

超临界流体萃取技术在植物精油提取中的应用研究进展

闻敏^{1,2}, 陶冉³, 陈益存¹, 汪阳东^{1*}, 蒋剑春³

¹中国林业科学研究院 亚热带林业研究所, 杭州 311400; ²南京林业大学, 南京 210037;

³中国林业科学研究院 林产化学工业研究所, 南京 210042

摘要:超临界流体萃取技术具有适应性广、分离工艺流程简单、萃取温度低和效率高等优点,在提取天然活性物质的应用上具有显著优势。植物精油作为重要的天然活性物质之一,主要由萜烯类和芳香族化合物组成,具有抑菌、抗氧化等生物活性。然而,精油中的多种有效成分因其热敏性、化学稳定性在传统提取方法下易被破坏,超临界流体萃取技术能够稳定成分,提高提取率。本文以植物精油的组成成分、含量及提取率等为指标,对蒸馏法和萃取法两大类提取精油的方法进行评述,分析其主要优缺点。详细介绍了超临界流体萃取技术在植物精油的应用情况,提出存在问题与解决办法,展望了该技术的发展前景,以期为其在植物精油的提取分离研究中提供理论参考和借鉴。

关键词:植物精油;超临界流体萃取;应用

中图分类号:S759.3;TQ42

文献标识码:A

文章编号:1001-6880(2023)Suppl-0174-08

DOI:10.16333/j.1001-6880.2023.S.021

Research progress on the application of supercritical fluid extraction technology in the extraction of plant essential oils

WEN Min^{1,2}, TAO Ran³, CHEN Yi-cun¹, WANG Yang-dong^{1*}, JIANG Jian-chun³

¹Research Institute of Subtropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Hangzhou 311400, China;

²Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China;

³Institute of Chemical Industry of Forest Products, Chinese Academy of Forestry, Nanjing 210042, China

Abstract: Supercritical fluid extraction technology offers numerous advantages, including wide adaptability, a simple separation process, low extraction temperature, and high efficiency. Plant essential oil, a natural active substance, primarily consists of terpenes and aromatic compounds, exhibits antibacterial and antioxidant activities. However, traditional extraction methods often destroy the effective components of essential oils due to their thermal sensitivity and chemical stability. Supercritical fluid extraction technology can stabilize these components and improve the extraction rate. This paper focuses on the composition, content, and extraction rate of essential oils, reviews and analyzes the two major methods of essential oil extraction: distillation and extraction. The advantages and disadvantages of each method are discussed. The detailed application of supercritical fluid extraction technology in plant essential oils is described, along with proposed solutions to existing problems. Furthermore, the development prospects of this technology are envisioned, aiming to provide theoretical references and guidance for the study of extraction and separation of plant essential oils.

Key words: plant essential oil; supercritical fluid extraction; application

植物精油(essential oil)亦称为挥发油或芳香油,是从芽、茎、叶、花、种子、根或树皮等植物组织中提取出来的次生代谢产物^[1],具有抗氧化、抗细菌真菌、抗病毒和杀虫等多种生物活性^[2],可用于芳

香疗法、油漆、美容产品和香水工业等领域。精油的成分主要包括萜类和苯丙素类两类化合物,其中,丰富的单萜烯、氧化单萜、氧化倍半萜等萜类化合物决定了精油的复杂性^[3]。

根据精油提取主要形式将提取方法分为水蒸气蒸馏法和有机溶剂萃取法两种类型,水蒸气蒸馏法是利用植物精油易挥发的原理,将植物与水混合,当水浴温度达到植物中带有活性且易挥发成分的沸点

收稿日期:2023-08-07

接受日期:2023-10-11

基金项目:中国林科院中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金(CAFYBB2022ZA002)

*通信作者 Tel:86-018758128012; E-mail: wangyangdong@caf.ac.cn

后,便会随着水蒸气馏出的提取方法,为提高水蒸气蒸馏法中精油的提取率、有效成分含量以及质量稳定性等有效指标,水蒸气蒸馏法还可以联用不同的辅助提取技术,如微波辅助水蒸气蒸馏法、超声辅助水蒸气蒸馏法、酶辅助水蒸气蒸馏法等^[4]。蒸馏法是提取植物精油的传统方法,虽然蒸馏法这类传统提取方法在当前精油提取工作中仍是主导力量,但其存在易降解、不稳定、能耗大、提取时间长与产率低等问题^[2]。萃取法主要指有机溶剂萃取的方法,近年来,低共熔溶剂(离子液)萃取法、超临界 CO₂

萃取法、亚临界萃取法^[5]等新技术和新方法不断涌现,显著提升了提取效率^[4]。其中,超临界提取具有降低能耗和提取时间,提高精油品质的优点,能有效和快速的提取精油^[6,7]。而这也是从芳香植物中提取和分离精油的目标,使超临界流体萃取技术在萃取植物次生代谢产物(精油^[4]、黄酮^[8]、多酚^[9]、生物碱^[10])领域使用愈益广泛的原因之一。超临界流体萃取技术也凭借诸类优势,广泛应用于食品、医药以及化工等领域。植物精油提取方法之间的对比见表 1。

