DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20251122003
**引用格式**: 李芊慧, 刘常薇, 于永利, 等. 芦丁的提取和分离纯化研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(6): 105–117.
LI QH, LIU CW, YU YL, *et al*. Research progress on extraction, separation and purification methods of rutin [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(6): 105–117. (in Chinese with English abstract).

# 芦丁的提取和分离纯化研究进展

李芊慧, 刘常薇, 于永利, 常　杰, 周　婷*
(内蒙古民族大学生命科学与食品学院, 通辽　028000)

**摘　要:** 芦丁是一种天然黄酮醇糖苷化合物, 具有显著的生理和药理功效。目前, 芦丁及其相关产品研究与开发主要围绕芦丁高效获取与精准分析展开。本文以“芦丁”与“提取”为研究主题, 对相关领域的研究热点与发展规律进行了分析总结。基于文献计量学方法, 本文分析和揭示了当前研究在增强提取效率、开发绿色提取工艺等方面的主要进展, 主要包括芦丁提取原料的选择方法、预处理方法及其影响, 传统提取技术与绿色提取技术的原理、优势与局限性以及分离纯化方法。最后总结并展望了芦丁的提取与分离纯化面临的挑战和未来发展趋势, 旨在为芦丁及其相关产品的深入研究、工艺优化及产业化应用提供理论支撑和参考依据。

**关键词:** 芦丁; 提取; 分离; 纯化

## Research progress on extraction, separation and purification methods of rutin

LI Qian-Hui, LIU Chang-Wei, YU Yong-Li, CHANG Jie, ZHOU Ting*
(*College of Life Sciences and Food Engineering*, *Inner Mongolia Minzu University*, *Tongliao* 028000, *China*)

**ABSTRACT:** Rutin is a natural flavonol glycoside compound with considerable physiological and pharmacological effects. Currently, research and development on rutin and its related products mainly focued on efficient acquisition and precise analysis of rutin. The paper took “rutin” and “extraction” as the research themes and analyzed and summarized the research hotspots and development trends in the related fields. Based on bibliometric analysis, the review first revealed current research trends aimed at enhancing extraction efficiency and developing green extraction processes. It further discussed strategies for selecting raw materials and the influence of pretreatment methods, while providing an in-depth comparison of the principles, advantages and limitations of traditional extraction techniques versus modern green extraction methods. Finally, the paper elaborated on the separation and purification methods for rutin, summarized and prospected the challenges and future trends in its extraction, separation and purification. This review may provide theoretical support and references for subsequent in-depth research, process optimization and industrial application of rutin.

**收稿日期:** 2025-11-22
**基金项目:** 内蒙古自治区自然科学基金青年基金项目(2022QN03023); 2021 年度自治区本级事业单位引进人才项目(RCXM2022-2); 内蒙古民族大学科研启动项目(BSZ004)
**第一作者:** 李芊慧(2002—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为植物源食品功能成分富集技术与机理。E-mail: liqianhui202315@163.com
***通信作者:** 周婷(1989—), 女, 博士, 讲师, 主要研究方向为植物源食品功能成分富集技术与机理。E-mail: tingzhou007@163.com

**KEY WORDS:** rutin; extraction; separation; purification

## 0 引 言

芦丁($C_{27}H_{30}O_{16}$)又名芸香苷、路丁粉、紫槲皮苷、槐苷、维生素 P, 是一种天然黄酮醇类化合物, 其化学结构由作为苷元的槲皮素与芸香糖(由葡萄糖和鼠李糖组成)通过糖苷键连接而成。它在自然界中分布广泛, 已在 70 多种植物中被鉴定[1]。它因具有多种生理与药理活性, 如抗氧化、抗炎、抗过敏、细胞保护、血管保护、抗癌、神经保护、心脏保护、抗菌、抗病毒、抗肿瘤、降血脂等, 以及安全无毒的特性, 而备受医药、功能食品及化妆品领域的广泛关注[2]。据报道, 目前在美国销售的 860 多种膳食补充剂中都含有芦丁[3]。随着健康产业的蓬勃发展及消费者对天然产物需求的日益增长, 芦丁的市场需求持续攀升, 因此, 芦丁高效、绿色、可持续的制备技术成为研究热点。

“提取”是从天然原料中获取芦丁的初始环节, 直接决定了相关产品的得率、成本与后续分离纯化和检测的复杂性。因此, 如何高效、安全地提取芦丁等生物活性化合物是研究热点。目前, 芦丁提取的相关研究正经历从传统方法向现代技术的转变, 但其效率与效益受多种因素的制约。由于原料中芦丁含量在不同物种、部位、产地及采收期等差异较大, 因此, 如何科学选择与高效预处理原料是提升提取效率与经济效益的首要问题。各类提取技术[从传统溶剂浸提到超声辅助提取技术(ultrasonic-assisted extraction, UAE)、微波辅助提取技术(microwave-assisted extraction, MAE)、酶辅助提取技术(enzyme-assisted extraction, EAE)等现代辅助技术]原理迥异, 优、缺点并存, 亟待进行系统性的梳理与比较。此外, 粗提物成分复杂, 如何通过高效的分离纯化技术获得高纯度芦丁产品, 是实现其高值化应用的关键[3−5]。

因此, 本文对天然芦丁的“提取”与“分离纯化”进行系统性综述。基于文献计量学方法, 本文对以“芦丁”与“提取”为主题的相关领域的研究热点、以及不同国家/地区的研究趋势进行宏观分析, 把握学科前沿动态。基于前沿动态分析结果, 本文对芦丁提取的原料选择策略和预处理方法进行归纳, 并对比传统与现代提取技术在原理、优势与应用上的差异, 对芦丁的分离纯化策略[如柱色谱分离法(column chromatography, CC)、制备型高效液相色谱法(preparative high performance liquid chromatography, Prep-HPLC)等]进行总结, 旨在为芦丁的深入研究、工艺优化及产业化开发提供参考。

## 1 芦丁的研究历史与研究热点分析

### 1.1 芦丁的研究历史

据 COUCH 等[6]记载, 芦丁最早由 SCHUNCK 于 19 世纪中期在荞麦中发现, 作者从 30 磅(约 13.61 kg)的新鲜荞麦叶中仅分离出 240 格令(约 15.55 g)葡萄糖苷(得率为 0.11%)。芦丁的早期研究主要集中于其化学结构解析与基础理化性质表征, 这为后续芦丁研究奠定了基础。20 世纪中后期, 天然产物活性研究兴起, 芦丁的抗氧化、抗炎等生物活性也逐渐被发掘, 其研究重心逐渐转向药理作用机制与初步应用探索。近年来, 在提取、分离与纯化技术持续创新的驱动下, 芦丁及相关产品的研究与应用范围不断拓宽, 现已广泛应用于膳食补充剂、医药及化妆品等多个领域[3]。

如图 1 所示, 在 2002—2024 年期间, 在 Web of Science (WOS)数据库中, 以“芦丁”及“芦丁+提取”为主题检索的年度发文量整体呈上升趋势, 表明全球范围内该领域的研究热度持续攀升。从国家和地区发文分布看, 中国、印度等亚洲国家与巴西等拉丁美洲国家是相关研究论文的主要来源地, 其发文量的增长是全球趋势变化的关键贡献因素。

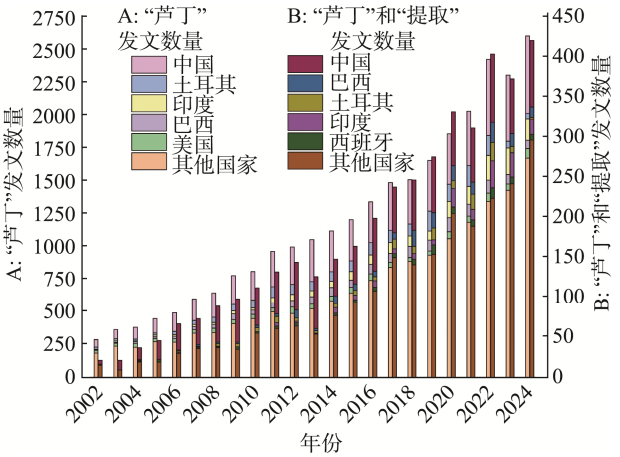



图 1 2002 年至 2024 年各国发表的文献数量

Fig. 1 Number of literature published by various countries from 2002 to 2024

### 1.2 研究热点分析

以 WOS 为数据库, 运用 VOSviewer 文献计量学软件对 2002—2024 年间以“芦丁”和“提取”为关键词发表的文献进行汇总并生成关键词共现分析聚类图(图 2)。结果显示, 相关研究主要包括 4 个领域: (1)绿色提取与加工工艺优化(红色区域), 如 UAE、MAE、深共晶溶剂(deep eutectic solvent, DES)、响应面法、优化、绿色、回收率等, 传统提取方法效率低、可持续性差, 研究人员探索使用超声波、微波等强化提取过程, 采用 DES 等新型绿色溶剂降低对环境的负面影响并运用响应面法优化提取工艺参数, 以达到

效率最大化；(2)生物活性与药理功能研究(绿色区域)，如抗氧化活性、抗菌活性、细胞凋亡、氧化应激、体外、细胞、药用植物等，研究人员通过体外实验和细胞模型对芦丁抗氧化能力、抗菌特性进行了系统评估，并深入探究其更深层次的药理作用；(3)芦丁的分离与检测(蓝色区域)，如芦丁、槲皮素、色谱法、高效液相色谱法、纯化、固相萃取等，研究人员致力于开发高精度的分离与检测方法，近几年色谱技术是研究的重点；(4)酚类物质组分分析(黄色区域)，如酚酸、鉴定、定量、质谱、成分等，研究人员利用联用分析技术，如利用二极管阵列检测器和质谱对产品中酚类物质组分进行全面的鉴定和定量分析。

这 4 个研究领域通过共现关系，直观呈现出当前芦丁提取的相关研究以“活性物质为核心、绿色技术为驱动、健康功效为导向”的研究框架与重点，为芦丁的开发与提取物的利用提供方向。

