

中药挥发油高效提取新技术进展与发展趋势

赵美润^{1,2}, 江婉¹, 张瑶¹, 傅艺¹, 罗文宇¹, 张普照¹, 郑琴^{1,3}, 祁晓旭², 伍振峰^{1,2}, 岳鹏飞^{1,2*}

1. 江西中医药大学 现代中药制剂教育部重点实验室, 江西 南昌 330004

2. 华润江中药业股份有限公司 经典名方现代中药创制全国重点实验室, 江西 南昌 330004

3. 江西中医药大学 中药制药技术协同创新研究院, 江西 南昌 330004

摘要: 中药挥发油是中药发挥药效的重要物质基础之一, 其提取技术直接决定产品的药效、安全性与质量稳定性。然而, 传统提取方法普遍存在提取效率偏低、热敏性成分易破坏、有机溶剂残留等问题, 严重影响挥发油的品质与规模化应用。因此, 发展绿色高效的新型提取技术已成为推动该领域技术进步的关键方向。系统概述了溶剂萃取、水蒸气蒸馏等常规提取技术的应用现状及其固有局限, 论述了通过工艺参数优化、设备结构改进及结合超声、微波等物理场辅助技术提升传统方法效能的研究策略。同时, 总结了超临界流体提取、亚临界提取、超声辅助提取、微波辅助提取、离子液体提取及脉冲电场辅助提取等新兴技术的技术最新进展与研究概况。最后, 展望了多技术协同联用、绿色溶媒替代及智能调控系统构建等未来发展趋势, 为中药挥发油提取技术的创新与产业化应用提供参考。

关键词: 中药挥发油; 提取技术; 亚临界提取; 离子液体提取; 微波辅助提取

中图分类号: R283 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-2670(2026)18-7451-11

DOI: 10.7501/j.issn.0253-2670.2026.18.031

Research progress and development trend of new high-efficiency extraction technologies for volatile oils from traditional Chinese medicine

ZHAO Meirun^{1,2}, JIANG Wan¹, ZHANG Yao¹, FU Yi¹, LUO Wenyu¹, ZHANG Puzhao¹, ZHENG Qin^{1,3}, QI Xiaoxu², WU Zhenfeng^{1,2}, YUE Pengfei^{1,2}

1. Key Laboratory of Modern Preparation of TCM, Ministry of Education, Jiangxi University of Chinese Medicine, Nanchang 330004, China

2. State Key Laboratory of Classical and Famous Prescriptions for Modern Chinese Medicine Creation, China Resources Jiangzhong Pharmaceutical Co., Ltd., Nanchang 330004, China

3. Traditional Chinese Medicine Pharmaceutical Technology Collaborative Innovation Institute, Jiangxi University of Chinese Medicine, Nanchang 330004, China

Abstract: Volatile oil in traditional Chinese medicine (TCM) is one of the important material bases for TCM to exert pharmacological effects, and its extraction technology directly determines the efficacy, safety and quality stability of the product. However, traditional extraction methods generally have problems such as low extraction efficiency, susceptible degradation of heat-sensitive constituents, and organic solvent residues, which seriously affect the quality and large-scale application of volatile oils. Therefore, the development of green and efficient new extraction technologies has become a key direction to promote technological progress in this field. This paper systematically summarizes the application status and inherent limitations of conventional extraction technologies such as solvent extraction and steam distillation, and discusses the research strategies to improve the efficiency of traditional methods through process parameter optimization, equipment structure improvement, and combination of ultrasonic, microwave and other physics auxiliary technologies. At the same time, the latest technical progress and research overview of emerging technologies such as supercritical fluid extraction, subcritical extraction, ultrasound-assisted extraction, microwave-assisted extraction, ionic liquid extraction and pulsed electric field-assisted extraction are summarized. Finally, the future development trends of multi-technology collaboration, green

收稿日期: 2026-03-14

基金项目: 江西省重点研发计划重点项目 (20243BCC31010); 国家自然科学基金资助项目 (82474087); 江西省赣鄱英才计划 (gpyc20250055)

作者简介: 赵美润, 硕士研究生, 研究方向为中药新剂型与新技术。E-mail: zmr11202580@163.com

*通信作者: 岳鹏飞, 教授, 从事中药新剂型与新技术研究。E-mail: ypfpharm@126.com

solvent substitution and intelligent regulation system construction are prospected, providing references for the innovation and industrial application of TCM volatile oil extraction technologies.

Key words: volatile oil; extraction technology; subcritical extraction; ionic liquid extraction; microwave-assisted extraction

中药挥发油是解表药、理气药、芳香化湿药等多类中药发挥药效的核心物质基础,通常指从药用植物根、茎、叶等部位,经水蒸气蒸馏、超临界萃取等工艺分离得到的挥发性油状混合物,又称中药精油^[1-2],多以油滴形态储存于植物表皮油室、油管或油细胞中,部分与树脂共存于树脂道内^[3]。挥发油有芳香走窜特性,能发散表邪、温通经络^[4]。现代药理研究证实,中药挥发油具有独特的药用价值,如白术挥发油有效降低肿瘤坏死因子- α 、一氧化氮水平,使抗炎因子白细胞介素-10 水平升高,从而减轻胃溃疡的炎症反应^[5];香薷挥发油具有抗氧化、抗病毒、解热、抗炎等活性^[6];而薄荷、八角茴香等天然挥发油不仅具有显著的抗炎镇痛、抑菌等生物活性,同时兼具食品调味、药品矫味价值。

尽管中药挥发油应用价值巨大,然而中药挥发油的产业化发展仍面临显著的技术瓶颈,传统提取技术存在得率低、提取周期长、热敏性成分易破坏、有机溶剂残留等问题,严重制约了其在医药领域的规模化生产与应用。在此背景下,发展绿色、高效的新型提取技术,已成为推动该领域实现突破的关键路径。

为应对上述挑战,近年来亚临界提取、微波辅助提取、离子液体提取等一系列新兴技术因其高效、节能、环保等优势,正逐步从实验室走向产业化应用,展现出良好的发展态势。本文旨在总结梳理传统提取技术的局限与改进策略,重点阐述新型提取技术的原理、研究进展与影响因素,并对其未来发展趋势进行展望,为中药挥发油提取技术的创新与产业化提供参考依据。

1 传统挥发油提取技术的局限性

1.1 溶剂萃取法

溶剂萃取法依据“相似相溶”原理,常选用石油醚、甲醇等低沸点有机溶剂,通过回流或冷浸工艺实现挥发油成分的溶出,再经减压蒸馏脱除溶剂得到粗制挥发油。该方法操作简便、对挥发油溶解能力强、可在温和温度条件下进行提取,适用于含热不稳定成分的提取。然而,该技术以有机溶剂为提取介质的固有属性,易导致溶剂残留于产品中,不仅存在用药安全隐患,且对环境造成负担,与现

