桂林市雁山区雁山镇（110°23'E, 25°12'N），两个地区均属于亚热带季风气候，年均降雨量为 1 750~1 817 mm；选取的百香果分别为钦州“钦蜜 9 号”（XA）、桂林“钦蜜 9 号”（XB）和钦州紫果（XC）。每个地区选取果形、大小、成熟度一致（全黄和全红）、无机械损伤的果实各 6 个，清洗后破壳取果浆（含果籽、果汁）混合、匀浆、过滤，取滤液用于后续分析，每个样品做 4 组平行。

主要试剂：甲酸，梯希爱（上海）化成工业发展有限公司；乙腈，美国 Thermo 公司；甲酸铵，美国 Sigma 公司；H₂O，美国 Millipore 公司。

主要设备：液相色谱仪、iCAP TQ 电感耦合等离子体质谱仪、Q Exactive 质谱仪，美国 Thermo 公司；ACQUITY UPLC[®] HSS T3 色谱柱（2.1×100 mm，1.8 μm），美国 Waters 公司；H1850-R 冷冻离心机，湖南湘仪实验室仪器开发有限公司；BE-2600 混匀仪，海门市其林贝尔仪器制造有限公司；MB-96 组织研磨器，浙江美壁仪器有限公司。

1.2 基本营养成分及矿物质元素的检测

1.2.1 基本营养成分的测定

总糖含量参照苯酚-硫酸法^[18]；粗蛋白含量参照《GB 5009.5-2016 食品安全国家标准食品中蛋白质的测定》；粗脂肪含量参照《GB 5009.6-2016 食品安全国家标准食品中脂肪的测定》；灰分、膳食纤维含量均参照《GB 5009.4-2016 食品安全国家标准食品中灰分的测定》。

1.2.2 矿物质元素的测定

称取 0.20 g 样本于微波消解罐中，加入 5.00 mL 硝酸进行消解（消解参考条件：10 min 内升温至 120 °C 并保持 3 min，10 min 内升温至 160 °C 并保持 3 min，10 min 内升温至 190 °C 并保持 20 min）。冷却后取出排气后，放置在赶酸仪上除酸，赶至近干。用少量水冲洗内盖，用 1% 硝酸定容至 10.00 mL，混匀，于电感耦合等离子体质谱仪上进行检测。

1.3 非靶代谢组学分析

1.3.1 代谢物的提取

精确称量 100 mg 样本置于 2.00 mL 离心管中，加

入含 2-氯-L-苯丙氨酸 (4 ppm) 的 600 μ L 甲醇, 并涡旋振荡 30 s; 在组织研磨器中以 55 Hz 研磨 60 s; 常温超声 15 min; 12 000 r/min 4 $^{\circ}$ C 离心 10 min, 取上清液过 0.22 μ m 膜过滤, 滤液用于 LC-MS 检测。

1.3.2 液相色谱-质谱联用仪分析

采用超高效液相系统进行分析。色谱柱为 ACQUITY UPLC[®] HSS T3 (2.1 $\times$ 100 mm, 1.8 μ m), 流速 0.30 mL/min, 柱温 40 $^{\circ}$ C, 进样量 2.00 μ L。以正离子和负离子两种模式分析代谢产物^[19], 其中正离子流动相为 0.10% 甲酸乙腈 B₁ 和 0.10% 甲酸水 A₁, 负离子流动相为乙腈 B₂ 和 5 mmol/L 甲酸铵水 A₂。洗脱程序为 0~1 min, 8% B₁(B₂); 1~8 min, 8%~98% B₁(B₂); 8~10 min, 98% B₁(B₂); 10~10.1 min, 98%~8% B₁(B₂); 10.1~12 min, 8% B₁(B₂)。

利用质谱检测器、电喷雾离子源 (ESI), 通过正、负离子模式分别采集数据。正离子喷雾电压为 3.50 kV, 负离子喷雾电压为 -2.50 kV。以分辨率 70 000 进行一级全扫描, 并采用 HCD 进行二级裂解, 二级分辨率为 17 500, 采集信号前 10 离子进行碎裂, 同时采用动态排除去除无必要的 MS/MS 信息^[20]。

1.4 数据处理与统计分析

结果以平均值 $\pm$ 标准偏差表示, 采用 Microsoft Office Excel 2019 进行数据整理, 采用 IBM SPSS Statistics 22 统计软件和 Origin 2022 进行差异显著性分析及绘图, P 值 < 0.05 代表统计学差异。

非靶代谢检测数据采用京都基因与基因组百科全书 <https://www.genome.jp/kegg/pathway.html> (Kyoto Encyclopedia of Genes and Genomes, KEGG)、人类代谢组数据库 <https://hmdb.ca/metabolites> (Human Metabolome Database, HMDB)、脂质代谢物和途径策略数据库 <http://www.lipidmaps.org/> (The Lipid Metabolites and Pathways Strategy, LIPID MAPS), 及诺米代谢自建代谢物数据库对鉴定到的代谢物进行注释。采用多反应监测模式对实验样本进行检测, 根据代谢物的质荷比、保留时间、峰面积等进行定性分析, 并以每个样本中单个组分峰面积占总峰面积的百分比计算相对定量。多元统计分析部分, 使用 BioDeep 云平台 (<https://www.biodeep.cn/>) 进行主成分分析 (Principal Component Analysis, PCA) 和正交偏最小二乘判别分析 (Orthogonal Partial Least Squares-Discriminant Analysis, OPLS-DA)。单变量分析部分, 基于 t 检验 FDR 调整后 P 值 (q 值) 筛选两组间具有统计学显著性差异的代谢物, 并计算代谢物在两组间的差异倍数 (Fold Change, FC)。差异代谢物筛选的标准设定为

变量重要性投影 (Variable Importance in the Projection, VIP) 即 $VIP > 1$ 且 $\log_2 FC \geq |1|$ 、 $q < 0.05$ 。

2 结果与讨论

2.1 常规营养成分

百香果以鲜食为主, 可食用部分一般包括果肉和种籽, 含有丰富的膳食纤维、矿物质、脂肪酸等营养成分, 但含量与种植地区和品种有关^[21]。本文采用国标方法分别检测了不同产区“钦蜜 9 号”果浆 (XA、XB) 百香果中蛋白质、脂肪、灰分和膳食纤维的含量, 并与钦州紫果比较。结果表明 (表 1), 总糖和膳食纤维是“钦蜜 9 号”果浆的主要成分, 平均含量分别在 9.72 g/100 g 和 12.44 g/100 g 以上。差异分析显示, 除膳食纤维外, 总糖、粗蛋白、粗脂肪和灰分在“钦蜜 9 号”果浆间存在显著差异 ($P < 0.05$, 下同), 其中总糖和粗蛋白以 XA 含量更丰富, 而粗脂肪和灰分则 XB 含量更高。相比于 XC, 总糖、粗蛋白含量显著低于“钦蜜 9 号”果浆, 粗脂肪和总膳食纤维显著高于“钦蜜 9 号”果浆; 灰分表现为 XC 显著高于 XA, 与 XB 差异不显著 ($P > 0.05$)。

