

亚临界二甲醚提取食品功能性成分研究进展

万潇夫¹ 潘 乐¹ 李慕春²

(1. 新疆农业大学化学化工学院, 新疆 乌鲁木齐 830052;

2. 新疆维吾尔自治区科技资源共享服务中心, 新疆 乌鲁木齐 830011)

摘要:随着对高品质天然产物提取物需求的增长,二甲醚作为一种新型绿色溶剂,在亚临界条件下,因其独特的物理化学特性,在油脂、类胡萝卜素、长链多不饱和脂肪酸等提取领域中展现出显著优势。文章综述了二甲醚在天然产物提取中的应用进展,重点讨论了其在处理高水分生物质、提高提取效率、降低能耗和环境负荷方面的优势,并对其未来发展方向进行了展望。

关键词:二甲醚;加压流体萃取;天然产物;绿色溶剂;亚临界流体

Research progress in extraction of food functional ingredients with subcritical dimethyl ether

Wan Xiaofu¹ Pan Le¹ Li Muchun²

(1. College of Chemistry and Chemical Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi,

Xinjiang 830052, China; 2. Xinjiang Uygur Autonomous Region Science and Technology

Resources Sharing Service Center, Urumqi, Xinjiang 830011, China)

Abstract: With the growing demand for high-quality natural product extracts, dimethyl ether as a new green solvent operating under subcritical conditions has exhibited notable benefits for the extraction of lipids, carotenoids, and long-chain polyunsaturated fatty acids, attributable to its distinctive physicochemical characteristics. This paper reviews the progress in the application of dimethyl ether in natural product extraction, focusing on its advantages in treating biomass with high moisture content, improving extraction efficiency, and reducing energy consumption and environmental load, with a view to providing reference for the application of subcritical dimethyl ether in extraction.

Keywords: dimethyl ether; pressurized fluid extraction; natural products; green solvent; subcritical fluid

二甲醚(DME)是一种新兴的绿色提取溶剂,具有低沸点(-24.8°C)、低密度(0.668 g/cm^3)、高溶解性的独特理化性质,可高效溶解非极性至中等极性化合物^[1]。作为公认安全物质(GRAS),DME已通过美国FDA、欧盟EFSA(2012/234号文件)及澳新食品标准局(Standard 1.3.3)的安全性认证^[2-4]。毒理学研究证实其无致癌性、致突变性及显著生物毒性,食品加工残留量($\leq 9\text{ }\mu\text{g/kg}$)符合国际安全标准^[5-6],可以作为食品加工用溶剂。

DME的核心技术优势在于其独特的水分兼容性和高效传质能力。与传统有机溶剂不同,其可直接处理高含水量($>80\%$)的湿态基质,无需高耗能的预干燥步骤^[7]。结合分子的两亲特性,其可穿透细胞膜磷脂双层,同时溶解水相与脂溶性成分。相比超临界 CO_2 萃取,DME的易压缩性降低了设备成本,同时通过夹带剂(如乙醇—丙酮)优化可进一步提升提取率^[8-9]。

随着绿色化学和可持续发展理念的深入推进,

基金项目:新疆青年拔尖人才计划项目(编号:20232110731);自治区重点研发计划项目(编号:2022B02037-3)

通信作者:潘乐(1985—),男,新疆农业大学副教授,博士。E-mail:chempan03@163.com

李慕春(1978—),男,新疆科技资源共享服务中心研究员,博士。E-mail:164228718@qq.com

收稿日期:2025-08-08 **改回日期:**2026-02-09

引用格式:万潇夫,潘乐,李慕春. 亚临界二甲醚提取食品功能性成分研究进展[J]. 食品与机械,2026,42(8):219-226.

Citation:Wan Xiaofu, Pan Le, Li Muchun. Research progress in extraction of food functional ingredients with subcritical dimethyl ether [J]. Food & Machinery, 2026, 42(8): 219-226.

DME 凭借其绿色属性与理化特性,正成为天然产物提取领域的重要发展方向,为可持续发展提供了兼具效率与安全性的解决方案。为生物资源的高值化利用,提供新的技术路径,具有极其广阔的应用前景和转化潜力。

1 DME 基于理化特性的提取优势

基于其低沸点、中等介电常数以及水分兼容性(见表 1),DME 成为绿色提取技术的理想溶剂^[10-13]。与传统有机溶剂相比,DME 在生物资源提物领域展现出显著的性能优势,包括处理高含水原料、高效传质和选择性提取。

DME 作为一种绿色提取溶剂,其技术优势可从分子设计、选择性和环境兼容性 3 个层面系统阐释:在分子设计层面,其独特分子结构中 C—O—C 键角为 111.8°,结合适度偶极矩,形成了弯曲的 V 形几何构型,从而优化了分子间作用力,增强了溶剂与目标化合物的亲和性,为高效提取提供了分子基础^[14-15]。表 2 总结并解析了 DME 在

表 1 不同溶剂的理化性能比较

Table 1 Comparative analysis of physico-chemical properties of different solvents

溶剂	沸点/℃	介电常数	水分兼容性
二甲醚	-24.7	5.1	优
乙醇	78.5	24.3	良
超临界 CO ₂	31.1	1.6	良
正己烷	69	1.88	良