代制药工业的绿色生产要求相悖。此外,依据相似相溶原理,提取过程中药材中的油脂、叶绿素等脂溶性杂质会与挥发油共溶出,大幅增加后续分离纯化的难度与成本。

溶剂种类、液料比、提取温度与时间是影响提取效果的关键参数。涂招秀等^[7]在南方红豆杉茎叶挥发油的提取研究中,通过单因素与正交实验相结合得到最佳提取工艺:石油醚为提取溶剂,液料比 20:1、提取温度 45 °C、提取时间 150 min,在此条件下,红豆杉挥发油得率为 1.93%。姚雪峰等^[8]以内蒙古产艾草(蒙艾)为原料,正己烷为溶剂对蒙艾进行萃取,料液比 1:30,萃取温度 70 °C,萃取时间 2 h,萃取 3 次,挥发油产率为 4.67%,证实了该方法在特定原料提取中的适用性,但有机溶剂残留与杂质分离问题仍需进一步解决。

1.2 水蒸气蒸馏法

水蒸气蒸馏法基于道尔顿分压定律,利用高温水蒸气携带药材中的挥发性成分逸出,经冷凝分离获得挥发油。该技术早期主要用于天然香料提取,玫瑰精油的提取即其经典应用之一^[9]。Visakh 等^[10]利用该法从柚子皮中提取出具有抗菌活性的精油,为废弃物高值化利用提供了新路径。邵佳等^[11]采用水蒸气蒸馏法提取石菖蒲挥发油,通过气质联用技术鉴定出 β -细辛醚、甲基丁香酚等主要特征成分,同时系统分析了提取过程中挥发性成分在油相、水相中的差异化分布规律,进一步验证了该方法在中药挥发油提取领域的可靠性与适用性。

作为中药挥发油提取的常规技术,水蒸气蒸馏法凭借设备简单、操作简便、成本低廉及提取效率相对稳定等技术优势,仍是目前国内制药行业应用最广泛的提取方式^[12]。该技术的原理性固有局限导致其存在显著的应用瓶颈,核心问题及瓶颈成因分析如下:高温诱导的热敏性活性成分降解,是该工艺的核心原理性缺陷。水蒸气蒸馏法工艺本质为在近 100 °C 高温水相下长时间蒸馏提取过程,挥发油中烯醇、醛、酮类等热敏性成分在长时间高温下极易发生氧化、水解与异构化反应,易造成活性成分损失,进而导致中药药效显著降低。同时,高温环境会加速药材中多糖、蛋白质等大分子杂质溶出,

在油水体系中形成稳定胶体体系,引发严重乳化现象,不仅增加纯化难度与成本,还会引入杂质干扰,影响挥发油的纯度。因此,从工艺原理而言,传统水蒸气蒸馏法不适用于含热敏性活性成分的提取。其次,传质效率不足是制约提取效能的根本瓶颈。传统水蒸气蒸馏装置仅以水蒸气的自然扩散实现传质,药材内部的挥发油难以充分扩散至水相,从根源上限制了提取效率。依据 Fick 扩散定律与传质动力学分析,自然扩散过程体系浓度驱动力不足,且挥发油自药材胞内扩散至外部水相的传质阻力较大,导致其释放速率显著降低,最终表现为提取周期长、挥发油提取效率低等技术缺陷。

2 传统提取技术效能提升策略

传统提取技术虽然在中药挥发油提取生产中仍广泛应用,但在提取效能、能耗与环保性方面存在明显不足。近年来,研究者通过工艺参数优化、设备结构改良、辅助技术联用等策略,结合传热传质理论、流体力学原理及物理场作用机制,有效改善了传统方法的局限性,实现了提取效能的显著提升。

2.1 提取工艺优化

提取温度、时间、液料比、原料粉碎度等参数是影响挥发油得率与品质的关键变量。通过单因素实验、正交实验、响应面法等实验设计对参数进行协同优化,可在提升提取率的同时减少活性成分损失。张小飞等^[13]以当归为研究对象,开展了挥发油提取工艺优化与乳化芳香成分的相关性研究,通过优化提取工艺参数,确定最佳提取工艺为提取时间 8.55 h,料液比 1:10,浸泡时间 1.82 h,实现了当归挥发油的高效溶出与活性保留;同时深入探究了乳化体系中芳香成分的稳定性及组成分布特征,明确了工艺优化对提升挥发油得率、保障乳化芳香等制剂原料质量的双重作用,为中药挥发油类制剂的工艺开发与质量控制提供了新的研究思路与实践依据。

2.2 提取设备结构改良

传统提取设备在冷凝效率、蒸汽分布均匀性及油水分离效果等方面存在一定局限性,具体表现为提取罐与冷凝装置连接管路过长,易导致蒸汽过早冷凝,降低回流效率;罐内药材堆积不均匀,影响水蒸气均匀穿透;及传统冷凝与收集装置在油水分离过程中易发生乳化或分离不全,影响产品纯度。

为解决上述问题,张贵民等^[14]对传统挥发油收集装置进行防污染与流速控制方向的创新性改造:

增设过滤器以防止暴沸产生的液滴对产物造成污染;在收集装置内部设置螺旋式阻尼板,利用流体阻尼效应降低高速回流液冲击防乳化;在收集装置底部设置可控速排液阀,通过调控流速延长油水混合物分层时间,提升分离效率。

在低温高效提取设备改造方面,王学成等^[15]开发微波真空提取装置,通过集成真空冷凝系统与减速电机驱动转盘,强化药材与蒸汽的接触均匀性,避免微波局部过热,实现挥发油低温提取,有效减少热敏性成分降解,同步提高出油率与提取效率、降低能耗。

在冷凝装置改进方面,采用基于节流膨胀降温效应与蛇形冷凝管相结合的复合结构设计,能够显著提高冷凝效率。实验研究表明,该改良结构可使挥发油得率提升 11% 以上,尤其对低沸点成分具有更优的冷凝效果,同时还可减少 30%~50% 的冷凝水消耗,具有良好的节能潜力^[16]。