据报道称, 百香果果籽是果实中蛋白质和脂质含量最丰富的部位, 如紫果果籽每 100 g 干重约含 13.20 g 蛋白、14.90 g 脂肪^[5]; 其次是果肉, 每 100 g 湿重含蛋白 2.20~3.00 g、脂肪 0.48~0.70 g; 果汁则主要由葡萄糖、果糖和蔗糖等碳水化合物和蛋白组成, 每 100 g 湿重约含 7.40~14.30 g 糖、0.39~1.20 g 蛋白质^[17]。“钦蜜 9 号”果浆中蛋白 (1.95~2.28 g/100 g) 和脂肪含量 (0.50~0.60 g/100 g) 明显不同于郭艳峰等^[14]测定的广西容县黄金果果肉 (不含果籽) 蛋白 (0.86~0.97 g/100 g) 和脂肪含量 (0.91~1.00 g/100 g), 而潘薇等^[16]测定的黄金果、紫果及两者杂交百香果果肉中的总糖含量 (9.83~16.00 g/100 g) 普遍高于本测定值 (8.95~10.03 g/100 g), 除与百香果品种遗传特性和取材不同有关外, 生长环境 (海拔高度、气候条件、土壤条件)、栽培管理 (灌溉和施肥) 以及成熟度等因素可能影响检测结果^[21]。

此外, 百香果果籽和果皮含有极其丰富的膳食纤维, 其中果籽每 100 g 干重约含 51.50~65.60 g 膳食纤维, 且黄金百香果品种显著高于紫果百香果^[5], 而果肉中膳食纤维含量甚微 (0.10~0.20 g/100 g 湿重)^[17]。因此, “钦蜜 9 号”果浆和钦州紫果果浆中的膳食纤维主要来源于果籽, 其中“钦蜜 9 号”果浆的含量更低, 但不溶性膳食纤维含量相近, 说明食用“钦蜜 9 号”和钦州紫果果籽在预防便秘、管理体重和改善肠道健康方面具有相同效果^[22]。同时, 由于 XC 含有更高水平

的可溶性膳食纤维和总膳食纤维，或许更适合用于开发新的富含纤维的健康食品。

表 1 百香果果浆的基本营养成分 (g/100 g)

Table 1 The essential nutrients of Passion fruit pulp (g/100 g)			
指标	XA	XB	XC
总糖	10.03 ± 0.12 ^a	9.40 ± 0.07 ^b	8.95 ± 0.07 ^c
粗蛋白	2.28 ± 0.03 ^a	1.95 ± 0.03 ^b	1.76 ± 0.02 ^c
粗脂肪	0.50 ± 0.00 ^c	0.60 ± 0.00 ^b	0.80 ± 0.00 ^a
灰分	0.42 ± 0.00 ^b	0.43 ± 0.00 ^b	0.43 ± 0.00 ^a
不溶性膳食纤维	2.57 ± 0.17 ^b	2.58 ± 0.08 ^b	2.79 ± 0.08 ^a
可溶性膳食纤维	9.76 ± 0.33 ^b	9.96 ± 0.15 ^b	10.47 ± 0.29 ^a
总膳食纤维	12.33 ± 0.26 ^b	12.55 ± 0.16 ^b	13.26 ± 0.23 ^a

注：采用单因素方差分析和图基检验，同行不同字母表示差异显著 ($P<0.05$)，字母相同则差异不显著。

2.2 矿物质含量

表 2 百香果果浆的矿物质含量

Table 2 Mineral content of Passion fruit pulp			
元素	XA	XB	XC
K/(g/100 g)	0.93 ± 0.07 ^a	0.79 ± 0.05 ^b	0.58 ± 0.05 ^c
Mg/(g/100 g)	0.12 ± 0.01 ^a	0.12 ± 0.00 ^a	0.13 ± 0.01 ^a
Ca/(mg/100 g)	47.00 ± 3.03 ^b	52.48 ± 1.98 ^a	28.24 ± 3.14 ^c
Na/(mg/100 g)	18.07 ± 0.20 ^a	3.84 ± 0.18 ^c	9.19 ± 0.27 ^b
Fe/(mg/100 g)	4.30 ± 0.05 ^a	4.15 ± 0.18 ^a	3.31 ± 0.09 ^b
Zn/(mg/100 g)	3.03 ± 0.01 ^a	2.33 ± 0.09 ^b	2.32 ± 0.05 ^b
Cu/(mg/100 g)	0.78 ± 0.04 ^c	0.91 ± 0.04 ^b	1.10 ± 0.02 ^a
Al/(mg/100 g)	0.44 ± 0.01 ^a	0.36 ± 0.02 ^c	0.41 ± 0.01 ^b
Cr/(μg/100 g)	14.78 ± 0.13 ^a	9.38 ± 0.38 ^c	13.00 ± 0.41 ^b
Se/(μg/100 g)	0.69 ± 0.05 ^b	1.19 ± 0.05 ^a	0.28 ± 0.04 ^c

注：同行不同字母表示差异显著 ($P<0.05$)，字母相同则差异不显著。

从表 2 可知，百香果果浆中含丰富的矿物质元素，其中 K、Mg、Ca 是“钦蜜 9 号”的主要矿物质成分，平均含量分别为 0.86 g/100 g、0.12 g/100 g 和 49.74 mg/100 g。差异分析显示，除 Mg、Fe 元素外，K、Ca、Na、Zn、Cu、Al、Cr、Se 含量在“钦蜜 9 号”间存在显著差异 ($P<0.05$ ，下同)，其中 K、Na、Fe、Zn、Al 含量以 XA 更高，而 Ca、Cu、Se 则在 XB 中含量更丰富。相比于 XC，K、Ca、Fe 含量显著低于“钦蜜 9 号”，Cu 显著高于“钦蜜 9 号”，Na、Al、Zn 显著低于 XA，Na 显著高于 XB，Mg 含量与“钦蜜 9 号”差异不显著 ($P>0.05$)。

K、Mg、Ca 是人体活动必需的常量元素，“钦蜜 9 号”中含量更丰富，明显高于广西省容县的黄金果果肉中的 K (0.41~0.45 g/100 g)、Mg (0.02 g/100 g) 和 Ca (7.23~7.34 mg/100 g) 含量^[14]；Fe 和 Zn 作为

人体必需的微量元素，“钦蜜 9 号”中含量也较丰富，分别为 4.15~4.30 mg/100 g、2.33~3.03 mg/100 g，明显高于广西容县的黄金果和紫果百香果果汁中 Fe (0.46~0.49 mg/100 g)、Zn (0.47~0.48 mg/100 g) 含量^[14]，可能与百香果的品种、种植环境、检测部位及检测方法差异有关^[13]。中国居民膳食营养素参考摄入量 (2023 版) 推荐 7~75 岁 Fe、Zn 摄入量分别为 12.00~18.00 mg/d 和 7.00~12.00 mg/d，说明食用“钦蜜 9 号”百香果 (平均单果质量 98.30~106.80 g^[23]) 可有助于普通人群补充 Fe、Zn 等必需微量元素。

此外，XB 和 XC 的 Cu 含量较高，分别为 0.91 mg/100 g、1.10 mg/100 g，超过了中国居民膳食营养素参考摄入量 (2023 版) 的推荐量 (0.50~0.80 mg/d)。对比 Luzia 等^[5]测定的黄金百香果果肉 (0.60 mg/100 g)、果籽 (0.90 mg/100 g) 和紫果百香果果肉 (0.20 mg/100 g)、果籽 (0.70 mg/100 g) 的 Cu 含量，表明百香果果浆中 Cu 大部分存在于果籽中，由于过量摄入 Cu 会对人体的肝脏、肾脏^[24]和心血管系统^[25]造成严重损害，甚至可能危及生命，因此建议少食果籽。

