DOI:10.12441/spyswjs.20250603003 [文章编号] 1673-1689(2026)05-0009-09

柑橘类水果加工废弃物中生物活性物质及其提取技术研究进展

吕元强[1] 毛聪妍[2] 林燕清[2] 李淑婷[1] 韩菲菲[1*]

(1. 浙江工商大学食品与生物工程学院,浙江 杭州 310018; 2. 衢州市衢江区农业农村局,浙江 衢州 324022)

摘要:柑橘类水果在加工过程会产生大量富含黄酮类化合物、酚类化合物、精油、类胡萝卜素和果胶等多种生物活性物质的废弃物。高效提取并资源化利用这些物质,对治理加工污染、促进循环经济发展具有重要意义。作者综述了柑橘类水果加工废弃物中主要生物活性物质的功能特性及应用现状,同时梳理了微波辅助提取、超临界流体萃取、超声辅助提取、酶解法等提取技术的原理、优势及实际应用效果。

关键词:柑橘类水果;加工废弃物;生物活性物质;提取技术;资源化利用

Progress on Bioactive Compounds in Citrus Fruit Processing Waste and Their Extraction Technologies

LYU Yuanqiang[1] *MAO Congyan*[2] *LIN Yanqing*[2] *LI Shuting*[1] *HAN Feifei*[1*]

(1. School of Food Science and Biotechnology, Zhejiang Gongshang University, Hangzhou 310018, China; 2. Qujiang District Bureau of Agriculture and Rural Affairs, Quzhou 324022, China)

Abstract: A substantial quantity of waste is generated during the processing of citrus fruits. Such waste is rich in diverse bioactive compounds, including flavonoids, phenols, essential oils, carotenoids, and pectin. The efficient extraction and resource utilization of these compounds hold significant importance in managing the processing pollution and propelling the development of a circular economy. The author presents a comprehensive review of the functional properties and application status of the major bioactive compounds in citrus fruit processing waste. Additionally, it expounds on the principles, advantages, and application outcomes of extraction technologies such as microwave-assisted extraction, supercritical fluid extraction, ultrasound-assisted extraction, and enzymatic hydrolysis methods.

Keywords: citrus fruit; processing waste; bioactive compound; extraction technology; resource utilization

柑橘类水果主要种植于亚热带和热带地区,品种超过 1 600 种,是全球分布最广、消费量最大的水果作物之一。据统计,全球柑橘类水果年产量已突破 1.2 亿 t,且整体呈持续增长趋势[1]。柑橘类水果加工后的果汁、果酱等产品在国际上拥有广阔的消费市场。然而,柑橘类水果在加工过程会产生大量果皮、残渣、种子等废弃物[2],同时柑橘类水果贮存期短、易腐烂变质,采后损耗问题突出,存在大量次果和落果。相关研究表明,全球柑橘类水果因加工损耗、采后腐烂变质造成的资源损失占总产量的 30%,在发展中国家的比例更是高达 50%。大规模的柑橘类水果废弃物不仅造成严重的经济损失,也带来了环境污染、食品安全隐患等一系列问题[3]。因此,迫切需要寻求可持续处理方案。研究发现,柑橘类水果废弃物中富含多种生物活性物质,可应用于多个领域。在功能性食品领域,橙皮苷、柚皮

基金项目:浙江省农业重大技术协同推广计划项目(2024ZDXT04)。

通信作者:韩菲菲(1980—),女,博士,副研究员,硕士研究生导师,主要从事食品营养与肠道健康研究。E-mail:hanzju@aliyun.com

收稿日期:2025-06-03 **修回日期:**2025-08-04

素等黄酮类化合物可用于制备降胆固醇类、抗疲劳类功能产品；类胡萝卜素、酚酸等可用于研发抗氧化功能饮料和膳食补充剂[4]。在食品包装和保鲜领域，果胶基复合膜、柑橘精油（CPEO）乳液等可食性材料不仅可增强包装机械强度和阻隔性[5]，还具有良好的抗菌与抗氧化活性[6]。在动物饲料领域，柑橘果渣经发酵处理后，可有效降解抗营养因子、富集有机酸[7]，从而显著改善饲料适口性与营养价值、降低寄生虫和消化性疾病的发生率[8]。在新材料领域，柑橘果渣中的纤维素、半纤维素可用于制备具有高比表面积和可控孔隙的纳米多孔炭吸附材料[9]。这些应用为柑橘类水果加工废弃物的资源化利用开辟了新的思路和方向。作者系统综述了近年来国内外柑橘类水果加工废弃物中主要活性物质的种类、功能特性及提取技术，旨在为其资源化利用提供理论依据和技术参考。

1 柑橘类水果废弃物的分类及其成分特征

柑橘类水果在生产与加工过程中产生的废弃物主要包括加工废弃物和农业废弃物2类，其中加工废弃物占废弃物总量的85%以上。柑橘类水果加工废弃物主要包括果皮、果渣与种子。果皮具有多层功能结构，可分为白皮层和黄皮层。其中白皮层富含酚酸类化合物与高甲氧基果胶，而黄皮层不仅是优质的胶凝剂和膳食纤维来源，也是柑橘精油的主要富集部位。果渣的主要成分为纤维素、半纤维素及残留果胶。种子在加工废弃物中的占比为3%~5%，其核心营养成分为油脂，油脂中亚油酸占比超过60%。另外，种子中还含有少量柠檬苦素。柑橘类水果的农业废弃物以落果和次果为主，还包含少量枝叶。柑橘类水果在生长过程中受各种环境因素影响，会出现部分果实尚未成熟即脱落，或成熟后因非自然因素脱落的情况；同时，部分果实会因微生物侵染发生霉变，或在运输过程中受挤压、碰撞形成次果。这类果实食用品质差、商品价值低，通常被直接废弃。但其营养物质组成与正常果实基本相近，与加工废弃物一样，均是极具开发潜力的生物资源。柑橘类水果不同类型废弃物的主要生物活性物质与特征见表1。