分子层面的作用与优势;在提取选择性层面,其中等极性特征允许通过夹带剂的协同使用,实现对特定化合物(如植物色素或生物活性分子)的精准识别与选择性萃取,避免了非目标成分的共提取,提升了提取纯度^[21-22];在环境兼容性层面,DME 的低温操作条件结合高回收率设计,显著降低了能耗和溶剂残留,同时支持脱水与提取一体化过程,不仅减少了废物生成,还严格遵循了绿色化学的原子经济性和能源效率原则,为可持续工业应用提供了可靠支撑^[23]。

表 2 DME 作为绿色溶剂的核心化学特性

Table 2 Core chemical properties of DME as a green solvent

特性类别	关键参数和机制	作用与优势	参考文献
热力学性质	生成焓 -184.1 kJ/mol,且吉布斯自由能稳定	低能耗传质,促进目标成分快速溶出	[16]
分子结构	氢键供体与范德华力协同	精准调控分子间作用力,增强提取效率	[17]
分子极性	介电常数约为 5.1,介于非极性与弱极性之间	差异化溶解不同极性天然产物,穿透物质微观结构,降低化学损耗	[18]
化学反应性	碳氢键与碳氧键高度稳定	保护目标产物化学结构与活性,避免非预期化学修饰	[19]
水—有机协同作用	形成共溶剂微区	降低含水生物质传质阻力,解决传统溶剂湿度敏感问题	[20]

1.1 高效传质性

在亚临界条件下(温度 30~50 ℃,压力 5~7 MPa),DME 具有超高的传质速率和提取效率。其独特的分子结构兼具疏水亚甲基与亲氧极性中心^[24],形成双功能协同机制:疏水基团通过范德华力高效渗透脂质屏障,而极性中心作为氢键供体与生物大分子中的含氧官能团定向结合,大幅提升传质动力^[25]。从热力学角度,DME 的低生成焓(-184.1 kJ/mol)和稳定的吉布斯自由能变化意味着其在提取过程中能够以极低的能耗实现高效传质^[16],有利于目标成分的快速溶出和传质。Rafińska 等^[17]研究证实,该溶剂对生物质微观结构具有超强渗透能力,其低黏度特性显著加速传质过程,在保持高选择性的同时实现提取效率的突破性提升。这种结构一功能协同效应使 DME 成为生物分子高效绿色提取的理想介质^[26]。

1.2 提取靶向性

DME 的靶向性提取优势源于其独特的分子结构具有对称醚键及适中的弱极性。其醚键氧原子受甲基的屏蔽效应,即分子内邻近基团的立体结构干扰,导致目标位点的化学活性或极性被削弱,从而形成比乙醇弱、比正己烷强的“两亲性”极性,可通过范德华力结合非极性脂质捕获多酚类中等极性分子^[18,27]。相较于乙醇和超临界 CO₂,DME 凭借以上优势,能够在复杂体系中精准分离植物精油、脂质及多酚等,在显著抑制多糖等杂质溶出的同时提升酚酸回收率(>20%)^[19,28],实现高效选择性提取。温度和压力对 DME 的靶向提取特性具有显著影响,通过精细调控亚临界条件^[29],DME 能实现对不同极性和热敏性化合物的精准提取。

1.3 水分适应性

水分适应性是亚临界 DME 作为绿色提取溶剂的核心差异化优势,而这一优势的本质源于其独特的“两性核

心”分子结构。在亚临界的调控状态下,DME分子同时具有疏水性的亚甲基基团和亲氧性的极性中心,这使得其能够通过分子间作用力的动态调节,实现对水相基质和脂溶性目标成分的双重适配^[30]。更为重要的是,DME在这一过程中无需额外添加夹带剂即可实现高效提取,这一特点显著区别于超临界CO₂或乙醇等传统溶剂,后者通常需要夹带剂来优化溶解性^[20]。值得注意的是,DME在水中的溶解度可高达37%(在25℃和标准大气压下),这一优势使其成为提取过程中的一个极具潜力的溶剂选择^[31]。这一特性使其无需依赖高耗能的原料预干燥环节,不仅大幅缩短了前处理周期,更显著降低了干燥过程中的能耗与设备成本投入,同时避免干燥导致的热敏性成分氧化损失。

首先,在湿度为15%~45%的生物质体系中,DME能够自发形成稳定的共溶剂微区,该微区可有效削弱体系内传质阻力,为后续提取过程的高效进行奠定基础^[32],这一关键特性成功突破了传统提取溶剂在处理含水生物质时面临的技术瓶颈,大幅拓宽了DME的适用场景。与传统提取工艺需对原料进行完全干燥处理的要求不同,亚临界DME可通过精准调控提取条件,省去原料预干燥环节,显著降低前处理阶段的能耗与成本投入。在湿物料提取应用中,DME的优势在亚临界状态下尤为突出:其可实现对含水率≤93%湿物料的液化渗透,并借助气—液相变过程中产生的微湍流效应及自身低黏度特性,高效完成传质过程^[33]。反观传统提取溶剂,由于水分子的阻隔作用,需将物料预干燥至含水率≤10%,且传质过程依赖缓慢的分子扩散,效率远低于DME^[34]。