2.3 百香果非靶代谢组学差异分析

2.3.1 百香果果浆的代谢物组成

利用非靶向代谢组学对钦州“钦蜜 9 号”(XA)、桂林“钦蜜 9 号”(XB) 和钦州紫果 (XC) 的果浆进行了代谢物的定性和定量分析。正负离子模式下，3 组均分别检测到一级代谢物 5 359 和 3 436 种。为了解 3 种百香果代谢谱的总体分布，对一级代谢物进行主成分分析 (PCA) 和正交 - 偏最小二乘判别 (OPLS-DA) 分析。PCA 结果显示，3 组样本组间明显分离，组内样本聚集在一起，说明 3 组样本的代谢物组成和浓度差别很大，而组内变异度较小重复性高。其中，在正离子模式下，主成分 1 的贡献率为 40.00%，主成分 2 的贡献率为 20.40% (图 1a)；在负离子模式下，主成分 1 的贡献率为 26.30%，主成分 2 的贡献率为 23.70% (图 1b)。进一步建立正交偏最小二乘法判别分析模型确定 3 组样品之间的差异，OPLS-DA 模型评价参数 (正离子模式 R^2Y : 0.999, Q^2 : 0.966；负离子模式 R^2Y : 0.999, Q^2 : 0.922) 表明模型稳定可靠 (图 1c、1d)。

一级代谢物进一步经二级质谱分析，3 组样本均包含 470 种化合物，其中脂类 83 种、多酚类化合物 80 种 (包括酚酸类 30 种、类黄酮类 17 种)、氨基酸及衍生物 78 种、碳水化合物 72 种 (包括糖类 47 种、醇类 22 种)、萜类 27 种、有机酸类 33 种、核酸及衍生物 24 种、生物碱 24 种、维生素及衍生物 17

种、其他类代谢物 35 种（表 3）。在含量上，3 种百香果代谢物中糖类含量（32.18%~35.24%）最高，氨基酸含量（22.97%~23.27%）次之，组间均无显著差异（ $P>0.05$ ，下同）；再者是脂类含量，相比于“钦蜜 9 号”（15.24%~16.43%），XC（21.39%）含更高水平的脂类，但其鞘脂类含量明显偏低（ $P<0.05$ ，下同）；XB 的多酚类、萜类含量显著高于 XA、XC，有研究表明酚酸具有抗氧化、抗癌、防止植物受病原菌的侵扰等作用，蔬果中的酚酸约占总多酚含量的三分之一^[26]，百香果的多酚类物质中大部分为酚酸，其中 XB 的酚酸含量明显更高，是酚酸的优质来源之一；目前关于百香果中生物碱的研究较少且已知的多数为吲哚类生物碱^[13]，3 种百香果检出的生物碱含量仅占总含量的 0.77%~1.29%，主要是吲哚类生物碱，XC 表现为更高含量的生物碱；核酸及衍生物、维生素及衍生物和其他类含量在 3 组样本间无显著差异（表 3）。

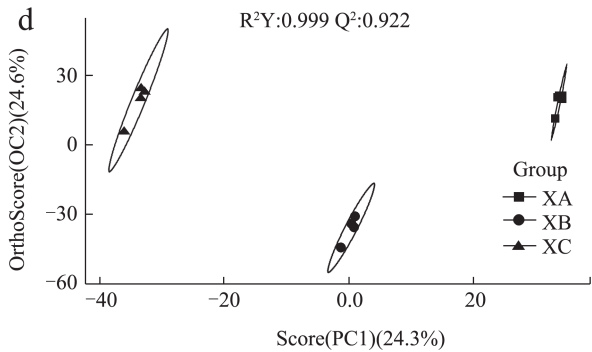
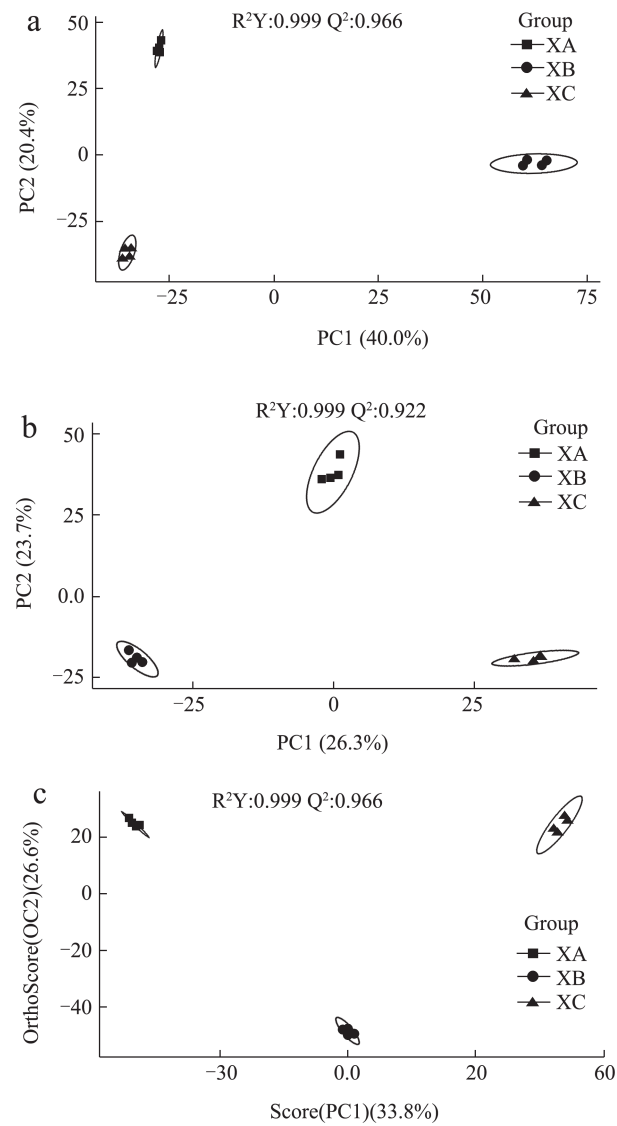


图 1 主成分分析（a，b）和 OPLS-DA 得分图（c，d）

Fig.1 PCA analysis (a, b) and OPLS-DA score plot (c, d)

注：a、c 为正离子模式；b、d 为负离子模式。

表 3 百香果果浆代谢物分布

Table 3 Metabolite distribution of Passion fruit pulp					
序号	代谢物类别	数量	相对含量/%		
			XA	XB	XC
1	脂类	83	16.43 ± 2.29 ^b	15.24 ± 2.09 ^b	21.39 ± 2.95 ^a
	脂肪酸衍生物	40	1.59 ± 0.15 ^a	1.71 ± 0.23 ^a	1.71 ± 0.19 ^a
	脂肪酸	23	4.59 ± 0.98 ^a	6.03 ± 2.16 ^a	7.13 ± 1.55 ^a
	类固醇类	10	2.49 ± 0.47 ^a	1.97 ± 0.26 ^a	0.25 ± 0.11 ^b
	磷脂类	5	3.24 ± 0.45 ^a	2.39 ± 0.71 ^a	3.19 ± 1.40 ^a
	鞘脂类	5	4.52 ± 0.94 ^b	3.14 ± 0.62 ^b	9.12 ± 3.30 ^a
2	多酚类	80	5.45 ± 1.36 ^b	9.20 ± 0.85 ^a	6.43 ± 1.75 ^b
	酚类	33	1.26 ± 0.28 ^a	1.16 ± 0.28 ^a	1.53 ± 0.29 ^a
	类黄酮类	17	0.46 ± 0.12 ^a	0.40 ± 0.04 ^a	0.56 ± 0.11 ^a
	酚酸类	30	3.73 ± 1.14 ^b	7.64 ± 0.66 ^a	4.34 ± 1.59 ^b
3	氨基酸及衍生物	78	23.19 ± 5.22 ^a	22.97 ± 4.28 ^a	23.27 ± 3.28 ^a
	氨基酸	18	14.28 ± 3.53 ^a	16.32 ± 3.30 ^a	15.51 ± 1.88 ^a
	氨基酸衍生物	60	8.92 ± 1.69 ^a	6.65 ± 1.16 ^a	7.76 ± 1.44 ^a
4	碳水化合物	69	37.38 ± 12.28 ^a	34.36 ± 3.63 ^a	33.86 ± 4.74 ^a
	糖类	47	35.24 ± 12.95 ^a	32.18 ± 3.97 ^a	32.28 ± 5.11 ^a
	醇类	22	2.14 ± 0.83 ^a	2.17 ± 0.51 ^a	1.58 ± 0.40 ^a
5	有机酸类	33	2.09 ± 0.42 ^a	1.75 ± 0.30 ^{ab}	1.53 ± 0.24 ^b
6	萜类	27	1.55 ± 0.67 ^b	2.33 ± 0.48 ^a	1.25 ± 0.06 ^b
7	核酸及衍生物	24	7.93 ± 1.64 ^a	8.75 ± 0.97 ^a	8.69 ± 0.89 ^a
8	生物碱类	24	0.89 ± 0.21 ^{ab}	0.77 ± 0.18 ^b	1.29 ± 0.36 ^a
9	维生素及衍生物	17	0.77 ± 0.24 ^a	0.53 ± 0.16 ^a	0.48 ± 0.08 ^a
10	其他	35	4.33 ± 4.95 ^a	4.10 ± 3.55 ^a	1.81 ± 0.37 ^a
总计		470	100	100	100

