DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20250930004
引用格式: 叶彩婷, 李亦文, 李春霞, 等. 梅州沙田柚柚花的活性成分和营养物质测定[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(4): 290–299.
YE CT, LI YW, LI CX, *et al*. Determination of active components and nutrients in Meizhou Shatian pomelo flowers [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(4): 290–299. (in Chinese with English abstract).

梅州沙田柚柚花的活性成分和营养物质测定

叶彩婷[1,2], 李亦文[2], 李春霞[2], 方　磊[3], 岳婧娴[3], 赖榕辉[4], 肖　微[2], 廖慧桢[2], 梁旭霞[2*], 韦晓群[1*]

(1. 广东省食品质量安全重点实验室, 畜禽产品精准加工与安全控制技术国家地方联合工程研究中心, 华南农业大学食品学院, 广州　510642; 2. 广东省生物制品与药物研究所, 广州　510440; 3. 广东省疾病预防控制中心, 广州　511400; 4. 梅州市农林科学院茶叶研究所, 梅州　514071)

摘　要: 目的　分析鉴定和定量测定梅州沙田柚柚花活性成分和营养物质。**方法**　采用超高效液相色谱-四极杆-静电场轨道肼高分辨质谱技术(ultra performance liquid chromatography-quadrupole/exactive-orbitrap high resolution mass spectrometry, UPLC-QE-Orbitrap-HRMS)结合 TraceFinder 5.0 软件及其中药数据库分析鉴定沙田柚柚花中非挥发性成分; 采用多种检测技术对柚花中活性成分和营养物质进行测定。**结果**　柚花中共鉴定出 51 种非挥发性活性成分, 包括 19 种黄酮、11 种香豆素、8 种萜类、3 种有机酸、2 种醛类、2 种氨基酸、2 种核苷、1 种酚类、1 种生物碱及 2 种其他类化合物, 柚花中黄酮类物质种类和含量丰富。本研究定量测定了柚花冻干粉中柚皮苷、总皂苷、脂肪、蛋白质、膳食纤维、碳水化合物、5 种维生素及 10 种营养元素含量, 柚花粉中柚皮苷含量高达 13.9 g/100 g, 皂苷和维生素 C、维生素 E 含量相对较高, 同时含有多种人体所需微量元素。**结论**　柚花活性成分和营养物质丰富。本研究为制定柚花相关质量标准、资源综合利用和产品开发提供了科学依据。

关键词: 沙田柚柚花; 超高效液相色谱-四极杆-静电场轨道肼高分辨质谱技术; 活性成分; 鉴定; 营养物质

Determination of active components and nutrients in Meizhou Shatian pomelo flowers

YE Cai-Ting[1,2], LI Yi-Wen[2], LI Chun-Xia[2], FANG Lei[3], YUE Jing-Xian[3], LAI Rong-Hui[4], XIAO Wei[2], LIAO Hui-Zhen[2], LIANG Xu-Xia[2*], WEI Xiao-Qun[1*]

(1. *Guangdong Provincial Key Laboratory of Food Quality and Safety*, *National and Local Joint Engineering Research Center of Precision Processing and Safety Control Technology for Livestock and Poultry Products*, *School of Food Science*, *South China Agricultural University*, *Guangzhou* 510642, *China*; 2. *Guangdong Provincial Institute of Biological Products and Materia Medica*, *Guangzhou* 510440, *China*; 3. *Guangdong Provincial Center for Disease Control and Prevention*, *Guangzhou* 511400, *China*; 4. *Meizhou Academy of Agricultural and Forestry Sciences*, *Institute of Tea Research*, *Meizhou* 514071, *China*)

收稿日期: 2025-09-30
基金项目: 国家自然科学基金项目(32372424); 广东省医学科学技术研究基金项目(A2024268); 梅州市科技计划项目(2023C0301001)
第一作者: 叶彩婷(1994—), 女, 硕士, 卫生检验技师, 主要研究方向为食品质量安全检测。E-mail: 659173901@qq.com
***通信作者:** 梁旭霞(1972—), 女, 博士, 主任技师, 主要研究方向为食品药品质量标准研究。E-mail: liangxuxia@126.com
韦晓群(1979—), 男, 博士, 副研究员, 主要研究方向为食品安全质量与品质分析。E-mail: 568096639@qq.com

ABSTRACT: Objective　To analyze, identify and quantitatively determine active components and nutrients in Meizhou Shatian pomelo flowers. **Methods**　Ultra performance liquid chromatography-quadrupole/exactive-orbitrap high resolution mass spectrometry (UPLC-QE-Orbitrap-HRMS) combined with workstation TraceFinder 5.0 and its Chinese medicine database were used to analyze non-volatile components of Shatian pomelo flower. Active compounds and nutrients in pomelo flowers were determined by other various detection techniques. **Results**　A total of 51 kinds of non-volatile active components were identified in pomelo flowers, including 19 kinds of flavonoids, 11 kinds of coumarins, 8 kinds of terpenoids, 3 kinds of organic acids, 2 kinds of aldehydes, 2 kinds of amino acids, 2 kinds of nucleosides, 1 kind of phenol, 1 kind of alkaloid and 2 kinds of other compounds. Types and content of flavonoids in pomelo flowers were rich. Naringin, total saponins, fat, protein, dietary fiber, carbohydrate, 5 kinds of vitamins and 10 kinds of nutrient elements in dried pomelo flowers were determined quantitatively in this study. The content of naringin was high to 13.9 g/100 g. The content of saponins, vitamin C and vitamin E were relatively high. It also contained a variety of trace elements needed by human body. **Conclusion**　Pomelo flowers are rich in active components and nutrients. This study provides a scientific basis for pomelo flowers related to the formulation of quality standards, the comprehensive utilization of resources and product development.

KEY WORDS: Shatian pomelo flowers; ultra performance liquid chromatography-quadrupole/exactive-orbitrap high resolution mass spectrometry; active components; identification; nutrients

0　引　言

柚花为芸香科柑橘属植物柚[*Citrus maxima* (Burm.) Merr.]的鲜花, 史载于《本草纲目》, 味辛、苦, 性温, 具有行气化痰、疏肝止痛等功效。在民间, 柚花具有悠久的食用历史, 其应用形式多样, 主要包括冲泡代茶饮、制作糕点及煲汤等食用方式。在柚树栽培过程中, 为保障果实品质, 果农需进行疏花保果处理, 疏花量可达 50%~70%, 这一过程产生了大量可利用的柚花资源, 使其具有应用开发的潜能。现代研究表明, 柚花富含多酚类、黄酮类、挥发油等多种生物活性成分, 使其具有抗氧化、抗炎抑菌、镇痛、保护心血管、抗肿瘤、降脂等多种药理活性作用[1–5]。柚花芳香气味及功效成分的研究, 使其营养价值和保健功效近年来备受关注, 在食品领域具有较高的开发价值。为此, 福建和四川分别发布了 DBS 35/010—2024《食品安全地方标准 柚子花》和 DBS 51/011—2025《食品安全地方标准 柚子花》, 广东梅州、湖北宣恩、浙江等地茶叶协会/学会和中国茶叶流通协会、海峡两岸茶业交流协会也纷纷出台了 T/MZSCX 01—2021《梅州柚子花茶》、T/MZSCX 01—2022《梅州柚花茶》、T/XWJTXH 003—2021《宣恩柚子花茶》、T/ZJTSS 029—2025《柚子花茶》、T/CTMA 074—2024《柚子花茶》、T/CSTEA 00072—2024《平和柚花茶》等相关团体标准。