基于以上特性,DME可直接用于新鲜果蔬、湿藻等食品原料的提取处理,有效规避传统溶剂因需对原料进行预干燥而导致的维生素、胡萝卜素等热敏性活性成分损失问题,对保障食品天然产物的品质与功能价值具有重要意义。

2 DME在食品功能性成分提取领域的应用

DME作为一种新型绿色溶剂,凭借其独特的物化特性已在天然产物提取的多个细分领域实现工业化应用,其中类胡萝卜素与脂肪酸提取为核心方向,合计占

比>75%,而其他高价值产品提取则作为重要拓展领域,图1直观展示了这一分布格局。DME的应用价值并非源于单一技术参数优势,而是基于其物化特性与提取场景需求的深度耦合,这些特性通过协同作用构建了“原料适配—效率提升—品质保障—工艺优化”的完整技术体系,有效突破了传统溶剂在高水分原料处理、热敏性成分保护及选择性分离等方面的瓶颈。

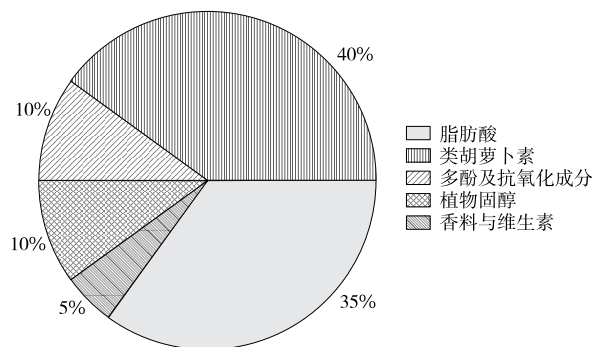


图1 DME提取食品功能性成分应用领域

Figure 1 Application fields for DME extraction of functional food ingredients

2.1 脂肪酸

多不饱和脂肪酸(PUFAs)尤其是长链多不饱和脂肪酸(LC-PUFAs),在微藻、金枪鱼肝脏等原料中常以酯化形式嵌入磷脂或糖脂结构,且原料普遍具有高含水率的特征,传统溶剂需通过预干燥降低水分干扰,不仅增加能耗,还易引发LC-PUFAs氧化降解。DME凭借其独特的理化性质,为脂肪酸的绿色高效提取提供了创新解决方案,已有较多应用研究的实例(见表3)。

2.1.1 水分兼容性与传质优势 在食品功能性成分提取领域,亚临界条件是DME发挥核心技术优势的关键前提,其突出价值在于无需原料预干燥即可直接处理高含水率物料。以金枪鱼肝脏油脂提取为例,通过精准调控提取温度与压力(42℃、0.8 MPa),可使DME稳定处于亚临界状态,该状态下DME既保留低黏度(0.12 mPa·s)特性以加速传质,又凭借独特的两亲性分子结构(疏水亚甲基+亲氧极性中心),同步穿透金枪鱼肝脏的脂质屏障与

表3 DME萃取脂肪酸的应用实例

Table 3 Exemplary implementations of fatty acid extraction with DME as a green solvent

生物质	提取目标	提取条件	提取率/%	参考文献
金枪鱼	金枪鱼肝油	0.8 MPa, 42℃, 50 min, 925 r/min	17.46	[35]
微藻	EPA	连续酯化(10% EtOH+DME)	4.90	[36]
微藻	脂肪酸	0.8 MPa, 42℃, 50 min, 925 r/min	65.00	[37]
绿藻	SFAs	1.8 MPa, 70℃, 60 min	24.60	[38]

水相基质,最终实现 17.46% 的油脂提取率,且对热敏性成分的保护效果显著,维生素活性保留率 $>90\%$ ^[35]。

对比传统乙醇提取工艺,需先将金枪鱼肝脏干燥至含水率 $\leq 10\%$ 以消除水分对溶剂的干扰,该预干燥步骤

不仅使能耗额外增加 32%,还因高温处理导致维生素损失率达 21%^[39]。如图 2 所示,亚临界 DME 在高含水率物料提取中,同时实现了效率提升—能耗降低—品质保护三重目标,显著优于传统溶剂工艺。

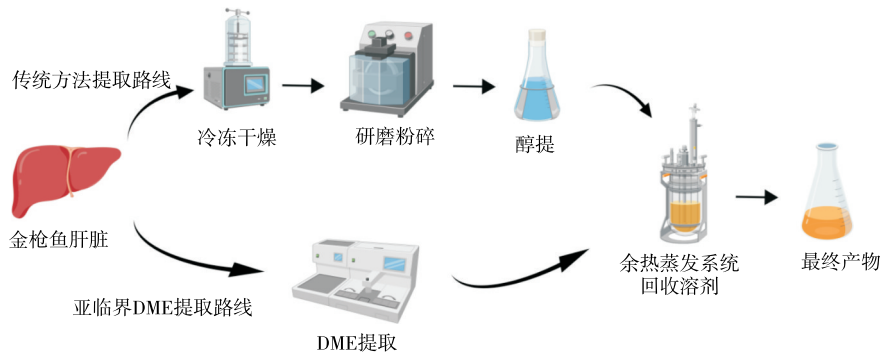


图 2 亚临界 DME 提取与传统提取工艺流程对比

Figure 2 Comparison between subcritical DME extraction and conventional extraction processes