注：方差分析，图基检验， $P<0.05$ 代表具有统计学差异，行中不同字母表示组间差异显著，字母相同则差异不显著。

2.3.2 差异代谢物分析

有研究发现，代谢物组成影响百香果的风味、香气和口感^[5]。基于 OPLS-DA 模型的变量重要性投影 VIP 值 (VIP > 1) 和代谢物含量差异倍数 ($\log_2FC \geq |1|$ 、 $q < 0.05$)，筛选 3 组百香果间的差异代谢物，并展示 KEGG 富集前 25 的代谢通路，结果见图 2 和图 3。

有报道指出，百香果代谢物因品种、栽培条件、种植管理模式的不同而存在差异^[15,27,28]。本研究结果显示，3 种百香果果浆的样本差异代谢物不同，其中 XA 和 XB 间存在差异代谢物 73 种（上调 45 种，下调 28 种），包括脂类 15 种、多酚类 14 种、碳水化合物类 15 种、氨基酸及衍生物类 10 种、核酸类 4 种、有机酸类 4 种等（图 3a），显著 ($P < 0.05$ ，下同) 富集在 ABC 转运蛋白 (ABC transporters)、精氨酸和脯氨酸代谢 (Arginine and proline metabolism)、果糖和甘露糖代谢 (Fructose and mannose metabolism)、亚油酸代谢 (Linoleic acid metabolism)、谷胱甘肽代谢 (Glutathione metabolism)、D-氨基酸代谢 (D-Amino acid metabolism)、组氨酸代谢 (Histidine metabolism)（图 2b）。XA 和 XC 间存在差异代谢物 96 种（上调 67 种，下调 29 种），包括脂类 15 种、多酚类 18 种、碳水化合物类 16 种、氨基酸及衍生物 15 种、生物碱 8 种，有机酸类 6 种、核酸类 5 种等（图 3b），主要富集在果糖和甘露糖代谢、肌醇磷酸代谢 (Inositol phosphate metabolism)、碳青霉烯生物合成 (Carbapenem biosynthesis)、谷胱甘肽代谢（图 2c）；XB 和 XC 间存在差异代谢物 114 种（上调 79 种，下调 35 种），包括脂类 20 种、多酚类 20 种、碳水化合物类 20 种、氨基酸及衍生物 20 种、核酸类 8 种、生物碱类 6 种等（图 3c），显著富集于肌醇磷酸代谢、ABC 转运蛋白、甘油磷脂代谢 (Glycerophospholipid metabolism)、玉米素生物合成 (Zeatin biosynthesis)（图 2d）。