表1 柑橘类水果废弃物的主要生物活性物质与特征

Table 1 Major bioactive compounds and characteristics of citrus fruit waste

类型	代表部位	主要生物活性物质	特征
加工废弃物	果皮（白皮层）	果胶、黄酮（橙皮苷）	DM值决定凝胶性能
	果渣	纤维素、半纤维素	持水力>8 g/g
	种子	油脂、柠檬苦素	不饱和脂肪酸占比>70%
农业废弃物	枝叶	枝叶精油（芳樟醇>20%）	抑菌活性优于果皮精油
	落果	酚酸（绿原酸）、类胡萝卜素	半成熟期时含量达到峰值

2 柑橘类水果加工废弃物的主要生物活性物质及功能

柑橘类水果加工废弃物以果皮和果渣为主。其中果皮富含黄酮类化合物、酚酸类化合物、类胡萝卜素、果胶等生物活性物质，是天然抗氧化剂的重要来源；果渣含有大量不溶性纤维素，在功能性均衡膳食原料的制备方面具有开发潜力[10]。

2.1 黄酮类化合物

黄酮类化合物是广泛存在于果蔬中的天然有机化合物。根据骨架结构及B环连接位置的差异，柑橘中的黄酮类化合物可分为黄烷酮、类黄酮、黄酮醇、花青素及中间型黄酮5大类，其中中间型黄酮包含二氢黄酮醇、异黄酮和白花青素[11]。

柑橘黄酮具有抗氧化、抗炎、抗菌、降血糖、抗癌、保护肠道、保护心血管、保护肝脏和保护神经等多种生物活性[12]。橙皮苷与柚皮素是柑橘类水果加工废弃物中含量最丰富的2种黄酮类化合物。橙皮苷是构成柑橘类水果酸味和苦味的主要物质[13]，具有抗动脉粥样硬化、抗炎及抗氧化等多种生物活性[14]。动物试验结果表明，橙皮苷可显著抑制脂多糖诱导的小鼠体内IL-6、IL-8、诱导型一氧化氮合酶（iNOS）和核因子红细胞2相关因子（Nrf2）等炎症因子的表达[15]。橙皮苷还可以通过乙酰胆碱介导的信号通路促进一氧化氮（NO）生成，下调糖尿病大鼠糖异生途径关键酶的表达，从而有效改善内皮细胞功能[16]。柚皮素同样具有良好的预防心血管疾病的生物活性，可通过抑制丝裂原活化蛋白激酶（MAPK）、转化生长因子（TGF-β）

和血管内皮生长因子（VEGF）等多种信号传导通路，发挥抗纤维化与抗癌作用[17]。此外，柚皮素还具有抗病毒活性，为其在多种疾病防治中的应用提供了新的研究方向[18]。

2.2 酚酸类化合物

柑橘类水果加工废弃物含有丰富的酚酸类化合物，其含量受品种、栽培环境、果实部位及成熟度等多种因素影响。研究表明，果肉与果皮中的酚酸类化合物含量存在明显差异，且半成熟柑橘果皮中的含量达到峰值[19]。酚酸类化合物是苯环带有若干羟基取代基的芳香族化合物，根据碳骨架结构可分为苯甲酸型和肉桂酸型2类。其中苯甲酸型包括对羟基苯甲酸、没食子酸、原儿茶酸等；肉桂酸型包括咖啡酸、阿魏酸、对香豆酸、芥子酸等。此外，还存在少数结构更为复杂的衍生物，如绿原酸等[20]。

现有研究表明，酚酸类化合物的生物活性主要包括抗炎、抗氧化与抑菌3个方面。在抗炎方面，不同酚酸具有特异性抗炎效果，如阿魏酸能有效抑制由二甲苯诱导的小鼠耳壳肿胀，咖啡酸对心血管系统炎症疾病具有潜在治疗作用[21]。在抗氧化方面，酚酸类化合物能够清除自由基、抑制脂质过氧化，如没食子酸和绿原酸等对DPPH自由基具有显著清除能力，同时可加速铁离子的还原[22]。在抑菌方面，肉桂酸型酚酸与苯甲酸型酚酸可通过破坏细菌细胞壁与细胞膜结构造成菌体死亡，从而发挥抑菌作用[23]。

2.3 CPEO

CPEO是柑橘果皮中富集的关键活性成分，因具有令人愉悦的香气被广泛应用。CPEO的化学组成复杂，主要包含萜烯类、醛类、酯类等多种天然易挥发的植物次生代谢产物[24]。CPEO含多种对人体健康有益的活性成分，中国已批准其作为天然食品香料或食品添加剂应用于各类食品，并在食品保鲜、医药制剂、临床医疗等领域展现出广阔的应用前景。

CPEO中的柠檬烯、香茅醛可清除体内自由基，通过激活Nrf2信号通路、提升超氧化物歧化酶（SOD）活性发挥抗氧化作用[25]。同时，CPEO具有显著的抗菌特性，其成分芳樟醇可破坏微生物细胞膜结构、抑制生物膜形成，有效抑制食源性病原菌的增殖，目前已广泛应用于食品保鲜领域[26]。此外，CPEO还具有抗炎、抗癌、促进消化吸收、调节情绪等多种功效，是一种极具开发价值的天然活性物质[27]。

