

# 植物活性成分提取新技术及最新研究进展

郭娟<sup>1</sup>, 范晓丹<sup>2</sup>, 杨日福<sup>2</sup>, 丘泰球<sup>2</sup>

(1. 广东药学院食品科学学院, 广东 广州 510006;

2. 华南理工大学轻化工研究所, 广东 广州 510640)

**摘要:** 详细介绍了超声波提取、微波辅助提取、超临界流体提取、亚临界水提取等几种近年来植物活性成分提取方面的新技术, 及超声强化超临界 CO<sub>2</sub> 提取技术、超声-微波协同提取技术、超声强化亚临界水提取等最新研究进展, 重点阐述了这些新技术的原理、应用现状, 指出了存在的问题, 最后对这些新技术的应用及发展前景进行了探讨。

**关键词:** 植物; 活性成分; 提取

中图分类号: TQ028.8

文献标识码: A

文章编号: 0253-4320(2011)08-0022-05

## New techniques and recent research progress on extraction of active components from herbal medicines

GUO Jun, FAN Xiao-dan, YANG Ri-fu, QIU Tai-qiu

(1. School of Food Science, Guangdong Pharmaceutical University, Guangzhou 510006, China; 2. Institute of Light Industry and Chemical Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

**Abstract:** In this paper, several new techniques on extraction of active components from herbal medicines, such as ultrasonic wave extraction, microwave-assisted extraction, supercritical fluid extraction and subcritical water extraction, are introduced in detail. Furthermore, recent research progress of ultrasound-enhanced supercritical dioxide carbon extraction, ultrasound-microwave extraction and ultrasound-enhanced subcritical water extraction are stated. The extraction principle and application research status of these techniques are focused. The existing problems are pointed out. Finally, their application and development prospect are proposed.

**Key words:** herb; active components; extraction techniques

天然活性提取物因其高的安全性及功能活性, 已明显地渗入到食品、医药、化工、化妆品等行业<sup>[1-2]</sup>, 随着研究的进一步深入, 这种趋势还将大规模发展。因此, 利用各种提取技术从植物中提取具有独特功能和生物活性的成分已经成为目前研究的热点之一。近年来相继出现了一些新的提取技术, 如超临界流体提取及超声强化超临界流体提取、超声波-微波协同提取、亚临界水提取及超声强化亚临界水提取等, 这些新技术与传统的提取技术相比具有提取率高、提取速度快、环保节能等诸多优点, 为此, 本文较为详细地综述了这些提取新技术的原理、特点及最新研究进展, 旨在为这些新技术的广泛及深入应用提供依据。

## 1 植物活性成分提取新技术

### 1.1 超声波提取技术

超声波提取技术 (ultrasonic wave extraction, UWE) 是利用超声波的机械效应、空化效应及热效应, 通过增大介质分子的运动速度和运动频率, 增强介质的穿透力以促进提取的一种技术。近年来该技

术已经在活性成分如皂甙类、蒽醌类、多糖类等的提取中得到了应用, 具有缩短提取时间、提高活性成分提取率、节约能源、避免高温对成分的影响等优点, 并展示出了良好的应用前景。郭孝武<sup>[3]</sup>探讨了单频超声提取杜仲叶黄酮类物质的最佳工艺及机理: 采用体积分数为 40%、料液比 1:60 的乙醇浸泡 24 h, 再用超声提取 45 min, 杜仲叶中总黄酮类物质的提出率可达 25.43%。实验结果表明, 超声提取主要通过空化作用实现, 可使杜仲叶中细胞壁破裂, 加速细胞中总黄酮类物质直接向溶剂中溶解, 以便快速完全地提取。笔者所在的研究团队已经研制出 100 L 的双频超声强化溶剂提取中试装置, 并以黄柏为原料研究了双频超声对提取小檗碱的强化效果<sup>[4]</sup>, 结果表明, 25 kHz 与 40 kHz 双频超声时的提取率为 64.1%, 单频 25 kHz 及 40 kHz 时的提取率分别为 36.8% 和 19.0%, 双频超声强化的提取率显著高于单频超声强化的提取率。研究还表明, 双频超声强化可以降低提取温度, 缩短提取时间, 为热敏性药物的提取提供了新的强化方法<sup>[5]</sup>。目前该研究已在广州市白云山和记黄埔中药有限公司进入