2.3 辅助提取技术联用

相比水蒸气蒸馏提取技术,超声、微波等辅助技术能够显著强化传质效率、降低提取过程所需的活化能,有效弥补传统方法在提取速率与得率方面的不足,缩短提取周期,全面提升中药挥发油的提取效能。超声辅助技术主要依靠超声波在液体介质中引发的空化效应与机械振动,促使植物细胞壁破裂,加速细胞内挥发油的释放与溶出,提高提取效率;微波辅助技术则是通过微波对细胞内极性分子的快速加热作用,使细胞内压迅速升高,导致细胞结构破裂,从而推动目标成分高效溶出;酶解技术则通过选择性降解细胞壁中的纤维素与半纤维素等结构组分,有效降低挥发油释放的传质阻力。而传统提取技术与上述辅助技术相结合,可通过超声、微波等物理场作用或生物酶催化机制破坏药材细胞壁结构、加速传质过程,从而实现“协同增效”。Yu 等^[17]采用中性纤维素酶辅助水蒸气蒸馏法所得龙脑油产率为 1.03%,与传统提取方法相比提高了 58%,证实酶解辅助技术的增效作用。

3 挥发油新兴提取技术研究

随着绿色化学的深入发展,亚临界提取、离子液体提取等新兴技术因具备高得率、低能耗且环保等核心优势,成为中药挥发油提取领域的研究热点。此类技术不同于水蒸气蒸馏等提取技术,为中药挥发油提取提供了多元化新型技术路径。研究证实,传统的冷压法适用于鲜柑类原料的挥发油提

取,可有效保留其中热敏性成分^[18];水蒸气蒸馏法提取的荆芥挥发油抗菌活性更强^[19];超声辅助法则可显著提升橙皮挥发油提取工艺效率^[20]。此外,研究表明,挥发油提取技术已不再局限于单一方法,原料预处理通过破坏挥发油储存腺体,提升挥发油的释放速率;目前,研磨、酶解、电流体处理等物理手段已被广泛用于香料原料的预处理过程,为后续提取效率的提升奠定了基础。

3.1 超临界流体提取技术

超临界流体提取技术以处于超临界状态的流体(如二氧化碳、丙烷、乙烷)为萃取剂,利用其高扩散性、低黏度、强溶解性的特性提取挥发油,是一种绿色高效的新兴提取技术^[21]。超临界流体的物理性质呈现“气-液双重性”:扩散系数接近气体,具有良好的流动性与传递性能,可快速渗透至药材的油室、油管等微观孔隙;同时又有类似液体的强溶解能力,通过范德华力、氢键等分子间作用力,可实现对挥发油中萜类、酚类、酯类等目标成分的选择性溶解。目前研究较多的是二氧化碳,因其临界温度低(31.1℃)、压力适中(7.38 MPa)、可近常温提取、无毒、不易燃、成本低且易与提取物分离无残留风险^[22]。

超临界流体提取效率主要受流体密度、萃取时间、压力、温度、及夹带剂等参数影响^[21,23]。不同参数组合直接影响挥发油得率与活性成分保留效率,现有研究已针对多种药用植物原料开展工艺优化及提取方法对比。如采用超临界CO₂提取香茅叶挥发油,通过响应面法优化工艺,确定最佳提取条件:萃取时间120 min、萃取压力25 MPa、萃取温度35℃、CO₂体积流量18 L/h,挥发油得率为4.40%^[24],进一步研究结果表明,其抗氧化活性显著

高于水蒸气蒸馏法产物,证实了超临界流体提取技术在保留香茅挥发油抗氧化活性成分方面具有明显优势。聚焦特定提取基质的提取效果,Zhang等^[25]对比了水蒸气蒸馏法与超临界CO₂提取樟树叶挥发油,结果显示:在25 MPa、45℃和2.5 h条件下超临界CO₂提取精油得率达4.63%,而水蒸气蒸馏法不足0.5%,进一步证实超临界提取技术在樟树叶挥发油提取中具有显著的得率优势。相较于单一超临界提取工艺,超临界提取与其他技术耦合的复合工艺已成为提升挥发油提取得率的重要方向。郭家刚等^[26]开展超临界CO₂联合分子蒸馏纯化生姜精油的工艺研究,当萃取压力24 MPa、萃取温度45℃、萃取时间2 h与分子蒸馏温度80℃时,得率达2.53%,显著高于水蒸气蒸馏法0.96%的得率,为生姜精油的高效提取提供了技术参考。

超临界流体提取技术在中药挥发油提取方面具有显著优势,但其在工业化应用过程中仍存在不可避免的技术障碍,导致工艺复杂性增加,且设备耐压要求高、成本高、不适用于高水分原料提取,目前主要用于檀香、沉香和龙涎香等珍贵天然原料中高价值挥发油的提取。无溶剂微波辅助预处理与超临界流体提取的结合,代表了一种前沿的环保高效提取方法^[27]。此外,超声辅助、酶增强处理、分子蒸馏等方法均可作为辅助技术手段,相关技术的集成模式见图1。

3.2 亚临界提取技术

亚临界状态指物质处于压力高于其临界压力但温度低于其临界温度,或压力低于临界压力而温度高于临界温度的状态。该技术核心装置与超临界提取技术类似,但突破了超临界提取技术高压运行的局限,是一种工艺条件温和且高效环保的新型提取

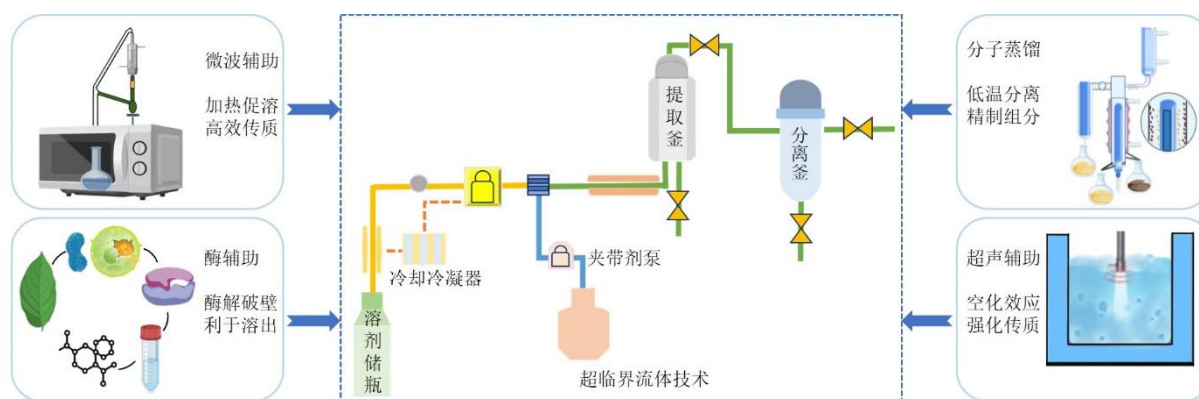


图1 超临界流体提取常用联用技术示意图

Fig. 1 Schematic diagram of commonly used combined technologies for supercritical fluid extraction

