

柚子主要生物活性成分及其功能研究进展

牛德宝¹, 叶鸿儒¹, 蒙美芬¹, 王家洁¹, 陈艳霞¹, 王明晖¹, 缪璐², 吕仕军^{2*}

(1. 广西大学轻工与食品工程学院, 广西南宁 530004)

(2. 广西壮族自治区产品质量检验研究院, 广西南宁 530200)

摘要: 柚子 (*Citrus grandis* (L.) Osbeck) 是一种亚热带水果, 具有独特的风味和较高的营养价值。作为柚子的原产地, 我国柚子栽培种植历史悠久, 品种资源丰富。大量研究表明, 柚子中富含多糖、黄酮类化合物和萜烯类化合物等功能活性物质, 具有抗氧化、抗癌、抗炎、降脂、降血糖和抗菌等功能。近年来, 人们对柚子生物活性成分及功能特性关注度越来越高, 然而目前柚子生物活性成分和功能特性相关的研究缺乏系统梳理, 这限制了柚子活性成分的开发与利用。因此该文综述了近年来柚子主要生物活性成分及其功能的研究进展, 对未来柚子功能活性物质开发的研究方向进行了详细讨论, 以期对柚子的进一步研究和开发利用提供参考依据。

关键词: 柚子; 活性成分; 功能

文章编号: 1673-9078(2025)07-371-383

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2025.7.1807

Research Progress on the Main Bioactive Compounds and Functional Properties of Pomelo

NIU Debao¹, YE Hongru¹, MENG Meifen¹, WANG Jiajie¹, CHEN Yanxia¹,

WANG Minghui¹, MIAO Lu², LYU Shijun^{2*}

(1.College of Light Industry and Food Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, China)

(2.Guangxi Zhuang Autonomous Region Testing Institute of Product Quality, Nanning 530200, China)

Abstract: Pomelo (*Citrus grandis* (L.) Osbeck) is a subtropical fruit with a unique flavor and high nutritional value. China has a long history of pomelo cultivation and has developed several varieties. Several studies have shown that pomelo is rich in bioactive compounds, such as polysaccharides, flavonoids, and terpenes, and possesses, antioxidant, anticancer, anti-inflammatory, lipid-lowering, hypoglycemic, and antibacterial properties, suggesting that it has broad application prospects in food, dietary supplement, and pharmaceutical industries. Despite the growing interest among researchers on the bioactive compounds and functional properties of pomelo, there is a lack of a comprehensive review on the bioactive compounds and functional properties of pomelo, thereby hindering the development and utilization of these active components. Therefore, this study summarizes the research progress on the main bioactive compounds and functional properties of pomelo in recent

引文格式:

牛德宝,叶鸿儒,蒙美芬,等. 柚子主要生物活性成分及其功能研究进展[J].现代食品科技,2025,41(7):371-383.

NIU Debao, YE Hongru, MENG Meifen, et al. Research progress on the main bioactive compounds and functional properties of pomelo [J]. Modern Food Science and Technology, 2025, 41(7): 371-383.

收稿日期: 2024-12-04

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目 (32102133); 广西自然科学基金面上项目 (2022GXNSFAA035559); 广西科技基地和人才专项 (桂科 AD23026214); 国家现代农业产业技术体系广西大豆油料产业创新团队油料岗位功能专家项目 (nycytxgxcxt-2023-22-03)

作者简介: 牛德宝 (1986-), 男, 博士, 副教授, 研究方向: 食品非热加工与生物酿造, E-mail: happyndb@gxu.edu.cn

通讯作者: 吕仕军 (1975-), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向: 食品检测分析和生产加工工艺, E-mail: 654310196@qq.com

years, and extensively explores potential research directions for the future development of these active compounds. Additionally, this study serves as a valuable resource for further research, development, and utilization of pomelo.

Key words: pomelo; active compounds; functional properties

柚〔 (*Citrus grandis* (L.) Osbeck) 〕属于芸香科柑橘属植物, 又名抛子、文旦, 果实体积庞大、营养价值高、耐贮藏、便运输, 有天然罐头之称^[1]。柚类是世界上主要的亚热带水果, 也是世界上大众化的果品之一, 在巴西、阿根廷、泰国以及墨西哥等许多国家和地区都有栽培^[2]。

中国是柚类的原产地和主产地, 在广西、四川、重庆、浙江、江西、福建、广东和长江流域的诸多省份均有广泛种植^[3]。我国柚类品种资源丰富、品质优良, 福建平和琯溪蜜柚、广西恭城沙田柚、玉环文旦柚、四川脆香甜柚、梁平平顶柚、福鼎四季柚、江西斋婆柚等为主要栽培品种, 平山柚、五布柚、永嘉早柚、金香柚、安江香柚、晚白柚等也有小面积或零星种植^[2]。截至 2021 年, 我国柚的种植面积已达 104 000 hm², 年产量达 528 万 t, 占世界柚子总产量的一半以上, 种植面积和产量已连续多年位居世界第一, 是世界上柚类生产和消费的大国, 且产量、进口价格和进口量等指标保持稳定增长态势^[4]。

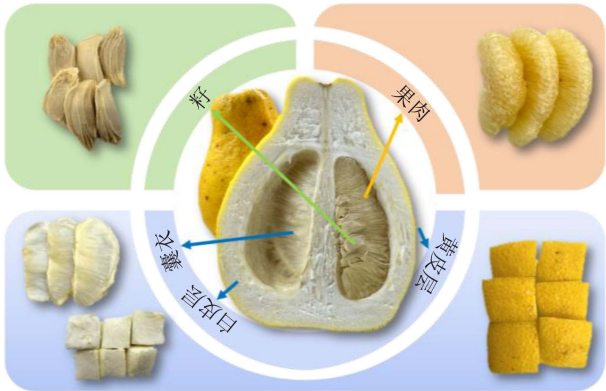


图 1 柚子不同部位的视图

Fig.1 Views of different parts of pomelo

柚子是最受欢迎的柑橘类水果之一, 可作为鲜果、果汁、腌制零食食用。柚子果肉鲜食酸甜可口, 不仅富含钾、磷、叶酸、蛋白质、维生素 C、B₁、B₂ 和 B₁₂ 等营养物质, 还是 β -胡萝卜素、萜类化合物、 β -谷甾醇、多酚和黄酮类化合物等物质的天然来源^[5]。此外, 柚籽中含有黄柏酮和黄柏内酯等多种生物活性成分^[6], 而柚皮则是膳食纤维、黄酮类

化合物、月桂烯等活性物质的理想来源^[7]。由于柚子富含多种生物活性成分, 在预防肥胖、抗炎、抗氧化、抗菌、抗糖尿病、抗癌等方面表现出积极作用, 具有替代人工合成抗氧化、抑菌、抗炎等药物的巨大应用潜力^[8,9]。本文综述了近年来关于柚子在生物活性物质及其生理活性方面的研究进展, 并提出了未来柚子及其产物进一步开发利用的研究方向。这将为柚子的深入研究提供理论参考, 以推动柚子的开发与应用。

1 主要生物活性成分

如图 2 所示, 柚子中富含大量的生物活性物质, 主要为多糖、酚酸、黄酮、香豆素类化合物和萜源类化合物等^[10-12]。其中黄酮和香豆素类化合物的提取、分离纯化以及生理活性研究是目前热点。

