

# 超临界流体萃取技术在农产品加工业中的应用进展

王晶晶<sup>1,2</sup>, 孙海娟<sup>3</sup>, 冯叙桥<sup>1,3,4\*</sup>

(1. 渤海大学食品科学研究院辽宁省食品安全重点实验室, 锦州 121013; 2. 辽宁医学院食品科学与工程学院, 锦州 121001; 3. 沈阳农业大学食品学院, 沈阳 110866; 4. 辽宁省食品质量与安全学会, 沈阳 110866)

**摘要:** 超临界流体萃取技术是一种清洁、高效的分离方法, 具有操作条件温和、无溶剂残留、分离效率高等特点, 正受到越来越广泛的关注。本文简要介绍了超临界流体萃取的基本原理、影响超临界流体萃取的因素以及超临界流体萃取技术在农产品加工业中的应用, 并对超临界流体萃取技术与其他高新技术联用情况进行了概述与展望, 以期超临界流体萃取技术在农产品加工业的进一步研究与应用提供参考和借鉴。

**关键词:** 超临界流体萃取; CO<sub>2</sub> 流体; 农产品加工

## Application progress of the use of supercritical fluid extraction technology in agricultural produces

WANG Jing-Jing<sup>1,2</sup>, SUN Hai-Juan<sup>3</sup>, FENG Xu-Qiao<sup>1,3,4\*</sup>

(1. Food Safety Key Laboratory of Liaoning Province, Food Science Research Institute of Bohai University, Jinzhou 121013, China; 2. College of Food Science and Engineering, Liaoning Medical University, Jinzhou 121001, China; 3. College of Food Science, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China; 4. Liaoning Province Society of Food Quality and Safety, Shenyang 110866, China)

**ABSTRACT:** Supercritical fluid extraction (SFE) technology is a clean, efficient separation method, and it has the advantages of mild reaction condition, no residual solvent and higher separation efficiency. So it is receiving more and more attention. The basic principle of SFE technology, impact factors and applications of supercritical carbon dioxide fluid extraction technology for agricultural product processing industry were briefly described in this paper. Furthermore, the situation of SFE technology combined with other technologies was presented and discussed in order to provide useful references to further SFE research.

**KEY WORDS:** supercritical fluid extraction; carbon dioxide fluid; agricultural product processing

## 1 引言

近年来, 随着人们对超临界流体 (supercritical

fluid, SCF) 性质了解的不断深入, 超临界流体萃取 (supercritical fluid extraction, SFE) 技术越来越受到国际科技界和工业界的广泛关注, 已经成为一种独特、

基金项目: 渤海大学人才引进基金项目 (BHU20120301), 辽宁省食品质量与安全学会研究课题 (LSFQS201101YJ001)

**Fund:** Supported by Bohai University Talent Introduction Foundation (BHU20120301) and Institute of Food Quality and Safety in Liaoning Province Research Subject (LSFQS201101YJ001)

\*通讯作者: 冯叙桥, 教授, 主要研究方向为果蔬质量与安全控制。E-mail: feng\_xq@hotmail.com

\*Corresponding author: FENG Xu-Qiao, Professor, Food Science Research Institute of Bohai University, No.19, Technology Road, Songshan District, Jinzhou 121013, China. E-mail: webmaster@bhu.edu.cn

高效、清洁、节能的分离方法, 在农产品加工、分离提取方面展现出独特的优势<sup>[1]</sup>。自 1978 年 1 月在原西德举行的首次超临界流体萃取技术研讨会后, 有关超临界流体对液态和固态物质有显著溶解能力这种物理现象的报道<sup>[1]</sup>相继出现。随后, 美国的 Todd 和 Elgin 从理论上提出超临界流体用于萃取分离的可能性, 至此, 超临界流体萃取技术在上受到人们的极大关注, 并推动了该技术的研究与发展<sup>[2]</sup>。目前, 超临界流体萃取技术在国内迅速发展, 已被广泛应用于从咖啡中提取咖啡因<sup>[3]</sup>、从啤酒花中提取有效成分<sup>[4]</sup>等食品工业中。

## 2 超临界流体萃取的基本原理

任何纯物质都有一个临界点, 在此临界点上, 气相和液相的界面消失, 两相成为混合均一的流体状态, 处于这种状态的流体被称为超临界流体<sup>[5]</sup>。超临界萃取是利用超临界流体的溶解能力与其密度的关系, 即利用压力和温度对超临界流体溶解能力的影响而进行的。在超临界状态下, 将超临界流体与待分离的物质接触, 使其有选择性地把极性大小、沸点高低和分子量大小的成分依次萃取出来<sup>[6]</sup>。在此过程中, 还可借助减压、升温等方法使超临界流体变成普通气体, 使被萃取物质完全或基本析出, 进而达到分离纯化的目的<sup>[7]</sup>。

超临界流体是处于临界温度( $T_C$ )和临界压力( $P_C$ )以上, 介于气体和液体之间的流体。超临界流体具有气体和液体的双重特性, 其密度和液体相近, 黏度与气体相近, 但扩散系数约比液体大 100 倍。超临界流体与气体、液体的一些物理性质的比较见表 1<sup>[8]</sup>。