2.1.2 靶向提取性与极性调控 DME 的介电常数约为 5.1,介于非极性溶剂(正己烷,1.9)与极性溶剂(乙醇,24.3)之间,使其对非极性至中等极性脂质具有选择性溶解能力。在微藻 EPA 提取中,单独使用亚临界 DME 提取,利用其两亲性即可实现 EPA 与多糖、蛋白质等杂质的初步分离。若需进一步优化,添加 10% 乙醇可进一步微调溶剂体系极性,增强对 EPA 的溶解选择性,最终提取率达 4.9%^[37]。相较于超临界 CO₂(介电常数 1.6)对极性脂质溶解能力不足的缺陷,DME 的极性调控潜力使其对 LC-PUFAs 的提取效率提升 15%~20%。同时,其弱极性特征避免了乙醇对强极性成分的共提取,后续纯化步骤简化 30%,符合食品级脂质工业化生产的经济性要求。

2.1.3 广谱溶解性的工艺适配 DME 在亚临界应用中展现出显著优势,其在水中溶解度高达 37%,显著高于超临界 CO₂(1.5%),这一特性使其可与微藻细胞内水分形成稳定共溶剂微区,有效降低传质阻力。一方面,在微藻总脂肪酸提取中,DME 与细胞内水分的协同作用加速了脂质从细胞壁向溶剂相的迁移,在 42℃、0.8 MPa、925 r/min 下,总脂肪酸提取率达 65%^[11]。该共溶剂体系无需额外添加乳化剂即可保持均一相,且溶剂回收阶段通过温和减压(<0.1 MPa)即可实现 DME 与水分的高效分离,回收率 $>95\%$,避免了传统溶剂—水体系分层难、分离能耗高的问题,构建了提取—分离—溶剂回收一体化的绿色工艺路线。另一方面,DME 在亚临界应用中也存在一定局限性。尽管回收率高,但其气体性质易导致少量溶剂损失,这会略微增加运营成本,尤其在连续批量操作中需优化密封设计以最小化逸散。此外,尽管压力条件相对温和,但目前专用设备多局限于实验室规模,缺乏成熟的工

业级解决方案,可能延缓从实验室向大规模生产的过渡,并增加初始投资门槛。

2.2 类胡萝卜素

类胡萝卜素因兼具抗氧化、天然着色功能及健康效益,已成为食品与饲料添加剂领域的研究热点。其共同的结构基础是分子骨架中广泛分布的共轭双键体系,该体系不仅决定了其光谱吸收与呈色行为,也为其高效清除自由基、发挥抗氧化功能提供了关键结构支撑^[38],表 4 为 DME 提取类胡萝卜素应用实例。

表 4 DME 萃取类胡萝卜素的应用实例

Table 4 Exemplary implementations of carotenoid extraction with DME as a sustainable solvent

生物质	提取目标	提取条件	提取结果/ ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)	参考 文献
万寿菊	叶黄素	0.4 MPa, 60 min	5.53	[40]
裙带藻	岩藻黄素	0.68 MPa, 30℃	96.00	[41]
绿藻礁膜	叶黄素	传统氯醇化法	0.30	[42]
绿藻	胡萝卜素	1.56 MPa, 41℃	4.14	[43]
	叶黄素	20 min	8.45	

2.2.1 高效传质性与活性保护 DME 沸点为 -24.8°C ,提取后可通过常温减压快速脱除,溶剂残留量 $\leq 9\mu\text{g/kg}$,远低于欧盟食品级溶剂残留限值($\leq 10\text{mg/kg}$)。在万寿菊叶黄素提取中,凭借临界状态下分子渗透优势穿透万寿菊花瓣细胞壁,在 40℃,解析时间 1.0 h, pH 为 7.0 条件下,叶黄素纯度达到 61.72 mg/g ^[40],较正己烷(12.30 mg/g 干重)提升 40%,且叶黄素顺式异构体含量仅为 3.2%^[44]。传统溶剂需通过高温蒸馏脱溶,导致类胡萝卜素共轭双

键断裂。而DME的低沸点特性结合高效传质性,既通过快速提取减少成分在原料内部的滞留时间,又通过温和脱溶避免高温对结构的破坏,实现高效提取—低损保留的双重目标。此外,DME在亚临界叶黄素提取中的应用也存在一定局限性。在万寿菊花瓣这种富含水分的植物基质中,尽管回收步骤温和,溶剂回收过程若优化不足,可能导致少量叶黄素热降解或溶剂残留波动,略微影响最终产物的稳定性与纯度,尤其在连续操作时需精确控温以最小化这一风险。