表 1 植物精油提取方法优缺点对比

Table 1 Comparison of advantages and disadvantages of plant essential oil extraction methods

提取方法 Extraction method	优点 Advantage	缺点 Disadvantage	参考文献 Reference
水蒸气及和其他联用蒸馏法	设备易获取、操作简单方便、成本低廉、精油产率高,是最为常见的提取方法	提取温度高、提取效率低下、耗能大,热敏性物质不易被保留	4, 11, 12
溶剂萃取法	萃取温度较低、精油得率较高、脱色效果好、选择性较好	提取纯度较低、有机溶剂易残留、萃取过程中大量挥发性成分溢出,容易造成环境污染	13-15
超临界流体萃取法	效率高、选择性好、能耗低、无有机溶剂残留、提取的精油品质好、对环境友好,几乎不产生新的“三废”	设备较为昂贵	4, 16

1 传统提取技术

1.1 水蒸气蒸馏法 (hydro-distillation extraction, HD)

水蒸气蒸馏法因其操作简单、成本低廉、污染少^[17]而被广泛应用,但由于提取时间长、提取温度高等原因,从而导致热敏物质分解,影响精油品质^[11]。故水蒸气蒸馏法与其他技术联用以提高精油得率和品质,主要包括:

微波辅助水蒸气蒸馏法 (microwave-assisted hydrodistillation, MAHD) 是利用微波能量破坏植物的细胞壁,使植物细胞内的水分子瞬间气化,在局部高温和高压的作用下,精油更快地向介质中扩散的一种快速、绿色的提取方法。微波辅助蒸馏提取法具有收率高、耗时短、能耗低等优点^[18],但会产生低沸点成分不同程度的挥发损失和高沸点成分提取率的减少等问题^[19]。

超声辅助水蒸气蒸馏法 (ultrasound-assisted hydrodistillation, UAHD) 是通过超声波的空穴作用,使液体微粒相互碰撞,破坏植物的细胞壁,获得精油的一种提取方法。UAHD 能显著提高精油的产量和质量,并减少时间和能源消耗^[20]。与水蒸气蒸馏法相比,使用 UAHD 提高了精油得率,缩短提取时长,降低操作成本^[21]。

酶辅助水蒸气蒸馏法 (enzyme-assisted hydrodistillation, EAHD) 是通过生物酶的专一性降解底物的细胞壁等细胞结构,使得在植物细胞内的有效成分溶出,从而提高精油产率的提取方法。但酶辅助水蒸气蒸馏法容易发生乳化现象,提高油脂的提取率需要对其进行破乳,并且酶制剂价格较为昂贵,使得生产成本变高^[22]。

1.2 溶剂萃取法 (solvent extraction, SE)

溶剂萃取法是利用液体混合物各组分在某些有机溶剂中的溶解度差异而实现分离的方法。对于不宜用水蒸气蒸馏的挥发油,该法常采用低沸点有机溶剂(乙醇、乙醚、乙酸乙酯、己烷、丁烷等)提取,目前广泛应用于植物精油的萃取工作中。提取方法有:浸提法、回流提取法等。有机溶剂浸提法虽然能在低温下进行提取,但其只能提取出溶于有机溶剂的挥发性化合物,而无法提取水溶性的物质^[23]。回流提取法方法简单、设备简易、溶剂用量少、稳定性好、生产成本低,能快速从天然产物中提取有效成分^[24]。

溶剂萃取法在一定程度上避免了蒸馏法的高温对精油热敏性物质产生的影响^[25],但也存在使用有机溶剂的量比较大、所得组分混有杂质等问题,需进一步提纯才能进行下一步研究^[26]。传统提取技术在提取植物精油中的工艺归纳见表 2。

表 2 不同蒸馏法提取植物精油的得率及最佳工艺比较

Table 2 Comparison of yield and optimal process for extracting plant essential oils using different distillation methods