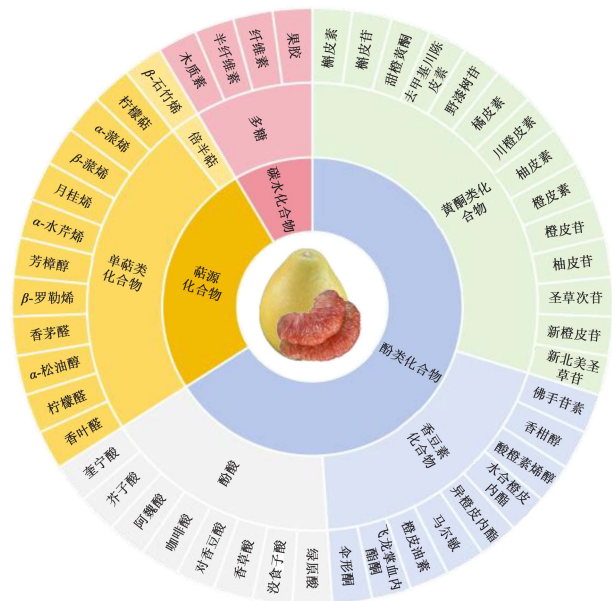


图 2 柚子中主要的生理活性物质

Fig.2 Main physiologically active substances in pomelo

1.1 酚类化合物

天然酚类化合物是植物的次生代谢物, 包括黄酮类化合物、香豆素类化合物和酚酸等物质, 具有抗氧化、抗炎、抗癌和保护心血管等生理活

性^[13,14]。表 1 展示了柚子中部分酚类化合物的结构式。

Su 等^[15]分析了不同产地柚皮中的酚类化合物，检测到 8 种黄酮类化合物、18 种香豆素、4 种有机酸、3 种醛和 12 种其他化合物，结果表明黄酮和香豆素类化合物是柚皮多酚的主要成分，其中黄酮类化合物包括石吊兰甲素、猫眼草黄素和艾黄素等，香豆素类化合物主要包括异紫花前胡内酯、7-甲氧基香豆素、氧化前胡素和秦皮素等。Quan 等^[16]研究结果表明柚子果汁的氧自由基吸收能力值与总酚含量（TPC）存在高度正相关（ $R^2=0.860\ 6$ ），推测柚子果汁中的多酚类化合物可能是果汁发挥抗氧化能力的主要成分。这些酚类化合物的含量和活性与柚子的品种、产地以及成熟度等条件有关。Wang 等^[17]研究了黄金广西蜜柚和三红广西蜜柚果实黄皮层、白皮层和果肉发育过程中酚类物质含量的变化，结果表明在整个发育期，黄金广西蜜柚和三红广西蜜柚 3 个部位的 TPC 均呈波动下降趋势，黄金广西蜜柚、三红广西蜜柚果肉的 TPC 均于花后第 60 天达最高峰 3 060.02、3 428.92 mg·kg⁻¹。成熟果实白皮层 TPC 最高，其次分别为黄皮层和果肉。与上述结果有所不同，宋彪等^[18]研究发现成熟期总酚相对含量为黄皮层>白皮层>囊衣>果肉>籽粒，分析这可能与选用柚子的品种或种植区域的气候差异有关。Deng 等^[19]研究发现广西蜜柚、沙田柚、梁平柚和玉环柚果肉 TPC 为 91.8~170.9 mg GAE·(100 g FW)⁻¹、ORAC（氧自由基吸收能力）值为 678.9~1 590.2 μmol TE·(100 g FW)⁻¹，且上述柚子的 ORAC 活性与酚类含量之间存在高度显著的相关性（相关系数 r 高达 0.93）。其中，梁平柚 TPC 和 ORAC 值最高，其次是沙田柚、玉环柚和广西蜜柚，说明不同品种柚子的酚类物质含量和抗氧化活性存在差异。该研究^[19]中的柚子显示出比泰国柚子品种更高的 TPC，这可能是地理环境差异以及品种差异所致，此外，柚子的 TPC 含量高于菠萝、香蕉、桃子、柠檬、梨和橙子 [70.6~94.3 mg GAE·(100 g FW)⁻¹]。因此，柚子可作为富含酚类食物的良好来源。

1.1.1 黄酮类化合物

黄酮类化合物是最常见的多酚，已发现 10 000 多种物质^[20]。柚子是柚皮苷、石吊兰素和橙皮甙等黄酮类化合物的良好来源，其中部分化合物的结构式如表 1^[15,21]所示。

表 1 柚子主要黄酮类化合物成分及其结构式
Table 1 Main flavonoids and their structural formulas in pomelo

黄酮类化合物	结构式	参考文献
柚皮苷		[21]
石吊兰素		
金腰乙素		
橙皮甙		[15]
5,7,3'-三羟基-6,4',5'-三甲氧基黄酮		
川陈皮素		
橙皮素		[15]
橘皮素		
洋艾素		

Deng 等^[22]从沙田柚果肉中分离得到包括柚皮苷、蜂毒苷、雪诺苷 B、雪诺苷 A 和佛手柑汁素等 11 种黄酮类化合物（新北美圣草苷、佛手柑汁素、雪诺苷 B、雪诺苷 A 为首次从柚子中分离得到），其中，蜂毒苷对 ORAC 活性的贡献最大，其次是柚皮苷和佛手柑汁素。Deng 等^[19]随后从沙田柚果肉中进一步分离到 4 种新的黄酮类化合物，分别为雪诺苷 C、D、E、F，研究结果表明不同品种柚子间黄酮类化合物的含量及体外生物活性存在显著差异，广西蜜柚、沙田柚、梁平柚和玉环柚的总黄酮类化合物含量（TEC）为 13.4~193.3 mg CE·(100 g FW)⁻¹，其中 TFC 和 ORAC 值最高的是梁平柚，高于荔枝、苹果和草莓果肉，其次是沙田柚和玉环柚（ $P<0.05$ ），广西蜜柚最低。其中，柚皮苷是广西蜜柚和梁平柚中含量最高的黄酮类化合物；蜂毒苷和野漆树苷分别是沙田柚和玉环柚中含量最丰富的黄酮类化合物。

柚皮苷是柚皮中黄酮类化合物的主要成分，占柚皮中黄酮类化合物的 70% 以上，具有预防或治疗肥胖、心脏病和糖尿病等功能^[23-25]。Nguyen 等^[24]采用酶-超声联合法对柚皮中的柚皮苷进行提取，测得柚皮苷含量为 6.94 mg·g⁻¹。Zhang 等^[26]对沙田柚、广西蜜柚、玉环柚和脆香甜柚柚汁中的柚皮苷成分进行分析，结果表明上述柚子间柚皮苷含量也有所差异，玉环柚（32.6 mg·L⁻¹）和脆香甜柚（21.8 mg·L⁻¹）的柚皮苷含量低于沙田柚（155 mg·L⁻¹）和广西蜜柚（136 mg·L⁻¹）。此外，相关学者研究发现未成熟柚子果汁的柚皮苷含量（40.27 μg·mL⁻¹）显著高于成熟果汁（0.53 μg·mL⁻¹）^[27]。推测柚皮苷含量随果实成熟度增加而降低可能与前体物质运输、相关代谢酶活性等因素有关^[28]。

综上所述，柚皮、柚汁中含有柚皮苷等多种黄酮类化合物，有望作为新型药物的开发来源。

1.1.2 香豆素类化合物

香豆素类化合物是柚皮中的主要酚类成分之一，包括酸橙素烯醇、橙皮内酯和马尔敏等，其中部分香豆素类化合物的结构式如表 2 所示，这些化合物具有抗炎、抗癌、抗氧化和抗菌等多种生理活性^[29-33]。

表 2 柚子主要香豆素类化合物成分及其结构式
Table 2 Main coumarin compounds and their structural formulas in pomelo

香豆素类化合物	结构式	参考文献
佛手柑素		[29]
水合橙皮内酯		
飞龙掌血内酯酮		
伞形酮		[30]
酸橙素烯醇		
马尔敏		[31]
橙皮油内酯		[32]
香柑醇		[33]

Zhao 等^[29]从云南柚皮中分离出 18 种香豆素类物质，其中大多数是 6,7-呋喃香豆素、7-取代香豆素化合物和 7,8-取代香豆素化合物。郝元元^[34]采用液相色谱-质谱法测定 6 种不同产地柚皮（广东沙田柚、广东化州柚、浙江四季柚、浙江常山胡柚、福建琯溪蜜柚、重庆垫江白柚）中香豆素类物质的组成及含量，结果表明柚皮中含有 7-甲基香豆素、7-甲氧基香豆素、7-乙氧基-4-甲基香豆素、醋硝香豆

素四种香豆素类物质, 其中 7-甲氧基香豆素含量较高, 为 $11.4\sim 123.7\ \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 与上述结果一致。Su 等^[15]从沙田柚、广西蜜柚、玉环柚、梁平柚、度尾文旦柚柚皮中提取得到异补骨脂素、异紫花前胡内酯等 18 种香豆素。其中, 5 种柚皮中均含有茛菪亭、异橙皮内酯、秦皮素、异茛菪亭、蛇床子素、7-羟基香豆素、佛手柑素 10 种香豆素类物质, 但异茴芹内酯仅在广西蜜柚柚皮中被检出, 异补骨脂素仅在玉环柚柚皮中未被检出, 7-甲氧基香豆素仅在度尾文旦柚柚皮中未被检出, 这些香豆素类化合物的种类与柚子品种密切相关。此外, 外界环境因素也会影响柚果皮有色层中香豆素的积累, 例如, 光照处理会促进贡水白柚和矮晚柚有色果皮中绝大多数香豆素的积累^[35]。但是目前光照处理对柚有色果皮香豆素代谢的调控机制还不完全明确, 关于光照对香豆素代谢途径的调控还需进一步研究。