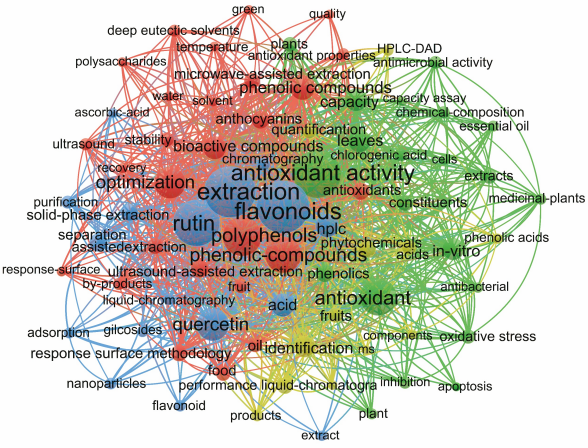



图 2　2002 年至 2024 年有关“芦丁”和“提取”的文献关键词共现的分析聚类图

Fig.2　Analysis and cluster diagram of co-occurrence of literature keywords related to “rutin” and “extraction” from 2002 to 2024

## 2　芦丁的提取

### 2.1　富含芦丁的植物资源

芦丁的提取效率受多种因素综合影响，其中提取原料的选择是决定提取效率和成本收益的基础与前提。为实现高效率、低成本、高纯度及可持续等提取目标，在提取过程中应综合考量以下 6 个关键方面(图 3)。(1)优先选择含量高且易于溶出的植物原料及部位。目前已发现的富含芦丁的植物众多，如苦荞(*Fagopyrum tartaricum* L. Gaertn)种子中芦丁含量可达 1411 mg/100 g DW，约占总黄酮含量的 70%~85%，苦荞芽苗中芦丁含量可达 65582 mg/100 g DW，槐树(*Sophora japonica* L.)花蕾的芦丁含量可达 21480~28210 mg/100 g DW，约占总黄酮含量的 64.2%~94.7%，芸香(*Ruta graveolens* L.)幼叶中芦丁含量可达 10000 mg/100 g DW，柑橘属多种植物(如常山胡柚、管溪蜜柚、温州蜜柑等)的果皮芦丁含量可达 736.3~2242.3 mg/100 g DW，且普遍高于果肉(230.4~823.1 mg/100 g DW)[7–10]。值得注意的是，不同植物来源的芦丁，因其存在形态(如游离态、与细胞壁结合、与金属离子络合等)的差异，导致其提取难度与最优提取工艺各不相同，为实现高效提取，必须依据原料特性合理选择提取工艺：对于结合紧密的形态，需采用能有效破坏细胞结构或化学键的预处理及提取技术[4,10]；(2)选择易于规模化采收的人工栽培物或农业副产物[11]；(3)评估原料中杂质(如纤维、草酸、脂质等)的类型与含量，并预估去除这些杂质的预处理工序及成本；(4)原料特性与所选取的提取方法相匹配；(5)评估原料在采收后是否易腐败或造成芦丁降解，并据此设计保鲜工艺减少成分损失；(6)根据产品不同用途进行选择，食品级选用药食同源原料，医药级选用高纯度、低杂质的原料，工业级选用成本低且杂质影响较小的原料[2,4,12]。

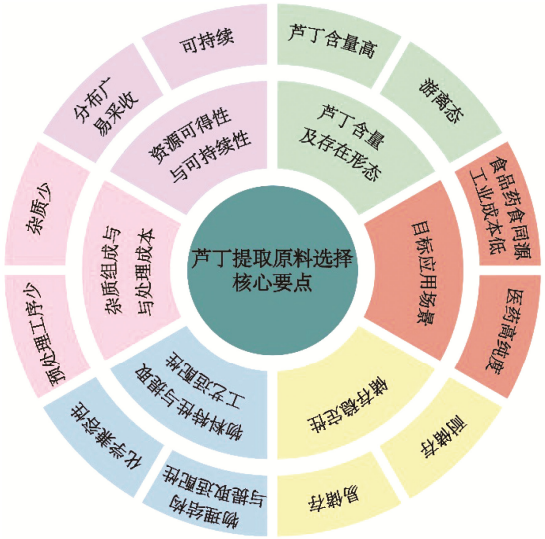



图 3　芦丁提取原料选择核心要点

Fig.3　Core points for raw material selection in rutin extraction

### 2.2　原料预处理

原料预处理是提取过程的第一步，通常包括干燥、粉碎及去脂处理中的 2~3 道工序[13]。

干燥处理的目的是去除原料中的水分，防止微生物滋生并抑制酶活性，避免芦丁降解。同时干燥处理也便于后续的粉碎和提取操作。常见的干燥方法有空气干燥、微波干燥、烘箱干燥和冷冻干燥等。空气干燥虽成本低，但耗时较长。微波干燥和烘箱干燥时间较短，但需严格控制温度，避免高温破坏芦丁[14]。CHEW 等[15]在制备木瓜叶芦丁提取物时，将木瓜叶在 50 ℃烘箱下烘 72 h，以去除木瓜叶中的水分。ABRAHA 等[16]在鱼腥草叶、茎干燥预处理研究中对比烘箱干燥与冷冻干燥效果，发现冷冻干燥耗时

长于烘箱干燥、最终含水量略高于烘箱干燥，但对芦丁及总酚、总黄酮含量与抗氧化活性的保留效果优于烘箱干燥。因此，相较于烘干干燥方法，冷冻干燥可以更好地保留芦丁等成分的活性，但该技术工艺成本相对较高。

通常，植物原料干燥后需进行粉碎处理。粉碎工序中可通过调整粉碎粒度大小改变芦丁的提取效率，研究发现小于 0.5 mm 的粒径(超微粉碎)是高效提取的最佳选择[17]。超微粉碎是一种通过破坏植物细胞壁使有效成分便于直接与溶媒接触溶出的粉碎方式，粉碎过程中不会产生局部过热现象，可以最大限度地保留粉体的生物活性成分[18]。李明娟等[19]将干燥的车前草粉碎成粗粉、细粉和超微粉 3 种不同颗粒大小的粉末，用 60%乙醇超声提取 15 min 后发现，超微粉提取物中 3 种黄酮苷元(槲皮素、木犀草素、黄芩素)的含量高于常规粗粉和细粉，提高了黄酮苷元的提取率。但并非所有原料的粉碎粒度越小提取率越高。在葛根总黄酮的提取中，提取率随提取粒度的减小呈现先增加后减小的趋势。这是因为，一方面，粒度减小可增大原料比表面积，提升与溶剂的接触效率，从而促进黄酮类成分浸出；另一方面，若粒度过细，颗粒间易因表面张力发生团聚，反而导致有效接触面积下降，进而使提取率降低[5,20]。

脂性物质的存在会影响提取物中芦丁及其衍生类黄酮的组成特征，需要额外的净化程序，正己烷与石油醚是除去亲脂性化合物的常用溶剂[21]。VETROVA 等[22]将 2 g 干燥的金槐芽用30 mL正己烷在沸腾条件下萃取150 min，有效去除了亲脂性干扰物，使后续乙醇提取的目标产率提升约 20%。

此外，酶解预处理也能提高提取率。由于芦丁等活性成分通常包裹在细胞壁内，因此，通过优化酶种类(如纤维素酶、果胶酶等)和酶解条件(温度、时间、酶的浓度等)可以改变细胞壁的通透性，使细胞壁疏松破裂，加速活性物质的溶出，从而提高提取率[23]。

综上所述，预处理方式的选择直接影响芦丁的提取效率及其活性保留。因此，在实际应用中，应根据原料特性和提取要求合理选择干燥、粉碎等预处理方法。表 1 展示了部分原料的预处理过程。

### 2.3 芦丁的提取方法

提取工艺条件是决定芦丁提取得率并保障其生物活性的重要环节，通常通过优化提取溶剂和工艺流程来提高芦丁的提取效率与产物浓度。为更好的保留芦丁活性，一般建议在低温环境下进行提取，避免高温下芦丁失活与降解。在提取溶剂选择上，一般优先选择低毒性、低沸点、传质快且与芦丁无不良相互作用的溶剂体系[3,32]。

#### 2.3.1 传统提取法

传统提取法包括水提法、醇提法和碱提酸沉法等，这些方法简单、成本低，但存在操作复杂、效率低等问题。水提法是一种以水为提取介质，利用芦丁等黄酮类化合物在热水中的溶解性实现提取的方法，该方法无需有机溶剂，适用于对有机溶剂使用有限制的场景。但此方法提取效率受限于水对芦丁的溶解度，且高温容易导致芦丁降解，无法通过延长时间提升效率[33]。CHAHYADI 等[34]用热水浸提法从木薯叶中提取芦丁，通过单因素试验确定优化参数为：固液比 1:30 (g:mL)、时间 15 min、温度 100 ℃，最终芦丁提取率为(20.38±0.66) mg/g DW，但低于 UAE (24.49 mg/g DW±0.41 mg/g DW)与 MAE (23.37 mg/g DW±1.00 mg/g DW)的提取率。WACK 等[35]同样从欧当归中提取芦丁时发现，与纯水相比，甲醇和乙醇作为提取剂结合离心处理均使产率提高了一倍以上。

与水提法相比，醇提法对黄酮类化合物表现出更高的提取选择性，常用的提取介质包括甲醇、乙醇及其不同比例的水溶液，通过调节溶剂极性，可以有效实现目标成分的选择性溶出[36]。近年来研究者常将醇提法与 UAE、

**表 1 不同原料的预处理过程**

**Table 1 Pretreatment process of different raw materials**

| 原料 | 预处理步骤 | 粉碎程度/目 | 参考文献 |
|---|---|---|---|
| 槐米 | 空气干燥后用粉碎机粉碎 | 60~80 | [24] |
| 槐米 | 槐米去除根和叶后用 80%乙醇溶液浸泡过夜脱脂，粉碎后过筛，再于 60 ℃干燥后备用 | 120 | [25] |
| 槐米 | 槐米在蒸馏水充分浸泡后用滤纸吸干表面水分，4 ℃冷藏保存，先经 480 W 功率超声处理 60 min，再于 180 ℃加热处理 60 min，最后粉碎过筛 | 100 | [26] |
| 槐米 | 槐米脱脂后，于 60 ℃烘箱干燥至恒重，粉碎后过筛 | 120 | [27] |
| 柠檬皮 | 清洗后于 40 ℃干燥 2~4 h，粉碎后过筛 | 10 | [28] |
| 苹果渣 | 将其室温干燥至恒重，经锤式粉碎机粉碎后过筛 | 20~80 | [12] |
| 苹果渣 | 先经离心、研磨机粉碎、液压机压榨，再于 65 ℃干燥箱中干燥 16 h，随后用配备 2 mm 筛网的切割粉碎机进一步粉碎 | 10 | [29] |
| 葡萄籽 | 葡萄籽干燥至恒重后用破碎机破碎并过筛，再加入石油醚浸泡 3 h 脱脂，沥干后于 105 ℃烘箱中干燥以去除残留石油醚 | 40 | [30] |
| 绿茶 | 挑选嫩梢及下方 3 片叶片，洗净后 90 ℃杀青 8 min，经揉捻后分两阶段干燥(第一阶段 130 ℃干燥 30 min，第二阶段 80 ℃干燥 80 min)，干燥后用搅拌机粉碎并过筛 | 40 | [31] |
| 木瓜叶片 | 除叶柄后洗净，于 50 ℃烘箱干燥 72 h，用商用榨汁机研磨成粉并过筛，储存于 4 ℃密封容器中 | 25 | [32] |