植物原料 Plant material	提取方法 Extraction method	提取率/得率 Extraction rate/ yield	提取时间 Extraction time (min)	结果 Result	参考文献 Reference
贡柑精油	超声辅助水蒸气蒸馏法	114.02 mg/g	40	相比于水蒸气蒸馏法,在相同的提取时间内,UARD 能显著提高精油的提取率。	20
	水蒸气蒸馏法	85.67 mg/g	40		
姜精油	水蒸气蒸馏法	1.44%	150	在相同提取率的情况下,MAHD 提取姜精油,提取时间缩短,提取效率提高。	27
	微波辅助水蒸气蒸馏法		60		
迷迭香精油	水蒸气蒸馏法	(1.35 ± 0.04)%	20	两种方法获得相同的提油率,但相比于水蒸气蒸馏法,MAHD 能缩短精油的提取时间,并且提取物中含氧化合物增加了 1.14%,使精油质量得到了提升。	28
	微波辅助水蒸气蒸馏法		180		
胡椒梗精油	酶辅助水蒸气蒸馏法	(1.21 ± 0.02)%	180.6	在酶浓度为 103.25 g/L,酶处理温度为 41.28 °C,酶处理时间为 3.01 h,液料比为 1:5.23 (g/mL) 时,比相同条件下水蒸气蒸馏法提油率高 51.25%。	29
白蒿挥发油	浸提法	6.39%	90	利用乙醇浸提法提取白蒿挥发油,方法简单、节能环保,且其提取率更高。	30
地榆总三萜	回流提取法	88.66 mg/g	360	采用回流提取法得到的地榆总三萜含量最高,且得到的产物清除 DPPH 自由基的能力强于 VC。	31
山苍子精油	水蒸气蒸馏法(鲜果)	3.60%	—	鲜重果实比干重果实的提油率更高;超声-微波协同提取法和微波辅助水蒸气蒸馏法可以在较短时间内高效完全提取山苍子油,得率较高,相较于水蒸气蒸馏法有更大优势。	32
	水蒸气蒸馏法(干果)	3.17%	240		
	超声微波协同提取法	3.22%	120	33	
	微波辅助水蒸气蒸馏法	3.20%	120		

2 超临界流体萃取技术

2.1 超临界流体萃取技术的定义与作用原理

超临界流体萃取法 (supercritical fluid extraction, SFE) 是一种基于在高于临界点的温度和压力下利用超临界流体来提取有用组分的技术^[34],其萃取过程见图 1。在一定的温度条件下,通过不断施加压力,使气体转变为液体,而在一定温度下,通过

不断升温,液体又转变成气体,对于某一特定物质的气-液转化总会存在一个临界点,使其状态维持在液体与气体的中间状态,而这一点就叫作临界点,而达到临界状态的物质就是超临界流体 (SF)^[35]。

传统的提取方法提取效率低下、纯度低、时间成本高且工艺繁琐,无法很好地保留精油的香气成分与热敏组分。超临界流体萃取技术以绿色高效著称,能够更好地从植物中获取精油的有效成分,从天然植物材料中分离出天然化学成分诸如类黄酮、精油、种子油、类胡萝卜素和脂肪酸等,是对传统提取方法的优化。

2.2 超临界流体萃取技术常用流体及流体的优点

CO₂、CH₄O、NH₄ 和 H₂O 等都可作为超临界流体,但在使用 SFE 提取天然产物时,通常会选择 CO₂ 作为超临界流体。这是由于 SC-CO₂ 萃取有以下优点:(1) CO₂ 是一种非极性溶剂,它的临界点在所有能够充当超临界流体的物质中是最接近室温的 (T_c = 31.06 °C),因此采用 CO₂ 萃取天然物质时可以在室温下完成,而且在萃取完成恢复至常温常压后,

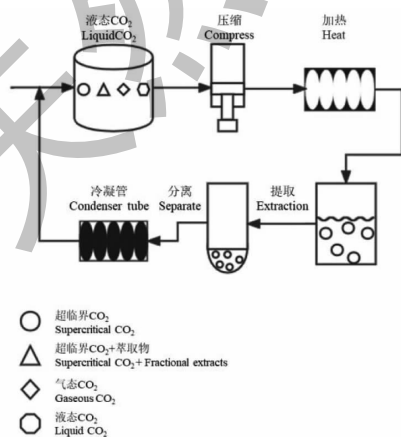


图 1 超临界流体萃取流程图

Fig. 1 The flow chart of supercritical fluid extraction

CO₂又能瞬间恢复至气体与目标物分离,还具备萃取热敏性化合物的选择性和潜力的能力,是最常用的SF之一^[35]; (2) CO₂的临界压力(P_c = 7.39 MPa)适中,临界密度(ρ = 0.448 g/cm³)高,同时还具备气体的扩散性、渗透性以及液体的流动性等性质,操作安全且容易达到超临界状态; (3) CO₂对有机物溶解能力强、选择性好、成本低廉、无毒无味、无腐蚀性、环保、化学活性低、还能使得萃取所得产品无溶剂残留; (4) 低极性化合物和小分子易溶于SC-CO₂中,大分子和极性化合物也可通过加入乙醇、甲醇或乙酸乙酯等夹带剂进行萃取来提高萃取产率^[36]。

3 超临界 CO₂ 萃取技术在植物精油提取中的应用

Moon^[37]通过对比 SC-CO₂ + 乙醇萃取与常规有机溶剂萃取的方法,提取细辛油。SC-CO₂ + 乙醇萃取在 25 MPa、50 °C 条件下得到的油脂产率最高,为 3.54 ± 0.21%。使用 SC-CO₂ 和乙醇作为共溶剂进行萃取,可获得比以往提取方法更高的精油量,且其油中含大量的甲醇和相对较低的黄樟醚,具备更好的除臭活性。