2.4 类胡萝卜素

柑橘类水果加工废弃物中类胡萝卜素含量丰富，且主要富集于果皮组织。叶黄素是柑橘类水果中类胡萝卜素的主要成分，占类胡萝卜素总量的90%左右[28]。柑橘类水果果皮中类胡萝卜素含量是果肉的2.5~15.0倍[29]。

类胡萝卜素作为一种天然色素，能够显著提升果蔬的外观品质，同时还具有多种生物活性。β-胡萝卜素、叶黄素等作为维生素A的前体物质，可参与视紫红质的生物合成过程，能够预防眼部疾病、缓解炎症反应，对改善年龄相关性黄斑变性、发挥抗氧化作用及对抗慢性疾病具有积极作用[30]。叶黄素还可影响光能的吸收和向PSII反应中心的转移效率，进而提升光合作用的整体效能[31]。β-隐黄质则具有显著的抗炎和抗氧化活性，可清除活性氧（ROS）、抑制NF-κB信号通路、减少炎症因子（如IL-6、TNF-α等）分泌，进而保护心血管与神经系统，改善老年人认知功能[32]。另有研究表明，孕期适量补充类胡萝卜素可降低孕妇贫血风险[33]，对人体健康具有重要作用。

2.5 果胶

果胶是广泛存在于高等植物中的天然杂多糖嵌段共聚物，在柑橘类水果果皮中含量尤为丰富。该物质主要由高半乳糖醛酸（HG）、鼠李糖半乳糖醛酸聚糖Ⅰ型（RG-I）、鼠李糖半乳糖醛酸聚糖Ⅱ型（RG-Ⅱ）及木糖半乳糖醛酸4种多糖组成，其中HG与RG-I为主要组分。果胶的物理和生化性质主要取决于半乳糖醛酸中羧基的甲酯化程度（DM），当DM≥50%时，果胶为高甲氧基（HM）果胶；当DM<50%时，果胶为低甲氧基（LM）果胶[34]。

果胶是少数符合益生元标准的新兴低聚糖之一，具有较高的营养价值。它具有优异的胶凝、增稠、稳定特性，被广泛应用于食品、药品、化妆品和个人护理品等领域。同时，果胶具有多种生理活性：其中HG可调节机体免疫、诱导结肠癌细胞凋亡、优化肠道微生物菌群结构、促进粪便短链脂肪酸（SCFAs）的生成，并增强机体对慢性铜绿假单胞菌感染的免疫反应[35]；RG-I与RG-II可改善膳食口感、延缓胃排空以控制体质量、降低胆固醇，进而预防心血管疾病[36]；木糖半乳糖醛酸具有抗氧化、抗炎功能，常与柑橘中的黄酮类化合物和酚

类化合物共价结合，以清除人体内的自由基。与谷物、大豆等来源果胶相比，柑橘果皮果胶的水溶性、保水能力和黏度更优，是公认安全且优质的食品添加剂。

目前，针对柑橘类水果废弃物中主要生物活性物质的研究已较为深入，特别是在抗氧化、抗炎、调节代谢等领域积累了大量试验数据。但现有研究多集中在单一活性成分在体外试验或动物模型中的效应，对于多种活性成分在人体内的协同作用、生物利用度、长期摄入的安全性与功效评估仍较为薄弱。未来研究应聚焦于活性成分间的相互作用，如黄酮与果胶共价复合物的功能特性，开展靶向功能的活性物质组合优化，构建更贴合人体生理环境的功效评价体系，最终为柑橘类活性物质的精准化、个性化应用提供理论依据。

3 柑橘类水果加工废弃物中生物活性物质的提取技术

目前，国内外已开发出索氏提取法、浸渍法、水力蒸馏法、输液法和渗滤法等多种技术，用于提取柑橘类水果加工废弃物中的生物活性物质[37]。但这些传统提取方法普遍存在操作烦琐、提取效率低等缺陷。为契合绿色可持续发展理念，微波辅助提取（microwave-assisted extraction）、超声辅助提取（ultrasound-assisted extraction）、酶解法（enzymatic hydrolysis）、超临界流体萃取（supercritical fluid extraction）等新型技术在柑橘类水果加工废弃物生物活性物质提取领域展现出广阔的应用潜力[38]，见表2。

表2 新型提取技术的原理与特点

Table 2 Principles and characteristics of new extraction technologies

提取技术	基本原理	优势	缺点
微波辅助提取[39-40]	利用微波能使介质偶极子转向极化，将电能转化为热能，促使细胞内水分气化产生压力，进而破坏细胞结构，加速目标成分溶出	高效快速、显著缩短提取时间、能量利用率高、溶剂用量少、选择性好、可通过参数优化实现特异性提取	设备成本高、需使用非极性/低极性溶剂（防爆燃）、穿透深度有限、难以处理大规模/高密度物料、物料介电性质差异易导致加热不均
超临界流体萃取[41-42]	利用超临界流体（如CO_2）兼具液体的溶解能力与气体的扩散性，从基质中选择性溶解目标成分	溶剂无毒、易回收、操作温度低、保护热敏成分、选择性高	设备投资大、操作成本高、对极性成分提取效率较低（需夹带剂）、规模化生产受限
超声辅助提取[43]	利用超声波空化效应产生局部高压/高温和机械振动，破坏细胞壁，增强溶剂渗透与传质速度，加速目标成分释放	高效快速、提取率高、操作温度低、节能环保、设备简单、易于集成	空化效应受溶剂性质影响、长时间超声可能导致热敏性成分降解、大规模应用时能量传递不均匀
酶解法[44]	利用生物酶（如果胶酶、纤维素酶等）特异性降解细胞壁多糖或大分子物质，破坏细胞结构，温和释放目标活性成分	条件温和（常温常压）、保护活性成分、选择性高、无污染、可针对性酶解复杂细胞壁结构	酶成本较高、反应时间长、需精确控制pH和温度、酶活性易受抑制剂影响