MAE 等相结合, 以提升溶剂渗透、降低提取时间并减少溶剂用量。例如, DUONG 等[37]从槐米中提取芦丁和槲皮素时用 96%甲醇与 UAE 联合, 液固比为 19:1 (*V*:*m*), 超声持续时间为 19 min, 最佳工艺下提取物中芦丁和槲皮素含量分别为 30.77%和 1.09%。而 FAN 等[24]采用 70%乙醇与 UAE 结合提取槐花中芦丁等黄酮类化合物, 在超声时间 30 min, 提取温度 61 ℃, 液固比 15.30 mL/g 参数下, 芦丁提取率为 14.61%。JAOUHARI 等[38]对比了醇提、水提和醇提联合 MAE 在提取覆盆子渣中酚类化合物提取率上的差异, 通过对比发现不同提取方法的提取率存在以下规律: 50%乙醇联合 MAE>50%乙醇>70%乙醇>90%乙醇>30%乙醇>水提。这些数据表明醇提与辅助技术协同提取效果需要“溶剂特性-原料属性-工艺参数”的综合匹配。

碱提酸沉法提取芦丁的核心原理, 是利用芦丁分子中酚羟基的弱酸性, 在碱性环境下, 酚羟基可形成可溶性盐溶解于提取液, 经酸化处理后, 芦丁又会以结晶形式析出, 以此实现目标成分的高效分离与纯化。该方法通过精准调控体系 pH, 既能提升对芦丁的选择性富集效果, 又可避免强酸强碱对其结构造成破坏, 同时大幅降低杂质的共溶率。此外该方法具有经济安全、操作简便、提取效率高等优势, 工业上常用此法提取芦丁[39]。童婧等[40]以槐米为原料, 系统对比了热水提法、80%乙醇提法与碱提酸沉法的提取效果。结果表明, 传统热水提取法所得的芦丁提取率为 12.1%, 芦丁纯度为 94.3%, 80%乙醇提取法的提取率为 10.6%, 纯度为 93.2%。而采用 pH 为 9 的硼砂-石灰水混合液作为碱性提取剂, 同时添加亚硫酸钠作为抗氧剂以保护芦丁结构, 提取完成后, 将提取液用盐酸调节 pH 至 4, 使芦丁结晶沉淀, 再经洗涤、干燥处理的碱提酸沉法得到的芦丁提取率为 18.1%, 产品纯度为 98.1%。因此, 碱提酸沉法在芦丁提取效率与产品纯度上显著优于热水提取法与乙醇提取法。

2.3.2　绿色提取技术

GAŁUSZKA 等[41]以通用绿色化学原则为基础, 通过筛选关键条款并整合分析化学的特定需求, 提出了绿色分析化学的 12 项原则。在此原则指导下, 绿色提取技术旨在最大限度地降低提取工艺对环境造成的负担, 并推动技术的可持续发展[42], 这些技术包括 UAE、MAE、超临界流体萃取(supercritical fluid extraction, SFE)法及 EAE 法等[43]。表 2 汇总了采用这些绿色技术提取芦丁的部分代表性研究。

**表 2　近年来绿色提取技术提取芦丁的应用**

**Table 2　Application of green extraction technologies in rutin extraction in recent years**

| 提取技术 | 提取原料 | 最佳提取条件 | 芦丁提取率/(mg/g DW) | 参考文献 |
|---|---|---|---|---|
| DES-UAE | 荞麦壳 | 氯化胆碱-甘油(摩尔比 1:1, 含水 20%)、40 ℃、50 min、200 W | 9.6 | [32] |
| DES-UAE | 宁夏枸杞 | 氯化胆碱与对甲苯磺酸 1:2 混合物、液固比 1:20 (*V*:*m*)、25 ℃、90 min | 9.1 | [44] |
| UAE | 葡萄果皮 | 水为溶剂、液固比 1:200 (*w*:*V*)、55 ℃、6 min、750 W、20 kHz 超声处理器 | 1.7 | [45] |
| UAE | 苹果 | 乙醇(70%)、44.61 ℃、26.90 min、480 W | 6.58 | [46] |
| 超声辅助双水相提取法 | 枣 | $K_2HPO_4$ (35%)-乙醇(20%)双水相、固液比 1:30 (g:mL)、50 min、200 W | - | [47] |
| UAE | 木薯叶 | 含水乙醇(40%~60%)、固液比 1:10 (*w*:*V*)、90 min、50 ℃、40 kHz | 24.49 | [34] |
| UAE | 棕榈小穗 | 乙醇(70%)、40.8 ℃、21.6 min、110 W、40 kHz | 114.6 | [48] |
| 表面活性剂-MAE | 无花果 | 聚乙二醇 8000、液固比 20 mL/g、40 ℃、10 min、400 W | 4.77 | [49] |
| MAE | 木薯叶 | 乙醇(60%)、固液比 1:10 (*w*:*V*)、5 min、180~720 W | 23.37 | [34] |
| MAE | 木芙蓉叶 | $Na_2CO_3$ (15%, *w*/*w*)-$Na_2CO_3$•10$H_2O$ (1.5%, *w*/*w*)、液固比 25 mL/g、25 ℃、研磨 4 min、提取 10 min | 5.44 | [50] |
| MAE | 红枣 | 乙醇(70%)、料液比 1:15 (g:mL)、70 ℃、80 s、400 W、40 kHz | 2.76 | [51] |
| DES-MAE | 槐花 | 氯化胆碱/1, 4-丁二醇(摩尔比 1:2)、含水量 25%、液固比 26 mL/g、62 ℃、20 min、600 W | 116.78 | [52] |
| DES-MAE | 东北茶藨子 | 氯化胆碱-乳酸(质量比 1:2)、含水量 25%、液固比 27 mL/g、54 ℃、10 min | 1.25 | [53] |
| $CO_2$-SFE | 芦笋 | 水-乙醇(1:1, *V*:*V*)、$CO_2$ 恒定流量(0.25±0.05) kg/h、15 MPa、65 ℃、60 min | 1.86 | [54] |
| $CO_2$-SFE | 沙棘叶 | 夹带剂乙醇(2.43%)、47.53 ℃、25.13 MPa、$CO_2$ 流速 14.47 g/min | - | [55] |
| EAE-UAE | 黄蜀葵 | 乙醇(70%)与 0.1 mol/L 磷酸二氢钠缓冲液混合液、纤维素酶-果胶酶(质量比 1:1)、酶浓度 3%、pH 6.0、50 ℃、40 min、500 W | 34.6 | [56] |
| EAE-UAE-*β*-环糊精提取法 | 连翘 | 纤维素酶(6.5%)与木瓜蛋白酶(1.5%)混合、*β*-环糊精 0.3 g、酶解温度 32 ℃、酶解时间 56 min、超声提取温度 60 ℃、超声提取时间 82 min、840 W | 3.60 | [57] |
| 双酶-UAE | 长药八宝 | 纤维素酶-果胶酶(质量比 1:1)添加量 1.5%、超声提取时间 60 min, 乙醇浓度 35%, 液料比 20:1 (mL:g) | 42.2 | [58] |

注: -表示未给出芦丁提取率。

(1)超声辅助提取法

UAE 是当前植物化学领域应用的热点技术，其核心作用机制是利用超声波在液体介质中产生的空化效应及其伴随的力学效应与热效应，通过多重协同作用优化芦丁等黄酮类物质的提取过程[59–60]。其中，超声空化效应可使植物原料破碎或颗粒微粉化，增大比表面积，同时对原料表面产生侵蚀作用，结合超声毛细管效应加快溶剂在原料孔隙与导管中的渗透速度、加深渗透深度，再借助声致穿孔效应增大细胞膜通透性，且超声辐照固液混合物时产生的液体剪切力能进一步加速植物结构分解[61]，这些协同机制共同破坏细胞壁结构，促进目标成分向溶剂溶出，使 UAE 成为绿色高效、经济可行的传统提取技术替代方案。该技术的提取效率受工艺参数(如功率、频率、时间)与介质参数(如溶剂性质、固液比)的综合影响(图 4)[62]，与传统提取方法相比，其不仅缩短了提取与加工时间，还减少了能源与溶剂消耗量、降低了 $CO_2$ 排放量[63]，且适用于多种植物基质，具备工艺参数可调性，更便于工业化应用[64]。

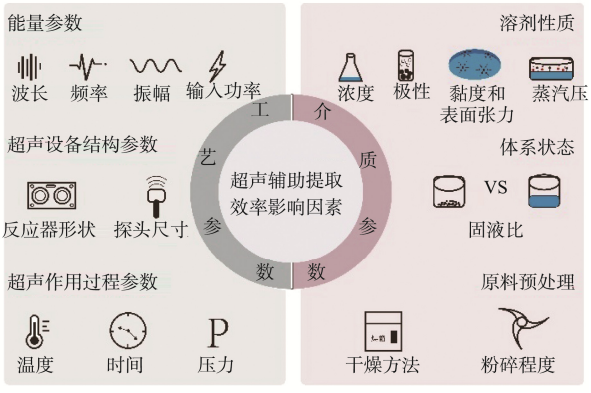



图 4 UAE 效率影响因素

Fig.4 Factors influencing the efficiency of UAE

(2)微波辅助提取法

MAE 是利用微波的热效应和非热效应提取芦丁等黄酮类物质，微波频率在 300 MHz 到 300 GHz，科研中常用 2.45 GHz(实验室)和 915 MHz(工业)频率。微波的热效应是通过离子传导和偶极子转动两种机制产热，溶剂和植物基质在微波的交变电场作用下，体系中的离子发生定向移动形成电子流，同时极性分子快速旋转和排列，两者与周围分子碰撞产热，使体系内部快速升温，形成高温和高压的微环境，破坏细胞膜和细胞壁，加速芦丁等黄酮类物质的释放；微波的非热效应是指微波电场使极性分子极化、破坏分子间作用力，还可让基质细胞膜/细胞壁产生电穿孔，提供额外溶出通道，提升提取选择性[65–66]。