收稿日期: 2011-03-21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (20776047); 广东省中医药局资助项目 (2010415)

作者简介: 郭娟 (1978-), 女, 博士, 讲师, 主要从事天然产物分离纯化新技术、新方法方面的研究, guojuan110@126.com。

中试阶段。并在此基础上,进一步研制出了  $1\text{ m}^3$  的三频超声强化溶剂提取产业化装置,目前该装置已在广州王老吉药业股份有限公司进行产业化应用,其提取效果非常显著。此外,本研究团队还利用双频、三频超声提取技术开展了海金沙、葛根、复方丹参、三七等单方或复方中药的工程化研究及中试放大实验<sup>[6-8]</sup>,解决了超声技术推向产业化的关键技术问题,直接形成了产业化的技术成果和产品,并与广州汉方现代中药研究开发有限公司合作完成了“十五”国家科技攻关计划重大项目。

## 1.2 微波辅助提取技术

微波辅助提取技术(microwave-assisted extraction, MAE)是利用微波能提高提取效率的一种新技术。它利用不同组分吸收微波能力的差异,使基体物质的某些区域或提取体系中的某些组分被选择性加热,从而使得被提取物质从基体或体系中分离,进入到介电常数较小、微波吸收能力相对较差的提取剂中,从而达到活性成分的溶出及提高产率的目的。由于微波较强的穿透力,可使反应物内外部同时均匀、快速地加热,可缩短生产时间、降低能耗,同时可提高收率和提取物的纯度<sup>[9]</sup>。黎海彬等<sup>[10]</sup>用微波辅助提取法提取干罗汉果中的罗汉果皂苷,结果显示此法提取率为 70.5%,比常规水提取法高 45%,还缩短了 50% 的时间。目前,微波辅助提取法以其

快速的提取速度和较好的提取物质量成为天然植物活性成分提取的有力工具。但由于微波技术是选择性内加热,另外,要求被处理的物料具有良好的吸水性,或者说待分离的产物所处的位置容易吸水,否则细胞难以吸收足够的微波能将自身击破,产物也就难以迅速释放出来。对于液体提取体系,要求溶剂物质具有极性,非极性溶剂对微波的作用不敏感,鉴于基体物质和提取体系的复杂性,微波提取技术的应用具有一定的局限性,尤其在微波提取的机理和工艺方面还有大量的工作要做。

## 1.3 超临界流体提取技术

超临界流体提取(supercritical fluid extraction, SFE)是一种较新型的提取分离技术,一般采用  $\text{CO}_2$  作为提取剂,20 世纪 80 年代中期,超临界二氧化碳提取技术逐步应用于植物活性成分的提取分离中,是研究和应用较为成功的一项新技术。其原理是利用超临界流体的独特溶解能力和物质在超临界流体中的溶解度对压力、温度的变化非常敏感的特性,通过升温、降压手段(或两者兼用)将超临界流体中所溶解的物质分离出来,达到分离提纯的目的,它兼有精馏和提取 2 种作用。具有活性成分不易失活、产品质量高、提取分离过程同步完成等优点,被认为是目前世界上绿色环保的高新分离技术,特别适合于不稳定天然产物和生理活性物质的分离与精制,

(上接第 21 页)