然而, 与柚子果实[6]、果汁[7]、种子[8]及柚子皮[9–11]的成分研究相比, 柚花作为非常规食品及药用花卉资源, 其成分研究相对匮乏。通过文献调研发现, 目前国内外对柚花的研究主要集中在香气成分分析方面, 多采用气相色谱-质谱技术探究其挥发性成分[12–13]以及采用高效液相色谱技术来检测其黄酮类成分含量[1], 对柚花非挥发性组分及整体化学成分的系统研究仍显不足。这种研究现状制约了柚花资源的深度开发和综合利用。超高效液相色谱-四极杆-静电场轨道肼高分辨质谱(ultra performance liquid chromatography-quadrupole/exactive-orbitrap high resolution mass spectrometry, UPLC-QE-Orbitrap-HRMS)技术整合了液相色谱卓越的分离效能和四极杆-静电场轨道肼所具备的高分辨率、高灵敏度与精准质量测定能力, 可以获得丰富的分子结构信息, 近年来被广泛应用于中草药的功效成分分析及鉴定[14–16]。因此, 本研究采用 UPLC-QE-Orbitrap-HRMS 技术, 对柚花非挥发性化学成分开展较全面的分析, 并结合多种现代分析测试手段, 定性、定量分析柚花活性成分和营养物质。通过此系统研究, 阐明柚花的特征性化学成分组成, 并确定其主要成分含量, 为建立柚花质量控制标准提供数据支撑, 同时为柚花资源的深度开发应用提供重要的科学依据。

1　材料与方法

1.1　材料与试剂

本研究样品采自广东梅州市 30 个沙田柚种植区, 在每个种植区随机采摘柚树盛花期不少于 2 kg 的新鲜柚花, 冷冻干燥后研成粉末, 密封冷冻保存。测试前将每 10 个种植区所采样品的冻干粉各取 50 g 混合均匀成为一个批号样品, 共 3 个批号样品, 供本研究测试使用。

柚皮苷标准品(纯度 94.2%)、人参皂苷 Re(纯度 95.1%)、柠檬苦素(纯度 97.7%)、香豆素(纯度 99.9%)、秦皮素(纯度 99.8%)(上海曼哈格公司); 槲皮素(纯度 94.5%,

上海安谱公司); 维生素 C、维生素 A、维生素 E、维生素 B_1、维生素 B_2 标准品(纯度>95%, 坛墨质检科技股份有限公司); 钙(Ca)、铁(Fe)、钾(K)、镁(Mg)、钠(Na)(质量浓度 1000 μg/mL)、铜(Cu)、锌(Zn)、锰(Mn)、硒(Se)(质量浓度 10 μg/mL)、多元素混合标准溶液(O2SI-161344-01-01)(美国 O2si 公司); 磷(P)(质量浓度 1000 mg/L) (GSB 04-1741-2004, 国家有色金属及电子材料分析测试中心); 甲醇、乙醇(质谱纯, 德国 Merck 公司); 硝酸(优级纯, 德国 CNW 公司)。

1.2 仪器与设备

Q-Exactive Plus 超高分辨率液质联用系统、UltiMate 3000 高效液相色谱仪、Thermo Accucore C_{18} 色谱柱(150 mm×2.1 mm, 2.6 μm)(美国 Thermo Fisher Scientific 公司); PE NexION 350X 电感耦合等离子体质谱仪(美国 PerkinElmer 公司); 海能 K1100 全自动凯氏定氮仪(中国海能仪器有限公司); UV2600i 紫外可见分光光度计(日本 Shimadzu 公司); Agilent 1260 高效液相色谱仪(美国 Agilent 公司); Milli-Q 去离子水发生器(美国 Millipore 公司); ME204 电子天平(感量 0.1 mg, 瑞士 Mettler-Toledo 公司)。

1.3 非挥发性组分筛查方法

1.3.1 样品前处理

精密称取柚花粉末 2 g, 置于 50 mL 离心管中, 准确加入 70%乙醇 50 mL, 振荡摇匀, 40 ℃超声 30 min, 10000 r/min 离心 10 min, 过 0.22 μm 微孔滤膜, 滤液作为 UPLC-QE-Orbitrap-HRMS 供试品溶液。

1.3.2 色谱和质谱条件

色谱条件: 色谱柱 Thermo Accucore C_{18} (150 mm×2.1 mm, 2.6 μm); 流动相A为水溶液, B为乙腈溶液; 流速为0.3 mL/min; 柱温为 30 ℃; 进样量 10 μL。梯度洗脱条件为 0~3.0 min (5% B); 3.0~18.0 min (5%~95% B); 18.0~20.0 min (95% B); 20.0~20.5 min (95%~5% B); 20.5~25.0 min (5% B)。

质谱条件: 离子源参数: 电喷雾离子源; 辅助气流速为 12 arb; 鞘气流速为 40 arb; 毛细管温度为 350 ℃; 雾化温度 300 ℃; 喷雾电压 3.50 kV; 采集方式为 Full MS/dd-MS^2 (Top 10)。一级母离子扫描模式为正负离子分别扫描, 正负离子其他扫描参数均相同, 具体为: 扫描质量范围 70~1050 *m/z*, 分辨率 70000; 裂解方式为高能碰撞诱导裂解模式。数据依赖二级扫描(dd-MS^2)参数: MS^2 分辨率 17500; 归一化碰撞能量为 20、40、60; 自动增益控制进入轨道阱中的离子数为 1×10^5; 二级碎裂最小目标离子数为 2×10^3; 循环次数为 10 次; 隔离窗口为 1.6 *m/z*; 顶点触发时间是 4~6 s; 动态排除时间为 8 s。

1.4 主要物质成分含量测定方法

柚花冻干粉主要物质成分含量测定方法参考《中华人民共和国药典》《保健食品理化及卫生指标检验与评价技术指导原则》《食品营养成分基本术语》《食品安全国家标准》5009 系列等国家标准。

1.5 数据处理

每批号样品各平行测定 3 次。使用 Thermo TraceFinder 5.0 与其自带的 1000 种常见中药数据库对 UPLC-QE-Orbitrap-HRMS 正、负离子模式下获得的总离子流数据进行非靶向筛查。设置母离子峰强度阈值为 5000; 信噪比阈值为 5; 母离子质荷比允许偏差 3×10^{-6}。碎片离子峰强度阈值为 10000; 碎片离子质荷比允许偏差是 5×10^{-6}。匹配上的最少碎片个数为 2 个。同位素峰模式相似度阈值为 90%。将筛查得到的化合物, 对其一级质谱和二级质谱信息与已有文献和 PubChem 数据库进行再次验证, 增加可信度。部分化合物如橘皮素、秦皮素、柚皮苷等采用标准品进行验证。采用化合物质谱响应强度与所有化合物的响应强度之和的比值作为化合物相对含量进行计算[17]。使用 ChemDraw 23 绘制化合物化学结构。使用 WPS 表格(12.1.0.23542)进行数据处理。

2 结果与分析

2.1 基于 UPLC-QE-Orbitrap-HRMS 技术分析柚花冻干粉醇提物化学成分组成

每批采用 UPLC-QE-Orbitrap-HRMS 技术以及 Thermo TraceFinder 5.0 软件, 对柚花冻干粉非挥发性组分进行分析与鉴定, 共鉴定出 51 种化合物。其中黄酮及黄酮醇、苷类化合物 19 种(相对含量占比为 41.55%)、香豆素及呋喃香豆素类化合物 11 种(相对含量占比为 20.98%)、单萜、倍半萜及三萜等萜类化合物 8 种(相对含量占比为 9.93%)、有机酸类 3 种(相对含量占比为 0.49%)、醛类 2 种(相对含量占比为 1.61%)、酚类 1 种(相对含量占比为 0.40%)、氨基酸类 2 种(相对含量占比为 9.76%)、生物碱 1 种(相对含量占比为 14.06%)、核苷 2 种及其他类化合物 2 种(相对含量占比为 1.23%)。具体成分信息见表 1。