2.2.2 靶向提取性与温度调控 DME的弱极性特征使其对类胡萝卜素的疏水结构具有特异性结合能力,通过调控提取温度可进一步强化这种选择性。在裙带菜岩藻黄素提取中,30℃、0.68 MPa的条件下,DME分子与岩藻黄素的疏水端形成稳定范德华力,同时避免高温对共轭双键的氧化破坏,提取率达96 mg/g^[41]。当温度升至60℃时,岩藻黄素提取率降至0.26 mg/g,且氧化产物含量增加至8.7%,印证了DME在温和温度下的靶向提取优势。此外,闭环溶剂循环系统利用DME易压缩性,通过动态调整溶剂回流次数,使溶剂与原料的接触效率提升40%,溶剂回收率>96%,既降低溶剂损耗成本,又减少环境排放,符合绿色化工发展要求^[45]。但DME在裙带菜这种湿润藻类基质提取中也存在一定的局限性,其温度敏感性虽确保低温靶向,但操作窗口较窄,若控温偏差可能导致传质不均或局部氧化风险增加,延长优化周期并影响批量再现性,尤其需精密传感器支持以匹配范德华力稳定性。

2.2.3 水分适应性与工艺简化 针对未干燥礁膜(含水率82%)的叶黄素提取,DME无需破壁预处理即可直接作用于胞内叶黄素。其分子的亲水—亲脂平衡特性使其可同时渗透礁膜细胞壁的脂质层与水合基质,在0.51 MPa、20℃条件下,叶黄素得率达3.0 mg/g干重^[46],远超氯仿—甲醇法(0.3 mg/g干重)^[42]。传统工艺需通过冷冻干燥与超声破壁预处理,且干燥过程导致叶黄素损失率达28%。而DME的水分适应性省去了预处理环节,工艺步骤缩减30%,能耗降低40%,同时避免预处理过程中的成分损耗^[43],为高水分藻类功能性成分的高效提取提供了低成本方案。尽管这些优势显著,DME在这种高含水基质中仍存在局限,其水分协同虽加速渗透,但提取后易形成微量乳化残留,导致相分离稍慢并需额外低速离心步骤,以确保溶剂与产物的彻底分离,避免产量波动^[47]。总体而言,这些局限可通过相分离优化(如添加破乳剂)或杂质预筛模块缓解,进一步强化DME在湿藻提取中的实用价值。

2.3 提取其他高价值产品

2.3.1 精油与生物活性化合物提取 DME通过其独特的

亲水—亲脂双功能特性,在生姜、黑胡椒等植物中实现精油与油酸甘油酯的同步提取(提取率提升15%~22%)^[48]。在柑橘皮/叶体系中,DME利用水分亲和性破坏细胞壁微结构,显著提升传质效率,实现精油与类黄酮的协同萃取,提取率为85%^[32],在根癌农杆菌发酵液中,DME通过温和相变实现辅酶Q10的选择性萃取,避免高温导致的异构化损失^[49]。同时成功解吸活性炭吸附的茉莉花芳香化合物,回收率达92%^[50]。

后续研究拓展至薰衣草精油—橙皮油酸甘油酯^[51]、绿茶咖啡因—儿茶素^[52]、山竹果氧杂蒽酮^[53]等复合体系中,验证了DME对热敏性成分的保护优势。

2.3.2 蛋白质—脂质复合体系分离 DME最具突破性的应用是开发反分馏程序:在蛋黄/乳清体系中,其亲水特性诱导脂质高效溶出(提取率>90%),同时通过溶剂极性梯度变化触发目标蛋白质选择性沉淀^[54]。更关键的是,DME的共萃取行为可同步捕获水溶性乳清蛋白(如 α -乳白蛋白)^[55],突破传统有机溶剂无法提取亲水性蛋白的局限。

3 DME作为提取溶剂的生物安全性

DME的急性暴露毒性显著低于常规有机溶剂,其哺乳动物口服半数致死量(LD₅₀)>5 000 mg/kg,属《全球化学品统一分类和标签制度》第5类低毒物质^[56]。浓度与毒性密切相关:一般而言,暴露浓度越高,毒性效应越显著,因为高浓度可能导致更严重的生理影响,如器官损伤或死亡;反之,低浓度则风险较小^[57]。根据DME小鼠试验数据支撑:当空气中DME质量浓度达到1 881 mg/m³时,大鼠肺部特异性气相色谱—质谱联用分析显示代谢残留量为26~35 mg/m³,相当于DME在空气中质量浓度的1/61,小鼠吸入DME 60 min后,各器官中的质量浓度降至7.5×10⁻⁶ mg/m³以下^[58]。综上,DME的体内毒性较低,同时在血液中接触质量浓度高达1 881 mg/m³的DME作用下不会产生明显影响。

基于现有研究证据,DME作为绿色溶剂的显著优势在于其极低残留特性,该特性源于其物理化学性质与环境兼容性:常温常压下DME呈气态(沸点-24.8℃),提取后可通过温和减压或加热(如60℃/1 h)高效脱除,挥发效率>99.97%^[59]。该特性得益于DME的低沸点与高挥发性,使其在脱溶过程中几乎完全逸散,避免提取物污染。同时,DME已被欧洲食品安全局(EFSA)等机构认证为安全溶剂,且因其化学惰性,不与环境或基质反应,无副产物生成,显著降低生态负荷^[60]。综上,DME凭借可忽略的溶剂残留及优异的环境相容性,成为食品与医药领域可持续提取技术的理想选择。