- [9] Jiao F, Harrison A, Jumas J C, *et al.* Ordered mesoporous  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  with crystalline walls[J]. *J Am Chem Soc*, 2006, 128(16): 5468 - 5474.
- [10] Jiao F, Jumas J C, Womes M, *et al.* Synthesis of ordered mesoporous  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  and  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$  with crystalline walls using post-template reduction/oxidation[J]. *J Am Chem Soc*, 2006, 128(39): 12905 - 12909.
- [11] 单永奎,王海文,孔爱国,等.以介孔碳为硬模板合成介孔氧化铁的方法:中国,200710036698.2[P].2007-08-01.
- [12] Shen W H, Dong X P, Zhu Y F, *et al.* Mesoporous  $\text{CeO}_2$  and CuO-loaded mesoporous  $\text{CeO}_2$ : synthesis, characterization, and CO catalytic oxidation property[J]. *Microporous and Mesoporous Materials*, 2005, 85(1/2): 157 - 162.
- [13] Yue W B, Zhou W Z. Synthesis of porous single crystals of metal oxides via a solid-liquid route[J]. *Chem Mater*, 2007, 19(9): 2359 - 2363.
- [14] Roggenbuck J, Koch G, Tiemann M. Synthesis of mesoporous magnesium oxide by CMK-3 carbon structure replication[J]. *Chem Mater*, 2006, 18(17): 4151 - 4156.
- [15] Ma C Y, Mu Z, Li J J, *et al.* Mesoporous  $\text{Co}_3\text{O}_4$  and Au/ $\text{Co}_3\text{O}_4$  catalysts for low-temperature oxidation of trace ethylene[J]. *J Am Chem Soc*, 2010, 132(8): 2608 - 2613.
- [16] Deng J G, Zhang L, Dai H X, *et al.* Ultrasound-assisted nanocasting fabrication of ordered mesoporous  $\text{MnO}_2$  and  $\text{Co}_3\text{O}_4$  with high surface areas and polycrystalline walls[J]. *J Phys Chem C*, 2010, 114(6): 2694 - 2700.
- [17] Liu Q, Wang A Q, Xu J M, *et al.* Preparation of ordered mesoporous crystalline alumina replicated by mesoporous carbon[J]. *Microporous and Mesoporous Materials*, 2008, 116(1/2/3): 461 - 468.
- [18] Wu Z X, Li Q, Feng D, *et al.* Ordered mesoporous crystalline  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$  with variable architecture and porosity from a single hard template[J]. *J Am Chem Soc*, 2010, 132(34): 12042 - 12050.
- [19] Wang Y G, Xia Y Y. Electrochemical capacitance characterization of NiO with ordered mesoporous structure synthesized by template SBA-15[J]. *Electrochimica Acta*, 2006, 51(16): 3223 - 3227.
- [20] Zhou Q, Li X, Li Y G, *et al.* Synthesis and electrochemical properties of semicrystalline gyroidal mesoporous  $\text{MnO}_2$  [J]. *Chin J Chem*, 2006, 24(7): 835 - 839.
- [21] Djinić P, Batista J, Cehić B, *et al.* Utilization of high specific surface area CuO- $\text{CeO}_2$  catalysts for high temperature processes of hydrogen production; stream re-forming of ethanol and methane dry re-forming[J]. *J Phys Chem A*, 2010, 114(11): 3939 - 3949.
- [22] 耿旺昌,赖小勇,李晓天.具有结晶孔壁介孔镓锌氧复合物[J]. *物理化学学报*, 2010, 26(2): 527 - 530. ■

目前已经成为食品、香料和医药等深加工领域中获得高品质活性产品的手段之一<sup>[11]</sup>。近年来该技术发展快速,并初步发展成为一个新兴的产业,在植物活性成分提取中有不少的成功实例<sup>[12]</sup>。然而 SFE-CO<sub>2</sub> 也有一定的局限性,其常用流体 CO<sub>2</sub> 由于非极性和相对分子质量低的特点,对许多极性较大或分子质量较大的物质缺乏足够的溶解性而提取效率不高,因而该技术通常较适用于亲脂性、小分子物质的提取,对于植物中的某些极性较强的活性成分,仅靠改变提取的压力和温度常难以达到理想的提取效果,必须在其提取体系中加入有机提携剂来提高其溶解强度,但这样一来又引入了有机溶剂的残留问题;另外由于水不溶于 CO<sub>2</sub>,因而超临界 CO<sub>2</sub> 提取过程中常需要将原料预先干燥,而干燥需要额外的成本,同时对芳香性化合物油也有损失的危险<sup>[13]</sup>。