2.2 各类化合物质谱裂解规律

2.2.1 黄酮类化合物

黄酮类化合物是以 2-苯基色原酮为基本母核, 泛指两个苯环(A 环与 B 环)通过三碳链相互连接而成的一系列化合物, 具有 6C-3C-6C 的基本骨架。在植物体内常以游离状态或与糖缩合成苷存在。这类化合物容易发生逆狄尔斯-阿尔德裂解、苷键裂解、环裂解以及丢失 CH_3、CO、H_2O 和 CO_2 等中性碎片离子。以化合物 15 为例, 推测黄酮类的物质裂解规律。在正离子模式下, 其准分子离子峰 *m/z* 为 303.0501 $[M+H]^+$, 丢失 H_2O、CO 及 C_6H_5O 碎片后, 产生 *m/z* 285.0395、*m/z* 229.0496、*m/z* 257.0442、*m/z* 137.0235 等碎片离子, 经采用标准物质以及与文献比对, 鉴定为橘皮素, 可能的裂解途径见图 1。化合物 13、14、18、20、23、28、30 为黄酮苷、黄酮醇苷类化合物, 易发生糖苷键裂解,

中性丢失木糖基 $C_5H_8O_4$ (132 u)、鼠李糖基 $C_6H_{10}O_4$ (146 u)或者葡萄糖基 $C_6H_{10}O_5$ (162 u)等特征碎片, 形成丰度较高的黄酮苷元, 黄酮苷元再进一步裂解。如化合物 28 在正离子模式下, 准分子离子峰 *m/z* 为 581.1879 $[M+H]^+$, 失去一分子鼠李糖产生碎片 *m/z* 435.1276 $[M+H-Rha]^+$、*m/z* 147.0441, 再失去一分子葡萄糖苷产生碎片 *m/z* 273.0755 $[M+H-Rha-Glc]^+$、*m/z* 165.0180, 形成一个柚皮素苷元, 再经过环开裂及失去中性碎片 CO 等分子后产生 *m/z* 219.0286、*m/z* 195.0287、*m/z* 191.0337 等碎片离子, 推测为柚皮苷, 采用标准物质进行比对获得确认, 其可能的裂解途径见图 2。化合物 30 在正离子模式下, 准分子离子峰为 *m/z* 449.1083 $[M+H]^+$, 在裂解过程中失去一分子葡萄糖基, 产生碎片 *m/z* 287.0549 $[M+H-Glc]^+$, 再发生逆狄尔斯-阿尔德裂解, 生成 *m/z* 153.0183 特征碎片, 推测为木犀草苷。类似的, 根据裂解碎片及结合标准物质或者文献报道[17,21,24], 鉴别其他黄酮类化合物。

表 1　柚花中化学成分 UPLC-QE-Orbitrap-HRMS 信息

Table 1　UPLC-QE-Orbitrap-HRMS information on chemical constituents in pomelo flowers

峰号	保留时间/min	分子式	相对分子质量	误差 ($\times10^{-6}$)	离子模式	主要碎片离子	化合物	分类	参考文献
1	1.30	$C_9H_{12}N_2O_6$	243.0626	1.18	$[M-H]^-$	110.0237、94.0285	尿苷	核苷	-
2	1.44	$C_9H_{11}NO_2$	166.0866	2.10	$[M+H]^+$	120.0812、149.0601	*L*-苯丙氨酸	氨基酸	[18]
3	2.02	$C_{11}H_{12}N_2O_2$	205.0974	1.35	$[M+H]^+$	118.0654、146.0600、188.0705	*L*-色氨酸*	氨基酸	-
4	2.47	$C_{10}H_{13}N_5O_3$	252.1093	0.71	$[M+H]^+$	99.0446、136.0620、69.0343、119.0354	虫草素*	核苷	-
5	4.03	$C_8H_8O_3$	153.0548	1.34	$[M+H]^+$	110.0367、125.0599	2-羟基-4-甲氧基苯甲醛	醛	-
6	4.21	$C_{16}H_{22}O_8$	360.1653	–0.10	$[M+NH_4]^+$	163.0752、131.0493	松柏苷	其他	-
7	5.41	C_9H_8O	133.0651	2.06	$[M+H]^+$	103.0547、105.0703、115.0544	肉桂醛	醛	[19]
8	5.70	$C_{27}H_{32}O_{16}$	613.1764	0.13	$[M+H]^+$	355.0811、415.1007	羟基红花黄色素 A	黄酮	-
9	5.96	$C_{15}H_{12}O_7$	305.0655	–0.29	$[M+H]^+$	259.0599、287.0544、153.0182	花旗松素*	黄酮	-
10	6.37	$C_8H_{10}N_4O_2$	195.0878	0.92	$[M+H]^+$	110.0716、138.0663	咖啡因*	生物碱	-
11	6.52	$C_9H_8O_2$	149.0599	1.31	$[M+H]^+$	117.0338、121.0286	肉桂酸	有机酸	[19]
12	6.56	$C_{16}H_{16}O_5$	289.1070	–0.30	$[M+H]^+$	187.0388、229.0856	二氢欧山芹醇醋酸酯	香豆素	-
13	6.60	$C_{27}H_{30}O_{15}$	595.1670	2.09	$[M+H]^+$	379.0808、457.1125、337.0701	维采宁-2*	黄酮	-
14	6.95	$C_{26}H_{28}O_{15}$	581.1503	0.29	$[M+H]^+$	287.0550、329.0653	山柰酚 3-O-桑布双糖苷*	黄酮	[20]
15	6.95	$C_{15}H_{10}O_7$	303.0501	0.69	$[M+H]^+$	229.0496、137.0235、153.0183、257.0442、285.0395	槲皮素	黄酮	[18–19]
16	7.06	$C_{15}H_{18}O_3$	247.1330	0.69	$[M+H]^+$	187.11169、131.0856	小白菊内酯衍生物	萜类	-
17	7.16	$C_{15}H_{24}O_2$	237.1850	0.30	$[M+H]^+$	135.1172、191.1789、133.1013、201.1634、119.0857	莪术醇/莪术二酮*	萜类	-
18	7.23	$C_{27}H_{32}O_{15}$	597.1818	0.71	$[M+H]^+$	289.0703、381.0958、435.1255、451.1221	圣草次甙*	黄酮	[18]
19	7.23	$C_{15}H_{12}O_6$	289.0709	0.91	$[M+H]^+$	163.0389、153.0183、135.0441、271.0598	圣草酚*	黄酮	[18]
20	7.23	$C_{27}H_{30}O_{16}$	611.1607	0.07	$[M+H]^+$	303.0498、465.1031	芦丁	黄酮	[21]
21	7.29	$C_{16}H_{12}O_7$	317.0655	–0.28	$[M+H]^+$	302.0418、153.0182、229.0495	异鼠李素*	黄酮	[22–23]
22	7.31	$C_{26}H_{28}O_{14}$	565.1560	1.46	$[M+H]^+$	379.0808、295.0603、121.0286	夏佛托苷/异夏佛托苷	黄酮	[19]
23	7.50	$C_{21}H_{20}O_{12}$	465.1033	1.12	$[M+H]^+$	303.0497、229.0494	金丝桃苷	黄酮	[22]
24	7.54	$C_{10}H_{10}O_4$	195.0653	0.45	$[M+H]^+$	145.0284、117.0337、177.0545、149.0596	阿魏酸	有机酸	[19]
25	7.56	$C_{11}H_{10}O_4$	207.0651	–0.39	$[M+H]^+$	151.0750、179.0698、146.0361	6,7-二甲氧基香豆素*	香豆素	-
26	7.59	$C_{11}H_{12}O_5$	225.0756	–0.57	$[M+H]^+$	207.0651、175.0390、119.0494	芥子酸*	有机酸	-
27	7.63	$C_{15}H_{12}O_5$	273.0759	0.43	$[M+H]^+$	231.0645、119.0494、219.0286、153.0183	柚皮素*	黄酮	[18]