1.2 多糖

柚子的柚皮、种子和果肉等部位含有丰富的糖类物质, 包括葡萄糖、阿拉伯糖以及膳食纤维和果胶等多糖成分。林诺怡等^[36]研究结果表明金柚幼果粗多糖 (PFCP) 提取率为 9.12%, 分子量为 3.31 ku, 粒径为 $101\ \mu\text{m}$ 。PFCP 由鼠李糖、阿拉伯糖、半乳糖、甘露糖和半乳糖醛酸组成。顾欣等^[37]研究结果表明梁平柚柚皮多糖含量为 5.46%, 主要由甘露糖 (4.26%)、鼠李糖 (4.72%)、葡萄糖 (11.46%)、半乳糖 (21.48%)、半乳糖醛酸 (23.67%) 和阿拉伯糖 (31.90%) 等单糖组成, 与上述结果^[36]中的单糖类型与比例都有所差异, 这可能与柚子品种、提取部位和测定方法等因素有关。Wu 等^[38]分别从柚子皮、种子、果肉和囊衣中提取得到 4 种水溶性多糖 (柚皮多糖 PPPs、柚籽多糖 PSPs、果肉多糖 FPPs 和囊衣多糖 SMPs), 结果表明 PPP、PSP、FPPs 和 SMPs 的平均分子量为 $4.604\times 10^5\ \text{u}$ 、 $10.85\times 10^5\ \text{u}$ 、 $5.795\times 10^5\ \text{u}$ 和 $16.06\times 10^5\ \text{u}$ 。PPP、PSP 和 SMP 均呈现球形结构, 而 FPP 主要呈线性链式结构。Lin 等^[39]分别采用热水萃取和超声辅助酶法提取沙田柚皮多糖, 结果表明超声辅助酶提取法所得多糖的产率、糖含量和糖醛酸含量更高并显示出更好的抗氧化活性, 多糖活性与其乙醛酸含量之间存在很强相关性, 因此柚多糖的生理活性与提取方法密切相关。现对柚多糖的研究多集中在提取工艺、组成结构与活性表征方面, 未来有必要加强柚多糖组成结构与

其生物活性间关系的研究, 以进一步揭示其构效关系及作用机制。

1.2.1 膳食纤维

膳食纤维 (DF) 是一类无法被人体内源性酶消化吸收的一类多糖, 分为可溶性膳食纤维 (SDF) 和不可溶性膳食纤维 (IDF), 三种类型 DF 都可改善血糖水平, 降低血脂水平, 并提高肠道细菌的丰富度和多样性^[40]。Liu 等^[41]发现金柚整果 TDF (总膳食纤维)、SDF 和 IDF 含量分别为 75.64%、10.10% 和 62.48%, 而 Ni 等^[42]发现琯溪蜜柚皮 TDF、SDF 和 IDF 含量分别为 89.64%、36.37% 和 53.27%。不同部位、品种和产地柚子 DF 的种类和含量可能存在一定差异, 但多数柚皮中主要 DE 为 IDF^[43]。Xiao 等^[44]发现经球磨处理后, 柚子果皮 IDF 粒径和结晶度减小, 持水能力、持油能力和溶胀能力分别提高了 43.7%、65.1% 和 107.5%。Sang 等^[43]发现与未改性的 IDF 相比, 高静水压处理的 IDF (H-IDF) 具有较强的表观粘度和胆固醇吸附能力, 这使得它具有作为增稠剂和功能性降血脂食品添加剂的潜力。Ouyang 等^[45]发现超高压技术可提高柚子 TDF 和 SDF 产率, 经 400 MPa 高压处理, SDF 产率从 32.49% 大幅提高到 41.92% ($P<0.05$)。与上述 Sang 等^[43]研究结果一致, 超高压处理还增强了膳食纤维的持水、持油、溶胀、胆汁结合和胰脂肪酶活性抑制能力, 表明其具有更好的体外降血脂活性, 这些现象可能归因于其表面孔隙的增加、结合位点的暴露和膳食纤维组分的变化 (SDF 含量增加)。这些研究为具有优异功能特性柚膳食纤维的制备提供了思路。

以上研究表明, 改性柚子膳食纤维因其优异的持水、持油、降血脂和溶胀能力, 具有作为潜在天然增稠剂、稳定剂、悬浮剂和填充剂的潜力。但目前改性柚子膳食纤维相关研究多停留在实验室阶段, 鲜有开展改性柚子膳食纤维中试化方面的研究。

1.2.2 果胶

果胶是一种高分子量阴离子多糖, 分为高甲氧基果胶 (酯化程度 $\text{DE}>50\%$) 和低甲氧基果胶 ($\text{DE}<50\%$), 具有输送药物、治疗前列腺癌等多种功能^[46]。Jiang 等^[47]发现柚皮中含有大量高甲氧基果胶 (果胶得率为 13.70%), 柚皮果胶由半乳糖醛酸 (84.9%~86.2%)、半乳糖 (5.4%~6.0%)、阿拉伯糖 (5.7%~6.8%)、鼠李糖 (1.2%~1.6%) 和葡萄糖 (0.7%~1.4%) 单糖组成, 并具有作为食品包装的

膜基质的潜力。相关研究^[48-50]结果表明柚皮中果胶酯化度为 62.37%~70.79%，均为高甲基果胶。冯硕儒^[51]发现储存时间是影响马家柚柚皮果胶产率和理化性质的重要因素，随着贮藏时间的增加，柚皮果胶的提取率降低了 13.54%，半乳糖醛酸含量和酯化度分别增加了 33.71% 和 21.48%，单糖和矿物质元素组成相似，但含量存在差异。此外，柚子果胶的提取方法对其结构和功能也具有显著影响。Li 等^[52]使用漆酶辅助提取柚子中的果胶，随着漆酶浓度从 $0 \text{ U} \cdot \text{g}^{-1}$ 增加到 $10 \text{ U} \cdot \text{g}^{-1}$ ，果胶酯化程度显著提高，但分子量未显著变化。Wani 等^[53]发现用弱酸提取得到的柚皮果胶比强酸提取得到的柚皮果胶具有更高的 DE。此外，当超声处理时间从 5 min 增加到 17.5 min 时，果胶的 DE 从 76.92% 增加到 84.9%。Duan 等^[54]发现经高压处理后，果胶的 DE 和半乳糖醛酸含量明显下降并表现出更高的粘度，这些变化表明高压处理促进了果胶的脱酯和解聚。

上述研究为柚皮果胶的高纯度化提取和功能化改造提供了参考，但是目前不同工艺条件对柚子果胶结构和功能的影响机制还不完全明确，这一因素制约了柚子果胶的工业化、高值化利用。

1.3 精油

柚子精油 (PEO) 是柚子中的一种植物代谢化合物，萜烯是 PEO 中最常见的物质，包括 α -蒎烯、沙宾烯、 β -蒎烯、月桂烯、 α -萜品烯、柠檬烯、 γ -萜品烯和芳樟醇，总浓度为 85.9%~96.5%^[55]。粉红和白色柚子花中挥发物成分相似，主要是柠檬烯、顺式- β -辛烯、 α -萜烯、芳樟醇、甲酰苯甲酸酯和呋喃，但两者柠檬烯和芳樟醇的浓度比不同^[56]。Zhang 等^[57]从产自广东的沙田柚柚皮中提取得到 PEO，测得 PEO 最高产率为 $14.63 \text{ mL} (\text{kg DW})^{-1}$ ，PEO 中柠檬烯化合物含量最高 (79.31%)，其次是 α -水芹烯 (4.72%) 和月桂烯 (3.46%)。He 等^[58]采用气相色谱-质谱联用分析来自福建柚子的柚皮精油成分，研究结果表明柠檬烯含量最高 (55.92%)，其次是 β -月桂烯 (31.17%) 和 β -蒎烯 (3.16%)，这与上述与 Zhang 等^[57]的研究结果有所不同，推测可能是由于柚子品种和种植环境差异导致。类似地，在另一项研究^[59]中学者发现，越南同塔省 DaXanh 柚和同奈省 DuongCam 柚精油主要成分为柠檬烯，而永隆省 NamRoi 柚和同塔省 BuoiLong 柚精油主要成分主要为 γ -萜烯、 α -蒎烯、 α -茶树烯和 β -茶树烯。PEO 具有抗炎、抗氧化、抑菌和抗病毒等生物活性，

但易被氧化和降解从而失去活性，这限制了它们的应用，为减少这些负面影响，往往采用包埋等技术对其修饰。Nguyen 等^[60]使用微胶囊化技术改善柚子精油的热稳定性，结果表明柚子精油的封装率可达 75.59%，在 160°C 时，胶囊化的 PEO 残留量仍在 90% 以上，而未胶囊化的 PEO 残留量仅为 50%。因此，精油包埋等相关研究在提高 PEO 的利用率和应用价值方面具有重要意义。