#### 1.4 亚临界水提取技术

亚临界水(subcritical water)又称超加热水、高压热水或热液态水,是指在一定的压力下,将水加热到 100℃ 以上临界温度 374℃ 以下的高温,水体仍然保持在液体状态<sup>[14]</sup>。亚临界状态下流体微观结构的氢键、离子水合、离子缔合、簇状结构等发生了变化,因此亚临界水的物理、化学特性与常温常压下的水在性质上有较大差别。常温常压下水的极性较强,亚临界状态下,随着温度的升高,水的极性大大降低,由强极性渐变为非极性,其性质更类似于有机溶剂,可将溶质按极性由高到低提取出来,这样就可以通过控制亚临界水的温度和压力,进行选择提取,也可使水的极性在较大范围内变化,从而实现天然产物中活性成分从水溶性成分到脂溶性成分的连续提取。此外,亚临界水提取是以价廉、无污染的水作为提取剂,因此,该技术自问世以来,以其具有提取时间短、效率高、能耗低、产品质量高等优点备受关注,被称为绿色环保、前景广阔的变革性技术。

亚临界水提取技术(subcritical water extraction, SWE)作为一种新技术,国内外关于它的研究还处于探索阶段,尚未进行深入、全面的研究,相关研究基本上都是实验室样品处理的应用规模,没有上升到工业化应用的水平,因此很有必要加强工业化应用的相关研究;尤其是国内对该技术的研究才刚刚起步,相应的研究极为有限。为此,本研究团队已经以工业化应用为目标率先研制出提取罐容积为 2 L 的亚临界水提取装置,选用具有岭南特色的红葱头为原料进行了亚临界水提取洋葱精油的研究,并在此基础上正在进行食品香辛料、添加剂等的相关研

究,希望将来能得到一些具有参考价值的研究成果。

## 2 最新研究进展

上述几种新型的提取技术的确有利于提高活性成分的提取率,也大大缩短了提取时间,但还存在一些问题,如超临界二氧化碳提取法整个提取过程要在很高的压力下进行,故工艺设备要求高,投入大;亚临界水提取的对象多为固体原料,由于原料本身属性的限制,在提取罐中无法安装搅拌装置,物料往往是大量堆积在一起,导致传质效率低和提取的不均匀性,并且随装料量的增多和堆积高度的增大这种缺点表现得更为明显,超声提取法的提取率还有待提高。上述问题一定程度上制约了这些新型提取技术的广泛应用,为此,近年来,利用各种强化技术或进行技术的协同是人们解决这些问题的途径之一。

### 2.1 超声强化超临界 CO<sub>2</sub> 提取技术

超声强化超临界 CO<sub>2</sub> 提取技术(ultrasound-enhanced supercritical dioxide carbon extraction, USFE-CO<sub>2</sub>)是在超临界 CO<sub>2</sub> 提取的同时附加超声场,以达到降低提取压力和提取温度、缩短提取时间、提高提取率的技术。超声强化与其他强化方法相比较,具有无污染、强化效率高等优点。因此,目前超声作为超临界 CO<sub>2</sub> 提取强化的手段越来越得到研究人员的广泛关注,成为了一个研究的热点。

国外, Sethuraman 等<sup>[15]</sup>用超声强化超临界流体提取辣椒中的辣椒素,取得了良好的效果,提取率及提取容器的负载都明显提高。最近, Riera 等<sup>[16]</sup>报道了 20 kHz 的超声对超临界流体提取传质的强化作用,结果表明,20 kHz 的功率超声能够加快杏仁油的传质过程和最终提高杏仁油的提取率,提取率提高了约 20%,提取时间缩短了 30% 左右。Balachandran 等<sup>[17]</sup>研究了超声对超临界提取冷冻干燥姜粒的影响,在超声作用下,生姜辛辣化合物姜酚的提取率得到明显提高,提取率提高了 30%。

国内,方瑞斌等<sup>[18]</sup>对超声强化超临界流体提取紫杉醇进行了研究,结果表明,超临界流体完全提取红豆杉树皮中紫杉醇所耗时间和 CO<sub>2</sub> 用量是超声强化超临界流体提取的近 3 倍。在对质量分数 1.1% 紫杉醇浸膏样的提取试验中,发现对高含量样品,超声强化的超临界流体提取能很快达到 100% 提取,而单纯的超临界流体提取在 3 倍时间及相同用量条件下只能达到 41% 的提取率,这充分显示了该技术的优越性。李娟等<sup>[19]</sup>对超临界 CO<sub>2</sub> 提取除虫菊酯的超声强化进行了初步研究,结果表明,在