Xiong^[38]、Syaifullah 等^[39]从 SC-CO₂ 工艺参数进行研究,萃取温度、萃取压力、萃取时间和原料粒度等因素考察对广藿香挥发油萃取率的影响。Xiong 在萃取温度 47 °C、萃取压力 24.5 MPa、萃取时间 119 min 的条件下,精油得率为 2.4356%。Syaifullah 在萃取温度 80 °C、萃取压力 20 MPa 时,超临界 CO₂ 萃取的产率为 12.41%。实验表明,SC-CO₂ 萃取能够快速、大量地生产广藿香挥发油,且经 GC/MS 对比,SC-CO₂ 萃取中 α-patchoulene、azulene 和 epiglobulol 成分是在蒸馏法中检测不到的。

Akolade 等^[40]采用 SC-CO₂ 包合技术,在萃取压力 12 MPa 和萃取温度 45 °C 条件下,使用聚乙二醇(PEG)和月桂酸(LA)处理具有抗糖尿病活性的酸橙精油 2 h,制备成大小为 2 μm、具有高收率和生物活性精油负载能力的球型微粒。SC-CO₂ 辅助的挥发油聚合物包封能够减少月桂酸的快速汽化,延长释放时间和抑制 α-淀粉酶活性。

Ma 等^[41]以白豆蔻为原料,以萃取率为评价指标,对水蒸气蒸馏法和超临界流体萃取进行比较,SFE 提取白豆蔻精油得率为 6%,是 SDE 提取精油的 1.5 倍。据 GC/MS 分析结果显示,SDE 提取的精油检出 97 种化合物,而 SFE 提取的精油中检出 111 种,共有化合物有 50 种。两者所得精油的组成相似,但含量差异较大,SFE 更能有效提取白豆蔻精油

中的有效成分。

Ding 等^[42]凭借能分离提取微量及稳定性低的活性成分的超临界技术,首次在沙棘果中发现芹菜素-6-C-葡萄糖苷-8-C-木糖苷、儿茶素-7-葡萄糖苷、苜蓿素、紫罗兰素、刺槐黄素这 5 种黄酮。

Zhang^[43]对水蒸气蒸馏法和超临界 CO₂ 萃取法两种方法进行比较和总结,其中水蒸气蒸馏法在压力 15 MPa、温度 35 °C 的条件下,超临界 CO₂ 萃取法在萃取压力 25 MPa、萃取温度 45 °C、时间 2.5 h 条件下提取香樟叶精油,并通过 GC/MS 对香樟叶精油进行检测,分别鉴定出 21 个和 42 个化合物。根据成分之间的对比,得出水蒸气提取法更适合提取出沸点较低、酯类和环氧化物较多的挥发性物质;超临界萃取法则更适合提取醇类含量较高的弱极性物质的结论。超临界 CO₂ 萃取能选择性地提取精油成分,有效防止氧化和热敏性物质的逸出。

Zeng 等^[44]通过比较水蒸气蒸馏法、超声辅助水蒸气蒸馏法、微波辅助水蒸气蒸馏法和超临界 CO₂ 萃取法,提取山苍子花蕾中的挥发油,并用 SPME-GC/MS 进行分析。结果显示,超临界 CO₂ 萃取的成分种类及含量与其他 3 种差异最大,所提取的精油中单萜烯类化合物含量很低,倍半萜类和其他类型化合物含量较高,这些成分极性较强、沸点较高、相对分子质量较大。且在设定参数下,超临界 CO₂ 萃取挥发油提取率为 400 mg/g,远远大于其他三种方法的提取率,是水蒸气蒸馏法提取率的 12.5 倍,是超声辅助水蒸气蒸馏法提取率的 10 倍,是微波辅助水蒸气蒸馏法提取率的约 10.8 倍。

Luo 等^[45]以柠檬香茅为原料,采用水蒸气蒸馏法、酶辅助水蒸气蒸馏法和超临界 CO₂ 萃取法对柠檬香茅挥发油进行提取,通过 GC/MS 分析挥发性成分,三者分别分离获得 71 种、82 种和 65 种成分,虽然超临界 CO₂ 萃取法制备得到的成分少,但超临界 CO₂ 萃取法所得挥发油中含有较多脂肪酸类沸点较高及含风味的成分,使挥发油能较大程度散发自然的香气。

对于不同精油的不同特性,以及所提取的有效成分的不同极性,增加对精油有效成分的提取量需要综合多因素进行调节。其中对提取效率存在影响的因素包括超临界流体萃取的压力、温度、时间,流体的流速、极性以及物料的投料量、粉碎粒度等^[46]。不同的有效成分其萃取压力大不相同,对于碳氢化合物和酯类等弱极性物质而言,萃取压力一般在 7-