4 结论

文章系统探讨了亚临界二甲醚在绿色提取技术中的独特作用,作为一种低沸点、高安全性的环保溶剂,其凭借两亲性在亚临界条件下(30~50 ℃, 5~7 MPa)直接处理含水率>80%的湿生物质,无需夹带剂或预干燥,即可高效捕获脂质、多不饱和脂肪酸和类胡萝卜素等功能成分,避免了传统乙醇提取的极性不足与冷冻干燥的高能耗困境。与常规溶剂相比,二甲醚传质速率提升 2~5 倍,活性保留率>90%,显著降低整体能耗 30% 以上,同时其公认安全物质认证确保残留<10 μg/kg 的生物安全性。随着对绿色化学和可持续发展的重视以及科技的进步,二甲醚将驱动可持续提取革新,为功能性食品和制药领域注入更具选择性和环保的活力。

参考文献

- [1] Level W E E. Workplace environmental exposure level (WEEL) committee occupational alliance for risk science (OARS) toxicology excellence for risk assessment (TERA) [J]. Toxicology and Industrial Health, 2022, 38(8): 435-443.
- [2] Gulati O P, Ottaway P B, Jennings S, et al. Botanical nutraceuticals (food supplements and fortified and functional foods) and novel foods in the EU, with a main focus on legislative controls on safety aspects[M]// Nutraceutical and functional food regulations in the United States and around the World. Academic Press, 2019: 277-321.
- [3] Ng S, Shao S Y, Ling N. Food safety risk-assessment systems utilized by China, Australia/New Zealand, Canada, and the United States[J]. Journal of Food Science, 2022, 87(11): 4 780-4 795.
- [4] Wang T, Zhu L, Mei L, et al. Extraction and separation of natural products from microalgae and other natural sources using liquefied dimethyl ether, a green solvent: a review[J]. Foods, 2024, 13(2): 352.
- [5] 耿俊峰, 梅丽华. 国内现运行二甲醚(DME)生产工艺路线对比[J]. 河北化工, 2008, 31(3): 42-43, 45.
Geng J F, Mei L H. The compare of the running DME process route in domestic[J]. Hebei Chemical Industry, 2008, 31(3): 42-43, 45.
- [6] Pollet P, Davey E A, Ureña-Benavides E E, et al. Solvents for sustainable chemical processes[J]. Green Chemistry, 2014, 16(3): 1 034-1 055.
- [7] Rajapaksha D S W, Shimizu N. Valorization of spent black tea by recovery of antioxidant polyphenolic compounds: Subcritical solvent extraction and microencapsulation[J]. Food Science & Nutrition, 2020, 8(8): 4 297-4 307.
- [8] Catchpole O J, Tallon S J, Eltringham W E, et al. The extraction and fractionation of specialty lipids using near critical fluids[J]. The Journal of Supercritical Fluids, 2009, 47(3): 591-597.
- [9] Patrice D Y, Gijsbert T T, Su Z, et al. What is next the greener future of solid liquid extraction of biobased compounds: novel techniques and solvents overpower traditional ones[J]. Sep Purif Technol, 2023, 320: 124147.
- [10] Bizak K, Škerget M, Košir I J, et al. Sub-and supercritical extraction of slovenian hops (*Humulus lupulus* L.) aurora variety using different solvents[J]. Plants, 2021, 10(6): 1 137.
- [11] Medina-Medrano J R, Torres-Contreras J E, Valiente-Banuet J I, et al. Effect of the solid-liquid extraction solvent on the phenolic content and antioxidant activity of three species of Stevia leaves[J]. Separation Science and Technology, 2019, 54(14): 2 283-2 293.
- [12] Selvamuthukumar M, Shi J. Recent advances in extraction of antioxidants from plant by-products processing industries [J]. Food Quality and Safety, 2017, 1(1): 61-81.
- [13] Lee S Y, Cho J M, Chang Y K, et al. Cell disruption and lipid extraction for microalgal biorefineries: a review[J]. Bioresource Technology, 2017, 244: 1 317-1 328.
- [14] Cravotto C, Fabiano-Tixier A S, Claux O, et al. Towards substitution of hexane as extraction solvent of food products and ingredients with no regrets[J]. Foods, 2022, 11(21): 3 412.
- [15] Chemat F, Abert-Vian M, Fabiano-Tixier A S, et al. Green extraction of natural products. Origins, current status, and future challenges[J]. TrAC Trends in Analytical Chemistry, 2019, 118: 248-263.
- [16] Hardouin K, Bedoux G, Burlot A S, et al. Enzyme-assisted extraction (EAE) for the production of antiviral and antioxidant extracts from the green seaweed *Ulva armoricana* (Ulvales, Ulvophyceae) [J]. Algal Research, 2016, 16: 233-239.
- [17] Rafińska K, Wrona O, Krakowska-Sieprawska A, et al. Enzyme-assisted extraction of plant material-new functional aspects of the process on an example of *Medicago sativa* L[J]. Industrial Crops and Products, 2022, 187: 115424.
- [18] Raza A, Li F, Xu X Q, et al. Optimization of ultrasonic-assisted extraction of antioxidant polysaccharides from the stem of *Trapa quadrispinosa* using response surface methodology[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2017, 94: 335-344.
- [19] Eskilsson C S, Björklund E. Analytical-scale microwave-assisted extraction[J]. Journal of Chromatography A, 2000, 902(1): 227-250.
- [20] 王文洁, 陈修彪, 陈云云, 等. 亚临界萃取技术在水产品营养成分提取领域研究进展[J]. 食品与机械, 2023, 39(2): 1-8, 24.
Wang W J, Chen X B, Chen Y Y, et al. Research progress of subcritical extraction technology in the field of nutrient component extraction from aquatic products[J]. Food & Machinery, 2023, 39(2): 1-8, 24.
- [21] Lardon L, Hélias A, Sialve B, et al. Life-cycle assessment of biodiesel production from microalgae[J]. Environmental