表 1(续)

峰号	保留时间/min	分子式	相对分子质量	误差($\times10^{-6}$)	离子模式	主要碎片离子	化合物	分类	参考文献
28	7.63	$C_{27}H_{32}O_{14}$	581.1879	2.39	$[M+H]^+$	435.1276、273.0755、219.0286、195.0287、147.0441、191.0337、165.0180	柚皮苷	黄酮	[24]
29	7.73	$C_{15}H_{20}O_2$	233.1537	0.20	$[M+H]^+$	187.1480、215.1432、159.1167	白术内酯 II/异土木香内酯	萜类	-
30	7.90	$C_{21}H_{20}O_{11}$	449.1083	1.11	$[M+H]^+$	153.0183、287.0549	木犀草苷	黄酮	[23,25]
31	7.96	$C_{27}H_{30}O_{14}$	579.1719	1.91	$[M+H]^+$	433.1133、271.0601、153.0182	野漆树苷	黄酮	[24]
32	8.09	$C_{28}H_{32}O_{15}$	609.1811	–0.51	$[M+H]^+$	301.0707、463.1220、258.0522	地奥司明	黄酮	[24]
33	8.13	$C_{15}H_{10}O_6$	287.0548	–0.80	$[M+H]^+$	137.0234、241.0492	木犀草素	黄酮	[22–23]
34	8.21	$C_{15}H_{20}O_4$	263.1293	1.61	$[M-H]^-$	163.0757、219.1390、204.1156、201.1286、153.0916	脱落酸	萜类	-
35	8.23	$C_{15}H_{22}O$	219.1745	0.59	$[M+H]^+$	201.1637、131.0857、173.1327	α-香附酮	萜类	-
36	8.32	$C_{10}H_{14}O$	151.1118	0.30	$[M+H]^+$	93.0704、105.0703、123.1170、133.1014、151.1118	紫苏烯	萜类	[19]
37	8.73	$C_{15}H_{12}O_4$	257.0809	0.24	$[M+H]^+$	173.0604、153.0183	松属素*	黄酮	-
38	9.41	$C_{15}H_{22}O_2$	235.1693	0.02	$[M+H]^+$	189.1637、199.1479	青蒿酸	萜类	-
39	9.74	$C_{15}H_{10}O_6$	285.0408	0.80	$[M-H]^-$	117.0335、211.0394、185.0601、229.0514、257.0461	山柰酚	黄酮	[22]
40	10.22	$C_{15}H_{16}O_4$	261.1122	0.05	$[M+H]^+$	189.0546、131.0492、243.1013	异橙皮内酯	香豆素	[24]
41	10.27	$C_{26}H_{30}O_8$	471.2019	1.13	$[M+H]^+$	425.1955、161.0597、407.1845	柠檬苦素	萜类	-
42	10.78	$C_{17}H_{16}O_6$	317.1019	–0.10	$[M+H]^+$	233.0443、203.0337、231.0286、218.0208、175.0389、85.0654	白当归脑	香豆素	-
43	10.94	$C_{17}H_{26}O_4$	293.1766	2.64	$[M-H]^-$	193.1595、221.1547、236.1056	6-姜酚	酚	[18–19]
44	11.34	$C_{10}H_8O_5$	209.0444	–0.08	$[M+H]^+$	194.0210、149.0234	秦皮素	香豆素	[26]
45	11.58	$C_{10}H_8O_4$	193.0496	0.03	$[M+H]^+$	178.0259、133.0285、150.0314	异莨菪亭/东莨菪内酯	香豆素	[19]
46	12.18	$C_{11}H_6O_4$	203.0339	0.00	$[M+H]^+$	159.0441、147.0441	香柑醇	香豆素	[24]
47	12.20	$C_{14}H_{12}O_3$	229.0858	–0.39	$[M+H]^+$	131.0492、201.0913	去甲氧基醉椒素*	其他类	-
48	12.20	$C_9H_6O_3$	163.0390	0.19	$[M+H]^+$	119.0495、107.0496	7-羟基香豆素*	香豆素	-
49	12.20	$C_{11}H_6O_3$	187.0389	–0.48	$[M+H]^+$	159.0440、131.0492、115.0544、143.0490、159.0441、91.0548	异补骨脂素	香豆素	[26]
50	12.81	$C_{16}H_{14}O_4$	271.0966	0.25	$[M+H]^+$	203.0338、147.0440、131.0492	欧前胡素/异欧前胡素	香豆素	[26]
51	14.40	$C_{21}H_{22}O_4$	339.1595	1.07	$[M+H]^+$	203.0338、159.0416、147.0440、131.0492	佛手柑素	香豆素	-