10 MPa 范围内,而含有羟基、羧基基团以及苯环直接与羟基或羧基基团相连的这类物质的萃取压力相对更高,流体流速和极性调节剂也会对提取效率产生影响^[47],根据上述报道整理得到在不同的植物精油提取中,超临界 CO₂ 萃取法或超临界 CO₂ 萃取法与其他萃取技术提取对比,其主要成分及区别见表 3。CO₂ 是最常用的超临界流体,其流速大小会影响

流体密度(流体密度同时也与萃取温度、压力有关),从而影响溶质在流体中的溶解度;同时它属于非极性溶剂,萃取时增加极性调节剂能够调节液相的总极性,从而提高萃取的选择性^[48]。物料粒径大小对提取效率也存在一定影响,当粒径太小时,物料间能被压缩的空间有限,导致最终的萃取增量有限。

表 3 植物精油采用超临界 CO₂ 萃取的得率、主要成分及与其他提取方式的比较

Table 3 Plant essential oil by Supercritical Carbon Dioxide Extraction yield, the main component and compared with other extraction methods

植物原料 Plant material	提取方法 Extraction method	提取率 Extraction rate	主要成分 Main ingredient	参考文献 Reference
细辛金莲花	超临界 CO ₂ 萃取 + 夹带剂(乙醇)	3.54 ± 0.21 %	在不同的提取条件下,主要挥发物为 27 种,其中尤卡瓦酮、3-芳烃、黄樟素、甲基丁香酚、樟脑和十七烷挥发物含量最高,该研究中,黄樟醚的含量范围为 6.27 - 14.22 %。	37
广藿香挥发油	超临界 CO ₂ 萃取法	2.44 %	α-愈创木烯、西车烯、长叶烯醛、广藿香醇和广藿香酮。	38
	超临界 CO ₂ 萃取法	12.41 %	δ-愈创木烯、西车烯、广藿香醇和甘菊环烃。	39
酸橙精油	超临界 CO ₂ 萃取法		柠檬烯、β-蒎烯、γ-蒎烯、柠檬醛、β-月桂烯、α-蒎烯和乙酸橙花酯。	40
白豆蔻精油	超临界 CO ₂ 萃取法	6 %	SFE 提取精油中分别检出 111 种,独有化合物分别有 61 种,共有化合物有 50 种。主要成分有桉叶油醇、α-蒎烯、4-异丙基甲苯、顺式十五烯酸、棕榈酸等。	41
	水蒸气蒸馏法	4 %	SDE 提取精油中分别检出 97 种,独有化合物分别有 47 种,两种提取方法所得精油的组成相似,但含量差异较大。结果表明 SFE 是提取白豆蔻精油的有效方法。	
沙棘果油	超临界 CO ₂ 萃取法		沙棘果油中含有 18 种黄酮类化合物,其中芹菜素-6-C-葡萄糖苷-8-C-木糖苷、儿茶素-7-葡萄糖苷、苜蓿素、紫罗兰素、刺槐黄素这 5 种黄酮首次被发现存在于沙棘果中。	42
香樟叶精油	水蒸气蒸馏法	< 0.5 %	共含有 21 种化合物。	43
	超临界 CO ₂ 萃取法	4.63 %	共含有 42 种化合物,超临界 CO ₂ 萃取能选择性地提取精油成分,有效防止氧化和热敏性物质的逸出。	
山苍子挥发油	水蒸气蒸馏法		SCEF 法用时最短,且提取率远高于另外 3 种方法。四种方法鉴定出的成分分别为 42、49、42 和 41 种。共有成分有 15 种,其中主要的香气成分为柠檬醛、柠檬烯、罗勒烯、月桂烯、芳香醇。	44
	超声辅助水蒸气蒸馏法			
	微波辅助水蒸气蒸馏法			
柠檬香茅挥发油	超临界 CO ₂ 萃取法			
	水蒸气蒸馏法	0.6 %	水蒸气蒸馏法、酶辅助水蒸气蒸馏法制备得到的挥发油中分离得到的成分分别有 71 和 82 种成分,二者含量最高的主要成分均为香叶醇、β-香茅醇、榄香醇、香茅醛;超临界 CO ₂ 萃取法制备得到 65 种成分,含量最高的主要成分为香叶醇、β-香茅醇、榄香醇和十六酸。	45
	酶辅助水蒸气蒸馏法	0.8 %		
	超临界 CO ₂ 萃取法	3 %		

4 前景与展望

超临界流体萃取技术可减少林产加工过程中对环境的污染和对生态系统的破坏,是一种能提高植物精油品质的先进绿色技术^[10],不仅能够解决精油有效成分遇热不稳定而氧化分解的问题,最大程度上保留精油中的热敏性和化学性质不稳定的物质,

还能减少操作流程,缩短精油提取的时间,提高产品品质。此外,超临界流体技术在其他领域也是研究热点,不仅可以作为食品的非热杀菌技术,杀灭微生物的同时避免高温而对食品品质产生不利影响^[49-51],在食品提取、转化、保存和干燥等加工领域应用广泛^[52,53];也可应用于天然植物中提取生物活