技术^[28] (图 2)。该技术可显著避免热敏性成分在提取过程中的损失,有效保留天然产物的生物活性与原品质,具备低温、低压、耗时短、运行成本低、无溶剂残留等综合优势。亚临界水是该技术中应用最广泛的提取介质,指在 100~374 ℃内,施加一定压力以维持液态的水,其性质介于液态水与气态水之

间,具有低介电常数与高离子积的独特物理化学特征^[29]。低介电常数使亚临界水对非极性或弱极性挥发油成分表现出良好的溶解能力,有助于目标成分的高效溶出;高离子积则赋予其一定的催化活性,可促进细胞壁中纤维素与半纤维素的水解,从而破坏细胞结构、加速挥发油释放,进一步提高提取效率。

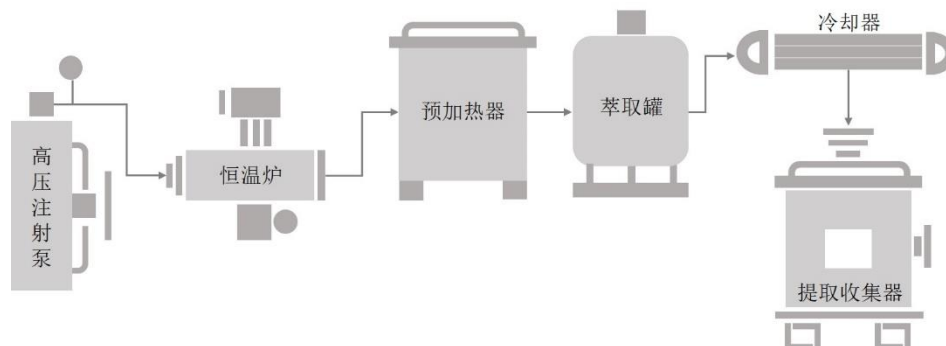


图 2 亚临界水萃取工艺示意图

Fig. 2 Schematic diagram of subcritical water extraction process

在亚临界提取挥发油过程中,提取温度、时间、压力、流体种类、料液比及夹带剂等是影响提取效率与挥发油品质的关键因素^[30],不同亚临界流体(如丙烷、丁烷、二氧化碳等)的极性与溶解性存在差异,需根据目标挥发油的化学成分特性选择,夹带剂可调节流体的极性,显著影响最终提取产物的得率、纯度及活性保留率。Liu 等^[31]在 182 ℃亚临界水体系中提取了具有优异抗氧化活性的佛手精油,与传统水蒸气蒸馏法相比,实现了提取时长缩减与能耗成本降低,具有节能环保的显著优势。沈汝青等^[32]通过亚临界流体 [1,1,1,2- 四氟乙烷 (R134a)] 提取沉香挥发油,考察了料液比、提取压力、温度、时间以及乙醇体积分数对得率的影响,发现最佳提取条件为:料液比 1:30,提取时间 6 h,提取压力 1.55 MPa,提取温度 60 ℃,乙醇体积分数 80%,挥发油提取率可达 (3.77±0.21) %。此外,该技术还可用于糖苷、木脂素、有机酸、生物碱等多种天然产物成分的提取^[33]。

亚临界提取技术已成为植物源目标化合物提取的优选方法,在食品与制药行业具有广阔的应用前景(表 1)。该技术应用广泛、能耗低、操作条件温和,但对高极性成分溶解能力有限。

3.3 超声辅助提取技术

超声辅助是一种典型的强化浸提技术,利用超声波在液体介质中产生的空化效应、机械振动及介质摩擦产生的温和热效应,促使细胞壁破碎,加速

表 1 亚临界水在挥发油提取中的应用

Table 1 Application of subcritical water extraction technology in volatile oil extraction

天然产物	提取条件	提取成分	文献
肉桂	130 ℃、10 min	肉桂醛	34
黑胡椒	每 10 min 170 ℃、每 15 min 200 ℃	β-石竹烯、柠檬烯	35
芫荽	100 ℃、10 min、60 bar	多酚、精油	36
生姜	130 ℃、20 min、10 mL·g ⁻¹	精油、姜烯酚	37
薄荷	220 ℃、5 min	精油	38

挥发油成分从细胞内释放并充分溶解于溶剂。

溶剂的极性与沸点直接影响挥发油成分的溶解速率,并且对产物纯度产生关键影响。因此,溶剂选择需遵循“相似相溶”原则,同时优先选用低共熔溶剂、乙醇水溶液等绿色溶剂,实现提取效能与安全环保的协同优化。杨妞妞等^[39]以甜菜碱-甘油(物质的量比 4:3)低共熔溶剂为提取介质,结合超声辅助技术提取瓜蒌籽挥发油,得率达 9.24%,构建了高效提取体系。超声预处理可通过空化效应强化水相体系中挥发油的传质过程,王娟等^[40]采用响应面法优化超声辅助水蒸气蒸馏法提取肉豆蔻挥发油,在液料比 15:1、超声时间 21 min、超声功率 181 W、提取时间 129 min 的最佳条件下,肉豆蔻挥发油得率达 13.387%,与模型预测值高度吻合。

超声辅助提取技术具备提取速度快、设备成本低、操作简便、可联用绿色溶剂等优势,但存在超

声能量分布不均的问题,大规模生产需配备多探头设备。

3.4 微波辅助提取技术

微波辅助技术自 20 世纪 80 年代起被用于中药有效成分的提取,该技术克服了药材细粉易凝聚、易焦化的弊端,利用微波介电加热与选择性加热特性,使药材细胞极性分子吸收能量产生高频振动,细胞内温压升高、细胞壁破损形成“微通道”,降低挥发油向溶剂扩散阻力,加速溶剂渗透与成分溶出,从而实现挥发油的高效提取。该技术核心优势为提取速度快、得率高、整个过程较经济,且无需使用有机溶剂,可避免溶剂残留引发的恶臭异味与皮肤刺激性问题^[41],适用于多数中药材挥发油的提取,尤其对富含极性分子的新鲜药材。

在微波辅助提取挥发油工艺中,微波功率、辐射时间、溶剂极性、原料含水率等是影响提取效果的关键参数。不同物种需根据原料特性设定最佳微波功率;微波辐射时间过长会导致热效应累积,破坏挥发油热敏性成分化学完整性;功率过高易造成提取体系温度骤升,影响挥发油冷凝回收;功率过低则会延长提取周期。针对这一技术的应用效果,已有多项研究展开验证:在提取效率提升方面,Wang 等^[42]采用无溶剂微波提取肉桂精油,得率较传统蒸馏法提高了 12.35%,且精油中含氧萜类化合物的含量随微波功率的增加呈上升趋势;类似地,Wei 等^[43]利用微波辅助提取指香椽,挥发油得率提高 27.91%。除效率提升外,微波辅助方法在选择性提取与成分保留方面也显示出优势。李欠等^[44]通过对比水蒸气蒸馏法、微波辅助水蒸气蒸馏法、低共熔溶剂辅助微波水蒸气蒸馏法提取独活挥发油的效果,并结合网络药理学预测其质量标志物(quality marker, Q-Marker),发现低共熔溶剂辅助微波水蒸气蒸馏法的得率约为传统水蒸气蒸馏法的 2 倍,而微波水蒸气蒸馏法产物中 Q-Marker 含量最高,由此推测该提取方法对独活挥发油中特征性活性成分的提取效能更优。