3.1 黄酮类化合物的提取技术

传统黄酮类化合物提取技术的溶剂消耗量大、提取效率低，且工艺多伴随高温处理，易破坏黄酮类化合物的化学结构稳定性、降低其生物活性。近年来，多种环境友好且高效的新型提取技术快速发展，如超声辅助提取、微波辅助提取、加压液体萃取、超临界流体萃取、磁性分子印迹聚合物提取及酶辅助提取等，有效弥补了传统方法的不足。这类技术普遍具有提取时间短、能耗低、溶剂用量少、提取效率高等优势。作者对比了几种常见的柑橘类水果加工废弃物中黄酮类化合物提取技术的特点，并以橙皮苷为例对比了提取技术的工艺参数和得率，见表3。

3.2 酚酸类化合物的提取技术

酚酸类化合物是柑橘类水果加工废弃物中重要的生物活性成分，其提取技术需充分考虑存在形式（游离态、结合态）、热敏性及细胞壁结合特性。传统工艺多采用无机酸水解细胞壁中的酯键，以释放结合态酚酸，但强酸会导致部分酚酸水解，因此酸水解法逐渐被新型工艺替代。目前，亚临界水提取法、酶解-溶剂联用技术、固相微萃取法等新型提取工艺是酚酸类化合物的主流提取技术。其中，亚临界水提取法是最绿色、高效的提取技术，该技术利用100~374 ℃高温高压下水的介电常数变化特性，可选择性溶解柑橘类水果加工废弃物中的酚酸类化合物。通过对比不同提取技术的适用范围与得率可以发现，不同存在状态下酚酸类化合物的最适提取技术和提取条件存在显著差异，见表4。

表3 柑橘类水果加工废弃物中黄酮类化合物的提取技术

Table 3 Extraction technologies for flavonoids in citrus fruit processing waste

提取技术	主要特点
索氏提取	乙醇体积分数80%，于80 ℃提取6 h，橙皮苷得率为（18.2±0.8）mg/g
超声辅助提取	溶剂用量少、重现性好；在功率300 W、60 ℃、体积分数50%的乙醇条件下提取30 min，橙皮苷得率为（23.5±1.1）mg/g[45]
微波辅助提取	对柚皮素、橙皮苷等黄酮类化合物的提取率显著高于传统索氏提取法；微波（500 W）-乙醇（体积分数70%）协同处理10 min，橙皮苷得率为（28.7±1.3）mg/g[46]
加压液体萃取（pressurized liquid extraction）	耗时短、溶剂消耗少，橙皮苷得率可达12.81 mg/g[47]
超临界流体萃取	以超临界CO_2为萃取介质，低温、无氧环境中能有效保持热敏性黄酮类化合物活性，所得提取物的抗氧化活性较高[48]
酶辅助提取	酶解结合超声处理将柚皮素和橙皮苷得率分别提升5.7%和1.2%[49]
亚临界水萃取	利用高温高压下水的极性可调特性（接近有机溶剂），仅以纯净水为溶剂即可高效提取疏水性黄酮类化合物，是一种环境友好的绿色提取技术[50]；于140 ℃、4 MPa条件下处理20 min，橙皮苷得率为（26.4±1.0）mg/g
磁性分子印迹聚合物提取（magnetism molecular imprinted polymer）	以特定黄酮（如橙皮苷或柚皮素）为模板制备磁性分子印迹聚合物，选择性吸附目标化合物，可通过施加外部磁场实现快速分离，具有高选择性和高回收率特点[51]
静水压辅助萃取（high hydrostatic pressure）	200~400 MPa的非热压力使细胞结构破裂，不仅能提高黄酮类化合物的溶出率及抗氧化活性，还能有效抑制物料中的微生物生长[52]
高压放电辅助萃取（high pressure electro-discharge）	可快速释放柑橘加工废弃物中的橙皮苷、柚皮素等目标成分，具有低能耗特点[53]

表4 柑橘类水果加工废弃物中酚酸类化合物的提取技术

Table 4 Extraction technologies for phenolic acids in citrus fruit processing waste

提取技术	适用成分	得率/（mg/g）	pH敏感性
酸水解法	结合态酚酸	3.8±0.3	高（需中和）
亚临界水提取法	游离态酚酸	6.2±0.5	中
酶解-溶剂联用技术	细胞壁结合态酚酸	7.5±0.6	低
固相微萃取法	挥发性酚衍生物	痕量分析	极低

3.3 CPEO的提取技术

CPEO的传统提取技术主要包括压榨法和水蒸气蒸馏等，存在操作烦琐、得率低、能耗高等弊端，正逐渐被迭代更新。目前CPEO提取技术朝着高效、高保真化、绿色化方向发展。目前，柑橘类水果加工废弃物中精油的主要提取技术包括水蒸气蒸馏法、压榨法、冷磨法、蒸馏萃取法、顶空固相微萃取法等。不同提取技术对精油的产率具有显著影响，见表5。对比分析发现，超临界CO_2萃取所得精油的品质最优、得率最高，但成本较高；微波辅助萃取则兼顾了提取效率与经济效益，更适用于柑橘类水果果渣的规模化处理。

3.4 类胡萝卜素提取技术

柑橘类水果加工废弃物中类胡萝卜素的绿色高效提取技术包括超临界CO_2萃取、酶辅助乳化提取、亚临界水提取及微波辅助提取等。相较于传统方法，上述提取技术不仅提取效率更高，还可显著提升类胡萝卜素的得率和产品品质。以β-胡萝卜素得率为评价指标，对比几种常见的类胡萝卜素提取技术，发现超临界CO_2萃取技术得率高且无溶剂残留，但设备昂贵；酶辅助乳化提取安全性最优，更适用于食品领域，见表6。