性化合物^[54]最大程度上保留植物中的有效成分,并提高其提取率^[55]、纯度^[56]和提取效率^[57];还可以作为纳米技术,将所需物质吸附或封存在载体中,增加其稳定性,减少氧化降解等化学反应^[58],改善物质的生物利用度^[59,60]。目前,随着对环境友好、高效能和多功能性需求的增加,超临界流体萃取技术发展潜力显著增加,对该技术进行深入研究对林产加工业、食品业、制药化工行业的发展都具有深远意义。尽管超临界流体萃取技术有诸多优势及意义,但尚未能进行大规模投入市场应用。主要存在以下几方面的局限性:(1)CO₂的回收率低;(2)生产成本低;(3)常用的CO₂流体是弱极性的,主要适用于非极性或非极性化合物的提取,适用性不高等问题。

针对以上问题,可以通过:(1)优化整个萃取过程和提高设备性能,提高CO₂的溶解度和萃取效率并增设可以提高CO₂的回收设备;(2)可通过优化提取工艺参数(萃取压力、萃取温度、流体流速^[61]等)、研发新型吸附材料提高萃取效率、选择对目标精油具有高溶解度的超临界流体来降低萃取成本;(3)了解所研究的植物精油的特性是否适用于超临界流体萃取,若出现选择性、对强极性和分子量较大的物质而导致萃取率不够高的问题,可添加有机溶剂作为夹带剂辅助或将超临界流体萃取技术与传统提取方法相结合,进行优势互补,或将推动天然产物的研究向更高层次的发展^[46],也能为资源利用和环境保护做出贡献。

参考文献

- Cai J, et al. Antifungal and mycotoxin detoxification ability of essential oils: A review[J]. *Phytother Res*, 2022, 36: 62-72.
- Ayub MA, et al. Biological activity of *Boswellia serrata* Roxb. oleo gum resin essential oil: effects of extraction by supercritical carbon dioxide and traditional methods[J]. *Int J Food Prop*, 2018, 21: 808-820.
- Liang XL, et al. Research progress on anti-tumor effects of plant essential oils[J]. *Chin Tradit Herb Drugs* (中草药), 2022, 53: 1252-1263.
- Hu J, et al. Research and application progress on extraction technology of edible essential oils[J]. *Chin Condiment* (中国调味品), 2022, 47: 209-213.
- Yao L, et al. Research progress in extraction technology and biological application of perilla seed oil[J]. *Contemp Chem Ind* (当代化工), 2022, 51: 1943-1947.
- Chakravarty I, et al. Current trends in essential oil (EO) production[J]. *Biomass Conve Biorefi*, 2021. DOI10. 1007/ s13399-021-01963-3.
- Yousefi M, et al. Supercritical fluid extraction of essential oils[J]. *Trends Anal Chem*, 2019, 118: 182-193.
- Jing LP, et al. Research progress on extraction methods of flavonoids from plants[J]. *J Cellul Sci Technol* (纤维素科学与技术), 2021, 29: 60-70.
- Ning EJ, et al. Study on functional components and antioxidant activities of peony seed oil by different extraction techniques[J]. *J Cereals Oilseeds* (粮食与油脂), 2023, 36: 62-66.
- Fang LY, et al. Research progress on identification methods of active ingredients in plant extracts[J]. *Chin J Anim Nutr* (动物营养学报), 2022, 34: 6451-6458.
- Shao F, et al. Research progress on extraction method, biological function and application of plant essential oil[J]. *Feed Res* (饲料研究), 2022, 45: 119-123.
- Djapic N. Essential oils of *taxodium distichum* winter leaves obtained by supercritical carbon dioxide extraction method and hydrodistillation[J]. *Separations*, 2022, 9: 436.
- Goncalves D, et al. Performance of continuous countercurrent extractor on the fractionation of *Citrus bergamia* essential oil using ethanol/water mixtures as solvents[J]. *Chem Eng Res Des*, 2018, 137: 566-576.
- Goncalves D, et al. Liquid-liquid equilibrium of rosemary model essential oil (alpha-pinene plus eucalyptol plus camphor) and solvent (ethanol plus water) at room conditions[J]. *Fluid Phase Equilib*, 2020, 521: 112730.
- Li JX, et al. Development on extraction technique of plant essential oils and its application in food industry[J]. *J Anhui Agric Sci* (安徽农业科学), 2011, 39: 3070-3071.
- An JH. Application status of supercritical carbon dioxide extraction of natural products[J]. *Guangzhou Chem Ind* (广州化工), 2022, 50: 25-28.
- Wang QY, et al. Research Progress on the extraction methods, antibacterial activities of citronella essential oil and its application in food preservation[J]. *Chin Condiment* (中国调味品), 2021, 46: 181-184.
- Zhao YF, et al. Extraction of essential oil from *Psidium guajava* leaves by microwave-assisted hydrodistillation method[J]. *J Sichuan Forest Sci Technol* (四川林业科技), 2022, 43: 100-103.
- Li L, et al. GC-MS analysis of components of nutmeg volatile oil extracted by different methods[J]. *Herald Med* (医药导报), 2019, 38: 1630-1634.
- Li G, et al. Effect of response surface methodology-optimized ultrasound-assisted pretreatment extraction on the composi-