MAE 提取效果受多种因素影响。(1)溶剂选择需合理，溶剂的介电常数是实现高效、选择性提取的重点考量参数。介电常数高的溶剂具备更强的微波能量吸收能力。溶剂选择需与目标化合物的化学性质相匹配。乙醇、甲醇等极性溶剂因高介电常数更适配于芦丁的提取，采用多种溶剂混合或添加改性剂可优化提取效率；(2)固液比需适宜，过量或不足溶剂会影响微波传导和物质传递；(3)微波功率需合理调控，微波功率升高会促使提取温度同步上升，过高易导致芦丁降解；(4)植物原料粒径需控制在较小范围(100 μm~2 mm)，物料粒径越小，溶剂可渗透的表面积越大，更易引发细胞破裂并强化传质过程；(5)提取过程中需引入搅拌操作，搅拌能够直接强化传质效率；(6)提取时间需严格把控，通常在数秒至数分钟范围内，合理应用循环提取工艺(向提取后的残留植物基质中补加新鲜溶剂，继续进行提取操作，直至提取完成)，可在节省溶剂用量的同时缩短总提取时长[4,65]。MAE 已成功从草莓叶[67]、无花果叶[49,68]等植物中提取出芦丁等黄酮类物质，经响应面法等模型优化提取条件后，该技术的提取率在同类绿色提取技术中处于较高水平[69]。目前 MAE 已逐步发展出氮保护微波辅助提取技术(nitrogen-protected microwave-assisted extraction, NPMAE)、真空微波辅助提取技术(vacuum microwave-assisted extraction, VMAE)、超声微波辅助提取技术(ultrasonic microwave-assisted extraction, UMAE)、动态微波辅助提取技术(dynamic microwave-assisted extraction, DMAE)、无溶剂微波辅助萃取技术(solvent-free microwave-assisted extraction, SFMAE)等多种优化亚型，通过优化设备、参数与工艺，在提升提取效率、保护目标成分、降低环境影响等方面持续进步，成为植物活性成分提取的优选技术之一[65]。

(3)超临界流体萃取法

SFE 可通过调控温度、压力、流体极性(如添加夹带剂)，对芦丁等黄酮类成分选择性萃取[70]。在超临界流体中，$CO_2$ 因具有临界条件温和(临界温度=31.3 ℃，临界压力=7.39 MPa)、化学惰性、无毒、无残留、成本低廉且可循环利用等优点，成为目前最常用的萃取介质[71]。$CO_2$-SFE 的原理是通过升压使 $CO_2$ 达到超越气液临界点的超临界状态，该状态下其流体兼具气体的高渗透性和液体的高溶解能力，可高效萃取目标物，随后再通过降压使 $CO_2$ 气化并与萃取物彻底分离，这种方法很好的解决了传统有机溶剂提取中的溶剂残留问题[72]。但纯超临界 $CO_2$ 极性极低，无法提取强极性芦丁，必须添加夹带剂(如乙醇、甲醇、乙醇-水混合体系)或共溶剂，通过提升流体极性、破坏芦丁与植物基质的氢键/共价键作用，实现芦丁的有效溶出[73]。使用夹带剂不仅能够增强对极性物质的溶解能力和过程选择性，还能有效降低所需的操作温度与压力，在提升萃取效率的同时更好地保护热敏性成分[74–75]。但使用时需要注意助溶剂的用量、安全性及适用性等，以确保最终产物符合预期的纯度和安全性[76]。

(4)酶辅助提取法

EAE 是一种利用特定酶制剂降解植物细胞壁结构，释放细胞内黄酮类化合物等活性成分的绿色提取技术。EAE 的提取效率主要与所用酶的种类和特性有关。适用于 EAE 的理想酶应具有以下标准：较高的催化活性；底物特异性，能高效靶向细胞壁组分；较好的环境适应性，能在提取体系的温度、pH 等条件下维持活性稳定[77]。针对芦丁等

黄酮类化合物, 提取常选用纤维素酶、果胶酶、木质素过氧化物酶和木聚糖酶等多酶组合, 旨在更彻底地破坏细胞壁网络, 提升溶剂对芦丁的萃取效率, 如果胶水解酶和纤维素水解酶等。与传统方法相比, EAE 具有条件温和、选择性高、细胞破碎更彻底且提取效率显著提升等优点, 但酶制剂成本高、操作稳定性差、回收率低及活性易受工艺条件影响而降低等缺点使其在大规模工业应用中的推广受到阻碍[78]。

(5)深共晶溶剂

DES 是由氢键受体和氢键供体组成的在室温条件下呈液态的共晶混合体系, 因其环境友好、低成本、生物降解性好等优点, 已在生物活性成分提取、分离和包载递送等方面得到广泛应用[79]。亲水性 DES 通常由氯化胆碱、尿素、甘油等极性组分组成, 易溶于水, 适合极性物质的提取。疏水性 DES 则是由胺类、酚类、长链脂肪酸等非极性或弱极性组分组成, 难溶于水, 适合非极性或疏水性物质的提取。与亲水性 DES 相比, 疏水性 DES 具有更低的黏度, 在提取中传质效率和可操作性更高, 因此更适用于芦丁等黄酮类化合物的提取[80]。不同类型的 DES 可联合不同提取技术以提高目标活性成分的提取效率。李晓珺等[81]对比了 6 种 DES 联合 UAE 南非叶总黄酮的提取率, 结果发现最优 DES 组合为氯化胆碱和 1,4-丁二醇(溶剂含水量为 30%、氯化胆碱和 1,4-丁二醇的摩尔比为 1:3), 在料液比 1:30 (g:mL), 超声工艺参数为功率 360 W、时间 29 min, 温度 50 ℃条件下, 总黄酮提取率为 18.54%, 比 70%乙醇提取的提取率高了 2.64 倍。因此, DES 凭借其可定制性、高提取效率、环境友好性和提取条件温和等优势, 未来将成为替代传统有毒、挥发性有机溶剂的理想选择[82]。

2.3.3　传统提取技术与绿色提取技术的优缺点对比

传统与现代提取技术因其原理与工艺不同, 在提取效率、成本与环保性等方面各具优缺点。选择芦丁等黄酮类化合物的提取工艺时, 需综合考虑目标物性质、生产规模、经济成本及环境相容性等[32,83–85]。表 3 总结了不同方法在提取芦丁、槲皮素等黄酮类化合物时的技术特点, 以期为针对性地选择与优化芦丁提取工艺提供科学参考。

**表 3　芦丁提取方法比较**

**Table 3　Comparison of rutin extraction methods**

| 提取技术 | | 优点 | 缺点 | 参考文献 |
|---|---|---|---|---|
| 传统提取技术 | 水提法 | 成本低、操作安全、绿色环保、设备简单 | 选择性差、提取率低、耗时长、能耗高、水提液不易储存 | [83] |
| | 醇提法 | 选择性较好、提取率较高、防腐抑菌、易回收 | 成本高、乙醇易挥发, 存在火灾隐患、毒性残留、使蛋白变性 | [32] |
| | 碱提酸沉法 | 针对性强、提取效率高、成本较低、适合工业化生产 | 对操作精度要求高、污染环境 | [84] |
| 绿色提取技术 | UAE | 效率高、耗时短、环境友好 | 设备费用高、工艺控制要求高、需配合后续处理 | [85–87] |
| | MAE | 提取率高、溶剂用量少、时间短、简化流程和操作 | 不适合工业化生产、设备成本高、缺乏实际工业应用参数、可能存在加热不均、对物料性质敏感 | [88] |
| | SFE | 高选择性、可分离目标物、提取物纯度高、操作温度温和、常用超临界 $CO_2$ 作溶剂, 提取物无溶剂残留 | 设备昂贵、操作难度大、规模化应用复杂、能耗高, 对高极性化合物萃取效率低 | [89] |
| | EAE | 效率高、绿色环保、条件温和、专一性强、能耗低 | 成本较高、工艺复杂、耗时、酶易失活、酶的回收利用率低、可能存在酶残留 | [78] |
| | DES | 低挥发性、高稳定性、高效、低毒性、低成本、易于制备、提取条件温和、绿色可持续溶剂 | 黏度高、传质效率低、不同组分形成的 DES 性质差异大、亲水性 DES 吸湿性强易导致提取率不稳定 | [90] |

## 3　芦丁分离纯化技术

从复杂粗提物中高效分离并高纯度获取目标产物, 是天然产物下游加工过程中的关键环节与挑战所在。为实现芦丁的特异性分离与纯化, 多种色谱与膜技术已被广泛应用。下文将重点阐述 CC、Prep-HPLC、膜分离法(membrane separation technology, MST)及薄层色谱法(thin-layer chromatography, TLC)这几种主流技术的原理与应用, 其系统性比较见表 4。

### 3.1　柱色谱分离法

CC 是纯化植物提取物中芦丁等黄酮类化合物的常用手段, 其原理是利用目标物在固定相与流动相间不同的分配平衡实现分离。CC 通常作为后续精细纯化(如 Prep-HPLC)前的初步纯化步骤, 能有效去除大量共存杂质。常用的固定相材料包括硅胶、聚酰胺及大孔吸附树脂等, 其选择主要考虑目标成分的极性与吸附特性[95]。

硅胶作为一种多孔极性吸附剂, 其分离机制主要依赖于表面硅羟基与黄酮类化合物酚羟基之间形成的氢键作用, 从而实现对目标物的选择性吸附[96]。TONG 等[97]以 1500 g、100~200 目硅胶 H 作为固定相, 采用氯仿-甲醇混合溶剂进行梯度洗脱, 对结香花正丁醇提取物进行纯化, 最终获得 108 mg 部分纯化样品, 其中芦丁与尼可苷含量分别约为 52%和 31%, 杂质被有效去除。