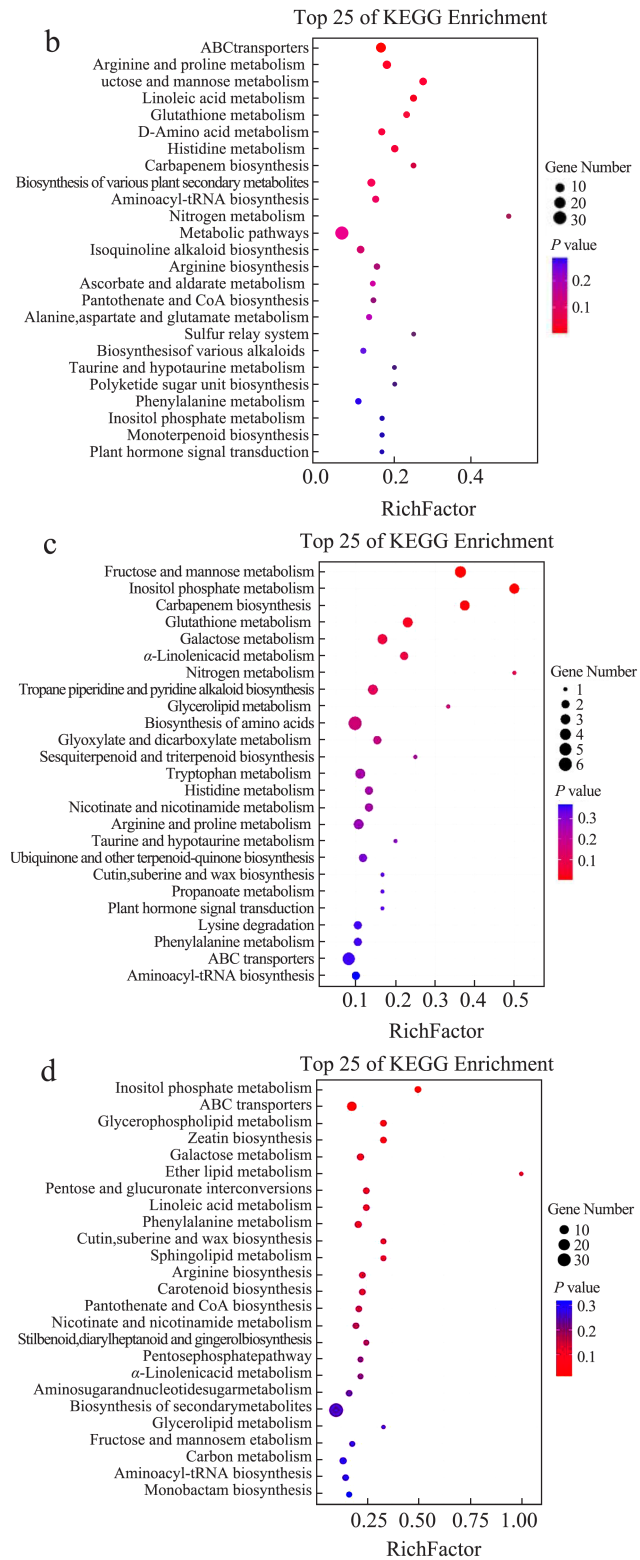
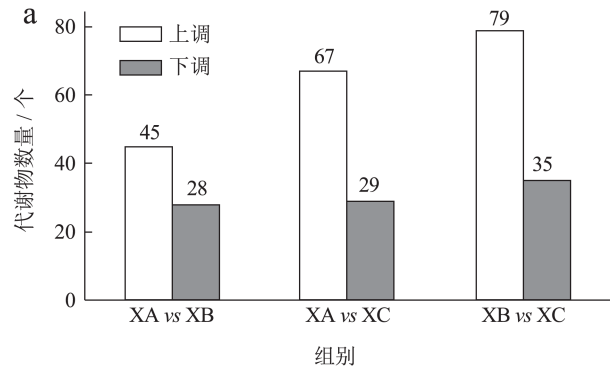
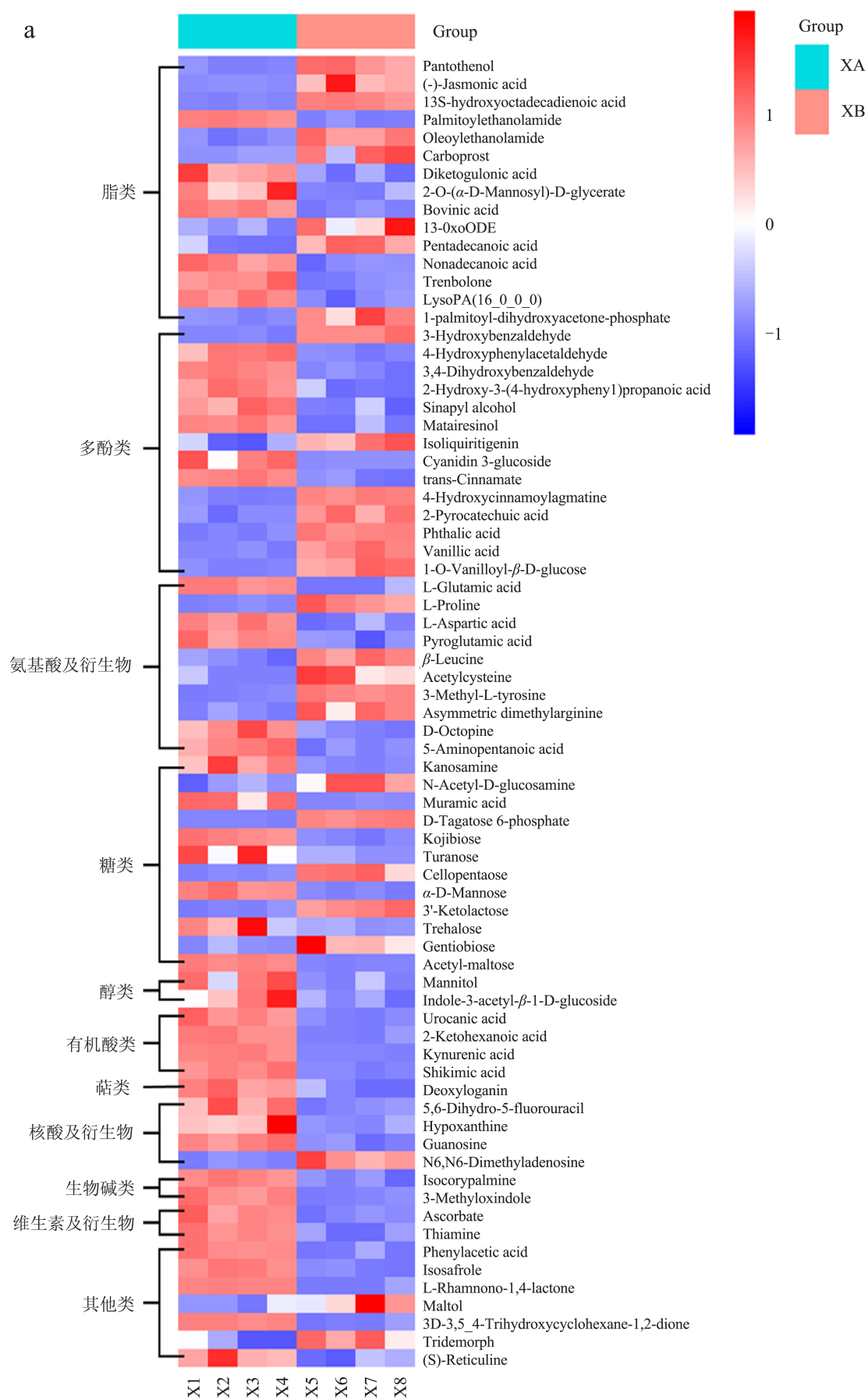
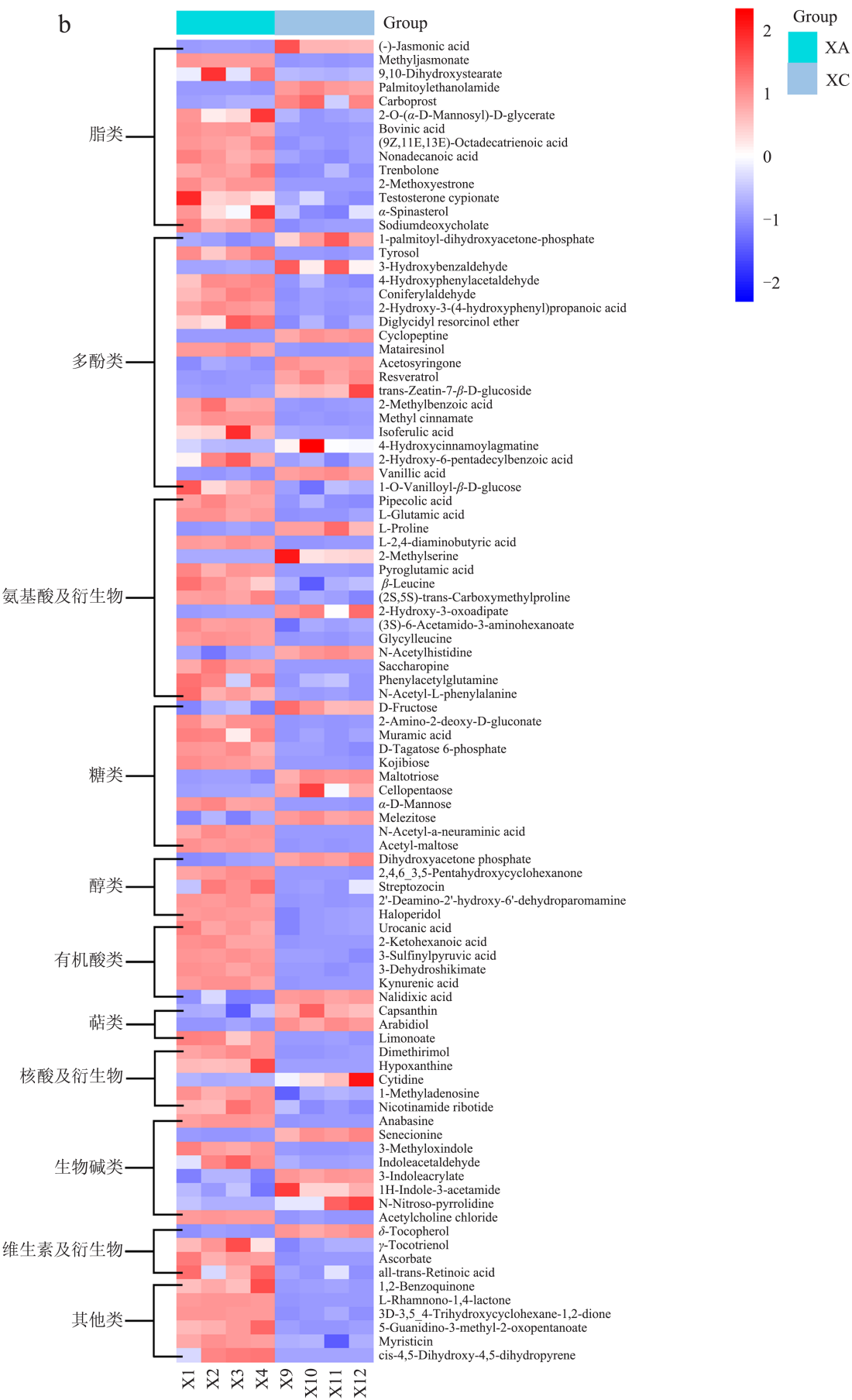