超声场中用超临界 CO<sub>2</sub> 提取除虫菊酯,不但提高了提取率,且不会引起除虫菊酯的降解。

近几年来,笔者所在的研究团队在超声强化超临界流体提取方面进行了大量的研究,研制了 1 L 和 5 L 超声强化超临界流体提取装置,并采用 1 L 超声强化超临界流体提取装置,分别从海藻中提取 EPA 和 DHA<sup>[20]</sup>、薏仁中提取薏苡仁油和薏苡仁酯<sup>[21]</sup>及香椿叶中提取黄酮类化合物<sup>[22]</sup>,发现相对于单独使用超临界流体提取,超声强化超临界流体提取过程不仅降低了提取系统的压力、提取温度、夹带剂用量和提取时间,而且提取率提高了 30% 左右,并揭示了超声强化超临界 CO<sub>2</sub> 提取的机理主要源于超声的机械波动效应和热效应。李超<sup>[23]</sup>将超声强化超临界 CO<sub>2</sub> 提取技术应用到了中药复方的研究开发及产业化研究中,从提取工艺、超声强化超临界 CO<sub>2</sub> 提取的机理、动力学模型以及产业化应用等方面对超声强化超临界 CO<sub>2</sub> 提取复方丁香肉桂挥发油进行了详细的研究,结果表明,相对于超临界 CO<sub>2</sub> 提取来说,超声强化超临界 CO<sub>2</sub> 用来提取复方丁香肉桂挥发油可以缩短提取时间、降低提取压力、提高挥发油的得率。

## 2.2 超声-微波协同提取技术

微波是一种非电离的电磁辐射,被辐射物质的极性分子在微波电磁场中快速转向及定向排列,从而产生撕裂和相互摩擦引起发热,同时可以保证能量的快速传递和充分利用,具有高效、节能、无工业污染等优点,但微波的穿透深度有限(与其波长在同一数量级),且它在强化提取过程中传质功能并不显著。超声波是一种高频机械波,具有湍动效应、微扰效应、界面效应和聚能效应等,但超声波所产生的热效应不显著,且局限在空化泡周围的极小范围。将它们两者结合起来,协同作用有利于破壁、组分释放等,即通过微波-超声波协同强化提取技术可获得一种高效、价廉、无污染的生物活性物质的提取方法。目前国内外已有利用该技术提取黄酮、土壤中微量多环芳烃、类胡萝卜素、香兰素、大豆油、中药的水溶性生物活性成分、多糖等物质的研究。

罗锋等<sup>[24]</sup>采用超声-微波协同提取法(ultrasound-microwave extraction)从甘草中提取黄酮。马利华等<sup>[25]</sup>研究了传统蒸馏法与超声波-微波协同提取法对牛蒡中类胡萝卜素提取率的影响,并通过正交实验确定了超声波-微波协同提取法的最佳提取条件为:超声波功率 40 W,微波功率 350 W,提取时间 30 s,料液比 1:25,牛蒡粉碎程度为 60 目。白红

进等<sup>[26]</sup>分别以无水乙醇、蒸馏水及无水乙醇-蒸馏水(体积比为 1:1)等为溶剂,采用超声-微波协同提取芦荟,并采用 743 食用油氧化稳定性测定仪分别测定提取物对菜籽油、猪油、棉籽油及葵花油的抗氧化作用。国外 Sharma A 等<sup>[27]</sup>采用微波-超声场协同提取香兰素, Li H 等<sup>[28]</sup>采用微波-超声场协同提取大豆油, He J T 等<sup>[29]</sup>采用微波-超声场协同从中药中提取水溶性生物活性成分,均取得较好的效果。