表 4 芦丁分离方法比较
Table 4 Comparison of rutin isolation methods

| 分离方法 | 优点 | 缺点 | 应用场景 | 参考文献 |
|---|---|---|---|---|
| CC-硅胶 | 分离选择性好, 技术成熟, 应用范围广 | 洗脱烦琐耗时, 溶剂消耗量大, 不环保, 载量较低, 不适合大规模制备 | 实验室小批量制备, 常用于从粗提物中进一步分离单体, 或作为最后一步纯化以获得高纯度样品 | [91] |
| CC-聚酰胺 | 对黄酮类化合物有特异吸附, 可重复使用 | 吸附容量有限, 洗脱流速慢, 样品损失大 | 实验室及中小规模制备。特别适用于从富含色素、多酚的植物粗提物中选择性富集和纯化芦丁 | [92] |
| CC-大孔吸附树脂 | 处理量大, 吸附容量高, 成本低 | 选择性通常低于聚酰胺, 对结构非常相似的化合物分离效果有限 | 工业中大规模芦丁纯化, 用于芦丁粗提液的初步富集和脱色 | [92] |
| Prep-HPLC | 分离能力最强, 分离效率高, 重现性好, 终产物纯度高, 可以根据被分离物质的性质配备不同的检测器 | 设备成本较高, 溶剂消耗大, 操作复杂, 制备量小 | 实验室制备高纯度芦丁标准品 | [92] |
| MST | 效率高, 适用性广, 设备简单, 能耗低, 无溶剂污染, 常温操作无热破坏, 过程温和, 适用于热敏性化合物 | 分离精度有限, 难以区分结构相似的化学物, 膜易堵塞需频繁清洗, 对原料预处理要求高 | 芦丁提取液的预处理(除杂、浓缩), 常作为大孔树脂或色谱纯化前的预处理步骤 | [93] |
| TLC | 成本低, 操作简单, 显影时间快, 可直观判断分离效果 | 不具备制备能力, 仅用于分析鉴定, 定量精度有限, 重现性较差, 分离结果易受多种因素干扰 | 芦丁分离过程的定性检测, 分离条件摸索与筛选 | [94] |

聚酰胺树脂可通过氢键、范德华力及 π-π 相互作用选择性吸附含酚羟基及共轭体系的化合物, 因而对黄酮类成分具有优异吸附选择性, 成为多酚类物质分离的常用介质[98]。王峥等[99]以金槐槐米为原料, 通过静态与动态试验优化聚酰胺树脂纯化芦丁工艺, 确定 100~200 目聚酰胺树脂为适宜载体, 在上样浓度 0.286 mg/mL、上样流速 1.0 mL/min、洗脱剂为 80%乙醇且洗脱体积 2.5 BV 的条件下, 芦丁得率 55.49%、纯度 99.08%, 为金槐芦丁的工业化纯化提供了技术支撑。

大孔吸附树脂是一类具有高比表面积、可控孔径及稳定骨架结构的高分子吸附材料, 其分离性能主要取决于吸附容量与解吸动力学[100–101]。在椪柑陈皮总黄酮的纯化工艺研究中, 通过比较 AB-8、HPD-500、HP-20 和 D101 4 种树脂的静态吸附与解吸行为, 发现虽然 AB-8 在吸附率上效果最好, 但是 HPD-500 在综合解吸率和比表面积等关键参数上综合效果最优, 展现出其在规模化提取中作为理想纯化介质的潜力[102]。CHEN 等[103]对比了离子液体真空-MAE、离子液体-MAE 和离子液体热回流萃取法从银中杨树皮中提取水杨苷、金丝桃苷和芦丁的差异, 结果发现 3 种方法总萃取率分别为(39.25±1.59)、(32.51±1.32)和(28.27±1.18) mg/g, 且离子液体真空-MAE 耗时最短(20 min), [C4mim]BF4 离子液体萃取液经 D101 大孔树脂吸附解吸处理(去离子水洗涤-60%乙醇解吸)后, 实现了 3 种目标成分的有效分离, 得率分别为 89%、82%和 84%。

### 3.2 薄层色谱法

TLC 自上世纪六十年代起, 已成为芦丁等黄酮类化合物分离分析中的一项经典技术。该技术具有操作简便、成本低廉且通常无需复杂的样品前处理等优点[104]。作为一种高通量分离技术, 其分离基础是混合物中各组分在固定相与流动相之间分配系数或吸附特性的差异实现分离。分离后的组分可通过特异性显色剂进行显色, 因此可以用于组分定性与半定量分析[105]。如 YINGYUEN 等[106]利用反相-TLC, 以含有 F245 荧光指示剂的预涂硅胶 60 RP-18 为固定相, 甲醇-水(1:1, *V*:*V*)为流动相, 从芭蕉叶提取物中成功分离出芦丁。在紫外光(365 nm)下, 分离出的芦丁组分呈现橙黄色斑点, 其 Rf 值为 0.6。但由于 TLC 定量精度有限, 所以常需与其他分析技术联用, 以提升分离结果的准确性与可靠性。如 LI 等[107]开创性地将 TLC 与表面增强拉曼光谱法联用, 成功对柑橘中 14 种黄酮类化合物生物活性成分进行了分离与鉴定, 结果表明, 与单独使用 TLC 相比, 联用技术检测灵敏度提升了 6 至 500 倍, 且各组分的回收率表现良好(91.5%~121.7%), 显著增强了方法的整体分析效能。

### 3.3 制备型高效液相色谱法

Prep-HPLC 是一种基于高载量、高分离效率的制备色谱柱实现目标组分分离与纯化的关键技术。与传统制备技术相比, 该方法具有处理通量、分离速度、纯化效率、方法重现性及终产物纯度等优点[108–109]。如药食同源植物黄精叶片中富含黄酮类化合物, 但其粗提物中常共存多糖、叶绿素等干扰成分。若直接进行 Prep-HPLC 分离, 这些杂质易导致柱效下降、色谱柱污染及目标物纯度不理想等问题[110]。DAI 等[110]创新性地采用中压制备色谱与 Prep-HPLC 技术对黄精叶片粗提物进行分离, 先用中压制备色谱对粗提物进行初步除杂与富集, 后用 Prep-HPLC 进

行精细分离, 最终从黄精叶片中成功分离出 9 种黄酮类化合物, 其中包括 7 种结构新颖的化合物, 且各化合物纯度均达到 96%以上。

### 3.4 膜分离法

MST 通常作为纯化前的预处理步骤, 其以压力差、浓度差、电势差或化学势差作为传质驱动力, 利用膜材料的选择透过性, 依据待分离组分在分子尺寸、形状或带电性质的差异实现分离。分离过程具有条件温和、步骤简洁, 能够有效保持目标成分的理化与生物活性稳定性等优点[111]。值得注意的是, 膜材料在形态、结构与表面性质上具有多样性: 其材质可以是固体、液体或复合态; 结构可以是对称或不对称; 表面电荷特性可以是电中性、带正电或带负电[112–114]。

根据膜孔径尺寸的不同, MST 主要分为微滤、超滤、纳滤和反渗透等类型[115]。微滤膜孔径一般不小于 0.1 μm, 操作压差通常在 0.01~0.2 MPa 之间, 主要用于去除悬浮颗粒、细菌、酵母及胶体等微米级物质[93]。超滤膜孔径约为 0.01~0.1 μm, 常用跨膜压差为 0.05~0.5 MPa, 适用于蛋白质、多糖、细菌等大分子有机化合物的分离[116]。纳滤膜孔径约为 1~10 nm, 跨膜压差通常低于 1.5 MPa, 具有良好的截留小分子有机物与多价离子的能力, 广泛应用于水质净化与物料浓缩[117]。陈玲等[118]采用水煎煮法提取紫花杜鹃干燥嫩叶中的黄酮类化合物(以芦丁为标准品), 提取液经离心预处理后去除其中的固体杂质, 再将上清液在 0.35 MPa 压力下通过 Millipore Labscale TFF 超滤系统, 依次经过截留相对分子质量为 $10^5$、$5\times10^4$、$10^4$ 的超滤膜纯化, 最终黄酮类化合物纯度从 13.95%提升至 46.07%。

## 4 结束语

芦丁是一种常见的天然膳食黄酮类化合物, 广泛存在于水果、蔬菜等天然植物中。对 WOS 数据中“芦丁”及其“提取”为主题的相关研究热点进行宏观分析, 发现芦丁相关研究已从基础理化性质, 逐步向提取、分离纯化、检测、生物活性挖掘、健康功效应用等前沿方向延伸, 表明该领域正向高效、绿色、应用驱动方向发展, 蕴含着巨大的开发潜力与应用价值。在芦丁等黄酮类物质获取的初始阶段, 原料的选择与预处理是关键, 不仅决定提取效率与效益, 对后续工艺的可行性与经济性也有影响。提取技术的发展与变革整体呈现出从传统溶剂提取法向高效、节能、环保、可持续方向发展的趋势。绿色提取技术(如 UAE、MAE、SFE 等)在提取效率、得率和选择性上有着明显的优势, 但传统提取方法因成本低廉、操作简便等优点, 在特定场景下仍具有应用价值。芦丁的分离纯化是获取高纯度芦丁及其相关产品的关键步骤。CC-大孔吸附树脂因其能平衡成本与效率成为主流选择, Prep-HPLC 作为获得高纯度单体的可靠技术, 被广泛使用。在绿色、可持续原则下, 要想实现效益最大化, 未来的提取和分离纯化工艺应把重点放在多种技术的联用与工艺参数的精准优化上。

芦丁的研究已取得丰硕成果, 但未来仍面临诸多挑战与机遇。在提取工艺技术上, 开发低毒、可回收的绿色溶剂体系, 并探索提取与纯化的连续化、工业化、自动化集成工艺, 是实现芦丁绿色制造和提高提取效率与效益的重点研究方向。其次, 在分离纯化技术上, 开发低成本、低能耗、环境友好的规模化集成生产工艺, 实现从实验室到产业化的无缝衔接, 是未来的核心课题。目前芦丁的提取率已通过绿色提取技术与工艺优化得到有效解决, 但芦丁生物利用度低是如今面临的更大挑战之一, 这严重制约了芦丁提取物的应用。因此, 在芦丁提取物应用方面, 针对芦丁水溶性与生物利用度低的问题, 设计新型纳米载药系统或进行结构修饰将是未来的研究热点。最后, 芦丁的研究正朝着一个新的方向发展, 通过持续的技术创新和工艺优化, 有望推动其在功能食品、特医食品及化妆品等大健康领域中创造更大的价值。

## 参考文献


[1] GOYAL J, VERMA PK. An overview of biosynthetic pathway and therapeutic potential of rutin [J]. Mini-Reviews in Medicinal Chemistry, 2023, 23(14): 1451–1460.

[2] NAUTIYAL G, MINOCHA N, SHARMA SK, *et al*. Nano-rutin: A promising solution for alleviating various disorders [J]. Recent Patents on Nanotechnology, 2025, 19(4): 592–608.