综上所述，柚子精油活性成分的分离、鉴定研究已经被广泛报道，但是柚子精油的疏水性、不稳定性和挥发性等因素，限制了柚子精油在食品领域的运用。因此，根据精油的理化特性改善其应用缺陷，是目前柚子精油研究的重点方向之一。

2 生物活性功能及其机制

柚子富含的多酚、多糖和萜烯类化合物等多种生理活性物质，在抗氧化、抗菌、抗炎、降脂、降血糖等方面发挥着重要作用。表 3 展示了柚子部分功能特性及作用机理。

2.1 抗氧化作用

柚子富含多种生理活性物质，具有显著的自由基清除能力 ($P < 0.01$)，可作为天然抗氧化剂的良好来源，目前相关研究越来越受到关注^[75,76]。

相比大多数柑橘属植物，柚子具有更高的总酚含量、ABTS⁺ 猝灭活性、DPPH· 清除能力和铁离子还原能力 (FRAP)^[64]。酚类化合物是水果抗氧化能力的主要贡献者，Mäkynen 等^[72]研究发现泰国 6 种柚子果肉的总酚含量为 $101.32 \sim 113.73 \text{ mg 没食子酸当量} (\text{g 提取物})^{-1}$ ，6 种柚子果肉提取物的 DPPH· 清除能力、植物当量抗氧化能力、FRAP、氧化自由基吸收能力、清除羟自由基能力和超氧阴离子自由基清除能力分别为 $0.41 \sim 13.77 \text{ mg 抗坏血酸} (\text{g 干提取物})^{-1}$ 、 $356.17 \sim 1139.87 (\mu\text{mol/L Trolox})(\text{g 干提取物})^{-1}$ 、 $345.78 \sim 616.89 (\mu\text{mol/L 抗坏血酸})(\text{g 干提取物})^{-1}$ 、 $3.23 \sim 52.81 \mu\text{M Trolox} \cdot (\text{g 干提取物})^{-1}$ 、 $3.69 \sim 9.86 \text{ mg Trolox} \cdot (\text{mg 干提取物})^{-1}$ 、 $0.48 \sim 0.80 \text{ mg Trolox} \cdot (\text{mg 干提取物})^{-1}$ ，总酚含量均与抗氧化活性显著相关。Ali 等^[5]发现化州柚提取物 DPPH· 清除活性为 $1.70 \mu\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$ 、FRAP 值为 $1848.2 \mu\text{M Fe} \cdot (100 \text{ g})^{-1}$ 。此外，三周内口服高达 $1000 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的柚子提取物未引起大鼠主要器官的组织病理学变化。除清除自由基外，柚子中的生理活性成分还可以其他形式发挥抗氧化作用。李汀

等^[77]发现蜜柚果肉多酚可降低细胞中活性氧的积累、Nrf2 从细胞质到细胞核的转运，并上调其靶基因 *GSTA2*、*HO-1*、*GCLC*、*NQO1* 表达，提高细胞抗氧化活性。Liu 等^[78]发现柚子中的柚皮苷还可以提高兔子体内超氧化物歧化酶、过氧化氢酶和谷胱甘肽过氧化物酶基因的表达，从而增强清除体内自由基能力。与上述结果类似，浦绍敏^[65]发现柚籽油可通过增强超氧化物歧化酶活性、激活 Nrf2 信号通路（上调 *HO-1*、 γ -GCS 的 mRNA 相对表达量和蛋白表达水平），发挥抵御氧化损伤功能。

上述研究表明柚子含有多种抗氧化活性物质，柚子提取物的安全性也得到了初步验证，有望作为应用于食品、药品和化妆品工业的天然抗氧化剂。

但柚子中除了酚类、维生素 C、黄酮类化合物等已知抗氧化剂外，还存在一些未知的抗氧化成分未被发掘^[79]。此外，当前对于柚子抗氧化活性研究基本处于量效关系阶段，抗氧化机制有待深入研究，以促进其在医药领域的应用。未来还需探究活性成分与抗氧化能力间的构效关系，并从分子水平探究柚子提取物的抗氧化机制。

2.2 抗菌作用

由于许多人工合成的防腐剂对人类健康具有潜在威胁，源自天然成分的防腐剂、抗菌剂受到广泛关注^[80]。柚子中的多种天然生物活性物质，具有作为新型天然抗菌剂、防腐剂的潜力。

表 3 柚子功能特性
Table 3 Functional characteristics of pomelo

功能特性	作用机理	参考文献
抗氧化	降低氧化应激水平，防止生物分子氧化；增强超氧化物歧化酶活性；通过上调 <i>HO-1</i> 、 γ -GCS 基因的 mRNA 相对表达量和蛋白表达水平，激活促进核因子 E2 相关因子 2 (Nrf2) 信号通路；清除 DPPH· (1,1- 二苯基 -2- 三硝基苯胍自由基)、O ₂ ⁻ · (超氧离子自由基) 等自由基。	[61-65]
抗菌	抑制细菌生物膜成熟关键基因 <i>gtfB</i> 和 <i>gtfC</i> 的表达，破坏细菌的细胞膜并引起形态变化；抑制细菌紫色杆菌素的生成、自诱导子 AI-2 的生成和群集运动能力，从而抑制细菌群体感应；诱导活性氧过度积累，导致谷胱甘肽耗竭以及脂质过氧化。	[66-69]
抗炎	抑制氧化应激，抑制 NF- κ B 信号通路中促炎基因的表达；下调 JAK2/STAT3 表达水平；抑制巨噬细胞中炎症因子 (IL-1 β 、PGE2 和 TNF- α) 的分泌。	[29,70,71]
降脂	抑制胰脂肪酶和胆固醇酯酶活性；抑制胆固醇胶束形成及其与胆汁酸的结合；通过抑制脂类的消化和吸收来降低血液中胆固醇和甘油三酯的水平；上调线粒体中参与 β 氧化的酶 (如 PPAR α 受体、酰基辅酶 a 氧化酶、脂肪酸合成酶) 的 mRNA 表达水平；通过下调 <i>ACC</i> 、 <i>SREBP-1c</i> 、 <i>PPAR-γ</i> 、 <i>FAS</i> 基因的 mRNA 相对表达量和蛋白表达水平，激活 AMPK 通路。	[65,72,73]
降血糖	抑制肠道 α -淀粉酶和 α -葡萄糖苷酶的活性；促进肝脏中葡萄糖激酶 mRNA 的表达，同时抑制磷酸烯醇式丙酮酸羧激酶和葡萄糖-6-磷酸酶 mRNA 的表达；抑制 HMG-CoA 还原酶和酰基辅酶 a 的活性。	[74]
抑制黑色素生成	下调 B16 细胞中酪氨酸酶的表达水平，以剂量依赖的方式抑制酪氨酸酶活性，最终阻断黑色素合成途径。	[58]

Liu 等^[81]发现从柚籽中提取的肽没有抗大肠杆菌活性，而乳酸菌发酵后的柚籽肽可能通过破坏细胞膜显著抑制大肠杆菌生长，其最小抑制浓度 MIC 值为 12.5 $\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$ ，合适的处理方法对柚籽肽的抗菌活性有积极影响。Sarkar 等^[82]发现柚籽油对铜绿假单胞菌、金黄色葡萄球菌、大肠杆菌和枯草芽孢杆菌表现出优良抑制作用。Zhang 等^[57]发现 3.5 $\text{mg}\cdot\text{mL}^{-1}$ 柚皮精油对假尾孢菌的抑菌率可达 100%。Sadeva 等^[83]发现 5 $\text{mg}\cdot\text{mL}^{-1}$ 柚皮提取物可抑制多重耐药性铜绿假单胞菌菌株的生长和铁载体的分泌，平均抑制率分别为 44.9% 和 53.9%。以柚皮提取物作为还原剂合成的银纳米粒子 AgNPs 对甲氧

西林耐药金黄色葡萄球菌也具有抑制作用，其 MIC 值为 8.27 $\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$ ，低于利奈唑胺 (30 $\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$)、庆大霉素 (10 $\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$)、红霉素 (15 $\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$) 等常用抗生素^[84]。在另一项研究^[85]中，以柚子果肉提取物作为还原剂合成的 AgNPs 可通过抑制生物膜形成、破坏细菌完整性和下调 *T6SS* 基因表达等途径抑制 *Acidovorax oryzae* 菌的活性。大量研究结果表明柚子中的黄酮和香豆素类化合物等是柚子发挥抗菌功能的重要成分。柚皮黄酮提取物可以剂量依赖性方式抑制细菌群体感应 (减少 *C. violaceum* 026 菌紫色杆菌素的产生并抑制 *V. anguillarum* 菌自诱导子 AI-2 的产生、生物膜的形成、群集运动)，从而抑