- tion of essential oil released from tribute citrus peels [J]. *Front Nutr*, 2022, 9: 840780.
- 21 Wang J, et al. Study on extraction of essential oil from nutmeg by ultrasonic-assisted steam distillation and its antioxidant activity [J]. *J Cereals Oilseeds (粮食与油脂)*, 2022, 35: 81-85.
- 22 Gao JJ, et al. Research progress on the extraction technology of seabuckthorn fruit oil and the application of nutritional factors [J]. *Sci Technol Food Ind (食品工业科技)*, 2022, 43: 400-407.
- 23 Zhang Y, et al. GC-MS analysis of the volatile compounds derived from *elaegnus angustifolia* under different extraction conditions [J]. *Mod Food Sci Technol (现代食品科技)*, 2018, 34: 241-250.
- 24 Xia GH, et al. Application of reflux extraction in extraction of flavonoids from *Polygonatum odoratum* [J]. *J Tonghua Normal Univ (通化师范学院学报)*, 2016, 37: 11-14.
- 25 Wang S, et al. Analysis on the extraction and refining of plant essential oil [J]. *New Technol New Prod Chin (中国新技术新产品)*, 2020, 2: 60-62.
- 26 Gao M, et al. Research progress on technology methods for extracting volatile oil [J]. *Life Sci Instrum (生命科学仪器)*, 2012, 10: 3-7.
- 27 Liu HX, et al. Optimization of extraction process of ginger essential oil and comparative analysis of its components [J]. *Chin Condiment (中国调味品)*, 2021, 46: 101-104.
- 28 Elyemni M, et al. Extraction of essential oils of *rosmarinus officinalis* L. by two different methods: hydrodistillation and microwave assisted hydrodistillation [J]. *Sci World J*, 2019, 2019: 3659432.
- 29 Li LZ, et al. Optimization of extraction conditions of pepper stems essential oil and its composition analysis [J]. *Mod Food Sci Technol (现代食品科技)*, 2021, 37: 126-135.
- 30 Sun ZH, et al. Components and their antioxidant activity of essential oil of *Herba Artemisiae Sieversianae* from different growth periods [J]. *Chin J Anal Chem (分析化学)*, 2017, 45: 1655-1661.
- 31 Wang SY, et al. Study on comparison of different methods on extracting total triterpenoids from *Sanguisorba officinalis* and its antioxidant activities [J]. *Food Res Dev (食品研究与开发)*, 2019, 40: 111-115.
- 32 Tian SP, et al. Contents of essential oil and citral in fruits of *Litsea cubeba* from different populations and their correlation with geographical-climatic factors [J]. *J Plant Resour Environ*, 2012, 21: 57-62.
- 33 Han YL, et al. Comparative study of extraction of *Litsea cubeba* essential oil by different methods [J]. *J Cent South Univ For Technol*, 2013, 33: 175-178.
- 34 Allawzi M, et al. A. CO₂ supercritical extraction of essential oil of Jordanian rosemary [J]. *J Aoac Int*, 2019, 102: 662-665.
- 35 Ren Y. Introduction and application of supercritical fluid extraction technology [J]. *Food Ind (食品界)*, 2021, 6: 124 + 126.
- 36 Uwineza PA, et al. Recent advances in supercritical fluid extraction of natural bioactive compounds from natural plant materials [J]. *Molecules*, 2020, 25: 3847.
- 37 Moon JN, et al. Physicochemical characterization and deodorant activity of essential oil recovered from *Asiasarum heterotropoides* using supercritical carbon dioxide and organic solvents [J]. *J Ind Eng Chem*, 2019, 69: 217-224.
- 38 Xiong K, et al. Experimental optimization and mathematical modeling of supercritical carbon dioxide extraction of essential oil from *Pogostemon cablin* [J]. *J Chem Eng*, 2019, 27: 2407-2417.
- 39 Muhammad S, et al. Characterization of bioactive compounds from patchouli extracted via supercritical carbon dioxide (SC-CO₂) extraction [J]. *Molecules*, 2022, 27: 6025.
- 40 Akolade JO, et al. CO₂-assisted production of polyethylene glycol/lauric acid microparticles for extended release of *Citrus aurantifolia* essential oil [J]. *J CO₂ Uti*, 2020, 38: 375-384.
- 41 Ma Q, et al. Optimization of supercritical CO₂ extraction process and volatile aroma components analysis of pepper seed essential oil [J]. *Chin Brew (中国酿造)*, 2022, 41: 204-212.
- 42 Ding LN, et al. Determination of flavonoids in the supercritical CO₂ extract of sea buckthorn fruit by using ultra-high performance liquid chromatography-mass spectrometry [J]. *Food Sci (食品科学)*, 2019, 40: 273-280.
- 43 Zhang HX, et al. Extraction of camphor tree essential oil by steam distillation and supercritical CO₂ extraction [J]. *Molecules*, 2022, 27: 5385.
- 44 Zeng CY, et al. Comparative Study on extraction of volatile oils from flower buds of *Litsea pungens* Hemsl. by different methods [J]. *Chin Condiment (中国调味品)*, 2021, 46: 157-161.
- 45 Luo T, et al. Comparison and analysis of volatile oil components of *cymbopogon citratus* based on different extraction [J]. *Food Sci Technol (食品科技)*, 2021, 46: 218-223.
- 46 Miao XY, et al. Optimization of supercritical CO₂ extraction of essential oil from *Sarcodon aspratus* by response surface methodology and analysis of its volatile compounds [J]. *Mod Food Sci Technol (现代食品科技)*, 2018, 34: 148-157.