图 2 百香果果浆差异代谢物统计及其 KEGG 富集通路图

Fig.2 Graph of differential metabolite counts and their KEGG-enriched pathways in Passion fruit pulp

注：a 为差异代谢物数量统计图，橙色表示上调数目，绿色表示下调数目。b~d 分别为 XA vs XB、XA vs XC、XB vs XC 差异代谢物 KEGG 富集通路图。





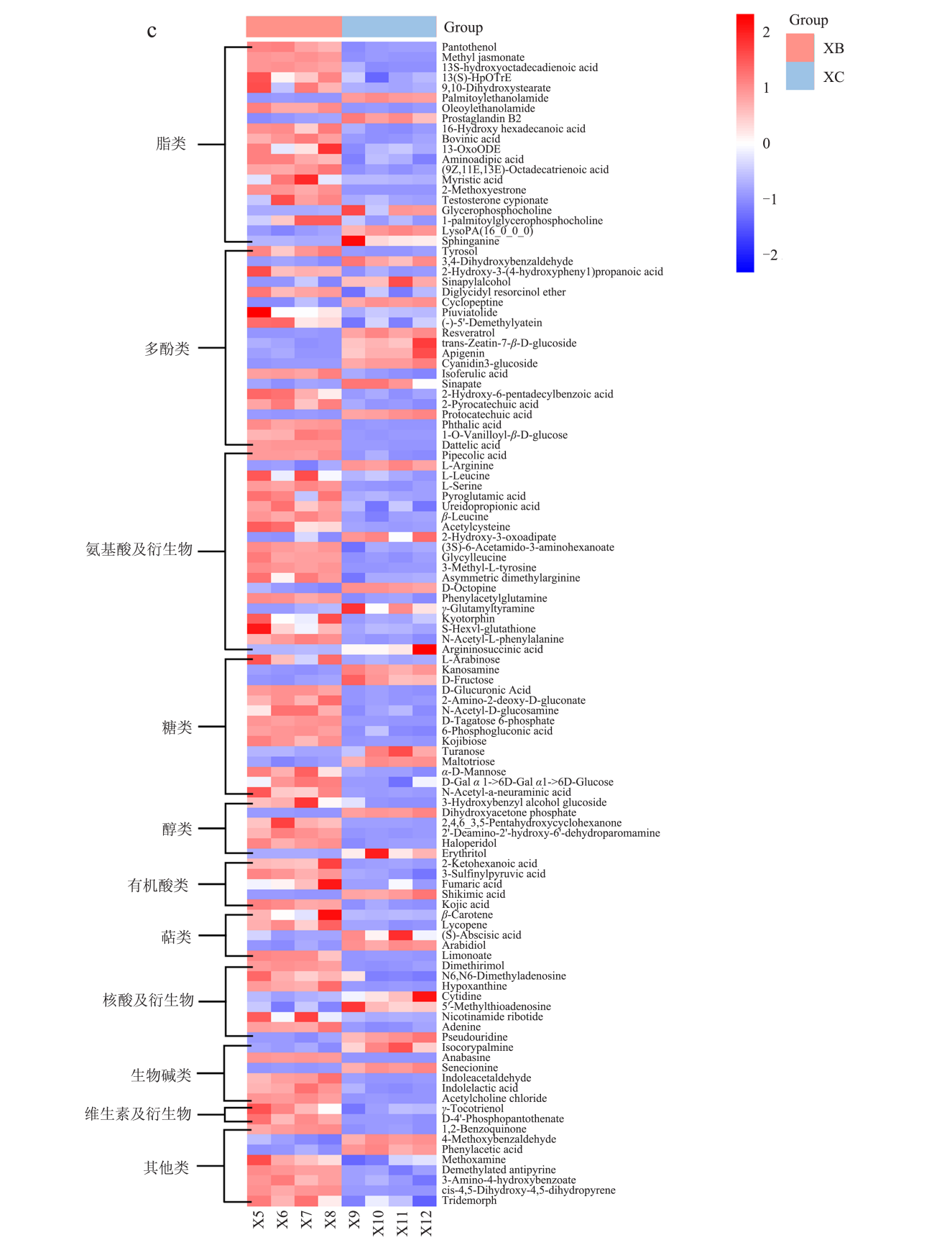


图 3 差异代谢物热图

Fig.3 Heat map of differential metabolites

注: a~c 分别为 XA vs XB、XA vs XC、XB vs XC。

2.3.2.1 差异脂类代谢物分析

脂类作为挥发性有机物的前体物质,其种类和含量会影响食品的口感和风味^[27,29]。3组样本检测出脂类代谢物83种(表3),总含量为15.24%~21.39%,包括脂肪酸衍生物40种、脂肪酸23种及鞘脂类、磷脂、类固醇类等20种,其中差异代谢物30种,包括脂肪酸衍生物16种、脂肪酸4种及磷脂类、鞘脂类等10种。从脂类代谢物含量上看,脂肪酸和鞘脂类在“钦蜜9号”果浆中的积累量低于在XC中的积累量。差异分析显示(图3,下同),脂肪酸衍生物、脂肪酸和类固醇类在“钦蜜9号”果浆中显著积累,其中XB中脂肪酸衍生物含量更高,而磷脂类和鞘脂类在XC中显著积累,这30种脂质的积累可能是影响百香果口感和风味的关键物质。KEGG富集分析显示(图2,下同),这些差异脂类富集于亚油酸代谢、 α -亚麻酸代谢、甘油酯代谢、甘油磷脂代谢、醚脂代谢等途径中。

此外,有研究发现植物可通过调节多不饱和脂肪酸的合成来响应干旱、寒冷等环境的胁迫及对病原体的防御^[30]。“钦蜜9号”果浆含更丰富的多不饱和脂肪酸,如共轭(9Z 11E)亚油酸、 α -桐酸、茉莉酸甲酯、13S-羟基十八碳二烯酸,这些物质的积累可能是该品种具有耐热、抗病性强等特点的原因之一^[1]。

2.3.2.2 差异多酚类代谢物分析

多酚类化合物自然存在于植物中,对产品颜色、香气、味道等感官特性及抗害虫等产生重要作用^[3]。本次从3种百香果中检测到多酚类代谢物80种(表3),总含量为5.45%~9.20%,包括33种酚类、30种酚酸、17种类黄酮类,其中XB的酚酸类代谢物含量最高,XC表现出更高含量的酚类和类黄酮类。差异分析共涉及31种多酚类,包括14种酚类、4种类黄酮类及13种酚酸类,其中酚类和酚酸类主要在“钦蜜9号”果浆中积累,类黄酮类主要在XC中积累,而冉露霞等^[31]研究发现,西南(云南、贵州)、华南(广东、海南)和华东(江西、福建)地区的“钦蜜9号”果肉和果籽中总黄酮平均含量均高于紫果“台农1号”,这可能与检测方法、种植地及品种的差异有关。白藜芦醇属于二苯乙烯类代谢物,由于二苯乙烯在紫果百香果中的积累高于黄金百香果,使得紫果百香果呈现出更涩的味道和纤维质地^[32],本研究中“钦蜜9号”果浆的白藜芦醇含量比XC低,这可能是“钦蜜9号”果浆具有更好口感的原因。KEGG富集分析显示,这些差异多酚类主要富集于黄酮类化合物生物合成、次级代谢产物生物合成等途径中。