3.5 果胶提取技术

目前柑橘类水果果胶提取领域的新技术以酶辅助提取法为主，通过使用果胶酶或纤维素酶对细胞壁进行定向水解，可在温和条件下实现果胶的提取。与传统方法相比，该技术的提取效率提高了22%，同时能够保持果胶的RG-I结构，其半乳糖醛酸占比提升至78%~82%，凝胶强度增加了10%。微波-酸/酶协同法作为一种新型果胶提取技术，采用400~600 W的微波快速破碎柑橘类水果细胞壁，结合酸或酶以增强果胶溶出率，显著缩短了提取时间，提高了提取效率和凝胶强度。此外，亚临界水提取和超临界CO_2萃取也在果胶提取中得到了广泛应用。通过对比果胶得率、半乳糖醛酸质量分数和凝胶强度等指标，发现微波-酶协同法在提升果胶提取率和品质方面具有显著优势，见表7。

表 5 柑橘类水果加工废弃物中精油的提取技术

Table 5 Extraction technologies for essential oils in citrus fruit processing waste

提取技术	主要特点
压榨法	传统提取技术，提取效率相对较低，能最大限度地保留精油中的天然香气，尤其适用于新鲜果皮[56]；在 20~25 MPa、室温条件下处理新鲜果皮，精油得率为 0.8%~1.2%，柠檬烯保留率>95%
水蒸气蒸馏	耗时较长，通过改进装置（如挥发油提取器）可实现节能减污并提升提取效率[54]；在 100~105 ℃处理干制果皮、枝叶 2~3 h，精油得率为 1.5%~2.0%，柠檬烯保留率为 70%~75%
蒸馏萃取	蒸馏与萃取步骤同步进行，节省溶剂和时间，能在很大程度上保留 CPEO 的香气成分[55]，但高温操作可能导致部分香气失真[56]
溶剂浸提	挥发性溶剂溶解精油，再通过蒸发或蒸馏分离；得率高、成本低；溶剂残留问题影响精油纯度，需进行精馏纯化[57]
微波辅助提取	具有高效节能特点，规模化应用受到限制[58]；在 35 MPa、45 ℃、夹带剂为体积分数 10% 乙醇条件下处理果皮，精油得率为 2.1%~2.6%，柠檬烯保留率为 85%~88%
超临界 CO_2 萃取	绿色提取技术的代表，低温操作、无溶剂残留、选择性高，适用于热敏性精油的提取，但设备成本高昂[59]；在微波功率 400 W 处理 5 min、蒸馏 1 h 条件下处理高水分果渣，精油得率为 2.8%~3.5%，柠檬烯保留率>90%
顶空固相微萃取	集采样、萃取与浓缩于一体，能高效捕获 CPEO 中的挥发性成分，操作简便[60]
酶辅助水蒸气蒸馏	在水蒸气蒸馏基础上添加果胶酶等破坏细胞壁结构，提高精油的溶出率，但酶成本较高，限制了其推广应用[61]

表 6 柑橘类水果加工废弃物中类胡萝卜素的提取技术

Table 6 Extraction technologies for carotenoids in citrus fruit processing waste

提取技术	工艺参数	β-胡萝卜素得率/（μg/g）	光稳定性
有机溶剂浸提	正己烷与丙酮体积比 1∶1、温度 40 ℃、提取时间 4 h	85.3±3.2	差，半衰期<24 h
超临界 CO_2 萃取	40 MPa、50 ℃、夹带剂为体积分数 10% 的乙醇	92.7±4.1	中等
亚临界水提取	提取溶剂为水，160 ℃、6 MPa 提取 30 min	78.5±3.5	良
酶辅助乳化提取	果胶酶与植物油，50 ℃提取 2 h	70.2±2.8	优，半衰期>72 h

表 7 柑橘类水果加工废弃物中果胶的提取技术

Table 7 Extraction technologies for pectin in citrus fruit processing waste

提取技术	工艺参数	得率/%	半乳糖醛酸质量分数
酸提法	pH 2.0、85 ℃提取 2 h	19.2±0.9	72%~75%
酶解法	纤维素酶、50 ℃、pH 4.8 提取 2 h	22.1±1.1	78%~82%
微波-酸协同法	pH 2.5、微波功率 500 W 处理 5 min	25.3±1.2	80%~84%
微波-酶协同法	酶解后微波功率为 400 W 处理 3 min	28.5±1.4	85%~88%

当前，对于柑橘类水果加工废弃物中生物活性物质的提取研究多聚焦于单一技术优化，对多种技术联用（如超声-酶解、微波-超临界等）的研究较少。当前需要通过多技术联用突破单一技术局限性，实现生物活性物质的高效、低能耗和高品质提取。此外，多数研究仍停留在实验室规模，亟须推进工业放大研究，解决设备成本高、能耗高、连续化操作难度大等产业化核心问题。

4 展望

柑橘类水果加工废弃物的资源化利用虽已取得明显进展，但仍面临成分稳定性差、提取效率低及产业化应用受限等多重挑战。未来研究应重点关注以下方向：第一，深化活性成分在复杂体系中的相互作用机制与生物利用度研究，打破单一成分的研究模式，探究多组分协同作用效应，同时构建贴近人体真实生理环境的评价模型，为功能性食品和药品的开发提供理论依据；第二，推动绿色提取技术向智能化、集约化方向发展，重点研发多技术协同的集成化提取系统（如超声-微波-酶解耦合、超临界 CO_2-膜分离联用等），实现低能耗、连续化生产，同时加强在线监测与过程控制，提升活性物质的提取效率和产品稳定性；第三，解决从实验室研究到规模化生产的工程问题（包括降低设备成本、优化工艺参数、制定技术标准等），结合柑橘主产区的分布特征，建立集中处理与分散加工相结合的原料收集与加工模式，降低产业链运营成本；第四，拓展高值化应用场景，在现有功能性