制细菌生长^[68]。盛秋双^[67]进一步发现黄酮类化合物可显著下调细菌生物膜成熟过程中关键基因 *gtfB* 和 *gtfC* 表达。此外,柚皮苷可诱导大肠杆菌中活性氧过度积累,导致谷胱甘肽耗竭以及脂质过氧化,而脂质的过氧化进一步造成 DNA 损伤和细菌膜通透性改变,最终引发细菌死亡^[69]。与上述结果类似,柚子中富含的香豆素类化合物也可通过抑制细菌的群体感应和生物膜形成发挥抗菌功能^[86]。此外,柚子提取物还可以结合抗生素使用以增强抗生素的抑菌能力^[87],但需要进一步确定该复合抗菌剂中两种成分的协同机理。

综上所述,目前柚子提取物在体外实验中显现出优良的广谱抑菌效果,在抑制腐败菌和致病菌等方面具有广阔前景,具有缓解人工合成抑菌剂副作用的应用潜力。但目前大部分柚子提取物的抗菌机理尚不明确,且大多集中在体外实验。因此,还需进一步开展抗菌机制和临床方面的研究,以评估其生物效用和安全性。

2.3 调节血糖作用

柚子中的多酚、膳食纤维等活性成分,可通过降低淀粉酶活性、调节胰岛素分泌、改善胰岛素敏感性、保护 β 细胞等方式发挥降血糖功能,在糖尿病预防和治疗中具有一定的应用潜力。

Ademosun 等^[88]评估了市售冰淇淋和混合柚子果皮的冰淇淋对大鼠血糖指数的影响,结果表明混合柚子果皮冰淇淋组大鼠的升糖指数(33.5%)低于市售冰淇淋组(70.0%),这可能与柚皮中存在的酚类化合物密切相关。Reshmi 等^[89]发现掺入柚子果实的面包具有较高抗性淀粉含量(3.87%~10.96%)和较低升糖指数(62.97%~53.13%),这可能归因于柚子中柚皮苷对消化酶活性的抑制作用。Kim 等^[74]发现柚子提取物可通过抑制肠道中的 α -淀粉酶和 α -葡萄糖苷酶活性,控制糖尿病患者的血糖水平。Liu 等^[41]发现 TDF、SDF 和 IDF 均可通过降低 β -淀粉酶活性控制血糖浓度,其中 SDF 延缓葡萄糖扩散和降低血糖的效果更显著,这可能是由于其表面更加光滑,且不易被淀粉吸收。另外,小鼠分别经 TDF、SDF、IDF 和阿卡波糖灌饲后血糖值下降了 20.07%、33.80%、12.40% 和 30.15%,SDF 可调节 β 细胞的胰岛素分泌、改善具有降血糖功能肠道菌群的丰富度和多样性,其降血糖效果优于阿卡波糖。Syed 等^[90]评估了柚子中富含的柚皮苷对糖尿病大鼠影响,实验结果表明柚皮苷可缓解胰岛素抵抗并具

有治疗糖尿病诱发脂肪性肝炎的潜力。一项体外和大鼠体内实验^[91]结果表明,柚子中富含的柚皮素可减少肠刷状缘对葡萄糖的吸附和肾对葡萄糖的重吸收,并增加肌肉和脂肪组织对葡萄糖的摄取和利用;另外,研究还发现柚皮素可抑制肝糖异生、增加胰腺对葡萄糖的敏感性和抑制 β 细胞凋亡。

近年来,有关柚子及其提取物降血糖相关的研究已经开始从活性物质的提取拓展到作用机制的探究,为柚子提取物在保健品、医药领域中的应用奠定了一定的理论基础。上述研究结果表明,柚子既可以直接作为糖尿病病人理想的食品辅料,也可作为潜在的天然降血糖药物来源,但大部分研究仍停留在体外试验和动物试验,还需通过广泛的临床试验进一步验证其效果。

2.4 抗炎作用

从柚子中提取的物质(黄酮类化合物、精油和多糖等)具有很强的抗炎活力。柚皮苷是柚子中所富含的一种黄酮类化合物,除已被证明具有某些抗氧化、抗癌和降血糖作用外,还对患有强直性脊柱炎小鼠具有保护作用,研究表明柚皮苷可通过诱导小鼠骨化、抑制氧化应激以及下调 JAK2/STAT3 表达水平等途径发挥抗强直性脊柱炎作用^[71]。柚皮苷还可显著减轻脂肪性肝炎相关的炎症、氧化应激和线粒体凋亡,因此柚皮苷也可作为预防脂肪性肝炎的潜在药物^[90]。柚皮精油可以通过抑制 TLR4/NF- κ B 信号通路、NLRP3 炎性小体活性来缓解神经炎症,推测其中的柠檬烯和 β -月桂烯是抗炎的主要成分^[92,93]。Zhao^[29]发现柚皮中富含的 18 种香豆素可通过抑制巨噬细胞中炎症因子(IL-1 β 、PGE2 和 TNF- α)的分泌而发挥抗炎作用,其中 5-(6-羟基-3,7-二甲基-2E,7-辛二烯氧基)补骨脂素、8-(6,7-二羟基-3,7-二甲基-2E-辛烯氧基)补骨脂素、橙皮油素、7-(6-羟基-3,7-二甲基-2E,7-辛二烯氧基)香豆素、飞龙掌血内酯酮 5 种香豆素表现出与地塞米松相当的抗炎活性。Fang 等^[70]评估了柚子果实粗多糖的抗炎活性,结果表明柚子多糖(100 和 200 μ g·mL⁻¹)可显著降低氧化应激水平,同时抑制 NF- κ B 信号通路中促炎基因的表达。Chen 等^[94]发现柚子多糖能够剂量依赖性显著减少慢性咽炎兔的病理细胞数并下调炎症标志物(IFN- γ 、IL-2 和 IL-4)的表达($P<0.01$),推测柚多糖可能通过抑制 IKKs 的磷酸化、抑制 NF- κ B 通路的激活并抑制炎症介质的产生而发挥抗炎作用。另外,该研究的临床结果

表明, 柚多糖能够显著缓解慢性咽炎患者喉咙发痒、声音嘶哑、疼痛、吞咽痛、咳嗽和耳痛等症状。Wu等^[95]发现柚子果胶可缓解结肠炎小鼠结肠的缩短、降低血清中的一氧化氮和血清脂肪酶含量, 并可显著降低结肠炎小鼠的疾病活动指数评分, 这表明柚子果胶能在一定程度上缓解小鼠结肠炎。该研究还发现果胶多糖对肠道炎症的作用呈现高度结构依赖性, 但还需要进一步的研究来揭示所涉及的机制和途径。

2.5 其他有益价值

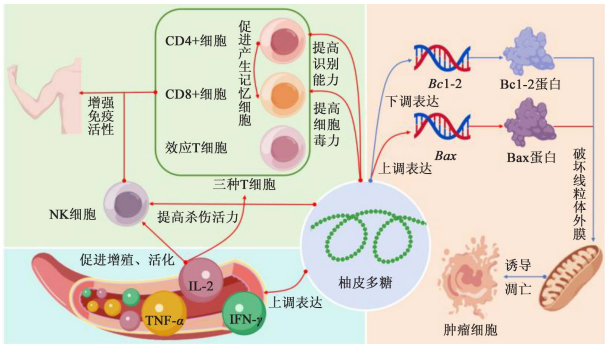


图 3 柚皮多糖的抗肿瘤机理

Fig.3 Anti-tumor mechanism of pomelo peel polysaccharide

柚子提取物及其生理活性物质在抗癌、降脂和改善肠道环境等方面同样表现出积极作用。柚皮的乙醇-水提取物(0~100 mg·mL⁻¹)对 A549、MCF-7、HepG2 和 HT-29 四种癌细胞系表现出抗增殖作用; 全柚果实(果肉+果皮)提取物对 U373MG、SNU-16、HeLa 和 AGS 癌细胞系表现出剂量依赖性(0~400 μg·mL⁻¹)的抗增殖作用, 这可能归因于其富含的川陈皮素、橘皮素、柠檬烯、十六烷酸和 α-松油醇等物质^[96]。如图 3^[97,98]所示, 柚皮多糖(PPs)可通过提高自然杀伤细胞(NK 细胞)的杀伤活性、CD4⁺ 细胞(辅助性 T 细胞)的识别能力、CD8⁺ 细胞(细胞毒性 T 细胞)的细胞毒力和血清中细胞因子 IL-2、IFN-γ 和 TNF-α 的表达水平, 发挥免疫调节功能, 最终对 S180 肿瘤细胞产生抑制作用。此外, PPs 还可通过阻断细胞周期、下调 *Bcl-2* 表达和上调 *Bax* 表达诱导 S180 细胞凋亡。Wang 等^[99]发现经过果胶酶处理后的柚子果胶可促进拟杆菌等肠道益生菌的生长, 同时抑制埃希氏菌-志贺氏菌等病原体的增殖, 这为肠道微生物群的调控提供了思路。Ni 等^[42]发现补充柚皮膳食纤维后肥胖小鼠肝脏和附睾组织脂肪堆积减缓, 血脂异常显著缓解, 甘