3.5 离子液体提取技术

离子液体是熔点低于 100 °C 的熔融盐类物质,在替代传统有机溶剂方面展现出诸多优势:具备低挥发性、高热稳定性与化学稳定性;对有机化合物和生物聚合物具有优异溶解性^[45],这些特性使其成为符合绿色化学理念的新型绿色溶剂。

离子液体的阴阳离子类型与结构是影响提取

效率的根本因素,其中阳离子结构(咪唑类、吡啶类、季铵盐类)决定离子液体极性、溶解性及与挥发油成分的相互作用。Franco-Vega 等^[46]研究发现同系列离子液体辅助微波提取橙皮挥发油,随烷基链长度增加可显著提升挥发油提取效率;此外,萃取时间、温度、离子液体浓度及体系 pH 值也通过影响传质动力学过程、溶剂溶解度及目标成分的化学形态影响提取效果^[47]。在工艺优化方面,离子液体与水体系的协同作用也受到关注。唐一梅等^[48]以 1-烷基-3-甲基咪唑类离子液体为辅助溶剂,结合水蒸汽蒸馏法提取石菖蒲挥发油,系统考察了离子液体-水体系中离子液体种类、配比及添加方式对提取效果的影响,发现 1-辛基-3-甲基咪唑溴离子液体([OMIM]Br)辅助效果最佳,当 [OMIM]Br 与水体积比为 1:20 时,挥发油提取率可达 3.95%,成功建立了离子液体辅助提取石菖蒲挥发油的优化工艺条件。

离子液体提取技术具有热稳定性好、可设计性强等优势,但成本较高、部分生物降解性差、回收工艺复杂。

3.6 脉冲电场辅助提取技术

脉冲电场辅助提取是一种基于非热物理作用的先进新型提取技术,利用高场强、短脉冲的电场处理药材,诱导细胞产生电穿孔效应,破坏细胞膜的完整性与结构稳定性,以促进挥发油高效溶出。该技术的非热加工特性,能最大限度减少传统加热工艺的有害影响,有效抑制植物源性成分和油脂的热降解^[49]。

脉冲电场辅助提取效能主要受电场参数、溶剂特性与提取温度的协同调控。电场强度直接影响细胞穿孔效率,场强过低,难以在药材细胞膜上形成有效孔道,场强过高则易导致药材局部过热或电击穿现象;脉冲宽度与频率需匹配调节,通常宽度越大、频率越高,电穿孔效应越强,但能耗同步升高;溶剂需具备良好导电性以保障电场均匀分布,实现高效电穿孔,水、乙醇水溶液可作为该技术的适配溶剂,石油醚等非极性溶剂因导电性差不适用于该提取体系;提取温度通常控制在室温至 40 °C,过高温度可能干扰电穿孔效应的稳定性,降低提取效率。

目前,该技术已用于薄荷^[50]、高良姜^[51]等中药挥发油的提取研究。Barros 等^[52]采用高压脉冲电场预处理结合水蒸气蒸馏法,提取桉树、迷迭香和百里香叶精油,结果显示,预处理 30 min 后,桉树、

迷迭香精油提取率分别提高约 17%、11%，且桉树精油中总酚含量更高，百里香叶的提取率也较传统方法提升 40%。Gu 等^[53]研究证实，脉冲电场预处理可强化阳春砂叶挥发油的提取效果，在电场强度 0.64 kV/cm、脉冲次数 284 次、料液比 1：6 的工艺

条件下提取，挥发油得率为传统水蒸气蒸馏法的 1.32 倍；所得挥发油富含萜类及含氧萜类物质，可通过破坏致病菌细胞膜完整性发挥良好抑菌活性。
中药挥发油新兴提取技术分析与应用实例见表 2。

Table 2 Analysis and application examples of novel extraction technologies for traditional Chinese medicines volatile oil					
技术名称	核心原理	关键影响因素	典型应用	主要优点	局限性
超临界流体提取	超临界流体高选择性溶解挥发油	流体密度；萃取时间；原料粉碎度；夹带剂	香茅叶精油：得率 4.40% ^[24] ；联合分子蒸馏，生姜精油得率达 2.53% ^[26]	低温提取，热敏性成分保留好；无溶剂残留；选择性强；环保	设备耐压要求高、成本高；不适用于高水分原料
亚临界提取	亚临界流体破坏细胞壁溶解挥发油	流体介电常数；萃取时间、压力；料液比；夹带剂	佛手精油：182 ℃，得率 4.36% ^[31]	能耗低；操作条件温和；可回收溶剂	对高极性成分溶解能力有限；需高压设备
超声辅助提取	超声波空化破坏细胞壁，加速传质	超声功率、频率、时间；溶剂种类；原料粉碎度、含水率	瓜蒌籽挥发油：低共熔溶剂，得率 9.24% ^[39] ；肉豆蔻挥发油：得率 13.387% ^[40]	提取速度快；设备成本低；操作简便；可联用绿色溶剂	超声能量分布不均；大规模生产需多探头设备
微波辅助提取	微波选择性加热致细胞壁破裂	微波功率、时间；溶剂极性、浓度；原料含水率	香橼挥发油：得率提高 27.91% ^[43]	提取速度极快；能耗低；选择性强	依赖极性溶剂；易局部过热
离子液体提取	离子液体溶解细胞壁释放挥发油	离子液体结构、浓度；提取温度、时间	石菖蒲挥发油：得率 3.95% ^[48]	无溶剂挥发；热稳定性好；可设计性强	离子液体成本高；部分生物降解性差；回收工艺复杂
脉冲电场辅助提取	高场强脉冲致细胞膜电穿孔促进挥发油释放	电场强度、脉冲宽度、频率；溶剂种类、料液比	桉树精油：挥发油得率提高 17% ^[52] ；白蒿精油：仅 30 min，挥发油得率达 2.05%，是传统提取技术的 3 倍 ^[53]	非热提取，活性保留好；处理时间短；能耗低	需高压脉冲设备、成本高；依赖溶剂导电性