2.3.2.3 差异氨基酸及其衍生物类分析

氨基酸不仅是食品中重要的营养物质,还是食品

风味多样性的重要来源^[33,34]。百香果中富含人体不能合成的氨基酸高达氨基酸总含量的26.07%^[13]。3组果浆样品中共检测出18种氨基酸和60种衍生物,包括16种常规氨基酸、2种非常规氨基酸(高脯氨酸和鸟氨酸)。

差异分析共涉及29种氨基酸及衍生物类代谢物,大部分在“钦蜜9号”果浆中显著积累。与百香果风味密切相关的呈味氨基酸主要包括鲜味类氨基酸(天冬氨酸、谷氨酸等)、甜味氨基酸(脯氨酸、丝氨酸等)和苦味氨基酸(亮氨酸、精氨酸等)等^[35,36]。L-谷氨酸、DL-高脯氨酸是“钦蜜9号”的优势代谢物,XA的L-谷氨酸含量更高,同时还含较高水平的L-天冬氨酸及较低水平的L-脯氨酸,这可能使其味道更浓郁、口感更柔和;有报道指出“钦蜜9号”品种比紫果百香果具有更好的口感^[37],XB相较于XC具有更低含量的L-精氨酸和更高含量的L-氨酸、DL-高脯氨酸,可能平衡了XB的整体风味;3组间还富含L-焦谷氨酸、甘氨酸-L-亮氨酸等其他氨基酸类代谢物。这29种代谢物可能是造成“钦蜜9号”在不同地区和品种百香果间具有独特风味的关键物质。KEGG富集分析显示,这些差异氨基酸及衍生物类主要富集于精氨酸和脯氨酸代谢、D-氨基酸代谢、组氨酸代谢、氨基酸生物合成等途径中。

2.3.2.4 差异碳水化合物类和有机酸类代谢物分析

碳水化合物是百香果中含量最丰富的成分,其中糖类高达47种,占总含量的32.18%以上(表3),包括蜜二糖、甘露糖、龙胆二糖、葡萄糖、果糖等,其中蜜二糖含量最高,XA、XB、XC分别为21.83%、12.92%和14.78%。醇类主要在“钦蜜9号”果浆中积累,差异分析共涉及的9种醇类大部分也在“钦蜜9号”果浆中积累。糖和有机酸组分的比例是影响果实口感、风味的重要指标^[27]。3组果浆样品中共有21种糖类和9种有机酸存在显著差异,并且大部分在“钦蜜9号”中积累。前人研究发现黄金百香果相较于紫果百香果具有更低的总酸含量和更高的总糖含量^[27,28]，“钦蜜9号”果浆相较于紫果果浆,除茶啉酸、莽草酸外,其余7种有机酸(尿刊酸、2-氧代己酸、3-亚磺酰基丙酮酸、3-脱氢莽草酸、犬尿酸、富马酸、曲酸)均上调,说明茶啉酸、莽草酸的下调可能是造成“钦蜜9号”总酸含量低的原因;虽然本实验测定的“钦蜜9号”总糖含量均显著高于XC(表2),但代谢物分布分析显示(表3),XB比XC糖类含量低,可能是3-氨基-3-脱氧-D-葡萄糖、D-果糖、D-松二糖、麦芽三糖下调造成的;而XA的总糖含量高,可能是其具有更高含量的D-氨基葡萄糖酸、D-塔格糖-6-磷酸、

A-葡糖-A-葡糖苷、 α -D-甘露糖、乙酰麦芽糖等糖类作用的结果。KEGG 富集分析显示, 差异有机酸类主要富集于乙醛酸和二羧酸代谢、牛磺酸和亚牛磺酸代谢、丙酸代谢等途径中, 而差异糖类主要富集于果糖和甘露糖代谢、戊糖和葡萄糖醛酸相互转化等途径中。

2.3.2.5 其他差异代谢物分析

百香果中还富含萜类、核酸类、生物碱、维生素等其他活性物质, “钦蜜9号”中的萜类、维生素含量更高, 而紫果果浆含更丰富的生物碱(表3)。差异分析显示, 共有11种核酸类、10种生物碱、7种萜类、6种维生素类及15种其他类代谢物存在显著差异, 其中核酸类、维生素类、生物碱主要在“钦蜜9号”中积累。此外, 我们还发现一些萜类代谢物, 如 β -胡萝卜素、番茄红素、柠檬苦素, 它们在XB vs XC间存在差异, 且均在XB中显著积累。百香果被认为是维生素C的最佳来源之一^[13], 杨朴丽等^[3]研究发现, 紫果百香果果肉相较于黄金百香果果肉具有更高含量的维生素C, 而本实验中XA中维生素C的含量比XC高, 可能是品种、产地及检测部位等差异导致的。富集分析显示, 这些代谢物主要富集于抗坏血酸和醛酸盐代谢、倍半萜类和三萜类化合物生物合成、各种生物碱的生物合成、次生代谢物生物合成等途径中。

3 结论

本研究以钦州、桂林“钦蜜9号”和钦州紫果的果浆作为研究对象, 探究“钦蜜9号”新品种的基本营养成分和植物化学成分。“钦蜜9号”果浆总糖、粗蛋白含量显著高于钦州紫果果浆, 而粗脂肪、膳食纤维含量显著低于钦州紫果。此外, 3种百香果富含多种人体所需的常量和微量元素, “钦蜜9号”果浆富含K、Ca、Fe, 而钦州紫果果浆的Mg、Cu含量更高; 其中“钦蜜9号”果浆中, 钦州产的K、Na、Fe、Zn、Cr含量更高, 桂林产的Se、Ca含量高。

通过非靶代谢组学分析, 3种百香果果浆中共检出470种代谢物, 包括脂类、多酚类、氨基酸及衍生物、糖类、醇类、有机酸类、萜类、生物碱等, 以糖类含量(32.18%~34.24%)最高; 差异分析揭示, 钦州“钦蜜9号”与桂林“钦蜜9号”的差异代谢物73种, 钦州“钦蜜9号”与钦州紫果的差异代谢产物96种, 钦州“钦蜜9号”与钦州紫果的差异代谢产物114种, 其中脂肪酸及衍生物、酚类、酚酸类、氨基酸及衍生物、糖类、醇类、有机酸类、核酸类及维生素类主要在“钦蜜9号”中积累, 而磷脂类、鞘脂类、类黄酮类、生物碱主要在钦州紫果中积累; L-谷氨酸、L-脯氨酸、D-氨基葡萄糖酸、D-塔格糖-6-磷酸、茶啉酸、 β -胡

萝卜素、维生素C等178种差异代谢物可能是影响“钦蜜9号”和钦州紫果差异的关键物质, 它们主要富集在肌醇磷酸代谢、果糖和甘露糖代谢、碳青霉烯生物合成、谷胱甘肽代谢等代谢途径中。“钦蜜9号”与其他品种百香果在口感和风味上的差异, 需要综合感官评定、转录组学和基因组学等多种技术来进行多层次、多维度的分析验证。