## 2.3 超声强化亚临界水提取

亚临界水提取技术作为一种新兴的技术,存在着提取率有待提高的问题,此外由于它的提取过程需要在较高的温度下进行,所以在尽可能短的时间内获得高的提取率,无论对减少能耗还是避免活性成分的热降解都有着积极的作用。超声波是频率为  $2 \times 10^4 \sim 10^9$  Hz 的声波,由一系列疏密相间的纵波组成,在介质中传播时可导致介质粒子的机械振动,从而引起与介质的相互作用。因此,将超声波提取技术应用到亚临界水中,利用超声波在液体介质中传播时所特有的空化效应,加上超声波传播产生的机械振动、微射流、微声流等多极效应,使活性物质能在较低的温度下更容易被提取出来,从而达到提高活性成分提取率的目的。目前本研究团队已经成功研制出 2 L 的超声强化亚临界水提取装置,并将该技术应用到植物中的风味营养成分的提取中,正在进行“超声强化亚临界水提取植物风味营养物质”的研究。与此同时,在国家自然科学基金项目和“十一五”国家科技支撑计划重点项目的支持下,本研究团队将该技术应用到了中药及海洋植物活性成分的提取中,正在进行超声强化亚临界水提取肉桂、紫草、砂姜、砂仁等植物中活性成分的详细研究。

## 3 展望

植物药物活性成分的提取技术近几年发展非常迅速,不断融入新的技术,而且出现的诸多新型提取技术,与传统方法相比,无论在提取效率方面还是自动化程度方面都有了很大的进步。但由于是新型的技术,相关的研究还很不完善,有以下几个方面的工作尚需进一步展开:

(1) 加强新技术应用于工业化生产的研究。目前上述新型的提取技术大多处在实验室规模的研究上,因此,加强有关工程问题的研究,使这些新型的提取技术向着有利于工业化大规模生产的方向发展是今后研究的一个重点。

(2) 提取理论的研究。对提取理论的深入研究是提高提取技术的基础,目前对这些新型提取技术的研究大多集中在该技术应用的可行性方面,对提取过程的机理性研究工作还是初步的、多处于定性讨论的阶段。提取技术对动力学模型中参数的影响可以反映出提取技术的特点,因此加强植物药物活性成分提取动力学数学模型的建立及参数分析,对促进这些新型提取技术的快速发展具有重要的意义。

(3) 提取技术的联用。无论是何种提取技术都或多或少存在着一些不足,即使是现在运用较好的一些新技术,也都存在着不尽人意的地方,因此,根据植物药物原料与期望的目标产物的特性,选择不同方法进行提取或多种提取方法联合用,达到最大可能保留活性成分、提高活性组分的提取效率的目的,可能是未来有所突破的一个方向。