4 中药挥发油提取技术未来的发展趋势

在现代提取分离技术革新驱动下，中药挥发油提取技术正向高效、绿色、智能和多功能化方向加速发展。当前，各类单一提取技术在应用中普遍存在作用机制局限、难以兼顾提取效率、产品质量与成本的核心痛点，因此，整合不同提取技术的优势特性，建立协同联用技术体系，已成为提升中药挥发油整体提取效能、突破现有技术瓶颈的重要发展趋势（图 3）。

4.1 多技术协同，从单一提取到体系化集成

传统提取方法因作用机制单一，难以同时实现高得率、高活性保留与低能耗的平衡。通过多种提取技术的有机结合，可发挥各自优势、弥补不足，实现提取效果的协同增强。如微波-超声协同提取技术融合了微波的快速整体加热与超声的局部空化破碎作用，不仅能显著缩短提取时间，还可有效提高挥发油得率，尤其适用于细胞结构致密的药材。超临界流体提取与分子蒸馏联用技术，则先以超临

界流体实现温和高效提取，再通过分子蒸馏进行精细分离，在维持高提取率的同时大幅提升目标成分纯度，为高附加值挥发油的精准制备提供了可靠路径。因此，多提取技术集成体系正逐步成为复杂基质中挥发油提取的重要发展方向。

4.2 绿色溶媒替代，推动提取工艺可持续发展

传统有机溶剂提取工艺存在溶剂残留、环境负荷高、安全性差等原理性缺陷，难以适配现代中药工业绿色低碳与质量可控的发展要求，因此，绿色溶媒替代已成为推动中药提取行业转型升级、实现可持续发展的核心技术引擎。低共熔溶剂和离子液体因其结构可设计、溶解性强、挥发性低、可循环使用等特点，可针对不同挥发油组分定制溶媒极性，实现靶向选择性提取。该类溶媒在川芎、薄荷等多种药材挥发油的高效提取中已展现出良好应用潜力，溶剂回收率可达 90%以上，大幅降低了环境负担，有助于推动中药提取工艺向清洁化、可持续方向转型。超临界 CO₂、亚临界水等超临界/亚临

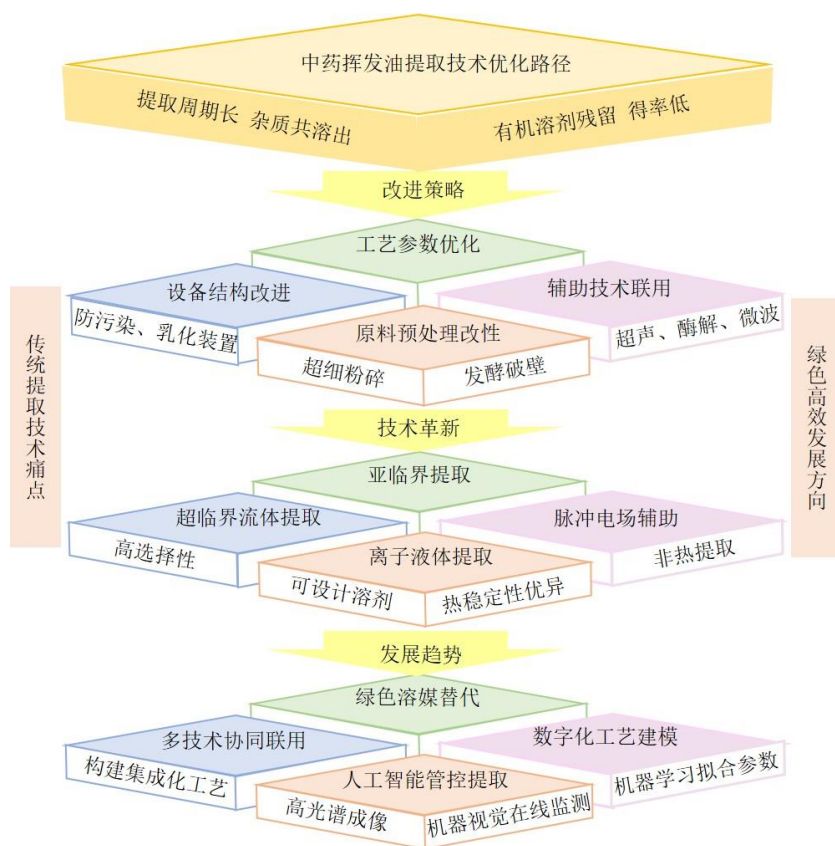


图 3 中药挥发油提取技术发展趋势示意图

Fig. 3 Schematic diagram of development trends for traditional Chinese medicines volatile oil extraction technologies

界流体技术,兼具高渗透性、无溶剂残留、提取条件温和等优势,可完全规避有机溶剂残留风险,特别适用于热敏性挥发油成分的提取,是绿色提取技术的核心发展方向。

4.3 人工智能融合,实现提取过程的精准管控

随着智能制造与过程分析技术在中药领域的深度应用,中药挥发油提取正逐步向数字化、智能化方向发展。通过机器学习、深度学习等人工智能算法,可对药材基原、产地、粒度、含水率等原料属性,及提取温度、时间、液料比、功率等多源工艺参数进行深度关联分析,构建药材特性、工艺条件与提取效能之间的预测模型,实现提取工艺的动态优化与自适应调控。深度学习可通过模拟人脑神经网络结构完成特征提取与信息筛选,大幅降低人工预处理成本。高光谱成像、机器视觉及图像识别等智能感知技术为提取过程实时状态监控提供了新途径。该类技术可同步获取图像形态与光谱特征,结合卷积神经网络、支持向量机、随机森林等算法,对提取过程中中药挥发油分散状态、油水界面形态、乳化程度、浊度等关键指标实现精准识别与

量化监测。结合近红外光谱等多模态感知技术,可进一步实现提取状态、组分变化及油水分离效率的实时感知与动态调控。将人工智能预测模型、多模态智能感知系统与可编程逻辑控制器深度融合,可构建“智能感知+智能决策+精准执行”的闭环控制系统,对提取压力、温度、时间、流速等关键参数进行自适应调控,为实现中药挥发油提取向高效化、标准化、智能化驱动提供关键技术支撑。

5 结语与展望

中药挥发油是中药的重要药效物质,其提取技术的革新对推动中药产业现代化具有关键意义。当前,溶剂萃取、水蒸气蒸馏等传统方法在实际应用中仍面临提取效率偏低、受热时间长、热敏成分易破坏等问题,难以完全满足高质量、规模化生产的需求。相比之下,超临界流体提取、亚临界提取、离子液体提取等现代绿色技术,在提取效率、活性保留和环境友好性等方面展现出显著优势,为中药挥发油的精细化提取提供了多样化的技术路径。