- Science & Technology, 2009, 43(17): 6 457-6 481.
- [22] Khonchaisri R, Sumonsiri N, Prommajak T, et al. Optimization of ultrasonic-assisted bioactive compound extraction from green soybean (*Glycine max* L.) and the effect of drying methods and storage conditions on procyanidin extract[J]. Foods, 2022, 11(12): 1 775.
- [23] Abudakar A R, Haque M. Preparation of medicinal plants: basic extraction and fractionation procedures for experimental purposes[J]. Journal of Pharmacy and Bioallied Sciences, 2020, 12(1): 1-10.
- [24] Mena-García A, Ruiz-Matute A I, Soria A C, et al. Green techniques for extraction of bioactive carbohydrates[J]. TrAC Trends in Analytical Chemistry, 2019, 119: 115612.
- [25] Belwal T, Ezzat S M, Rastrelli L, et al. A critical analysis of extraction techniques used for botanicals: trends, priorities, industrial uses and optimization strategies[J]. TrAC Trends in Analytical Chemistry, 2018, 100: 82-102.
- [26] Kumar K, Srivastav S, Sharanagat V S. Ultrasound assisted extraction (UAE) of bioactive compounds from fruit and vegetable processing by-products: a review[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2021, 70: 105325.
- [27] Ai-Dhabi N A, Ponnuragan K, Jeganathan P M. Development and validation of ultrasound-assisted solid-liquid extraction of phenolic compounds from waste spent coffee grounds[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2017, 34: 206-213.
- [28] Azmir J, Zaidul I S M, Rahman M M, et al. Techniques for extraction of bioactive compounds from plant materials: a review[J]. Journal of Food Engineering, 2013, 117(4): 426-436.
- [29] Kaya M, Cam M. Eritadenine: pressurized liquid extraction from *Lentinula edodes* and thermal degradation kinetics[J]. Sustainable Chemistry and Pharmacy, 2022, 29: 100809.
- [30] 牛逍瞳, 马燕, 杨域宁, 等. 亚临界丁烷萃取沙棘籽油工艺优化及多维品质分析[J]. 食品与机械, 2025, 41(9): 186-195.
- Niu X T, Ma Y, Yang Y N, et al. Optimization of subcritical butane extraction process for sea buckthorn seed oil and its multidimensional quality analysis[J]. Food & Machinery, 2025, 41(9): 186-195.
- [31] Kanda H, Hoshino R, Murakami K, et al. Lipid extraction from microalgae covered with biomineralized cell walls using liquefied dimethyl ether[J]. Fuel, 2020, 262: 116590.
- [32] Boonnoun P, Tunyasitkun P, Clowutimon W, et al. Production of free lutein by simultaneous extraction and de-esterification of marigold flowers in liquefied dimethyl ether (DME)-KOH-EtOH mixture[J]. Food Bioprod Process, 2017, 106: 193-200.
- [33] Kanda H, Wahyudion O, Machmudah S, et al. Direct extraction of lutein from wet macroalgae by liquefied dimethyl ether without any pretreatment[J]. Acs Omega, 2020, 5(37): 24 005-24 010.
- [34] Kuramochi H, Maeda K, Osako M, et al. Superfast transesterification of triolein using dimethyl ether and a method for high-yield transesterification[J]. Ind Eng Chem Res, 2018, 47(24): 10 076-10 079.
- [35] Huang Z G, Zheng H T, Brennan C S, et al. Production of milk phospholipid-enriched dairy ingredients[J]. Foods, 2020, 9(3): 263.
- [36] 勾华, 张美. 二甲醚的应用前景探讨[J]. 广州化工, 2013, 41(16): 13-15.
- Gou H, Zhang M. The application prospect of dimethyl ether [J]. Guangzhou Chemical Industry, 2013, 41(16): 13-15.
- [37] Wang Q, Oshita K, Takaoka M, et al. Influence of water content and cell disruption on lipid extraction using subcritical dimethyl ether in wet microalgae[J]. Bioresource Technology, 2021, 329: 124892.
- [38] 韩露, 项丹丹, 谢丹, 等. 甲壳类水产及其加工副产物中虾青素提取方法研究进展[J]. 食品与机械, 2024, 40(8): 197-204.
- Han L, Xiang D D, Xie D, et al. Advances in extraction methods of astaxanthin from crustacean aquatic products and their processing by-products[J]. Food & Machinery, 2024, 40(8): 197-204.
- [39] 谢鸿飞, 陈鑫, 徐文迪, 等. 反应精馏隔壁塔制二甲醚过程模拟与分析[J]. 辽宁化工, 2024, 53(8): 1 288-1 293.
- Xie H F, Chen X, Xu W D, et al. Simulation and analysis of reactive dividing wall column for dimethyl ether production[J]. Liaoning Chemical Industry, 2024, 53(8): 1 288-1 293.
- [40] 吴红艳, 石岩, 李秀鑫, 等. 大孔树脂纯化万寿菊中叶黄素的工艺优化[J]. 食品与机械, 2022, 38(9): 153-158.
- Wu H Y, Shi Y, Li X X, et al. Optimization of purification process of lutein from Marigold by macroporous resin[J]. Food & Machinery, 2022, 38(9): 153-158.
- [41] 李悦, 薛敬林, 张健, 等. 超临界 CO₂ 萃取对海带粉脂质、岩藻黄素及挥发性风味物质的影响[J]. 食品与机械, 2025, 41(2): 166-172.
- Li Y, Xue J L, Zhang J, et al. Effect of supercritical CO₂ extraction on lipids, fucoxanthin, and volatile flavor compounds in *Sacharina japonica* powder[J]. Food & Machinery, 2025, 41(2): 166-172.
- [42] Zhang D, Huang Y, Oshita K, et al. Liquefied dimethyl ether based multi-stage extraction for high efficient oil recovery from spent bleaching clay[J]. Waste Management, 2021, 136: 204-212.
- [43] Lemes A C, Egea M B, De Oliveira Filno J G, et al. Biological approaches for extraction of bioactive compounds from agro-industrial by-products: a review[J]. Frontiers in Bioengineering and Biotechnology, 2022, 9: 802543.
- [44] Kanda H, Fukuta Y, Wahyudiono, et al. Enhancement of lipid extraction from soya bean by addition of dimethyl ether as entrainer into supercritical carbon dioxide[J]. Foods, 2021, 10: 1 223.
- [45] Cheng Y, Xue F M, Yu S, et al. Subcritical water extraction of natural products[J]. Molecules, 2021, 26(13): 4 004.