### 参考文献

- [1] 谭天伟. 天然产物分离新技术[J]. 化工进展, 2003, 22(7): 665-668.
- [2] 刘辉琳, 唐明林, 安莲英, 等. 中草药化学成分提取新技术[J]. 广州化学, 2003, 28(2): 59-64.
- [3] 郭孝武. 超声提取杜仲叶中黄酮类物质工艺研究[J]. 陕西师范大学学报: 自然科学版, 2005, 33(4): 59-61.
- [4] 丘泰球, 曾荣华, 张晓燕. 双频超声强化提取的机理[J]. 华南理工大学学报: 自然科学版, 2006, 34(8): 89-93.
- [5] 曾荣华, 丘泰球, 陆海勤. 双频超声空化效应强化提取中药有效成分的实验研究[J]. 声学技术, 2005, 24(4): 219-222.
- [6] 贲永光, 丘泰球, 阎杰. 双频超声强化从海金沙中提取黄酮的实验研究[J]. 声学技术, 2006, 25(3): 209-213.
- [7] 张晓燕, 丘泰球, 徐彦渊, 等. 双频超声强化提取葛根有效部位的研究[J]. 食品工业科技, 2006, 27(3): 51-54.
- [8] 贲永光, 丘泰球, 李金华. 双频超声强化对三七总皂苷提取的影响[J]. 江苏大学学报: 自然科学版, 2007, 28(1): 12-16.
- [9] 王艳, 张铁军. 微波提取技术在中药有效成分提取中的应用[J]. 中草药, 2005, 36(3): 470.
- [10] 黎海彬, 李琳, 胡松青, 等. 微波辅助提取罗汉果皂苷的研究[J]. 食品科学, 2003, 24(2): 92-95.
- [11] De Castro M D L, Jiménez Carmona M M. Where is supercritical fluid extraction going[J]. Trends in Analytical Chemistry, 2000, 19(4): 223-227.
- [12] 林秀仙, 梁宝钻, 潭晓华, 等. 超临界 CO<sub>2</sub> 提取杏仁油的工艺研究[J]. 中药材, 1998, 21(8): 403-405.
- [13] 朱自强. 超临界流体技术——原理和应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2001.
- [14] Ozel M Z, Kaymaz H. Superheated water extraction, steam distillation and Soxhlet extraction of essential oils of *Origanum onites* [J]. Anal Bioanal Chem, 2004, 379: 1127-1133.
- [15] Sethuraman, Ravishankar. Supercritical fluid extraction of capsaicin from peppers[J]. USA: Texas Tech University, 1997: 101-102.
- [16] Riera E, Golas Y, Blanco A, et al. Mass transfer enhancement in supercritical fluids extraction by means of power ultrasound[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2004, 11: 241-244.
- [17] Balachandran S, Kentish S E, Mawson R, et al. Ultrasonic enhancement of the supercritical extraction from ginger[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2006, 13: 471-479.
- [18] 方瑞斌, 张世鸿. 超声强化超临界萃取紫杉醇的研究[J]. 分析化学新进展, 1998, 15(6): 1243-1244.
- [19] 李娟, 张智燕, 郭可勇, 等. 超声场强化超临界 CO<sub>2</sub> 萃取除虫菊酯的初步研究[J]. 应用声学, 2006, 25(1): 43-47.
- [20] Qiu T Q, Ding C M, Hu A J. Analyses of factors affecting the ultrasonically-enhanced supercritical fluid extraction of EPA and DHA from algae[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2004, 32(4): 43-47.
- [21] 丘泰球, 杨日福, 胡爱军, 等. 超声强化超临界流体萃取薏苡仁油和薏苡仁酯的影响因素及效果[J]. 高校化学工程学报, 2005, 19(1): 30-35.
- [22] 丁彩梅, 丘泰球, 陆海勤. 双频超声强化超临界流体萃取黄酮类化合物[J]. 化学工程, 2005, 33(6): 67-70.
- [23] 李超. 超声强化超临界 CO<sub>2</sub> 萃取复方丁香肉桂挥发油的研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2008.
- [24] 罗锋, 汪河滨, 杨玲, 等. 超声-微波协同萃取法提取甘草黄酮的研究[J]. 食品研究与开发, 2006, 27(8): 127-128.
- [25] 马利华, 秦卫东, 戴晓娟. 超声波-微波协同提取牛蒡中类胡萝卜素[J]. 食品研究与开发, 2007, 28(1): 81-85.
- [26] 白红进, 汪河滨, 杨翔. 芦荟超声-微波协同萃取物抗脂质氧化作用的研究[J]. 塔里木大学学报, 2006, 18(4): 62-67.
- [27] Sharma A, Chandra Verma S, Saxena N, et al. Microwave- and ultrasound-assisted extraction of vanillin and its quantification by high-performance liquid chromatography in *Vanilla planifolia* [J]. Journal of Separation Science, 2006, 29(5): 613-619.
- [28] Li H, Pordesimo L O, Weiss J, et al. Microwave and ultrasound assisted extraction of soybean oil [J]. Transactions of the ASAE, 2004, 47(4): 1187-1194.
- [29] He J T, Shi Z H, Chang W B. Comparison of microwave-assisted and ultrasound-assisted extraction for determination of main water-soluble bioactive constituents in traditional Chinese medicinal preparation Tongmaichongji by HPLC-DAD [J]. Journal of Liquid Chromatography and Related Technologies, 2004, 27(11): 1769-1784. ■

欢迎订阅《现代化工》杂志, 邮发代号 82—67。