展望未来,绿色高效提取技术的规模化应用前景广阔,但需进一步通过设备成本控制、工艺稳定

性提升与系统集成优化,以适应产业化连续生产的要求。中药挥发油提取技术将朝着以下方向持续发展:一是深化多技术协同联用,构建高效集成的提取技术体系;二是推动绿色提取溶媒向低成本、高生物相容性方向创新;三是加强智能调控系统的通用化与精准化建设,实现工艺过程的智慧管控。通过持续优化工艺体系与核心设备性能,中药挥发油提取技术有望加速实现工业化应用与产业升级,为中医药高质量发展提供可靠的技术支撑。

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突

参考文献

- [1] Tian B R, Liu J Y, Yang W, *et al.* Biopolymer food packaging films incorporated with essential oils [J]. *J Agric Food Chem*, 2023, 71(3): 1325-1347.
- [2] 陈军, 何天雨, 燕妮, 等. 基于药性特征的中药挥发油透皮促渗“热者易效”规律与机制 [J]. *中草药*, 2024, 55(20): 7144-7154.
- [3] 王晓禹, 吴国泰, 杜丽东, 等. 中药挥发油新型制剂及其质量控制的研究现状 [J]. *中国药房*, 2021, 32(20): 2551-2555.
- [4] 齐明月, 郭红叶, 谢晨琼, 等. 基于指南/教材研究经典咳嗽治疗方的药味配伍规律 [J]. *世界科学技术—中医药现代化*, 2025(9): 2654-2665.
- [5] Li L, Du Y Y, Wang Y, *et al.* Atractylone alleviates ethanol-induced gastric ulcer in rat with altered gut microbiota and metabolites [J]. *J Inflamm Res*, 2022, 15: 4709-4723.
- [6] 吴婷婷, 杜清, 余欣然, 等. 香薷挥发油化学成分及药理活性研究进展 [J]. *中成药*, 2025, 47(5): 1574-1581.
- [7] 涂招秀, 付建平, 饶玉喜, 等. 有机溶剂法提取南方红豆杉茎叶中挥发油的工艺研究 [J]. *江西科学*, 2018, 36(6): 916-918.
- [8] 姚雪峰, 洪海龙, 石俊庭, 等. 有机溶剂法和超临界CO₂萃取法提取蒙艾挥发油的对比研究 [J]. *广州化工*, 2020, 48(23): 55-57.
- [9] Aziz Z A A, Ahmad A, Setapar S H M, *et al.* Essential oils: Extraction techniques, pharmaceutical and therapeutic potential—A review [J]. *Curr Drug Metab*, 2018, 19(13): 1100-1110.
- [10] Visakh N U, Pathrose B, Narayanankutty A, *et al.* Utilization of pomelo (*Citrus maxima*) peel waste into bioactive essential oils: Chemical composition and insecticidal properties [J]. *Insects*, 2022, 13(5): 480.
- [11] 邵佳, 邹俊波, 史亚军, 等. GC-MS 分析水蒸气蒸馏法提取石菖蒲挥发油过程中油水分分配规律 [J]. *中草药*, 2020, 51(1): 59-66.
- [12] 马贝娜, 白昀川, 宋萍, 等. 中药挥发油提取精制技术研究进展 [J]. *中华中医药杂志*, 2022, 37(11): 6606-6610.
- [13] 张小飞, 詹娟娟, 吴司琪, 等. 当归挥发油提取工艺优化及其乳化芳香水成分分析 [J]. *中国实验方剂学杂志*, 2017, 23(5): 27-31.
- [14] 张贵民, 王永刚, 纪红英, 等. 高效挥发油提取设备: 中国, CN113845980B [P]. 2025-01-14.
- [15] 王学成, 伍振峰, 杨明, 等. 中药挥发油微波真空提取装置及提取方法: 中国, CN117025302A [P]. 2023-11-10.
- [16] 张贵民, 李艳芳, 范建伟, 等. 一种新型挥发油提取器: 中国, CN212357185U [P]. 2021-01-15.
- [17] Yu H, Ren X N, Liu Y L, *et al.* Extraction of *Cinnamomum camphora* chvar. Borneol essential oil using neutral cellulase assisted-steam distillation: Optimization of extraction, and analysis of chemical constituents [J]. *Ind Crops Prod*, 2019, 141: 111794.
- [18] Park M K, Cha J Y, Kang M C, *et al.* The effects of different extraction methods on essential oils from orange and tangor: From the peel to the essential oil [J]. *Food Sci Nutr*, 2024, 12(2): 804-814.
- [19] He L H, Zhang L J, Bai X. Comparison of three different extraction methods on *Schizonepeta tenuifolia* (Benth.) briq essential oil: Chemical constituents and *in vitro* and *in silico* biological activities [J]. *Chem Biodivers*, 2025, 22(2): e202401964.
- [20] Bodea I M, Baenas-Soto A B, Garre A, *et al.* Enhancing essential oil extraction from orange peels using ultrasound-assisted hydro-distillation: A sustainable approach [J]. *J Clean Prod*, 2026, 552: 147980.
- [21] Uwineza P A, Waśkiewicz A. Recent advances in supercritical fluid extraction of natural bioactive compounds from natural plant materials [J]. *Molecules*, 2020, 25(17): 3847.
- [22] Bin Nabi M H, Ahmed M M, Mia M S, *et al.* Essential oils: Advances in extraction techniques, chemical composition, bioactivities, and emerging applications [J]. *Food Chem Adv*, 2025, 8: 101048.
- [23] Arumugham T, Rambabu K, Hasan S W, *et al.* Supercritical carbon dioxide extraction of plant phytochemicals for biological and environmental applications—a review [J]. *Chemosphere*, 2021, 271: 129525.
- [24] Wu H, Li J L, Jia Y, *et al.* Essential oil extracted from *Cymbopogon citronella* leaves by supercritical carbon dioxide: Antioxidant and antimicrobial activities [J]. *J Anal Meth Chem*, 2019, 2019(1): 8192439.
- [25] Zhang H X, Huang T, Liao X N, *et al.* Extraction of