- [46] Fang Y Z, Gu S Q, Liu S L, et al. Extraction of oil from high-moisture tuna liver by subcritical dimethyl ether: feasibility and optimization by the response surface method[J]. RSC Advances, 2018, 8(5): 2 723-2 732.
- [47] Chang A C C, Chang H F, Lin F J, et al. Biomass gasification for hydrogen production[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2011, 36(21): 14 252-14 260.
- [48] Haro-González J N, Castillo-Herrera G A, Martínez-Velázquez M, et al. Clove essential oil (*Syzygium aromaticum* L. Myrtaceae): extraction, chemical composition, food applications, and essential bioactivity for human health[J]. Molecules, 2021, 26(21): 6 387.
- [49] Krakowska-Sieprawska A, Kielbasa A, Rafińska K, et al. Modern methods of pre-treatment of plant material for the extraction of bioactive compounds[J]. Molecules, 2022, 27 (3): 730.
- [50] Grosso C, Valentao P, Ferreres F, et al. Alternative and efficient extraction methods for marine-derived compounds[J]. Mar Drugs, 2015, 13(5): 3 182-3 230.
- [51] Yen H W, Yang S C, Chen C H, et al. Supercritical fluid extraction of valuable compounds from microalgal biomass[J]. Bioresour Technol, 2015, 184: 291-296.
- [52] Jaswir I, Noviendri D, Hasrini R F, et al. Carotenoids: sources, medicinal properties and their application in food and nutraceutical industry[J]. Med Plants Res, 2021, 5(33): 7 119-7 131.
- [53] Catchpole O J, Grey J B, Perry N B, et al. Extraction of chili, black pepper, and ginger with near-critical CO₂, propane, and dimethyl ether: analysis of the extracts by quantitative nuclear magnetic resonance[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2003, 51(17): 4 853-4 860.
- [54] Nakamura A, Hara Y, Kawano T. Dewatering and extraction of hydrophilic solutes and essential oils from cryo-preserved lemon peels using liquefied dimethyl ether[J]. Solvent Extraction Research and Development, 2017, 24(1): 37-45.
- [55] Rapinel V, Santerre C, Hanaei F, et al. Potentialities of using liquefied gases as alternative solvents to substitute hexane for the extraction of aromas from fresh and dry natural products [J]. Comptes Rendus Chimie, 2018, 21(6): 590-605.
- [56] Kanda H, Li P, Makino H. Production of decaffeinated green tea leaves using liquefied dimethyl ether[J]. Food and Bioproducts Processing, 2013, 91(4): 376-380.
- [57] Nerome H, Hoshino R, Ito S, et al. Functional ingredients extraction from *Garcinia mangostana* pericarp by liquefied dimethyl ether[J]. Engineering Journal, 2016, 20(4): 155-162.
- [58] Catchpole O, Ryan J, Zhu Y, et al. Extraction of lipids from fermentation biomass using near-critical dimethylether[J]. The Journal of Supercritical Fluids, 2010, 53(1/2/3): 34-41.
- [59] Ye Q P, Jin X Y, Zhu X L, et al. An efficient extraction method for fragrant volatiles from *Jasminum sambac* (L.) Ait[J]. Journal of Oleo Science, 2015, 64(6): 645-652.
- [60] Eggmann F, Ayub J M, Conejo J, et al. Deep margin elevation-present status and future directions[J]. Journal of Esthetic and Restorative Dentistry, 2023, 35(1): 26-47.