油三酯、低密度脂蛋白胆固醇和高密度脂蛋白胆固醇水平恢复正常。另外, 柚皮膳食纤维还可通过增加肠道微生物多样性、增加有益菌丰度(双歧杆菌门、异菌门和乳酸菌)和减少葡萄球菌属等有害细菌丰度, 改善高脂饮食诱导的肠道菌群失调。柚子幼果提取物可以逆转肝细胞中脂质的积累, 在一定条件下可表现出与奥利司他同样的治疗效果^[73]。

3 展望

柚子果肉、果皮和果籽等部位中富含多种生理活性物质, 如多糖、精油、香豆素和黄酮类化合物等, 具有抗氧化、抗菌和抗炎等功能特性, 并且在预防和治疗肥胖、糖尿病、癌症等方面具有积极作用。然而, 目前关于柚子的利用多为直接食用或初加工, 富含丰富生物活性成分的柚皮、柚籽等副产物多被丢弃, 综合利用率低下, 今后可以考虑从以下 5 个方面, 进一步开展对柚子活性成分及其功能的研究。(1) 柚皮是膳食纤维、果胶、柚皮苷和柚皮精油等多种活性成分的低成本来源, 具有在化妆品、保健品等领域的巨大应用前景。柚皮生物活性成分的进一步产业化、规模化应用, 还需要柚皮生物活性成分提取和利用方面的深入研究;(2) 柚子精油等活性成分容易在提取、贮藏、使用过程中被破坏而失活, 这是目前的难题以及研究热点。未来可根据活性成分的理化特性, 结合包埋等修饰技术, 以提高其稳定性;(3) 目前关于柚子活性成分的提取多采用传统方法, 效率低且产品产率和质量较差。因此, 未来可引入多级膜过滤、双水相萃取法、超临界流体萃取法等方法, 并进一步开展小试、中试化研究, 以实现活性成分的高值化、产业化应用;(4) 目前关于柚子的生理活性研究多停留在体外实验和动物实验阶段, 柚子不同活性成分在体内代谢过程中的作用机理、过程路径等研究不足。未来应进行更深入的临床研究, 可以从代谢组学、基因组、转录组以及细胞生物学等角度进一步阐明各种活性成分对特定疾病发展的影响机制, 并全面评估柚子活性物质对人体健康的影响;(5) 柚子生物活性成分的功能研究目前基本处于量效关系阶段。未来可利用分子结构解析、定量构效关系研究以及化合物间的相互作用等方法, 揭示活性成分的完整结构, 这不仅能够为柚的深加工提供方向, 还可以丰富植物化合物的资源库。

参考文献

- [1] 陈璞,徐振江,江东,等.柚类种质资源DUS测试数量性状分级研究[J].果树学报,2024,41(9):1-21.
- [2] 徐甜.柚类籽油的提取工艺与理化特性及主要脂肪酸成分研究[D].长沙:中南林业科技大学,2018.
- [3] 杨亚妮,苏智先.中国名柚资源与品种现状研究[J].四川师范学院学报(自然科学版),2002,2:163-169.
- [4] 程莉.柚种质材料果肉颜色的遗传变异分析[D].重庆:西南大学,2024.
- [5] ALI M Y, RUMPA N-E N, PAUL S, et al. Antioxidant potential, subacute toxicity, and beneficiary effects of methanolic extract of pomelo (*Citrus grandis* L. Osbeck) in Long Evan rats [J]. Journal of Toxicology, 2019, 2019: 1-12.
- [6] 丘苑新,何娣,马路凯,等.亚临界丁烷萃取柚籽油的工艺研究及其营养评价[J].粮食与油脂,2021,34(6):78-81.
- [7] 袁志宁,霍栓,严嘉恬,等.挤压对柚皮可溶性膳食纤维理化、功能及结构特性的影响[J].天津科技大学学报, 2024,39(3):21-27,71.
- [8] HASAN S M K, ISLAM M R, KABIR M R, et al. Exploring the nutraceutical potential: Evaluating the nutritional and bioactive functions of five pomelo fruit varieties in Bangladesh [J]. Heliyon, 2024, 10(11): e31786.
- [9] HUYNH N T T, NGUYEN T T, TRAN T T, et al. Processing of alcohol pomelo beverage (*Citrus grandis* (L.) Osbeck) using saccharomyces yeast: Optimization, physicochemical quality, and sensory characteristics [J]. Open Chemistry, 2024, 22(1): 217-256.
- [10] 余丹丹,吴家雄,刘英,等.常山胡柚果实不同部位中主要功能性成分分析[J].浙江大学学报(农业与生命科学版),2023,49(6):802-812.
- [11] 汪丽霞,王刚,徐小忠,等.香柚主要营养成分及其生理功能的研究进展[J].发酵科技通讯,2023,52(4):218-225.
- [12] AJIRUL A M, Marfuah S, SUTRISNO. Chemical content and pharmacology of pomelo orange (*Citrus maxima*) fruit peel: A review [J]. E3S Web of Conferences, 2024, 481: 6004.
- [13] YANG B, DONG Y, WANG F, et al. Nanoformulations to enhance the bioavailability and physiological functions of polyphenols [J]. Molecules, 2020, 25(20): 4613.
- [14] ZHOU Z Q, XIAO J, FAN H X, et al. Polyphenols from wolfberry and their bioactivities [J]. Food Chemistry, 2017, 214: 644-654.
- [15] SU B, TIAN J, LIU M, et al. Analysis of the chemical components of pomelo peels (*Citrus grandis* [L.] Osbeck) from different cultivars by using supercritical CO₂ fluid extraction and ultra-high-performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry [J]. Journal of Separation Science, 2022, 45(15): 3031-3042.
- [16] QUAN W, TAO Y, LU M, et al. Stability of the phenolic compounds and antioxidant capacity of five fruit (apple, orange, grape, pomelo and kiwi) juices during *in vitro*-simulated gastrointestinal digestion [J]. International Journal of Food Science & Technology, 2017, 53(5): 1131-1139.
- [17] WANG B, DONG T, WANG J, et al. Study on the accumulation of Phenols during fruit development of two Pomelos [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2020, 474(3): 32033.
- [18] 宋彪,徐凯悦,ATIF M M,等.不同柚品种果实总酚、总黄酮及植酸的积累特征[J].中国农业大学学报,2022,27(3):158-171.
- [19] DENG M, DONG L, JIA X, et al. The flavonoid profiles in the pulp of different pomelo (*Citrus grandis* L. Osbeck) and grapefruit (*Citrus paradisi* Mcfad) cultivars and their *in vitro* bioactivity [J]. Food Chemistry: X, 2022, 15: 100368.
- [20] RAZA W, MEENA A, LUQMAN S. Diosmetin: A dietary flavone as modulator of signaling pathways in cancer progression [J]. Molecular Carcinogenesis, 2024, 63(9): 1627-1642.
- [21] MAI T C, TRAN N T, MAI D T, et al. Supercritical CO₂ assisted extraction of essential oil and naringin from *Citrus grandis* peel: *in vitro* antimicrobial activity and docking study [J]. RSC Advances, 2022, 12(40): 25962-25976.
- [22] DENG M, JIA X, DONG L, et al. Structural elucidation of flavonoids from Shatianyu (*Citrus grandis* L. Osbeck) pulp and screening of key antioxidant components [J]. Food Chemistry, 2022, 366: 130605.
- [23] MOGHADDAM R H, SAMIMI Z, MORADI S Z, et al. Naringenin and naringin in cardiovascular disease prevention: A preclinical review [J]. European Journal of Pharmacology, 2020, 887: 173535.
- [24] NGUYEN T A M, VAN H P, THI L P N, et al. Optimized conditions for flavonoid extraction from pomelo peel byproducts under enzyme-and ultrasound-assisted extraction using response surface methodology [J]. Journal of Food Quality, 2021, 2021: 1-10.
- [25] TIAN X, LIU Y, FENG X, et al. The effects of alcohol fermentation on the extraction of antioxidant compounds and flavonoids of pomelo peel [J]. Food Science & Technology, 2018, 89: 763-769.
- [26] ZHANG M, DUAN C, ZANG Y, et al. The flavonoid composition of flavedo and juice from the pummelo cultivar (*Citrus grandis* (L.) Osbeck) and the grapefruit cultivar (*Citrus paradisi*) from China [J]. Food Chemistry, 2011, 129(4): 1530-1536.
- [27] GUPTA A K, MEDHI M, CHAKRABORTY S, et al. Development of rapid and non-destructive technique for the determination of maturity indices of pomelo fruit (*Citrus grandis*) [J]. Journal of Food Measurement and Characterization, 2020, 15(2): 1463-1474.
- [28] GUPTA A K, DAS S, SAHU P P, et al. Design and