注: *通过与 PubChem 数据库比较再次验证; -表示无此项，表 2 同。

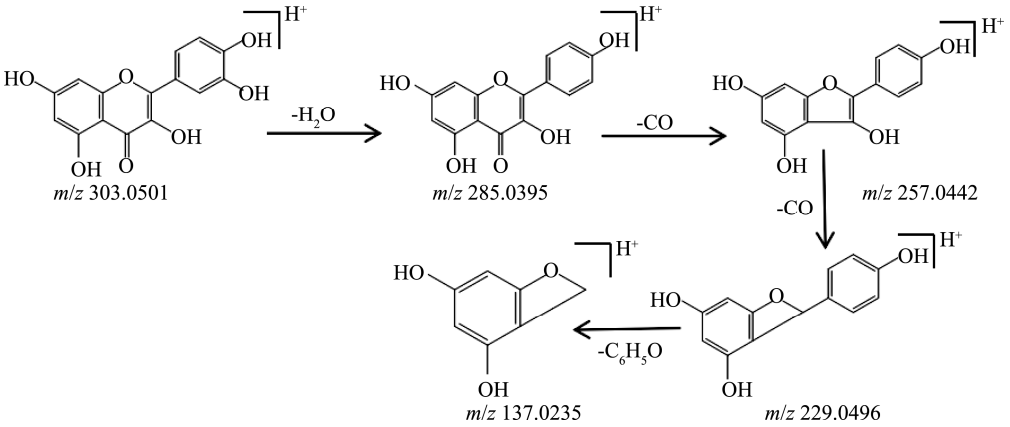


图 1 槲皮素可能的裂解途径

Fig.1 Possible cleavage pathways of quercetin

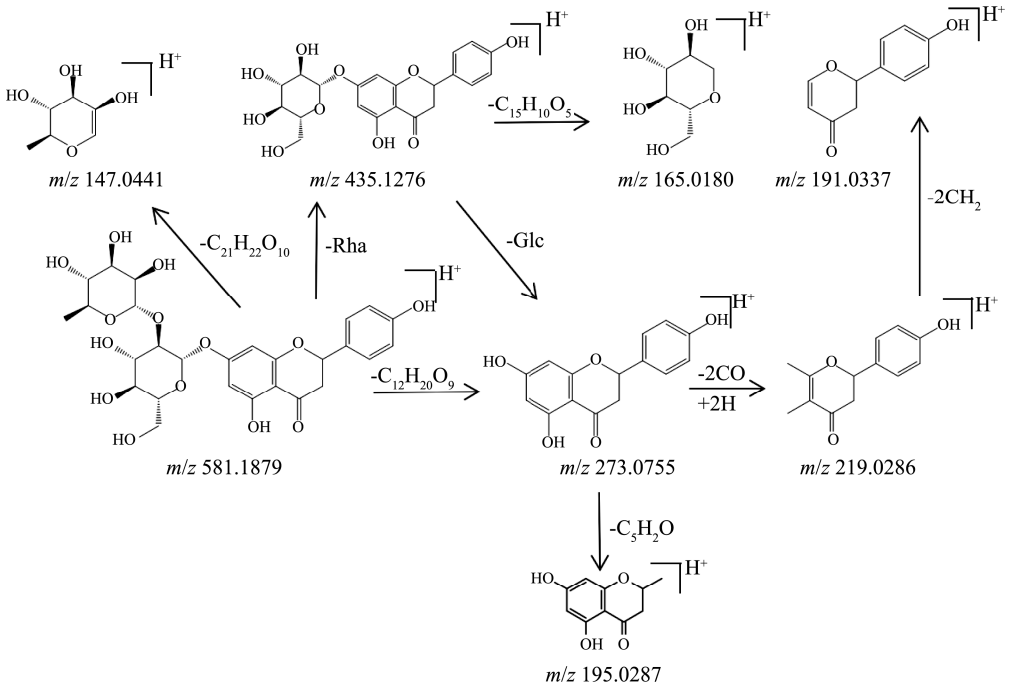


图 2　柚皮苷可能的裂解途径

Fig.2　Possible cleavage pathways of naringin

2.2.2　香豆素类化合物

香豆素类化合物是一类具有苯骈 α-吡喃酮母核的化合物, 呋喃香豆素类化合物由香豆素核上的异戊烯基与邻位酚羟基环合而成。这类化合物易发生开环反应、取代基的断裂与重排、失去 CO、CO_2 等小分子。以化合物 44 和 51 为例, 分析该类物质的裂解规律。化合物 44 在正离子模式下, 该化合物准分子离子峰 *m/z* 为 209.0444 $[M+H]^+$, 在丢失自由基 CH_3、CH_4 及 CO_2 分子后, 得到 *m/z* 194.0210、*m/z* 149.0234 碎片离子, 结合文献[26]推测为秦皮素, 采用标准物质进行比对获得确认, 其可能的裂解途径见图 3。化合物 51 丢失 C-10 侧链后得到 *m/z* 203.0338 碎片离子, 该碎片离子接着丢失 CO_2 中性分子或者丢失 2 分子 CO 中性分子, 分别得到产物离子 *m/z* 159.0416 或 *m/z* 147.0440, 产物离子 *m/z* 159.0416, 接着丢失一分子 CO 得到 *m/z* 131.0492 碎片离子, 推测为佛手柑素, 可能的裂解途径见图 4。其他化合物根据裂解离子、裂解规律结合文献[26]鉴别。

2.2.3　萜类化合物

萜类化合物是一类以异戊二烯为结构单元组成的化合物, 依据异戊二烯单元数量不同分为单萜、倍半萜、二萜、三萜、多萜等。萜类化合物容易失去小分子, 倍半萜类化合物容易发生环裂解、异戊二烯单元裂解, 三萜类化合物容易失去侧链。如化合物 29 在正离子模式下准分子离子为 *m/z* 233.1537 $[M+H]^+$, 丢失一分子 H_2O 产生碎片离子 *m/z* 215.1432、连续丢失两分子 CO 生成碎片离子 *m/z* 187.1480、*m/z* 159.1167, 推测为白术内酯 II 或其同分异构体异土木香内酯。化合物 35 在正离子模式下准分子离子为 *m/z* 219.1745 $[M+H]^+$, 丢失一分子 H_2O 产生碎片离子 *m/z* 201.1637 $[M+H-H_2O]^+$、丢失 CH_3 侧链及 O 分子生成碎片 *m/z* 173.1327 $[M+H-2CH_3-O]^+$, 接着丢失 C_3H_6 侧链生成碎片 *m/z* 131.0857 $[M+H-2CH_3-O-C_3H_6]^+$, 参考文献推测为 α-香附酮, 可能的裂解途径见图 5。其他化合物同样依据裂解离子、裂解规律结合文献[27]鉴别。

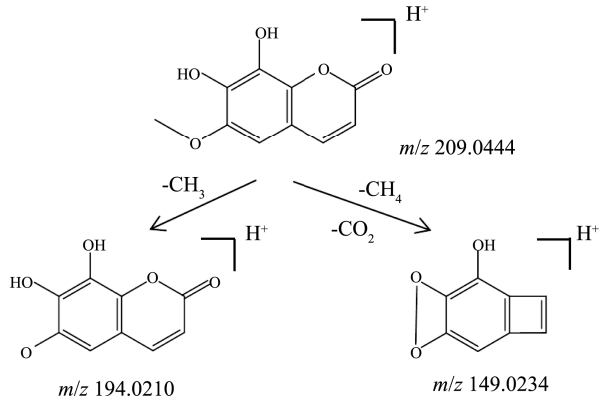


图 3　秦皮素可能的裂解途径

Fig.3　Possible cleavage pathways of fraxetin

2.2.4　其他类化合物

共鉴定了 5 个含氮类化合物, 包括 2 个氨基酸、2 个核苷、1 个生物碱类成分。氨基酸类化合物的碎片离子主要来源于结构中的 COOH 和 NH_3 的丢失。核苷类成分在二级质谱中的裂解规律主要为丢失呋喃核糖和 NH_3[24]。另外还鉴定了 3 个有机酸、2 个醛、1 个酚类化合物及 2 个其