食品、饲料、包装材料等应用领域的基础上，积极探索柑橘活性成分在生物医药（如抗炎药物载体、伤口修复敷料等）、化妆品（如天然抗氧化及防晒剂等）及环境材料（如新型生物吸附剂、可降解地膜等）等领域的创新应用。依托多学科交叉融合，构建覆盖基础研究、技术开发、产业落地的完整创新链条，有望实现柑橘类水果加工废弃物的全组分与高值化利用，为循环农业与食品工业的可持续发展提供系统化解决方案。

参考文献

[1] Putnik P，Barba F J，Lorenzo J M，et al. An integrated approach to Mandarin processing：food safety and nutritional quality，consumer preference，and nutrient bioaccessibility [J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety，2017，16(6)：1345-1358.

[2] Park J H，Lee M，Park E. Antioxidant activity of orange flesh and peel extracted with various solvents [J]. Preventive Nutrition and Food Science，2014，19 (4)：291-298.

[3] Richa R，Kohli D，Vishwakarma D，et al. Citrus fruit：classification，value addition，nutritional and medicinal values，and relation with pandemic and hidden hunger[J]. Journal of Agriculture and Food Research，2023，14：100718.

[4] Edwards-Jones V，Buck R，Shawcross S G，et al. The effect of essential oils on methicillin-resistant *Staphylococcus aureus* using a dressing model[J]. Burns，2004，30(8)：772-777.

[5] 朱金帅，李秋莹，于昕睿，等. 酚酸对水产品腐败希瓦氏菌的抑菌作用[J]. 食品与机械，2020，36(6)：133-137.
Zhu J S，Li Q Y，Yu X R，et al. Antibacterial effect of phenolic acid on *Shewanella putrefaciens* from aquatic product[J]. Food & Machinery，2020，36(6)：133-137.（in Chinese）

[6] Chen Y，Xu L L，Wang Y J，et al. Characterization and functional properties of a pectin/tara gum based edible film with ellagitannins from the unripe fruits of *Rubus chingii* Hu[J]. Food Chemistry，2020，325：126964.

[7] Czech A，Malik A，Sosnowska B，et al. Bioactive substances，heavy metals，and antioxidant activity in whole fruit，peel，and pulp of citrus fruits [J]. International Journal of Food Science，2021，2021：6662259.

[8] Sabertanha E，Rouzbehan Y，Fazaeli H，et al. Nutritive value of sorghum silage for sheep[J]. Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition，2021，105(6)：1034-1045.

[9] Manolikaki I I，Mangolis A，Diamadopoulos E. The impact of biochars prepared from agricultural residues on phosphorus release and availability in two fertile soils[J]. Journal of Environmental Management，2016，181：536-543.

[10] Torres-León C，Ramírez-Guzman N，Londoño-Hernandez L，et al. Food waste and byproducts：an opportunity to minimize malnutrition and hunger in developing countries [J]. Frontiers in Sustainable Food Systems，2018，2：52.

[11] Wang Y，Liu X J，Chen J B，et al. Citrus flavonoids and their antioxidant evaluation[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition，2022，62(14)：3833-3854.

[12] 刘丹，郭欢，吴笛，等. 柑橘黄酮类化合物的提取新技术及生物活性研究进展[J]. 食品与机械，2022，38(11)：217-224.
Liu D，Guo H，Wu D，et al. Research progress on new extraction technologies and bioactivities of flavonoids from orange[J]. Food & Machinery，2022，38(11)：217-224.（in Chinese）

[13] Bacanlı M，Başaran A A，Başaran N. The major flavonoid of grapefruit：naringin [M]//Ronald R W. Polyphenols：prevention and treatment of human disease. Amsterdam：Elsevier，2018：37-44.

[14] 高艳婷，李欢欢，许腾，等. 茶多酚在肉制品加工与保鲜中的应用研究进展[J]. 食品与生物技术学报，2025，44(6)：10-18.
Gao Y T，Li H H，Xu T，et al. Research progress in the application of tea polyphenols in meat processing and preservation[J]. Journal of Food Science and Technology，2025，44(6)：10-18.（in Chinese）

[15] Liu Y，Wu H，Nie Y C，et al. Naringin attenuates acute lung injury in LPS-treated mice by inhibiting NF-κB pathway[J]. International Immunopharmacology，2011，11(10)：1606-1612.

[16] Elsawy H，Alzahrani A M，Alfwuaires M，et al. Beneficial role of naringin against methotrexate-induced injury to rat testes：biochemical and ultrastructural analyses[J]. Redox Report，2022，27(1)：158-166.

[17] Frabasile S，Koishi A C，Kuczera D，et al. The citrus flavanone naringenin impairs dengue virus replication in human cells[J]. Scientific Reports，2017，7：41864.

[18] Salehi B，Fokou P V T，Sharifi-Rad M，et al. The therapeutic potential of naringenin：a review of clinical trials[J]. Pharmaceuticals，2019，12(1)：11.

[19] Farag M A，Abib B，Ayad L，et al. Sweet and bitter oranges：an updated comparative review of their bioactives，nutrition，food quality，therapeutic merits and biowaste valorization practices [J]. Food Chemistry，2020，331：127306.