[3] GULLÓN B, LÚ-CHAU TA, MOREIRA MT, *et al*. Rutin: A review on extraction, identification and purification methods, biological activities and approaches to enhance its bioavailability [J]. Trends in Food Science and Technology, 2017, 67: 220–235.

[4] TOBAR-DELGADO E, MEJIA-ESPAÑA D, OSORIO-MORA O, *et al*. Rutin: Family farming products' extraction sources, industrial applications and current trends in biological activity protection [J]. Molecules, 2023, 28(15): 5864.

[5] BITWELL C, SEN-INDRA S, LUKE C, *et al*. A review of modern and conventional extraction techniques and their applications for extracting phytochemicals from plants [J]. Scientific African, 2023, 19: e01585.

[6] COUCH JF, NAGHSKI J, KREWSON CF. Buckwheat as a source of rutin [J]. Science, 1946, 103: 197–198.

[7] KE J, RAN B, SUN PY, *et al*. An evaluation of the absolute content of flavonoids and the identification of their relationship with the flavonoid biosynthesis genes in tartary buckwheat seeds [J]. Agronomy-Basel, 2023, 13(12): 14.

[8] 谭均, 李隆云, 王计瑞, 等. 不同产地槐米的质量综合评价研究[J]. 天然产物研究与开发, 2018, 30(12): 2166–2174, 2202.
TAN J, LI LY, WANG JR, *et al*. Study on quality evaluation of *Flos sophorae* Immaturus [J]. Natural Product Research and Development, 2018, 30(12): 2166–2174, 2202.

[9] 周婷, 王海歌, 张继星, 等. 植物性食品原料中芦丁的来源、合成代谢与调控研究进展[J]. 食品科学, 2025, 46: 284–295.
ZHOU T, WANG HG, ZHANG JX, *et al*. Research progress in natural

sources, biosynthesis and metabolism regulation of rutin in plant-derived food materials [J]. Food Science, 2025, 46(3): 284–295.

[10] GUO N, CHEN Z, CAO SQ, *et al*. *Sophora japonica* L. bioactives: Chemistry, sources, and processing techniques [J]. Food Frontiers, 2024, 5(3): 1166–1187.

[11] MILESCU RA, SEGATTO ML, STAHL A, *et al*. Sustainable single-stage solid-liquid extraction of hesperidin and rutin from agro-products using cyrene [J]. Acs Sustainable Chemistry and Engineering, 2020, 8(49): 18245–18257.

[12] BORUJENI NE, ALAVIJEH MK, DENAYER JFM, *et al*. A novel integrated biorefinery approach for apple pomace valorization with significant socioeconomic benefits [J]. Renewable Energy, 2023, 208: 275–286.

[13] JHA AK, SIT N. Extraction of bioactive compounds from plant materials using combination of various novel methods: A review [J]. Trends in Food Science and Technology, 2022, 119: 579–591.

[14] ZUO YF, LIU XQ, MENG XS, *et al*. Effects of different postharvest drying processes on flavonoid content and enzymatic activity of *Styphnolobium japonicum* (L.) Schott flowers for industrial and medicinal use [J]. Heliyon, 2024, 10(15): 8.

[15] CHEW SK, TEOH WH, HONG SL, *et al*. Rutin extraction from female *Carica papaya* Linn. using ultrasound and microwave-assisted extractive methods: Optimization and extraction efficiencies [J]. Heliyon, 2023, 9(10): e20260.

[16] ABRAHA SM, YUNCHALARD S, PIYATHEERAWONG W, *et al*. Effects of drying pretreatments and extraction methods on biochemical activity of houttuynia cordata thunb [J]. Asia-Pacific Journal of Science and Technology, 2022, 28(5): 11.

[17] HÖß T. Alternative green extraction methods for natural products [D]. Regensburg: Universität Regensburg, 2018.

[18] 李蕊汐, 王闯, 刘燕, 等. 超微粉碎技术在中药制备领域的应用与研究进展[J]. 中国医药工业杂志, 2024, 55(2): 187–216.
LI RX, WANG C, LIU Y, *et al*. Application and research progress of ultrafine pulverization technology in preparation of traditional Chinese medicines [J]. Chinese Journal of Pharmaceuticals, 2024, 55(2): 187–216.

[19] 李明娟, 朱琪, 刘柳成, 等. 车前草超微粉黄酮的提取工艺研究[J]. 中药材, 2013, 36(8): 1335–1339.
LI MJ, ZHU Q, LIU LC, *et al*. Influence of superfine grinding technology on extracting flavones from plantain [J]. Journal of Chinese Medicinal Materials, 2013, 36(8): 1335–1339.

[20] 张喜梅, 李琳, 陈玲, 等. 葛根总黄酮提取工艺研究[J]. 现代食品科技, 2008, 24(4):365–368.
ZHANG XM, LI L, CHEN L, *et al*. Study on the extraction of total flavones from *Pueraria lobata* Ohwi [J]. Modern Food Science and Technology, 2008, 24(4): 365–368.

[21] LIGA S, PAUL C, PÉTER F. Flavonoids: Overview of biosynthesis, biological activity, and current extraction techniques [J]. Plants-Basel, 2023, 12(14): 25.

[22] VETROVA EV, MAKSIMENKO EV, BORISENKO SN, *et al*. Extraction of rutin and quercetin antioxidants from the buds of sophora japonica (*Sophora japonica* L.) by subcritical water [J]. Russian Journal of Physical Chemistry B, 2017, 11(7): 1202–1206.

[23] 邵圣娟, 李晓, 卫静莉. 超声波辅助纤维素酶解法提取马尾松花粉中的总黄酮[J] 中成药. 2016, 38(1): 204–207.
SHAO SJ, LI X, WEI JL. Ultrasound-assisted cellulase hydrolysis for extraction of total flavonoids from *Pinus massoniana* pollen [J]. Chinese Traditional Patent Medicine, 2016, 38(1): 204–207.

[24] FAN SH, YANG GG, ZHANG JH, *et al*. Optimization of ultrasound-assisted extraction using response surface methodology for simultaneous quantitation of six flavonoids in *Flos sophorae* Immaturus and antioxidant activity [J]. Molecules, 2020, 25(8): 1767.

[25] ZHONG WT, YANG CM, ZHANG YZ, *et al*. Effects of different deproteinization methods on the antioxidant activity of polysaccharides from *Flos sophorae* Immaturus obtained by ultrasonic microwave synergistic extraction [J]. Agronomy-Basel, 2022, 12(11): 2740.

[26] LI J, GONG YH, LI JW, *et al*. Improving the xanthine oxidase and adenosine deaminase inhibitory activities of *Flos sophorae* Immaturus by ultrasound-assisted heating treatments [J]. Food Bioscience, 2023, 51: 102245.

[27] ZHONG WT, YANG CM, ZHANG YZ, *et al*. The chemical profiling and anticancer potential of functional polysaccharides from *Flos sophorae* Immaturus [J]. Molecules, 2022, 27(18): 5978.

[28] HUANG JQ, XU X, LIU C, *et al*. Exploring the potential of lemon peel extracts in cosmetics: Chemical composition and bioactive properties [J]. Journal of Microbiology and Biotechnology, 2025, 35: e2412042.

[29] MIKSOVSKY P, KORNPOINTNER C, PARANDEH Z, *et al*. Enzyme-assisted supercritical fluid extraction of flavonoids from apple pomace (*Malus×domestica*) [J]. Chemsuschem, 2024, 17(7): e202301094.

[30] SUN LB, WANG H, DU J, *et al*. Ultrasonic-assisted extraction of grape seed procyanidins, preparation of liposomes, and evaluation of their antioxidant capacity [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2024, 105: 106856.

[31] ARIYANTHINI KS, ANGELINA E, ANDINA N, *et al*. Implementation of principal component analysis-cluster analysis on the extraction of green tea leaf (*Camellia sinensis* (L.) Kuntze) [J]. Biointerface Research in Applied Chemistry, 2022, 13(4): 335.

[32] HUANG Y, FENG F, JIANG J, *et al*. Green and efficient extraction of rutin from tartary buckwheat hull by using natural deep eutectic solvents [J]. Food Chemistry, 2017, 221: 1400–1405.

[33] 郭雪峰, 岳永德. 黄酮类化合物的提取·分离纯化和含量测定方法的研究进展[J]. 安徽农业科学, 2007, 35(26): 8083–8086.
GUO XF, YUE YD. Research advances in extraction, isolation, purification and content determination of methods flavonoids [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2007, 35(26): 8083–8086.

[34] CHAHYADI A, ELFAHM I. The influence of extraction methods on rutin yield of cassava leaves (*Manihot esculenta* Crantz) [J]. Saudi Pharmaceutical Journal, 2020, 28(11): 1466–1473.

[35] WACK H, SOMBORN A, SCHLEHUBER D, *et al*. Cultivation of lovage under exposure of light-emitting diode illumination and analysis of rutin produced by high performance liquid chromatography (HPLC) and ultraviolet-visible spectroscopy (UV-Vis) [J]. International Journal of Food Science, 2022, 2022(1): 6357893.

[36] 苏腾伟, 曾健, 谢园, 等. 银杏叶有效成分提取工艺研究进展综述[J]. 山东化工, 2025, 54(61): 130–132.
SU TW, ZENG J, XIE Y, *et al*. Research progress of ginkgo leaves extracting process [J]. Shandong Chemical Industry, 2025, 54(61): 130–132.

[37] DUONG TN, NGUYEN NVT, HA PL, *et al*. Optimization of ultrasound-assisted extraction and quantification of rutin and quercetin in *Flos styphnolobii Japonici* imaturi by validated UHPLC-UV method [J]. Journal of Chemical Metrology, 2024, 18(2): 134–145.

[38] JAOUHARI Y, BORDIGA M, TRAVAGLIA F, *et al*. Microwave-assisted extraction of raspberry pomace phenolic compounds, and their bioaccessibility and bioactivity [J]. Food Chemistry, 2025, 478: 143641.

[39] MA RL, WU WG, SHU YK, *et al*. Simultaneous extraction and in situ separation of flavonoids and alkaloids from mulberry leaves using a pH-responsive deep eutectic solvent/ water system [J]. Food Chemistry, 2025, 473: 9.