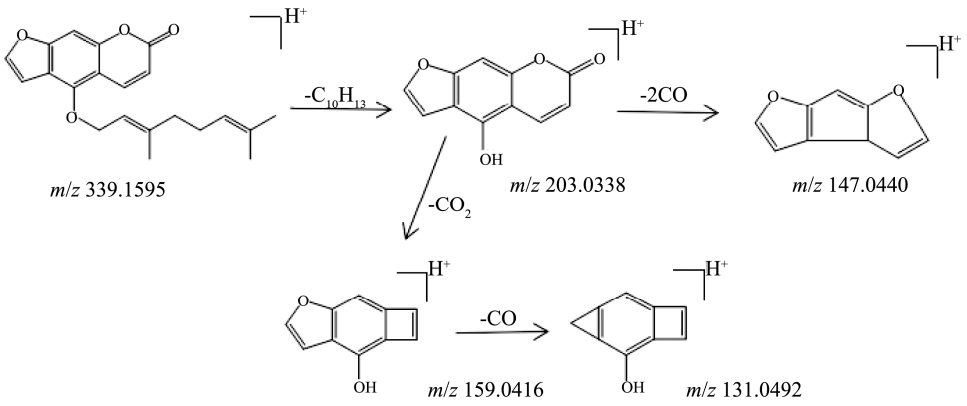


图 4 佛手柑素可能的裂解途径

Fig.4 Possible cleavage pathways of bergamottin

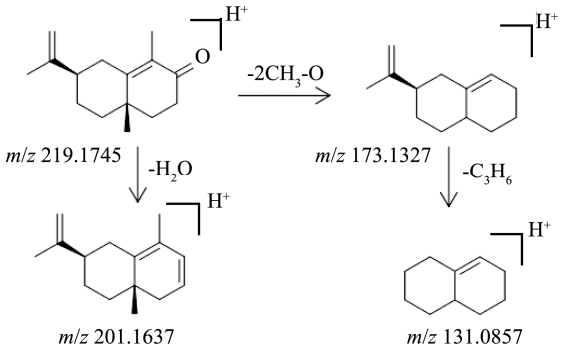


图 5 *α*-香附酮可能的裂解途径

Fig.5 Possible cleavage pathways of *α*-cyperone

他类化合物。有机酸类化合物容易失去 H_2O、COOH、CO_2 等中性分子[21]。如化合物 24 准分子离子峰为 *m/z* 195.0653 $[M+H]^+$，失去一分子 H_2O，产生碎片 *m/z* 177.0545 $[M+H-H_2O]^+$ 或者失去侧链产生碎片 *m/z* 149.0596 $[M+H-CH_2O_2]^+$，推测为阿魏酸。醛基的 *α*-裂解是醛类化合物的典型裂解方式，通过 McLafferty 重排丢失一个中性分子(如 CO 或 H_2)，如化合物 7 准分子离子峰为 *m/z* 133.0651 $[M+H]^+$，丢失一分子 CO 产生碎片 *m/z* 105.0703 $[M+H-CO]^+$，丢失一分子 H_2 产生碎片 *m/z* 103.0547 $[M+H-CO-H_2]^+$，或者丢失一分子 H_2O 产生碎片 *m/z* 115.0544 $[M+H-H_2O]^+$，推测为肉桂醛。酚类物质结构中存在苄基结构，与苯环相连的碳碳单键容易发生断裂，即苄基位的 C-C 键断裂，如化合物 43 在负离子模式下准分子离子峰为 *m/z* 293.1766 $[M-H]^-$，苄基裂解后产生碎片离子 *m/z* 236.1056 $[M-H-C_4H_9]^-$，再失去一个 CH_3 取代基生成碎片离子 *m/z* 221.1547 $[M-H-C_4H_9-CH_3]^-$，或者苄基裂解后产生碎片离子 *m/z* 193.1595 $[M-H-C_6H_{12}O]^-$，推测为 6-姜酚，可能的裂解途径见图 6。

2.3 主要成分测定结果

本研究参照标准方法定量测定了 3 个批号柚花冻干粉中柚皮苷、总皂苷、脂肪、蛋白质、膳食纤维、碳水化合物、5 种维生素及 10 种营养元素含量，检测结果见表 2。

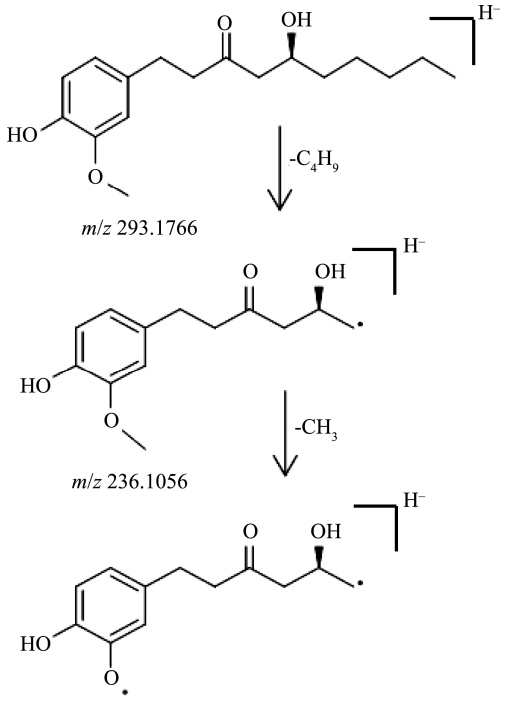


图 6 6-姜酚可能的裂解途径

Fig.6 Possible cleavage pathways of 6-gingerol

沙田柚花冻干粉中柚皮苷含量均值达到 13.9 g/100 g。柚花粉蛋白质含量较高，测得均值为 16.5 g/100 g，在提供人体必需氨基酸等方面有很好的潜力。膳食纤维含量(均值 39.4 g/100 g)在食物中也是较高的，与白笋干、甘草等含量相当，高膳食纤维含量有利于促进肠道蠕动，增加饱腹感，对于控制体重和改善肠道健康非常有益。总皂苷(以人参皂苷 Re 计)含量均值为 1.7 g/100 g，在食用花中处于较高水平。皂苷具有免疫调节和降低血脂等生理活性。

表 2　柚花主要营养成分表

Table 2　Main nutritional components table of pomelo flowers

营养成分	含量范围	平均值	RSDs	检测方法
柚皮苷/(g/100 g)	13.6~14.0	13.9	1.7	《中华人民共和国药典》(2020 年版)四部通则 0512 高效液相色谱法
总皂苷(以人参皂苷 Re 计)/(g/100 g)	1.6~1.8	1.7	5.9	《保健食品理化及卫生指标检验与评价技术指导原则》(2020 年版)
脂肪/(g/100 g)	1.2~1.6	1.4	14.3	GB 5009.6—2016《食品安全国家标准 食品中脂肪的测定》(第二法)
蛋白质/(g/100 g)	16.2~16.9	16.5	2.1	GB 5009.5—2016《食品安全国家标准 食品中蛋白质的测定》(第一法)
膳食纤维/(g/100 g)	38.2~41.0	39.4	3.7	GB 5009.88—2014《食品安全国家标准 食品中膳食纤维的测定》
碳水化合物/(g/100 g)	29.3~30.9	30.3	2.9	GB/Z 21922—2008《食品营养成分基本术语》
维生素 C/(g/kg)	0.566~0.608	0.581	4.0	GB 5009.86—2016《食品安全国家标准 食品中抗坏血酸的测定》
维生素 A/(mg/100 g)	<0.05	<0.05	-	GB 5009.82—2016《食品安全国家标准 食品中维生素 A、D、E 的测定》(第一法)
维生素 E/(mg/100 g)	4.3~4.6	4.5	3.8	
维生素 B_1/(mg/100 g)	0.038~0.051	0.045	14.6	GB 5009.84—2016《食品安全国家标准 食品中维生素 B_1 的测定》
维生素 B_2/(mg/100 g)	0.693~0.782	0.752	6.8	GB 5009.85—2016《食品安全国家标准 食品中维生素 B_2 的测定》
Mg/(g/kg)	2.12~2.20	2.17	1.9	GB 5009.268—2016《食品安全国家标准 食品中多元素的测定》(第二法)
P/(g/kg)	3.74~3.95	3.85	2.7	
K/(g/kg)	22.2~24.6	23.5	5.2	
Ca/(g/kg)	11.8~14.7	13.2	11.0	
Na/(mg/kg)	6.6~7.0	6.8	3.0	GB 5009.268—2016(第一法)
Mn/(mg/kg)	16.7~18.0	17.5	3.9	
Fe/(mg/kg)	59~66	63	5.6	
Cu/(mg/kg)	7.5~7.8	7.7	2.0	
Zn/(mg/kg)	20.5~21.1	20.9	1.5	
Se/(mg/kg)	0.066~0.086	0.074	14.0	

注: 相对标准偏差(relative standard deviations, RSDs), 单位为%。

较高的皂苷含量使柚花可能在调节人体免疫功能、降低胆固醇等方面有更好的效果。维生素 C 含量均值为 0.581 g/kg, 在花类中处于中等水平。维生素 E 含量均值为 4.5 mg/100 g, 与其他花类相比相对较高, 它在抗氧化保护方面能发挥更大的作用, 例如可以更好地保护细胞的脂质成分免受氧化损伤。维生素 B_1 和 B_2 含量也比较可观, 均值分别为 0.045 mg/100 g 和 0.752 mg/100 g。维生素 A 含量则较低。此外, 本研究测定了柚花干粉中 Mg、P、K、Ca、Na、Mn、Fe、Cu、Zn、Se 10 种矿物质元素。结果显示, 柚花中 Mg、P、K、Ca、Mn、Fe、Cu、Zn 含量相对较高, Na 含量相对较低。柚花中含有丰富的矿物质元素, 可对人体微量元素起到有益补充作用。