- camphor tree essential oil by steam distillation and supercritical CO₂ extraction [J]. *Molecules*, 2022, 27(17): 5385.
- [26] 郭家刚, 杨松, 伍玉菡, 等. 超临界萃取结合分子蒸馏纯化生姜精油及其挥发性成分分析 [J]. 食品与发酵工业, 2024, 50(3): 224-231.
- [27] Liu Z Z, Zu Y G, Yang L. A process to preserve valuable compounds and acquire essential oils from pomelo flavedo using a microwave irradiation treatment [J]. *Food Chem*, 2017, 224: 172-180.
- [28] Zhang Y, Hawboldt K, MacQuarrie S. Extraction of bioactive compounds from beach-cast brown algae: A review on accelerated solvent extraction and subcritical water extraction [J]. *RSC Sustain*, 2024, 2(8): 2069-2091.
- [29] Somat H A, Thani N M, Mustapha W A W, *et al.* Subcritical water extraction of bioactive compounds from plant materials: Recent advances [J]. *J Future Foods*, 2026, 6(5): 753-764.
- [30] Samadi M, Zainal Abidin Z, Yoshida H, *et al.* Towards higher oil yield and quality of essential oil extracted from *Aquilaria malaccensis* wood via the subcritical technique [J]. *Molecules*, 2020, 25(17): 3872.
- [31] Liu J Y, Li L, Wu W, *et al.* Green extraction of active ingredients from finger citron using subcritical water and assessment of antioxidant activity [J]. *Ind Crops Prod*, 2023, 200: 116821.
- [32] 沈汝青, 朱力, 冯志豪, 等. 亚临界流体萃取沉香挥发油工艺的优化及精制精油测定 [J]. 中成药, 2019, 41(7): 1495-1501.
- [33] Cheng Y, Xue F M, Yu S, *et al.* Subcritical water extraction of natural products [J]. *Molecules*, 2021, 26(13): 4004.
- [34] Lim S H, Ko M J. Extraction characteristics and hydrolysis of flavoring compounds of cinnamon (*Cinnamomum zeylanicum*) under subcritical-water conditions [J]. *Food Chem*, 2022, 388: 133029.
- [35] Lee H Y, Ko M J. Thermal decomposition and oxidation of β -caryophyllene in black pepper during subcritical water extraction [J]. *Food Sci Biotechnol*, 2021, 30(12): 1527-1533.
- [36] Zeković Z, Kaplan M, Pavlić B, *et al.* Chemical characterization of polyphenols and volatile fraction of coriander (*Coriandrum sativum* L.) extracts obtained by subcritical water extraction [J]. *Ind Crops Prod*, 2016, 87: 54-63.
- [37] Endy Yulianto M, Paramita V, Amalia R, *et al.* Production of bioactive compounds from ginger (*Zingiber officinale*) dregs through subcritical water extraction [J]. *Mater Today Proc*, 2022, 63: S188-S194.
- [38] Chiou T Y, Nomura S, Konishi M, *et al.* Conversion and hydrothermal decomposition of major components of mint essential oil by small-scale subcritical water treatment [J]. *Molecules*, 2020, 25(8): 1953.
- [39] 杨妞妞, 谢智锋, 吕丹, 等. 超声辅助低共熔溶剂提取瓜蒌籽挥发油工艺优化及其抗氧化活性研究 [J]. 天然产物研究与开发, 2025, 37(7): 1310-1321.
- [40] 王娟, 袁绍莉, 王丹. 超声辅助水蒸气蒸馏法提取肉豆蔻挥发油及其抗氧化活性研究 [J]. 粮食与油脂, 2022, 35(9): 81-85.
- [41] Yingngam B, Navabhatra A, Brantner A. Increasing the essential oil yield from *Shorea roxburghii* inflorescences using an eco-friendly solvent-free microwave extraction method for fragrance applications [J]. *J Appl Res Med Aromat Plants*, 2021, 24: 100332.
- [42] Wang Z H, Zhao R, Gao H F, *et al.* Solvent-free microwave extraction of essential oil and hydrosol from fresh leaves of *Cinnamomum burmannii* (Nees et T. Nees) Blume after screw extrusion treatment and evaluation of pancreatic lipase inhibitory activities *in vitro* compared to its main components [J]. *Ind Crops Prod*, 2023, 202: 116983.
- [43] Wei L, Yu X X, Li H, *et al.* Optimization of solvent-free microwave extraction of essential oil from the fresh peel of *Citrus medica* L. var. *arcodactylis* Swingle by response surface methodology, chemical composition and activity characterization [J]. *Sci Hort*, 2023, 309: 111663.
- [44] 李欠, 尹转霖, 丁小琴, 等. 独活挥发油低共熔溶剂辅助微波水蒸气蒸馏法提取及质量标志物 (Q-Marker) 研究 [J]. 中草药, 2024, 55(4): 1167-1177.
- [45] Usuki T, Munakata K. Extraction of essential oils from the flowers of *Osmanthus fragrans* var. *aurantiacus* using an ionic liquid [J]. *Bull Chem Soc Jpn*, 2017, 90(10): 1105-1110.
- [46] Franco-Vega A, López-Malo A, Palou E, *et al.* Effect of imidazolium ionic liquids as microwave absorption media for the intensification of microwave-assisted extraction of *Citrus sinensis* peel essential oils [J]. *Chem Eng Process Process Intensif*, 2021, 160: 108277.
- [47] 鲁鹏, 程伟琴, 冯明, 等. 离子液体在萃取-火焰原子吸收分光光度法测定水中痕量铜的应用 [J]. 化学工程师, 2020, 34(9): 81-84.
- [48] 唐一梅, 张博, 房海娜, 等. 离子液体辅助提取石菖蒲挥发油的工艺研究 [J]. 西北大学学报: 自然科学版, 2018, 48(3): 393-398.
- [49] Ranjha M M A N, Kanwal R, Shafique B, *et al.* A critical review on pulsed electric field: A novel technology for the extraction of phytoconstituents [J]. *Molecules*, 2021,

- 26(16): 4893.
- [50] Sadowska U, Matwiczuk A, Niemczynowicz A, *et al.* Spectroscopic examination and chemometric analysis of essential oils obtained from peppermint herb (*Mentha piperita* L.) and caraway fruit (*Carum carvi* L.) subjected to pulsed electric fields [J]. *Processes*, 2019, 7(7): 466.
- [51] Destryana R A, Estiasih T, Sukardi S, *et al.* Physicochemical and biological activities of *Alpinia galanga* (L.) Willd. essential oil extracted by pulsed electric field and ultrasonication pretreatments of hydrodistillation [J]. *Trends Sci*, 2025, 22(12): 11087.
- [52] Barros M, Redondo L, Rego D, *et al.* Extraction of essential oils from plants by hydrodistillation with pulsed electric fields (PEF) pre-treatment [J]. *Appl Sci*, 2022, 12(16): 8107.
- [53] Gu Y C, Lv B Y, Xie X R, *et al.* Antibacterial mechanism of pulsed electric field-assisted extracted volatile oil from *Wurfbainia villosa* leaves against *Escherichia coli* and *Staphylococcus aureus* [J]. *Front Microbiol*, 2026, 17: 1828154.

[责任编辑 赵慧亮]