[40] 童婧, 郭晓蓉, 房文亮, 等. 槐米中芦丁提取工艺研究[J]. 中外医疗, 2011, 30(26): 2.
TONG J, GUO XR, FANG WL, *et al*. Study on extraction process of rutin from *Sophora japonica* L. buds [J]. China Foreign Medical Treatment, 2011, 30(26): 2.

[41] GAŁUSZKA A, MIGASZEWSKI Z, NAMIEŚNIK J. The 12 principles of green analytical chemistry and the SIGNIFICANCE mnemonic of green analytical practices [J]. TrAC Trends in Analytical Chemistry, 2013, 50: 78–84.

[42] TAMKUT L, VAICEKAUSKAIT R, MELERO B, *et al*. Effects of chokeberry extract isolated with pressurized ethanol from defatted pomace on oxidative stability, quality and sensory characteristics of pork meat products [J]. LWT-Food Science Technology, 2021, 150(1-2): 111943.

[43] KAMARUDDIN MSH, CHONG G, UMANAN F, *et al*. Enhancement of 6-gingerol extraction from Bentong ginger using supercritical carbon dioxide [J]. Journal of $CO_2$ Utilization, 2023, 72: 102505.

[44] ALI MC, CHEN J, ZHANG HJ, *et al*. Effective extraction of flavonoids from *Lycium barbarum* L. fruits by deep eutectic solvents-based ultrasound-assisted extraction [J]. Talanta, 2019, 203: 16–22.

[45] ROMANINI EB, RODRIGUES LM, FINGER A, *et al*. Ultrasound assisted extraction of bioactive compounds from BRS violet grape pomace followed by alginate-$Ca^{2+}$ encapsulation-ScienceDirect [J]. Food Chemistry, 2020, 338: 128101.

[46] LIAUDANSKAS M, ZYMONE K, VISKELIS J, *et al*. Optimisation of the extraction of flavonoids from apples using response surface methodology [J]. Italian Journal of Food Science, 2018, 30(1): 89–101.

[47] ZHU J, KOU X, WU C, *et al*. Enhanced extraction of bioactive natural products using ultrasound-assisted aqueous two-phase system: Application to flavonoids extraction from jujube peels [J]. Food Chemistry, 2022, 395: 133530.

[48] ALMUSALLAM IA, AHMED IAM, BABIKER EE, *et al*. Optimization of ultrasound-assisted extraction of bioactive properties from date palm (*Phoenix dactylifera* L.) spikelets using response surface methodology [J]. LWT-Food Science and Technology, 2021, 140: 110816.

[49] YU L, MENG Y, WANG ZL, *et al*. Sustainable and efficient surfactant-based microwave-assisted extraction of target polyphenols and furanocoumarins from fig (*Ficus carica* L.) leaves [J]. Journal of Molecular Liquids, 2020, 318: 114196.

[50] XIE J, SHI L, ZHU X, *et al*. Mechanochemical-assisted efficient extraction of rutin from *Hibiscus mutabilis* L [J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2011, 12(2): 146–152.

[51] 王璐, 周讯, 王小琴, 等. 微波强化辅助提取新疆残次红枣中芦丁工艺研究[J] 中国果菜. 2023, 43(3): 49–54.
WANG L, ZHOU X, WANG XQ, *et al*. Optimization of microwave-assisted extraction of rutin from Xinjiang red jujube [J]. China Fruit and Vegetable, 2023, 43(3): 49–54.

[52] WANG G, CUI Q, YIN L J, *et al*. Efficient extraction of flavonoids from *Flos sophorae* Immaturus by tailored and sustainable deep eutectic solvent as green extraction media [J]. Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis, 2019, 170: 285–294.

[53] WANG W, XIAO SQ, LI LY, *et al*. Deep eutectic solvent-based microwave-assisted extraction for the extraction of seven main flavonoids from *Ribes mandshuricum* (Maxim.) Kom. leaves [J]. Separations, 2023, 10(3): 191.

[54] SOLANA M, BOSCHIERO I, DALL'ACQUA S, *et al.* A comparison between supercritical fluid and pressurized liquid extraction methods for obtaining phenolic compounds from *Asparagus officinalis* L [J]. Journal of Supercritical Fluids, 2015, 100: 201–208.

[55] MOGES A, BARIK CR, SAHOO L, *et al*. Optimization of polyphenol extraction from *Hippophae salicifolia* D. Don leaf using supercritical $CO_2$ by response surface methodology [J]. 3 Biotech, 2022, 12(11): 292.

[56] CHU QM, XIE SN, WEI HL, *et al*. Enzyme-assisted ultrasonic extraction of total flavonoids and extraction polysaccharides in residue from *Abelmoschus manihot* (L) [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2024, 104: 106815.

[57] XIAO X, ZHANG Y, SUN K, *et al*. Enzymatic and ultrasound assisted *β*-cyclodextrin extraction of active ingredients from *Forsythia suspensa* and their antioxidant and anti-inflammatory activities [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2024, 108: 106944.

[58] ZHAI K. Extraction, identification, and antioxidant activity of flavonoids from hylotelephium spectabile (Boreau) H. Ohba [J]. Foods, 2024, 13(17): 2652.

[59] YAO Q, SHEN Y, BU L. Ultrasound-assisted aque ous extraction of total flavonoids and hydroxytyrosol from olive leaves optimized by response surface methodology [J]. Preparative Biochemistry and Biotechnology, 2019, 49(9): 837–845.

[60] 董玲, 张凤菊, 籍子涵, 等. 苦荞黄酮提取工艺研究进展[J]. 食品研究与开发, 2025, 46(5): 212–217.
DONG L, ZHANG FJ, JI ZH, *et al*. Research progress on extraction methods of flavonoids from tartary buckwheat [J]. Food Research and Development, 2025, 46(5): 212–217.

[61] CHEMAT F, ROMBAUT N, SICAIRE AG, *et al*. Ultrasound assisted extraction of food and natural products. Mechanisms, techniques, combinations, protocols and applications. A review [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2017, 34: 540–560.

[62] RAJHA HN, BOUSSETTA N, LOUKA N, *et al*. Effect of alternative physical pretreatments (pulsed electric field, high voltage electrical discharges and ultrasound) on the dead-end ultrafiltration of vine-shoot extracts [J]. Separation Purification Technology, 2015, 146: 43–251.

[63] PHONG NV, GAO D, KIM JA. Optimization of ultrasonic-assisted extraction of α-glucosidase inhibitors from dryopteris crassirhizoma using artificial neural network and response surface methodology [J]. Metabolites, 2023, 13(4): 557.

[64] KHODDAMI A, WILKES M, ROBERTS T. Techniques for analysis of plant phenolic compounds [J]. Molecules, 2013, 18(2): 2328–2375.

[65] LÓPEZ-SALAZAR H, CAMACHO-DÍAZ BH, OCAMPO MLA, *et al*. Microwave-assisted extraction of functional compounds from plants: A review [J]. BioResources, 2023, 18(3): 6614–6638.

[66] 徐驰. 超声、微波辅助银杏叶多酚提取和纯化的数学研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2024.
XU C. Mathematical investigation about ultrasound and microwave-assisted extraction and purification of phenolics from *Ginkgo biloba* leaves [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2024.

[67] LIN D, MA Q, ZHANG Y, *et al*. Phenolic compounds with antioxidant activity from strawberry leaves: A study on microwave-assisted extraction optimization [J]. Preparative Biochemistry and Biotechnology, 2020, 50(9): 874–882.

[68] MRSAN A, NADPAL J, STUPAR A, *et al*. The perspectives of natural deep eutectic solvents in agri-food sector [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2020, 60(15): 2564–2592.

[69] FAN LH, FAN WX, MEI YQ, *et al*. Mechanochemical assisted extraction as a green approach in preparation of bioactive components extraction from natural products-A review [J]. Trends in Food Science and Technology, 2022, 129: 98–110.

[70] NURALIN L, GÜRÜ M, ÇETE S. Extraction and quantification of some valuable flavonoids from pinecone of *Pinus brutia* via Soxhlet and supercritical $CO_2$ extraction: A comparison study [J]. Chemical Papers, 2021, 75(10): 5363–5373.

[71] SRIDHAR A, PONNUCHAMY M, KUMAR PS, *et al*. Techniques and modeling of polyphenol extraction from food: A review [J]. Environmental Chemistry Letters, 2021, 19(4): 3409–3443.

[72] ESLAMI E, CARPENTIERI S, PATARO G, *et al*. A comprehensive overview of tomato processing by-product valorization by conventional methods versus emerging technologies [J]. Foods, 2023, 12(1): 166.

[73] PICOT-ALLAIN C, MAHOMOODALLY MF, AK G, *et al*. Conventional versus green extraction techniques-a comparative perspective [J]. Current Opinion in Food Science, 2021, 40: 144–156.

[74] AHMADKELAYEH S, HAWBOLDT K. Extraction of lipids and astaxanthin from crustacean by-products: A review on supercritical $CO_2$ extraction [J]. Trends in Food Science and Technology, 2020, 103: 94–108.

[75] TYSKIEWICZ K, KONKOL M, RÓJ E. The application of supercritical fluid extraction in phenolic compounds isolation from natural plant materials [J]. Molecules, 2018, 23(10): 2625.

[76] KLEIN EJ, NÁTHIA-NEVES G, VARDANEGA R, *et al*. Supercritical $CO_2$ extraction of *α*-/*β*-amyrin from uvaia (*Eugenia pyriformis* Cambess.): Effects of pressure and co-solvent addition [J]. Journal of Supercritical Fluids, 2019, 153: 104595.

[77] DAS S, NADAR SS, RATHOD VK. Integrated strategies for enzyme assisted extraction of bioactive molecules: A review [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2021, 191: 899–917.

[78] ŠTREIMIKYTĖ P, URBONAVIČIENĖ D, BALČIŪNAITIENĖ A, *et al*. Optimization of the multienzyme-assisted extraction procedure of bioactive compounds extracts from common buckwheat (*Fagopyrum esculentum* M.) and evaluation of obtained extracts [J]. Plants, 2021, 10(12): 2567.

[79] MARCHEL M, PRZYJAZNY A, BOCZKAJ G. First truly deep eutectic solvent (DES) based stationary phase for high-performance liquid chromatography (HPLC) [J]. Talanta, 2025, 292: 12.

[80] 邱月, 岳澳冬, 张建友. 基于超声辅助深共晶溶剂法的废弃虾蟹壳中虾青素高效提取[J]. 食品与发酵工业, 2025, 51(23): 277–285.
QIU Y, YUE AOD, ZHANG JY. Efficient extraction of astaxanthin from waste shrimp shells using ultrasound-assisted deep eutectic solvent method [J]. Food and Fermentation Industries, 2025, 51(23): 277–285.