[20] 张元梅. 中国野生宽皮柑橘酚类物质的检测及其抗氧化活性研究[D]. 重庆：西南大学，2013：17.

[21] Moon M K，Lee Y J，Kim J S，et al. Effect of caffeic acid on tumor necrosis factor-alpha-induced vascular inflammation in human umbilical vein endothelial cells [J]. Biological & Pharmaceutical Bulletin，2009，32(8)：1371-1377.

[22] Kikuzaki H，Hisamoto M，Hirose K，et al. Antioxidant

properties of ferulic acid and its related compounds[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2002, 50(7): 2161-2168

[23] Lima M C, Paiva de Sousa C, Fernandez-Prada C, et al. A review of the current evidence of fruit phenolic compounds as potential antimicrobials against pathogenic bacteria[J]. Microbial Pathogenesis, 2019, 130: 259-270.

[24] Bouzenna H, Dhibi S, Samout N, et al. The protective effect of *Citrus limon* essential oil on hepatotoxicity and nephrotoxicity induced by aspirin in rats [J]. Biomedicine & Pharmacotherapy, 2016, 83: 1327-1334.

[25] Filomeni G, De Zio D, Cecconi F. Oxidative stress and autophagy: the clash between damage and metabolic needs [J]. Cell Death & Differentiation, 2015, 22(3): 377-388.

[26] 曹文轩, 郑琦, 岳玲, 等. 几种天然植物精油的抑菌活性及协同增效研究[J]. 食品与生物技术学报, 2024, 43(5): 101-109.
Cao W X, Zheng Q, Yue L, et al. Antibacterial activity and synergistic enhancement of several natural plant essential oils [J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2024, 43(5): 101-109.(in Chinese)

[27] Fisher K, Phillips C. Potential antimicrobial uses of essential oils in food: is citrus the answer?[J]. Trends in Food Science & Technology, 2008, 19(3): 156-164.

[28] 杨成, 姜欣, 李晨妍, 等. 类胡萝卜素立体异构体构效关系及其应用研究进展[J]. 食品与生物技术学报, 2023, 42(4): 1-15.
Yang C, Jiang X, Li C Y, et al. Structure-activity relationship and applications of carotenoids stereoisomers: a review[J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2023, 42(4): 1-15.(in Chinese)

[29] Wang Y C, Chuang Y C, Hsu H W. The flavonoid, carotenoid and pectin content in peels of citrus cultivated in Taiwan[J]. Food Chemistry, 2008, 106(1): 277-284.

[30] Moise A R, Al-Babili S, Wurtzel E T. Mechanistic aspects of carotenoid biosynthesis [J]. Chemical Reviews, 2014, 114(1): 164-193.

[31] Du H, Wang N L, Cui F, et al. Characterization of the *β*-carotene hydroxylase gene DSM2 conferring drought and oxidative stress resistance by increasing xanthophylls and abscisic acid synthesis in rice[J]. Plant Physiology, 2010, 154(3): 1304-1318.

[32] Ma G, Zhang L C, Yungyuen W, et al. Expression and functional analysis of citrus carotene hydroxylases: unravelling the xanthophyll biosynthesis in citrus fruits [J]. BMC Plant Biology, 2016, 16(1): 148.

[33] Thorne-Lyman A L, Fawzi W W. Vitamin A and carotenoids during pregnancy and maternal, neonatal and infant health outcomes: a systematic review and meta-analysis [J]. Paediatric and Perinatal Epidemiology, 2012, 26(Suppl. 1): 36-54.

[34] Christiaens S, Van Buggenhout S, Ken H B, et al. Process-structure-function relations of pectin in food[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2016, 56(6): 1021-1042.

[35] Zhang X S, Rajagopalan K, Lei H W, et al. An overview of a novel concept in biomass pyrolysis: microwave irradiation[J]. Sustainable Energy & Fuels, 2017, 1(8): 1664-1699.

[36] Sharma P, Gautam K, Pandey A K, et al. Pectin[M]// Pandey A. Biomass, biofuels, biochemicals: biodegradable polymers and composites-process engineering to commercialization. Amsterdam: Elsevier, 2021: 101-128.

[37] Rifna E J, Misra N N, Dwivedi M. Recent advances in extraction technologies for recovery of bioactive compounds derived from fruit and vegetable waste peels: a review [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2023, 63(6): 719-752.

[38] Putnik P, Bursać Kovačević D, Režek Jambrak A, et al. Innovative "green" and novel strategies for the extraction of bioactive added value compounds from citrus wastes-a review[J]. Molecules, 2017, 22(5): 680.

[39] 陈韩英, 李炳奇, 刘红, 等. 熟地多糖的微波提取和含量测定[J]. 时珍国医国药, 2004, 15(8): 488-489.
Chen H Y, Li B Q, Liu H, et al. Research on microwave extraction and content measurement of Radix Rehmanniate polysaccharide [J]. Lishizhen Medicine and Materia Medica Research, 2004, 15(8): 488-489.(in Chinese)

[40] 张自萍. 微波辅助提取技术在多糖研究中的应用[J]. 中草药, 2006(4): 630-632.
Zhang Z P. Application of microwave-assisted extraction technology in polysaccharide research [J]. Chinese Traditional and Herbal Drugs, 2006(4): 630-632.(in Chinese)

[41] Babotă M, Frumuzachi O, Gâvan A, et al. Optimized ultrasound-assisted extraction of phenolic compounds from *Thymus comosus* Heuff. ex Griseb. et Schenk (wild thyme) and their bioactive potential [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2022, 84: 105954.