- development of IDE sensor for naringin quantification in pomelo juice: An indicator of citrus maturity [J]. Food Chemistry, 2022, 377: 131947.
- [29] ZHAO Y L, YANG X W, WU B F, et al. Anti-inflammatory effect of pomelo peel and Its bioactive coumarins [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2019, 67(32): 8810-8818.
- [30] SHAKIBA M, RASSOULI F B. Joining up the scattered anticancer knowledge on auraptene and umbelliprenin: a meta-analysis [J]. Scientific Reports, 2024, 14(1): 11770.
- [31] OUESLATI M H, GUETAT A, BOUAJILA J, et al. *Deverra tortuosa* (Desf.) DC from Saudi Arabia as a new source of marmin and furanocoumarins derivatives with α -glucosidase, antibacterial and cytotoxic activities [J]. Heliyon, 2021, 7(4): e06656.
- [32] BIBAK B, SHAKERI F, BARRETO G E, et al. A review of the pharmacological and therapeutic effects of auraptene [J]. BioFactors, 2019, 45(6): 867-879.
- [33] PHUCHAROENRAK P, TRACHOOTHAM D. Bergaptol, a major furocoumarin in Citrus: Pharmacological properties and toxicity [J]. Molecules, 2024, 29(3): 713.
- [34] 郝元元.LC-MS/MS法测定柚子皮中香豆素类物质组成及含量[J].食品研究与开发,2019,40(16):146-152.
- [35] 雷旭,黄迪捷,周青青,等.不同光照时长处理对柚果皮有色层香豆素代谢的影响[J].天津农业科学,2024,30(3):1-9.
- [36] 林诺怡,刘祎帆,王琴,等.金柚幼果多糖的结构鉴定与免疫调节作用[J].现代食品科技,2020,36(9):1-8.
- [37] 顾欣,高涛,刘梦雅,等.梁平柚柚皮多糖的提取、结构解析及抗氧化能力研究[J].食品与发酵工业,2021,47(7):137-145.
- [38] WU Z, LI H, LUO Y, et al. Insights into the structural characterisations, bioactivities and their correlations with water-soluble polysaccharides extracted from different pomelo (*Citrus maxima* Merr.) tissues [J]. International Journal of Food Science & Technology, 2020, 55(9): 3091-3103.
- [39] LIN B, WANG S, ZHOU A, et al. Ultrasound-assisted enzyme extraction and properties of Shatian pomelo peel polysaccharide [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2023, 98: 106507.
- [40] 牛德宝,叶鸿儒,冯小芹,等.火龙果主要生物活性成分及其功能特性研究进展[J].广西科学院学报,2024,40(1):9-20.
- [41] LIU H, ZENG X, HUANG J, et al. Dietary fiber extracted from pomelo fruitlets promotes intestinal functions, both *in vitro* and *in vivo* [J]. Carbohydrate Polymers, 2021, 252: 117186.
- [42] NI J, SHANGGUAN Y, JIANG L, et al. Pomelo peel dietary fiber ameliorates alterations in obesity-related features and gut microbiota dysbiosis in mice fed on a high-fat diet [J]. Food Chemistry: X, 2023, 20: 100993.
- [43] SANG J, LI L, WEN J, et al. Chemical composition, structural and functional properties of insoluble dietary fiber obtained from the Shatian pomelo peel sponge layer using different modification methods [J]. Food Science & Technology, 2022, 165: 113737.
- [44] XIAO Z, YANG X, ZHAO W, et al. Physicochemical properties of insoluble dietary fiber from pomelo (*Citrus grandis*) peel modified by ball milling [J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2021, 46(2): e16242.
- [45] OUYANG H, GUO B, HU Y, et al. Effect of ultra-high pressure treatment on structural and functional properties of dietary fiber from pomelo fruitlets [J]. Food Bioscience, 2023, 52: 102436.
- [46] BASAK S, ANNAPURE U S. Trends in “green” and novel methods of pectin modification-A review [J]. Carbohydrate Polymers, 2022, 278: 118967.
- [47] JIANG H, ZHANG W, KHAN M R, et al. Film properties of pectin obtained from various fruits’ (Lemon, Pomelo, Pitaya) peels [J]. Journal of Composites Science, 2023, 7(9): 366.
- [48] ROY M C, ALAM M, SAEID A, et al. Extraction and characterization of pectin from pomelo peel and its impact on nutritional properties of carrot jam during storage [J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2018, 42(1): e13411.
- [49] SUN Z, WANG S, ZHOU C, et al. Optimization of ultrasound assisted organic acid extraction of pectin from pomelo peel by response surface methodology and its preliminary characterization [J]. Biomass Conversion and Biorefinery, 2024, 14(17): 20129-20141.
- [50] HOSSAIN M M, ARA R, YASMIN F, et al. Microwave and ultrasound assisted extraction techniques with citric acid of pectin from Pomelo (*Citrus maxima*) peel [J]. Measurement: Food, 2024, 13: 100135.
- [51] 冯硕儒.马家柚果实储存时间、提取方法对柚皮果胶结构及性质的影响研究[D].南昌:南昌大学,2024.
- [52] LI S, JIE Z, XU Z, et al. Sequential combination of laccase pretreatment and acid extraction for high-yield pectin production from pomelo peels [J]. Biotech, 2020, 10(8): 330.
- [53] WANI K M, UPPALURI R V S. Continuous and pulsed ultrasound-assisted extraction of pectin from pomelo fruit peel using citric acid [J]. Biomass Conversion and Biorefinery, 2022, 14: 28603-28618.
- [54] DUAN H, YAN X, AZARAKHSH N, et al. Effects of high pressure pretreatment on acid extraction of pectin from pomelo peel [J]. International Journal of Food Science & Technology, 2022, 57(8): 5239-5249.
- [55] AGHBASHLO M, MOBLI H, RAFIEE S, et al. An artificial neural network for predicting the physiochemical properties of fish oil microcapsules obtained by spray drying [J]. Food Science and Biotechnology, 2013, 22(3): 677-685.
- [56] CHEONG M W, LOKE X Q, LIU S Q, et al. Characterization of volatile compounds and aroma profiles of Malaysian pomelo