[81] 李晓珺, 曹龙辉, 刘慧燕, 等. 深共晶溶剂结合超声波辅助提取南非叶总黄酮工艺优化及其抗氧化活性研究[J]. 食品科技, 2025, 50(4): 247–256.
LI XJ, CAO LH, LIU HY, *et al*. Ultrasound-assisted deep eutectic solvent extraction and antioxidant activity of flavonoids from *Vernonia amygdalina* leaves [J]. Food Science and Technology, 2025, 50(4): 247–256.

[82] WANG YJ, ZHANG YM, GU MX, *et al*. A green and efficient deep eutectic solvent for extracting total flavonoids from *Artemisiae scopariae* Herba (Yin Chen): Chemical characterization, antioxidant activity, and hepatoprotective effects, and mechanisms of action against liver injury [J]. Food Research International, 2025, 222: 18.

[83] UPPUGUNDLA N, ENGELBERTH A, RAVINDRANATH SV, *et al*. Switchgrass water extracts: Extraction, separation and biological activity of rutin and quercitrin [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2009, 57(17): 7763–7770.

[84] 郭乃妮, 杨建洲. 超声条件下碱提取酸沉淀法从槐米中提取芦丁的研究[J]. 应用化工, 2009, 38(2): 207–209.
GUO NN, YANG JZ. Study on ultrasonic condition alkali extraction and acid precipitation technology of rutin in sophora bud [J]. Applied Chemical Industry, 2009, 38(2): 207–209.

[85] MAI YH, ZHUANG QG, LI QH, *et al*. Ultrasound-assisted extraction, identification, and quantification of antioxidants from ‘jinfeng’ kiwifruit [J]. Foods, 2022, 11(6): 827.

[86] 李慧敏, 陈玲, 阳莹, 等. 黑果小檗果实中锦葵素-3-O-葡萄糖苷的分离纯化及安全性研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2024, 15(1): 303–313.
LI HM, CHEN L, YANG Y, *et al*. Isolation and purification of malvidin 3-O-glucoside from *Berberis heteropoda* Schrenk fruits and its safety studies [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2024, 15(1): 303–313.

[87] SINGH P, PANDEY VK, CHAKRABORTY S, *et al*. Ultrasound-assisted extraction of phytochemicals from green coconut shell: Optimization by integrated artificial neural network and particle swarm technique [J]. Heliyon, 2023, 9(12): e22438.

[88] WOUMBO CY, KUATE D, KLANG MJ, *et al*. Valorization of *Glycine max* (soybean) seed waste: optimization of the microwave-assisted extraction (MAE) and characterization of polyphenols from soybean meal using response surface methodology (RSM) [J]. Journal of Chemistry, 2021, 2021(1): 4869909.

[89] IACOPETTA D, BALDINO N, CARUSO A, *et al*. Nutraceuticals obtained by SFE-$CO_2$ from cladodes of two *Opuntia ficus-indica* (L.) mill wild in calabria [J]. Applied Sciences-Basel, 2021, 11(2): 477.

[90] KHAN WA, EL-RAYYES A, ARAIN MB, *et al*. Green, sustainable, and eco-friendly deep eutectic solvent-based microextraction approaches coupled with instrumental techniques: advantages, limitations, and challenges [J]. International Journal of Environmental Analytical Chemistry, 2025, 31. DOI: 10.1080/03067319.2025.2576526

[91] BUCAR F, WUBE A, SCHMID M. Natural product isolation-how to get from biological material to pure compounds [J]. Natural Product Reports, 2013, 30(4): 525–545.

[92] 杨发容, 景联鹏, 顾丽莉, 等. 色谱技术在黄酮类化合物分离纯化中的应用研究进展[J]. 食品与机械, 2021, 37(12): 202–208.
YANG FR, JING LP, GU LL, *et al*. Application progress of chromatographic technology in the separation and purification of flavonoids [J]. Food and Machinery, 2021, 37(12): 202–208.

[93] WANG C, WANG Y, QIN H, *et al*. Application of microfiltration membrane technology in water treatment [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2020, 571(1): 012158.

[94] SANTIAGO M, STROBEL S. Methods in enzymology [M]. San Diego: Elsevier Academic Press Inc, 2013.

[95] XUE HK, ZHA M, TANG YQ, *et al*. Research progress on the extraction and purification of anthocyanins and their interactions with proteins [J]. Molecules, 2024, 29(12): 2815.

[96] GUAN S, WANG Y, HU T, *et al*. Study on the selectivity of molecular imprinting materials determined through hydrogen bonding on template molecular structures of flavonoids [J]. 2024, 29(6): 1292.

[97] TONG SQ, YAN JZ, CHEN G, *et al*. Purification of rutin and nicotiflorin from the flowers of *Edgeworthia chrysantha* lindl. by high-speed counter-current chromatography [J]. Journal of Chromatographic Science, 2009, 47(5): 341–344.

[98] SUSANTI I, PRATIWI R, ROSANDI Y, *et al*. Separation methods of phenolic compounds from plant extract as antioxidant agents candidate [J]. Plants, 2024, 13(7): 965.

[99] 王峥, 秦源. 金槐芦丁聚酰胺树脂纯化工艺优化[J]. 食品与机械, 2018, 34(10): 169–173.
WANG Z, QIN Y. Purification of rutin from *Flos Sophora* [J]. Food and Machinery, 2018, 34(10): 169–173.

[100] QI YB, JIN XQ, YANG YP, *et al*. Rapid separation of representative monomer compound rutin from natural product by molecularly imprinted macroporous adsorption resin [J]. Journal of Separation Science, 2025, 48(1): e70085.

[101] MEI ZH, LI HF, LI TT, *et al*. Analysis of macroporous resin combined extraction and purification of polyphenols from *Agrimonia pilosa* Ledeb. and anti-tumor effect *in vitro* [J]. Molecules, 2025, 30(7): 20.

[102] 张嘉琼, 刘晨星, 曹艳, 等. 椪柑陈皮总黄酮大孔树脂纯化工艺优化及其体外活性分析[J]. 食品工业科技, 2025, 47(2): 1–18.
ZHANG JQ, LIU CX, CAO Y, *et al*. Optimization of macroporous resin purification process and *in vitro* activity study of total flavonoids from *Citrus reticulata cv.* ponkan peel [J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 47(2):1–18.

[103] CHEN FL, MO KL, LIU ZZ, *et al*. Ionic liquid-based vacuum microwave-assisted extraction followed by macroporous resin enrichment for the separation of the three glycosides salicin, hyperin and rutin from *Populus* bark [J]. Molecules, 2014, 19(7): 9689–9711.

[104] JUSZCZAK AM, ZOVKO-KONCIC M, TOMCZYK M. Recent trends in the application of chromatographic techniques in the analysis of luteolin and its derivatives [J]. Biomolecules, 2019, 9(11): 731.

[105] KOWALSKA T, SAJEWICZ M. Thin-layer chromatography (TLC) in the screening of botanicals-its versatile potential and selected applications [J]. Molecules, 2022, 27(19): 6607.

[106] YINGYUEN P, SUKRONG S, PHISALAPHONG M. Isolation, separation and purification of rutin from banana leaves (*Musa balbisiana*) [J]. Industrial Crops and Products, 2020, 149: 112307.

[107] LI YZ, ZHAO CY, LU C, *et al*. Simultaneous determination of 14 bioactive citrus flavonoids using thin-layer chromatography combined with surface enhanced Raman spectroscopy [J]. Food Chemistry, 2021, 338: 128115.

[108] ZHAO WQ, YANG G, ZHONG FY, *et al*. Isolation and purification of diastereoisomeric flavonolignans from silymarin by binary-column recycling preparative high-performance liquid chromatography [J]. Journal of Separation Science, 2014, 37(17): 2300–2306.

[109] CHEN T, LIU YL, ZOU DL, *et al*. Application of an efficient strategy based on liquid-liquid extraction, high-speed counter-current chromatography, and preparative HPLC for the rapid enrichment, separation, and purification of four anthraquinones from *Rheum tanguticum* [J]. Journal of Separation Science, 2014, 37(1-2): 165–170.

[110] DAI J, GU ZM, HONG SY, *et al*. Systematic and efficient isolation of flavonoids by MPLC combined with HPLC from *Polygonatum cyrtonema* leaves [J]. Separation Science Plus, 2025, 8(6): e70070.

[111] ZOU P, CHEN WT, XU Y, *et al*. Flavonoids from peony seed meal by nanofiltration membrane separation [J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2023, 2023(1): 5288151.

[112] SHAO SL, ZENG FX, LONG L, *et al*. Nanofiltration membranes with crumpled polyamide films: A critical review on mechanisms, performances, and environmental applications [J]. Environmental Science and Technology, 2022, 56(18): 12811–12827.

[113] ZHANG Q, LIU HL, SUN YM, *et al*. PA/APVC nanofiltration membrane from reactive positively charged substrate membrane [J]. Separation and Purification Technology, 2025, 354: 129027.

[114] LIU LL, LIN SH, XU XY, *et al*. Preference of negatively charged membranes in magnesium and lithium separation by nanofiltration [J]. Nature Communications, 2025, 16(1): 5731.

[115] 谢慧荣, 罗忠圣, 钱余, 等. 膜分离技术在天然产物中的应用[J]. 食品科技, 2021, 46(5): 104–107.
XIE HR, LUO ZS, QIAN Y, *et al*. Application of membrane separation technology in natural products [J]. Food Science and Technology, 2021, 46(5): 104–107.

[116] MA R, LI J, ZENG P, *et al*. The application of membrane separation technology in the pharmaceutical industry [J]. Membranes, 2024, 14(1): 24.

[117] MALLAKPOUR S, AZADI E. Nanofiltration membranes for food and pharmaceutical industries [J]. Emergent Materials, 2022, 5(5): 1329–1343.

[118] 陈玲, 李炳辉, 张志平, 等. 紫花杜鹃干燥嫩叶中黄酮类化合物的提取及膜分离纯化[J]. 食品科学, 2009, 30(24): 34–37.
CHEN L, LI BH, ZHANG ZP, *et al*. Extraction and purification of flavonoids from *Rhododendroni mariae* Hance [J]. Food Science, 2009, 30(24): 34–37.

(责任编辑: 蔡世佳 安香玉)