3　讨　论

从研究鉴定结果来看, 柚花冻干粉醇提物中检测出 19 种黄酮类化合物, 是相对含量最高的一类物质, 这类化合物是柚花发挥药理作用的主要活性成分。黄酮类化合物具有抗氧化、抗炎、心血管保护、抗肿瘤、免疫调节、神经保护等多种重要的功能活性作用[28–29]。如在黄酮类中相对含量最高的柚皮苷及柚皮素, 它具有显著的抗氧化能力[14], 能有效清除自由基, 减轻氧化应激损伤; 还具备抗炎特性, 可抑制炎症介质释放, 调节炎症信号通路, 缓解炎症反应; 在心血管保护方面, 可改善血管内皮功能、调节血脂代谢; 同时展现出一定的抗肿瘤活性, 诱导肿瘤细胞凋亡, 抑制其增殖与转移[30]。此外, 柚花中还富含香豆素类、萜类化合物成分, 如 7-羟基香豆素、佛手柑素、α-香附酮、柠檬苦素等。这两类成分同样被认为具有抗氧化、抗炎、抑菌、抗肿瘤等作用[2]。7-羟基香豆素具有胃黏膜保护活性和抗腹泻活性, 对多种肠道致病菌有抗菌作用, 可显著减少肠道蠕动和腹泻症状[31]; α-香附酮能减轻小鼠

骨关节炎症反应[32]; 柠檬苦素可抑制白血病细胞、宫颈癌细胞、乳腺癌细胞和肝癌细胞等多种癌细胞生长, 能激活谷胱甘肽转移酶, 阻断致癌剂对 DNA 的损害, 还可干扰癌细胞的 DNA 合成、破坏癌细胞的信号传导通路、诱导癌细胞凋亡[33]。这些化合物在柚花的整体药理活性中起到了不可或缺的作用。

本研究鉴定发现类黄酮、香豆素、萜类物质为沙田柚花中种类及含量相对较高的物质, 与报道的柚花非挥发性物质组成及柑橘属植物果实及果皮次生代谢物组成一致, 但种类及含量存在差异[2,11,34]。柚皮苷和柚皮素是柚花及柚果实代谢物报道最多的黄酮类物质, 柚皮苷被认为是化橘红发挥止咳化痰的主要功效物质, 同样也是柚花发挥药理作用的重要功能活性成分。经含量测定, 沙田柚花冻干粉中柚皮苷含量均值达到 13.9 g/100 g, 高于以往柚花及柑橘属植物报道的含量。野漆树苷、槲皮素、芦丁、山柰酚、地奥司明等多种物质为柚花及柑橘属植物共有的代谢物, 部分化合物如紫苏烯、青蒿酸、香柑醇等在柚花中未见报道, 但在柚皮、化橘红、广陈皮等柑橘属植物中被鉴定。金丝桃苷、羟基红花黄色素 A、松属素、夏佛托苷、木犀草素 5 种黄酮类物质, 白当归脑 1 种香豆素以及 α-香附酮、莪术醇、白术内酯 II/异土木香内酯 3 种萜类物质为首次在柚花中被鉴定。

4 结 论

柚花作为一种具有多种药理活性的天然植物资源, 其内部的化学成分和药理作用机制值得进行更为深入的研究和挖掘。本研究采用 UPLC-QE-Orbitrap-HRMS 技术, 较全面地分析了梅州沙田柚柚花中非挥发性化学成分, 鉴定出 51 个活性成分, 部分成分在柚花中为首次被鉴定。同时运用多种分析检测技术较全面分析了梅州沙田柚柚花的主要营养成分及其含量。本研究为制定柚花相关产品标准提供了可靠的数据支持和科学依据, 并为后续柚花资源综合利用和产品开发提供了发展思路。

参考文献

[1] 刘影, 杨鑫, 苏洁如, 等. 化州柚花浸提液中黄酮成分及其抗氧化活性分析[J]. 农产品加工, 2025(2): 61–65.
LIU Y, YANG X, SU JR, *et al*. Analysis of flavonoids and antioxidant activities in the extracts of *Citrus grandis* flower [J]. Agricultural Products Processing, 2025(2): 61–65.

[2] 刘孟华, 李泮霖, 罗铝铿. 柚花化学成分及药理活性研究进展[J]. 嘉应学院学报, 2015, 33(2): 67–73.
LIU MH, LI PL, LUO LK. Advances in studies of chemical constitutes and pharmacological activity of pomelo flower [J]. Journal of Jiaying University, 2015, 33(2): 67–73.

[3] 李武国, 苏乔, 魏洁书, 等. 化州柚花挥发油的 GC-MS 分析及其对肺癌细胞 A549 增殖、迁移的影响研究[J]. 中国药房, 2018, 29(22): 3093–3097.
LI WG, SU Q, WEI JS, *et al*. GC-MS analysis of volatile oil from the flowers of *Citrus grandis* and study on effects of it on the proliferation and migration of lung cancer A549 cells [J]. China Pharmacy, 2018, 29(22): 3093–3097.

[4] 郝云芳. 柚子花有效成分的分离纯化及对 3T3-L1 细胞增殖的影响[D]. 广州: 华南理工大学, 2015.
HAO YF. Isolation and Identification of the flower of *Citrus maxima* and its proliferation inhibition effect on 3T3-L1 preadipocytes [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2015.

[5] HAO YF, QIN SW, YANG L, *et al*. Marmin from the blossoms of *Citrus maxima* (Burm.) Merr. exerts lipid-lowering effect via inducing 3T3-L1 preadipocyte apoptosis [J]. Journal of Functional Foods, 2021, 82(5): 104513.

[6] WEN J, LIU H, LAI H, *et al*. Widely targeted metabolomics reveal the distribution of metabolites in Shatian pomelo fruit [J]. Foods, 2024, 13(22): 3689.

[7] CHEONG MW, LIU SQ, ZHOU W, *et al*. Chemical composition and sensory profile of pomelo [*Citrus grandis* (L.) Osbeck] juice [J]. Food Chemistry, 2012, 135(4): 2505–2513.

[8] ARNAB S, AKASH D, TANMOY B, *et al*. Phenolic profile, *in vitro* antioxidant and safety evaluation of extract obtained from *Citrus maxima* Burm. Merr. seeds [J]. Drug and chemical toxicology, 2025(8): 1–18.

[9] SU B, TIAN J, WANG K, *et al*. Qualitative and quantitative analyses of the chemical components of peels from different pomelo cultivars (*Citrus grandis* [L.] Osbeck) based on gas chromatography-mass spectrometry, ultraperformance liquid chromatography-Q-Exactive orbitrap-MS, and high-performance liquid chromatography-photodiode array detection [J]. ACS Omega, 2023, 8(7): 6253–6267.

[10] LU J, WANG W. Exploration of wendan pomelo [*Citrus maxima* (Burm.) Merr. cv. Wentan] peel from four different growing regions by liquid chromatography-mass spectrometry and bioactivity analysis [J]. Applied Sciences (Basel), 2024, 14(3): 1200.

[11] 苏柏庆. 不同品种的柚子果皮化学成分分析研究[D]. 广州: 广州医科大学, 2023.
SU BQ. Analysis of the chemical composition of the peel of differentcultivars of *Citrus grandis* [L.] Osbeck [D]. Guangzhou: Guangzhou Medical University, 2023.

[12] 李珊珊, 杨敏, 吴维坚. 琯溪蜜柚花不同生长期挥发油累积规律及挥发性成分变化[J]. 食品安全质量检测学报, 2022, 13(9): 2755–2762.
LI SS, YANG M, WU WJ. Accumulation law of volatile oil and the change of volatile components in Guanxi *Citrus grandis* flower in different growth stages [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2022, 13(9): 2755–2762.

[13] 冯涛, 孙嘉卿, 王秀敏, 等. 基于HS-SPME-GC-MS鉴定不同树龄柚子花关键呈香物质[J]. 安徽农业科学, 2023, 51(2): 206–211.
FENG T, SUN JQ, WANG XM, *et al*. Identification of key aromatic substances in pomelo flowers of different tree ages based on HS-SPME-GC-MS [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2023, 51(2): 206–211.

[14] LI JX, ZOU SQ, YANG WL, *et al.* Identification of volatile and nonvolatile compounds in citri reticulatae pericarpium viride using

GC-MS, UPLC-Q-Exactive Orbitrap-MS, and HPLC-PDA [J]. Food Science & Nutrition, 2023, 11(3): 1415–1425.