- (*Citrus grandis* (L.) Osbeck) blossom and peel [J]. Journal of Essential Oil Research, 2011, 23(2): 34-44.
- [57] ZHANG X, HUANG Y, NIU Y, et al. The preparation of the essential oil from pomelo (*Citrus maxima* 'Shatian Yu') peel using microwave-assisted distillation by pectinase soaking and its anti-fungal activity [J]. Separations, 2022, 9(7): 161.
- [58] HE W, LI X, PENG Y, et al. Anti-oxidant and anti-melanogenic properties of essential oil from peel of pomelo cv. Guan Xi [J]. Molecules, 2019, 24(2): 242.
- [59] LAN-PHI N T, VY T T. Chemical composition, antioxidant and antibacterial activities of peels' essential oils of different pomelo varieties in the south of Vietnam [J]. International Food Research Journal, 2015, 22(6): 2426-2431.
- [60] NGUYEN T N P, VAN C K, NGUYEN T T T, et al. Influence of spray drying parameters on the physicochemical characteristics of microencapsulated pomelo (*Citrus grandis* (L.) Osbeck) essential oil [J]. Food Science and Biotechnology, 2022, 31(13): 1679-1689.
- [61] LIM H K, YOO E S, MOON J Y, et al. Antioxidant activity of extracts from Dangyuja (*Citrus grandis* Osbeck) fruits produced in Jeju island [J]. Food Science and Biotechnology, 2006, 15(2): 312-316.
- [62] ABUDAYEH Z, AL KHALIFA I, MOHAMMED S, et al. Phytochemical content and antioxidant activities of pomelo peel extract [J]. Pharmacognosy Research, 2019, 11(3): 244-247.
- [63] XI W, FANG B, ZHAO Q, et al. Flavonoid composition and antioxidant activities of Chinese local pummelo (*Citrus grandis* Osbeck.) varieties [J]. Food Chemistry, 2014, 161: 230-238.
- [64] KUMAR D, LADANIYA M S, GURJAR M. Underutilized Citrus sp. pomelo (*Citrus grandis*) and Kachai lemon (*Citrus jambhiri*) exhal in phytochemicals and antioxidant potential [J]. Journal of Food Science and Technology, 2018, 56(1): 217-223.
- [65] 浦绍敏. 马家柚籽油组成特性及缓解HepG2细胞脂质积累与氧化应激的研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2024.
- [66] BHANDARI D P, POUDEL D K, SATYAL P, et al. Volatile compounds and antioxidant and antimicrobial activities of selected Citrus essential oils originated from Nepal [J]. Molecules, 2021, 26(21): 6683-6696.
- [67] 盛秋双. 柚皮素肺靶向微球增强多黏菌素对多重耐药肺炎克雷伯菌的抗菌活性及作用机制[D]. 长春: 吉林大学, 2023.
- [68] LIU Z, PAN Y, LI X, et al. Chemical composition, antimicrobial and anti-quorum sensing activities of pummelo peel flavonoid extract [J]. Industrial Crops and Products, 2017, 109: 862-868.
- [69] HAN G, LEE D G. Naringin generates three types of reactive oxygen species contributing differently to apoptosis-like death in *Escherichia coli* [J]. Life Sciences, 2022, 304: 120700.
- [70] FANG Y, HUANG B, ZHANG Y, et al. Polysaccharide derived from pomelo seed coat ameliorates APAP-induced liver injury in hybrid grouper (*Epinephelus lanceolatus* ♂ × *Epinephelus fuscoguttatus* ♀) [J]. eFood, 2022, 2(6): 319-325.
- [71] LIU K, WU L, SHI X, et al. Protective effect of naringin against ankylosing spondylitis via ossification, inflammation and oxidative stress in mice [J]. Experimental and Therapeutic Medicine, 2016, 12(2): 1153-1158.
- [72] MÄKYNEN K, JITSAAARDKUL S, TACHASAMRAN P, et al. Cultivar variations in antioxidant and antihyperlipidemic properties of pomelo pulp (*Citrus grandis* [L.] Osbeck) in Thailand [J]. Food Chemistry, 2013, 139(1-4): 735-743.
- [73] NGUYEN-HUU L-T, TRUONG V D, TRUONG M-N, et al. The protective effects of young pomelo fruits extract against acute hyperlipidemia and high-fat diet-induced obese mice [J]. Pharmacological Research-Modern Chinese Medicine, 2024, 11: 100438.
- [74] KIM G N, SHIN J G, J H-D. Antioxidant and antidiabetic activity of Dangyuja (*Citrus grandis* Osbeck) extract treated with *Aspergillus saitoi* [J]. Food Chemistry, 2009, 117(1): 35-41.
- [75] KOLEVA I I, VAN BEEK T A, LINSSEN J P H, et al. Screening of plant extracts for antioxidant activity: a comparative study on three testing methods [J]. Phytochemical Analysis, 2002, 13(1): 8-17.
- [76] NIE Z, WAN C, CHEN C, et al. Comprehensive evaluation of the postharvest antioxidant capacity of Majiayou pomelo harvested at different maturities based on PCA [J]. Antioxidants, 2019, 8(5): 136.
- [77] 李汀, 邹波, 吴继军, 等. 蜜柚果肉膳食多酚的结构鉴定及抗氧化机理 [J]. 食品科学, 2021, 42(19): 202-210.
- [78] LIU H, LIANG C, MA L, et al. Analysis of antioxidant response in pomelo fruitlets subjected to external injury stress: Significance of naringin biosynthesis [J]. Lwt-Food Science and Technology, 2021, 150: 111908.
- [79] YIN J, HU X, HOU Y, et al. Comparative analysis of chemical compositions and antioxidant activities of different pomelo varieties from China [J]. Food Chemistry Advances, 2023, 2: 100180.
- [80] GOVINDAIAH P M, WILFRED RUBAN S, KIRAN M, et al. Exploring the In-Vitro anti-oxidant and anti-microbial properties of pomelo fruit extract in goat meat: A promising alternative for preservative and health benefits [J]. Scientia Horticulturae, 2024, 337: 113534.
- [81] LIU H, WU G, SONG H, et al. Characterisation of antibacterial peptide fractions extracted from pomelo nucleus co-incubated with *Lactobacillus* [J]. International Journal of Food Science & Technology, 2020, 55(5): 2197-2207.

- [82] SARKAR A, SAHA R, SAHA S, et al. Transesterification, GC-MS profiling, and *in vitro* antimicrobial potential of oil obtained from seeds of *Citrus maxima* (Burm.) Merr [J]. Industrial Crops and Products, 2022, 189: 115764.
- [83] SADEVA I G K A, WULANDARI P A, PRASETYO A V, et al. Analysis of anti-quorum-sensing and antibiofilm activity by pomelo peel extract (*Citrus maxima*) on multidrug-resistance *Pseudomonas aeruginosa* [J]. BioMedicine, 2022, 12(4): 20-33.
- [84] LONG D B, HA B T, GIA-THIEN H T, et al. Green synthesis of nano-silver and its antibacterial activity against methicillin-resistant *Staphylococcus aureus* [J]. Journal of Saudi Chemical Society, 2023, 27(5): 101722.
- [85] ALI K A, YAO R, WU W, et al. Biosynthesis of silver nanoparticle from pomelo (*Citrus maxima*) and their antibacterial activity against *acidovorax oryzae* RS-2 [J]. Materials Research Express, 2020, 7(1): 15097.
- [86] EL-SAWY E R, ABDEL-AZIZ M S, ABDELMEGEED H, et al. Coumarins: quorum sensing and biofilm formation inhibition [J]. Molecules, 2024, 29(19): 4534.
- [87] YANG C, LEE F-W, CHENG Y J, et al. Chitosan coating formulated with citric acid and pomelo extract retards pericarp browning and fungal decay to extend shelf life of cold-stored lychee [J]. Scientia Horticulturae, 2023, 310: 111735.
- [88] ADEMOSUN A O, OBOH G, AJEIGBE O F. Antioxidant activities and glycemic indices of ice creams enriched with orange (*Citrus sinensis*) and shaddock (*Citrus maxima*) peels and effects on rat lipid profiles [J]. Journal of Food Biochemistry, 2021, 45(7): e1381.
- [89] RESHMI S K, SUDHA M L, SHASHIREKHA M N. Starch digestibility and predicted glycemic index in the bread fortified with pomelo (*Citrus maxima*) fruit segments [J]. Food Chemistry, 2017, 237: 957-965.
- [90] SYED A A, REZA M I, SHAFIQ M, et al. Naringin ameliorates type 2 diabetes mellitus-induced steatohepatitis by inhibiting RAGE/NF- κ B mediated mitochondrial apoptosis [J]. Life Sciences, 2020, 257: 118118.
- [91] DEN H D J, TSIANI E. Antidiabetic properties of Naringenin: A Citrus fruit polyphenol [J]. Biomolecules, 2019, 9(3): 99.
- [92] TIAN X Y, XIE L, WANG W Y, et al. Pomelo peel volatile oil alleviates neuroinflammation on focal cerebral ischemia reperfusion injury rats via inhibiting TLR4/NF- κ B signaling pathway [J]. Current Pharmaceutical Biotechnology, 2021, 22(14): 1878-1890.
- [93] ZOU X S, XIE L, WANG W Y, et al. Pomelo peel oil alleviates cerebral NLRP3 inflammasome activation in a cardiopulmonary resuscitation rat model [J]. Experimental and Therapeutic Medicine, 2021, 21(3): 233.
- [94] CHEN L, LAI Y, DONG L, et al. Polysaccharides from *Citrus grandis* L. Osbeck suppress inflammation and relieve chronic pharyngitis [J]. Microbial Pathogenesis, 2017, 113: 365-371.
- [95] WU D, CHEN S, YE X, et al. Protective effects of six different pectic polysaccharides on DSS-induced IBD in mice [J]. Food Hydrocolloids, 2022, 127: 107209.
- [96] TOCMO R, PENA-FRONTIERAS J, CALUMBA K F, et al. Valorization of pomelo (*Citrus grandis* Osbeck) peel: A review of current utilization, phytochemistry, bioactivities, and mechanisms of action [J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2020, 19(4): 1969-2012.
- [97] YU J, JI H, LIU A. Preliminary structural characteristics of polysaccharides from pomelo peels and their antitumor mechanism on S180 tumor-bearing mice [J]. Polymers, 2018, 10(4): 419.
- [98] YANG Y, LUNDQVIST A. Immunomodulatory effects of IL-2 and IL-15; implications for cancer immunotherapy [J]. Cancers, 2020, 12(12): 3586.
- [99] WANG Y, LIU J, LONG Y, et al. Enzymatic modification of pomelo pectins for shaping the gut microbiota to a healthy pattern [J]. Food Hydrocolloids, 2024, 152: 109939.