[42] Alwazeer D, Özkan N. Incorporation of hydrogen into the packaging atmosphere protects the nutritional, textural and sensorial freshness notes of strawberries and extends shelf life[J]. Journal of Food Science and Technology, 2022, 59(10): 3951-3964.

[43] Rajković K M, Vasić M, Drobac M, et al. Optimization of extraction yield and chemical characterization of optimal extract from *Juglans nigra* L. leaves[J]. Chemical Engineering Research and Design, 2020, 157: 25-33.

[44] Teng H, Zheng Y M, Cao H, et al. Enhancement of bioavailability and bioactivity of diet-derived flavonoids by application of nanotechnology: a review[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2023, 63(3):

378-393.

[45] Montero-Calderon A, Cortes C, Zulueta A, et al. Green solvents and ultrasound-assisted extraction of bioactive orange (*Citrus sinensis*) peel compounds[J]. Scientific Reports, 2019, 9: 16120.

[46] García-Martín J F, Feng C H, Domínguez-Fernández N M, et al. Microwave-assisted extraction of polyphenols from bitter orange industrial waste and identification of the main compounds[J]. Life, 2023, 13(9): 1864.

[47] Souza M C, Santos M P, Sumere B R, et al. Isolation of gallic acid, caffeine and flavonols from black tea by on-line coupling of pressurized liquid extraction with an adsorbent for the production of functional bakery products [J]. LWT-Food Science and Technology, 2020, 117: 108661.

[48] Kasapoğlu K N, Kruger J, Barla-Demirkoz A, et al. Optimization of supercritical carbon dioxide extraction of polyphenols from black rosehip and their bioaccessibility using an *in vitro* digestion/caco-2 cell model[J]. Foods, 2023, 12(4): 781.

[49] Tzanova M, Atanasov V, Yaneva Z, et al. Selectivity of current extraction techniques for flavonoids from plant materials[J]. Processes, 2020, 8(10): 1222.

[50] Song E J, Ko M J. Extraction of monoterpenes from coriander (*Coriandrum sativum* L.) seeds using subcritical water extraction (SWE) technique[J]. The Journal of Supercritical Fluids, 2022, 188: 105668.

[51] Cheng Y, Nie J Y, Liu H D, et al. Synthesis and characterization of magnetic molecularly imprinted polymers for effective extraction and determination of kaempferol from apple samples [J]. Journal of Chromatography A, 2020, 1630: 461531.

[52] Yamamoto K. Food processing by high hydrostatic pressure[J]. Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry, 2017, 81(4): 672-679.

[53] Nutrizio M, Gajdoš-Kljusurić J, Badanjak-Sabolović M, et al. Valorization of sage extracts (*Salvia officinalis* L.) obtained by high voltage electrical discharges: process control and antioxidant properties[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2020, 60: 102284.

[54] 周艳平. 水蒸气蒸馏法提取香樟叶精油工艺优化研究[J]. 林业勘察设计, 2021(1): 70-72.
Zhou Y P. Study on the extraction of essential oil from *Cinnamomum camphora* leaves by steam distillation[J]. Forestry Prospect and Design, 2021(1): 70-72.(in Chinese)

[55] 白雨佳, 张丽荣, 黄佳琪, 等. 压榨法制备甜橙油的研究[J]. 食品工业, 2015, 36(7): 87-90.
Bai Y J, Zhang L R, Huang J Q, et al. Compression method for essential oils extraction from *Citrus sinensis* [J]. The Food Industry, 2015, 36(7): 87-90.(in Chinese)

[56] 李娟, 陈巧玲, 胡泳华. 同时蒸馏萃取法提取红肉蜜柚果皮精油的工艺优化研究[J]. 新余学院学报, 2022, 27(5): 32-36.
Li J, Chen Q L, Hu Y H. Optimization of simultaneous distillation and extraction process for extraction of essential oil from red-flesh honey pomelo peel[J]. Journal of Xinyu University, 2022, 27(5): 32-36.(in Chinese)

[57] 梅桢, 王晓芳, 杨娅楠, 等. 溶剂浸提法提取桔皮精油及其稳定性研究[J]. 信息记录材料, 2018, 19(5): 244-245.
Mei Z, Wang X F, Yang Y N, et al. Study on the extraction of orange peel essential oil by solvent extraction method and its stability [J]. Information Recording Materials, 2018, 19(5): 244-245.(in Chinese)

[58] Shakir I K, Salih S J. Extraction of essential oils from citrus by-products using microwave steam distillation[J]. Iraqi Journal of Chemical and Petroleum Engineering, 2015, 16(3): 11-22.

[59] 康向奎. 超临界二氧化碳萃取的优点与前景[J]. 化工设计通讯, 2020, 46(6): 144-145.
Kang X K. Advantages and prospects of supercritical carbon dioxide extraction [J]. Chemical Engineering Design Communications, 2020, 46 (6): 144-145.(in Chinese)

[60] 詹思佳, 苏蔚莹, 王道梁, 等. 顶空-固相微萃取和同时蒸馏萃取法提取肉桂的挥发性成分[J]. 中国食品学报, 2022, 22(12): 181-190.
Zhan S J, Su W Y, Wang D L, et al. Extraction of volatile components of Rougui tea using the headspace-solid-phase microextraction and simultaneous distillation extraction [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2022, 22 (12): 181-190.(in Chinese)

[61] 尉洁净, 李媛, 熊群, 等. 柑橘属植物精油的提取技术与应用研究[J]. 上海化工, 2023, 48(3): 43-45.
Yu J J, Li Y, Xiong Q, et al. Study on extraction technology and application of essential oil from *Citrus*[J]. Shanghai Chemical Industry, 2023, 48 (3): 43-45.(in Chinese)