- 47 Song L. Study on extraction process, identification and efficacy of supercritical extract-of *Stellaria dichotoma* [D]. Ningxia: Ningxia University(宁夏大学), 2022.
- 48 Shi WQ, et al. Research progress on extraction methods of soybean isoflavone[J]. Soybean Sci(大豆科学), 2022, 41: 610-616.
- 49 Krystian M, et al. The application of supercritical carbon dioxide for the stabilization of native and commercial polyphenol oxidases and peroxidases in cloudy apple juice (cv. Golden Delicious) [J]. Innovative Food Sci Emerging Technol, 2017, 39:42-48.
- 50 Zhang XB, et al. Optimizing supercritical CO₂ extraction technology of clove oil by uniform design method[J]. Food Res Dev(食品研究与开发), 2017, 38:50-54.
- 51 Zheng ZL, et al. Analysis of clove bud oil obtained by supercritical CO₂ fluid extraction and steam distillation with GC-MS and their application in cigarette [J]. Flavour Frag Cosmet(香料香精化妆品), 2017, 5:6-10.
- 52 Wang WX, et al. Supercritical carbon dioxide applications in food processing[J]. J Food Eng Rev, 2021, 13:570-591.
- 53 Chai L, et al. Advances in the application of supercritical carbon dioxide in the sterilization of meat and meat products [J]. Meat Res(肉类研究), 2022, 36:46-52.
- 54 Li L, et al. Application and perspectives of supercritical fluid technology in the nutraceutical industry[J]. Adv Sustainable Syst, 2022, 6:2200055.
- 55 Liu CL, et al. Supercritical CO₂ extraction ester technology for extracting tremella polysaccharide[J]. Ningde Normal Univ: Nat Sci(宁德师范学院学报:自科版), 2015, 27:252-256.
- 56 Shen J, et al. High performance liquid chromatographic method for determination of active components in *Lithospermum* oil and its application to process optimization of *Lithospermum* oil prepared by supercritical fluid extraction [J]. Chin J Chromatogr(色谱), 2021, 39:708-714.
- 57 Jitpinit S, et al. Enhancement of omega-3 content in sacha inchi seed oil extracted with supercritical carbon dioxide in semi-continuous process[J]. Heliyon, 2022, 8:e08780.
- 58 Lai HZ, et al. Research progress and thinking on nano technology for improving stability of essential oils from traditional Chinese medicine [J]. Chin Tradit Herb Drugs(中草药), 2022, 53:641-652.
- 59 Zhang JX, et al. Research advance in quality control of protein-based nano-preparations [J]. Chin J New Drugs(中国新药杂志), 2021, 30:333-338.
- 60 Zhu JJ. Preparation technology of liver-aid tablet and its stability investigation [D]. Harbin: Harbin University of Commerce(哈尔滨商业大学), 2018.
- 61 Liu H, et al. Research progress on extraction and application of essential oil from citrus plant [J]. Food Res Dev(食品研究与开发), 2021, 42:173-179.

(上接第 27 页)

- 16 Zhang MM, Yin HX, Deng YL, et al. Analysis of key odorants responsible for different chestnut-like aromas of green teas based on headspace solid-phase microextraction coupled with comprehensive two-dimensional gas chromatography time-of-flight mass spectrometry and odor activity value [J]. Food Sci(食品科学), 2020, 41:244-252.
- 17 Wang JX, Ye JJ, Zhao WH, et al. Identification of characteristic flavor active compounds in soy sauce marinated chicken by HS-SPME-GC-MS and odor activity value [J]. Chin Condiment(中国调味品), 2020, 45:160-164.
- 18 Wang YL. Determination of essential oil from *Gastrodia elata* by GC-MS [J]. Sci Technol Assoc Forum(科协论坛), 2010, 2:93-95.