参考文献

- [1] 吴胜芳. 百香果不同繁育方式种植对比试验[J]. 热带农业科技, 2023, 46(4): 24-26.
- [2] 邢相楠, 黄永才, 陈格, 等. 广西百香果产业发展现状、存在问题及对策建议[J]. 南方农业学报, 2020, 51(5): 1240-1246.
- [3] 杨朴丽, 刘忠妹, 许木果, 等. 西番莲研究进展[J]. 热带农业科技, 2024, 47(1): 17-22.
- [4] 钱开胜. 广西“钦蜜9号”黄金百香果产业蓬勃发展[J]. 中国果业信息, 2023, 40(10): 57.
- [5] DOS REIS L C R, FACCO E M P, SALVADOR M, et al. Antioxidant potential and physicochemical characterization of yellow, purple and orange passion fruit [J]. Journal of Food Science and Technology-Mysore, 2018, 55(7): 2679-2691.
- [6] DA COSTA C A R, MACHADO G G L, RODRIGUES L J, et al. Phenolic compounds profile and antioxidant activity of purple passion fruit's pulp, peel and seed at different maturation stages [J]. Scientia Horticulturae, 2023, 321(1): 11224-11231.
- [7] TAL Y, ANAVI S, REISMAN M, et al. The neuroprotective properties of a novel variety of passion fruit [J]. Journal of Functional Foods, 2016, 23(1): 359-369.
- [8] RIZWANA H, OTIBI F A, AL-MALKI N. Chemical composition, FT-IR studies and antibacterial activity of *Passiflora edulis* f. *edulis* (Fruit) [J]. J Pure Appl Microbiol, 2019, 13(4): 2489-2498.
- [9] PEDROSA L D F, SCHOLS H, VOS P D, et al. Assessing high-temperature and pressure extraction of bioactive water-soluble polysaccharides from passion fruit mesocarp [J]. Carbohydrate Polymers, 2024, 335(1): 122010-122025.
- [10] ANDRADE M L D O, HOLANDA B F D L A, DOS ANJOS N S, et al. Analysis of the anti-inflammatory activity of the species *passiflora incarnata* linnaeus. (red passion fruit) [J]. Brazilian Journal of Development, 2021, 7(11): 103225-103228.
- [11] ZIBADI S, FARID R, MORIGUCHI S, et al. Oral administration of purple passion fruit peel extract attenuates blood pressure in female spontaneously hypertensive rats and humans [J]. Nutrition Research, 2007, 27(7): 408-416.
- [12] DENG J, ZHOU Y, BAI M, et al. Anxiolytic and sedative activities of *Passiflora edulis* f. *flavicarpa* [J]. Journal of Ethnopharmacology, 2010, 128(1): 148-153.
- [13] ZHANG J, TAO S, HOU G, et al. Phytochemistry, nutritional composition, health benefits and future prospects of *passiflora*: a review [J]. Food Chemistry, 2023, 428(1): 136825.
- [14] 郭艳峰, 杨得坡, 张延杰. 不同品种百香果果汁营养成分的比较[J]. 食品工业科技, 2018, 39(17): 283-287.
- [15] 卢晨, 陈楠, 王立娟, 等. 基于顶空固相微萃取-气相色谱-质谱联用

- 技术对不同产地黄金百香果的代谢组学分析[J].食品与发酵工业,2023,49(18):315-321.
- [16] 潘葳,刘文静,韦航,等.不同品种百香果果汁营养与香气成分的比较[J].食品科学,2019,40(22): 277-286.
- [17] ALEXANDRE M A, FONSECA M V G, MÁRIO R MARÓSTICA JUNIOR, ARMANDO J D SILVESTRE, et al. Purple passion fruit (*Passiflora edulis* f. *edulis*): a comprehensive review on the nutritional value, phytochemical profile and associated health effects [J]. Food Research International, 2022, 160(1): 111665-111688.
- [18] 王秀丽,薛登萍,易良,等.果胶酶提取西番莲果皮多糖的抗氧化和益生菌增殖活性[J].食品与发酵工业,2024,50(18):194-200.
- [19] ZELENÁ E, DUNN W B, BROADHURST D, et al. Development of a robust and repeatable UPLC-MS method for the long-term metabolomic study of human serum [J]. Analytical Chemistry, 2009, 81(4): 1357-1364.
- [20] WANT E J, MASSON P, MICOPOULOS F, et al. Global metabolic profiling of animal and human tissues via UPLC-MS [J]. Nature Protocols, 2013, 8(1): 17-32.
- [21] 李巍,李春俭,张福锁,等.西番莲营养品质与功能性成分研究及应用进展[J].中国农业大学学报,2022,27(11):79-92.
- [22] RAMAIIYA S D, BUJANG, J S, et al. Nutritive values of Passion fruit (*Passiflora* species) seeds and its role in human health [J]. Journal of Agriculture Food and Development, 2018, 4(1): 23-30.
- [23] 陈本令.黄金百香果钦蜜9号在尤溪的种植表现及栽培技术[J].农业科技通讯,2023,12:214-218.
- [24] TESCHKE R. Copper, iron, cadmium, and arsenic, all generated in the universe: elucidating their environmental impact risk on human health including clinical liver injury [J]. International Journal of Molecular Sciences, 2024, 25(12): 6662-6723.
- [25] LI X, DEGHAN M, TSE L A, et al. Associations of dietary copper intake with cardiovascular disease and mortality: findings from the Chinese Perspective Urban and Rural Epidemiology (PURE-China) study [J]. BMC Public Health, 2023, 23(1): 2525-2534.
- [26] 高媛,马帅,代敏,等.果蔬酚酸生物合成及代谢调控研究进展[J].食品科学,2018,39(9):286-293.
- [27] 袁启凤,颜培玲,史斌斌,等.基于广泛靶向代谢组学的2种百香果风味差异研究[J].中国果树,2023,9:65-71,85,144.
- [28] QIU W W, SU W Q, CAI Z Y, et al. Combined analysis of transcriptome and metabolome reveals the potential mechanism of coloration and fruit quality in yellow and purple *Passiflora edulis* Sims [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2020, 68(43): 12096-12106.
- [29] 李蕊蕊,高彦祥.脂类与风味物质的相互作用[J].中国食品添加剂,2017,8:201-207.
- [30] 蔡璨,白玉,韩艺,等.植物多不饱和脂肪酸的研究进展[J].高师理科学刊,2023,43(9):64-69.
- [31] 冉露霞,朱博,王俊杰,等.百香果不同组织抗氧化活性及矿质元素差异分析[J].江西农业大学学报,2023,45(6):1385-1396.
- [32] ZHENG Y Y, CHEN L H, FAN B L, et al. Integrative multiomics profiling of passion fruit reveals the genetic basis for fruit color and aroma [J]. Plant Physiology, 2023, 194(4): 2491-2510.
- [33] ZHANG X X, WEI X X, ALI M M, et al. Changes in the content of organic acids and expression analysis of citric acid accumulation-related genes during fruit development of yellow (*Passiflora edulis* f. *flavicarpa*) and purple (*Passiflora edulis* f. *edulis*) passion fruits [J]. International Journal of Molecular Sciences, 2021, 22(11): 5765-5778.
- [34] ZOU S C, WU J C, SHAHID M Q, et al. Identification of key taste components in loquat using widely targeted metabolomics [J]. Food Chemistry, 2020, 323(1): 126822-126828.
- [35] 吴斌,黄东梅,邢文婷,等.不同发育期黄金百香果果皮挥发性物质和游离氨基酸成分[J].福建农业学报,2024,39(1):57-65.
- [36] 程远,万红建,姚祝平,等.不同品种樱桃番茄氨基酸组成及风味分析[J].核农学报,2019,33(11):2177-2185.
- [37] 吴斌,黄东梅,邢文婷,等.不同黄金百香果品种果肉挥发性成分分析[J].中国果树,2023,9:57-64,143.