[15] WU H, CAO Y, QU Y, *et al.* Integrating UPLC-QE-Orbitrap-MS technology and network pharmacological method to reveal the mechanism of Bailemian capsule to relieve insomnia [J]. Natural Product Research, 2022, 36(10): 2554–2558.

[16] YU G, ZHANG T, XU H, *et al*. Investigating the active substance and mechanism of San-Jiu-Wei-Tai Granules via UPLC-QE-Orbitrap-MS and network pharmacology [J]. Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine, 2022, 2022: 1487903.

[17] 陈少影, 兰卫. 基于 UPLC-QE-Orbitrap-MS 技术的欧芹子成分分析[J]. 中国医院药学杂志, 2025, 45(4): 1–12.
CHEN SY, LAN W. Composition analysis of seeds of *Petroselinum crispum* (Mill.) Fuss by UPLC-QE-Orbitrap-MS [J]. Chinese Journal of Hospital Pharmacy, 2025, 45(4): 1–12.

[18] 王俊帅, 王雪仪, 王雪颖, 等. UPLC-Q-Exactive Orbitrap-MS 联合网络药理学分析清肺汤抗肺炎活性作用机制[J]. 湖南中医药大学学报, 2024, 44(12): 2267–2276.
WANG JS, WANG XY, WANG XY, *et al*. Analysis of the mechanism of action of Qingfei decoction's anti-pneumonia activity by UPLC-Q-Exactive Orbitrap-MS combined with network pharmacology [J]. Journal of Hunan University of Chinese Medicine, 2024, 44(12): 2267–2276.

[19] 孙燕, 冯峰, 黄特辉, 等. 基于 UPLC-Q-Exactive 技术结合 OTCML 数据库快速分析沙棘的功效成分[J]. 天然产物研究与开发, 2019, 31(7): 1192–1202.
SUN Y, FENG F, HUANG TH, *et al*. Rapid analysis of functional components of *Hippophae rhamnoides* by UPLC-Q-Exactive and OTCML database [J]. Natural Product Research and Development, 2019, 31(7): 1192–1202.

[20] YIN J, REN W, WEI B, *et al*. Characterization of chemical composition and prebiotic effect of a dietary medicinal plant *Penthorum chinense* Pursh [J]. Food Chemistry, 2020, 319: 126568–126580.

[21] 肖观林, 江洁怡, 李素梅, 等. 基于 UPLC-Q-TOF-MS/MS 技术的布渣叶化学成分分析[J]. 中国实验方剂学杂志, 2021, 27(3): 138–148.
XIAO GL, JIANG JY, LI SM, *et al*. Analysis of chemical constituents in *Microctis folium* by UPLC-Q-TOF-MS/MS [J]. Chinese Journal of Experimental Traditional Medical Formulae, 2021, 27(3): 138–148.

[22] 徐浩然, 乔溪莹, 张童画, 等. 基于 UPLC-Q-Exactive-Orbitrap-MS 技术的苗族药刺梨叶化学成分分析[J]. 中国现代中药, 2022, 24(10): 1850–1860.
XU HR, QIAO XY, ZHANG TH, *et al*. Analysis of chemical components of Miao medicine *Rosae roxburghii* Folium based on UPLC-Q-Exactive-Orbitrap-MS [J]. Modern Chinese Medicine, 2022, 24(10): 1850–1860.

[23] OGIDIGO JO, ANOSIKE CA, JOSHUA PE, *et al.* UPLC-PDA-ESI-QTOF-MS/MS fingerprint of purified flavonoid enriched fraction of *Bryophyllum pinnatum*; antioxidant properties, anticholinesterase activity and insilicostudies [J]. Pharmaceutical Biology, 2021, 59(1): 444–456.

[24] 罗思妮, 彭致铖, 范倩, 等. 经典名方小承气汤中化学成分的 UPLC-Q-Orbitrap-MS 分析[J]. 中国实验方剂学杂志, 2021, 27(23): 1–10.
LUO SN, PENG ZC, FAN Q, *et al*. Analysis on chemical constituents in Xiao Chengqitang by UPLC-Q-Orbitrap-MS [J]. Chinese Journal of Experimental Traditional Medical Formulae, 2021, 27(23): 1–10.

[25] 赵璐璐, 孙久兰, 赵诗阳, 等. 基于 UPLC-Q-Exactive Orbitrap-MS 和 UPLC-QQQ-MS 的玫瑰花化学成分定性与定量分析[J]. 现代食品科技, 2024, 40(11): 379–397.
ZHAO LL, SUN JL, ZHAO SY, *et al*. Qualitative and quantitative analysis of chemical constituents in *Rosa rugosa* by UPLC-Q-Exactive Orbitrap-MS and UPLC-QQQ-MS methods [J]. Modern Food Science and Technology, 2024, 40(11): 379–397.

[26] 王维皓, 严平贞, 杨滨. 羌活中香豆素类化合物 UPLC-Q-TOF 质谱裂解规律研究[J]. 中国中药杂志, 2021, 46(5): 1179–1190.
WANG WH, YAN PZ, YANG B. Study on fragmentation patterns of coumarins in *Notopterygium inchum* with ultra performance liquid chromatography combined with quadrupole time-of-flight mass spectrometry [J]. China Journal of Chinese Materia Medica, 2021, 46(5): 1179–1190.

[27] 李存满, 骆亚薇, 田宝勇. 环烯醚萜类化合物的质谱裂解规律研究进展[J]. 河北师范大学学报(自然科学版), 2015, 39(6): 522–526.
LI CM, LUO YW, TIAN BY. Research progress on mass spectral fragmentation of iridoids [J]. Journal of Hebei Normal University (Natural Science), 2015, 39(6): 522–526.

[28] CHEN S, WANG X, CHENG Y, *et al*. A review of classification, biosynthesis, biological activities and potential applications of flavonoids [J]. Molecules (Basel, Switzerland), 2023, 28(13): 4982.

[29] 贺佳仪, 林颖, 王长康, 等. 黄酮类化合物的生物活性作用及其在畜禽中的研究进展[J]. 饲料工业, 2022, 43(4): 30–35.
HE JY, LIN Y, WANG CK, *et al*. Bioactivities of flavonoids and its research progress in livestock and poultry [J]. Feed Industry, 2022, 43(4): 30–35.

[30] SHILPA VS, SHAMS R, DASH KK, *et al*. Phytochemical properties, extraction, and pharmacological benefits of naringin: A review [J]. Molecules, 2023, 28(15): 5623.

[31] CRUZ LF, FIGUEIREDO GF, PEDRO LP, *et al*. Umbelliferone (7-hydroxycoumarin): A non-toxic antidiarrheal and antiulcerogenic coumarin [J]. Biomedicine & Pharmacotherapy, 2020, 129: 110432.

[32] ZHANG H, LI S, LU J, *et al*. *α*-Cyperone (CYP) down-regulates NF-*κ*B and MAPKs signaling, attenuating inflammation and extracellular matrix degradation in chondrocytes, to ameliorate osteoarthritis in mice [J]. Aging (Albany NY), 2021, 13(13): 17690–17706.

[33] TUNDIS R, LOIZZO MR, MENICHINI F. An overview on chemical aspects and potential health benefits of limonoids and their derivatives [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2014, 54(2): 225–250.

[34] 曹小敏, 潘思轶. 柑橘属药食同源植物次生代谢物及生物活性研究进展[J]. 食品科学, 2022, 43(23): 305–315.
CAO XM, PAN SY. Progress in research on secondary metabolites and biological activity of medicinal and edible citrus plants [J]. Food Science, 2022, 43(23): 305–315.

(责任编辑: 安香玉 冯东慧)