表 1 超临界流体与其他流体传递性质的比较<sup>[8]</sup>  
Table 1 Comparison of transfer property between SCF and other fluids<sup>[8]</sup>

项目	相态		
	液体	超临界流体*	气体
密度/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	$1.0 \times 10^3$	$7.0 \times 10^2$	1.0
黏度/ $\text{Pa} \cdot \text{s}$	$10^{-4}$	$10^{-5}$	$10^{-6} \sim 10^{-5}$
扩散系数/ $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	$10^{-9}$	$10^{-7}$	$10^{-5}$

\* 32 °C、13.78 MPa 时的  $\text{CO}_2$

由于溶解过程包含分子间的相互作用和扩散作用, 因而超临界流体对许多物质有很强的溶解能力,

这一特性使得超临界流体成为一种好的萃取剂。而超临界流体萃取就是利用超临界流体的这一强溶解能力特性, 从动植物中提取各种有效成分, 再通过减压等方法将其释放出来的过程。超临界流体对物质进行溶解和分离的过程就叫超临界流体萃取。目前, 超临界流体主要有  $\text{CO}_2$ 、 $\text{C}_6\text{H}_6$ 、 $\text{CH}_4$ 、 $\text{C}_2\text{H}_6$ 、 $\text{C}_3\text{H}_8$ 、 $\text{C}_2\text{H}_5\text{O}$  等含碳的、低相对分子质量的化合物以及  $\text{H}_2\text{O}$  和  $\text{NH}_3$  等, 工业上使用较多的超临界流体主要有  $\text{CO}_2$  和  $\text{H}_2\text{O}$ <sup>[9]</sup>。表 2 中列举了一些可用作超临界流体萃取溶剂的流体临界性质<sup>[10]</sup>。虽然对于某些低挥发性物质的萃取,  $\text{CO}_2$  比不上常规的有机溶剂, 但因其具有无害、选择性好、所得产品无有机溶剂残留、保护活性物质生理活性及合理临界特性等优点<sup>[11-14]</sup>, 因而是食品工业中广为使用的萃取剂。

表 2 一些可用作超临界流体萃取溶剂的流体临界性质<sup>[10]</sup>  
Table 2 The critical property of some supercritical fluid extraction solvents

物质	临界温度 $T_C/\text{K}$	临界压力 $P_C/\text{MPa}$
二氧化碳	304.2	7.37
乙烷	305.4	4.88
乙烯	282.4	5.04
丙烷	369.8	4.25
丙烯	365.0	4.62
异丙醇	508.3	4.76
氨	405.6	11.28
水	647.3	22.05
苯	562.1	4.89
甲苯	591.7	4.11

## 3 影响超临界流体萃取的因素

超临界流体萃取首先将萃取剂转变为超临界状态, 再将萃取流体导入萃取釜内与物料充分接触, 然后经分离釜将目标组分与流体分离, 进而收集目的产物的过程。David 等<sup>[15]</sup>指出, 影响萃取效率的因素主要有溶质在流体中的溶解度、流体扩散至样品母体内的速度、溶质-母体间相互作用力; 并指出压力、温度、时间、萃取溶剂流速等参数以及溶剂极性也影响萃取效率。Careri 等<sup>[16]</sup>研究各参数对超临界萃取螺旋藻中类胡萝卜素过程的影响, 结果显示, 萃取温度对萃取率的作用甚微, 而萃取压力的作用却十

分显著。有研究显示,蔷薇果种子油的提取量会随着萃取压力的提高在短时间内迅速增加,随着萃取的进行逐步缓慢,而琵琶种子油提取量会随着萃取温度的上升而减少<sup>[17]</sup>。Yamini等在分离茴香精油时检验了萃取时间对所得精油的影响,发现增加萃取时间使萃取物中大多数组分有所增多,而当静态萃取时间超过10 min,从金丝桃花叶中提取间苯三酚的萃取产率将不再增加<sup>[18]</sup>。

影响超临界流体特别是超临界CO<sub>2</sub>流体溶解能力的最主要因素是溶质的性质。研究发现,超临界CO<sub>2</sub>对低分子量的脂肪烃、低极性的亲脂性化合物如酯、醚、醛等表现出较好的溶解能力,而对于大多数无机盐、极性较强的糖、氨基酸、淀粉等几乎不溶,物质中引入强极性的官能团如-OH、-COOH等也会造成萃取的困难<sup>[19]</sup>。因此,为了提高超临界CO<sub>2</sub>的溶解能力,可通过加入少量称为夹带剂物质来提高溶解能力。通常使用的夹带剂有水、甲醇、乙醇、丙酮、丙烷等。

此外,流体流速也会对萃取过程产生一定的影响。增大流速可以缩短萃取时间,但超过一定限度时,CO<sub>2</sub>流体中溶质含量也会急剧降低。但对于一些溶质与基体作用较弱且浓度较高的体系,增大流体流速可显著提高萃取效率。另外,在超临界流体萃取过程中还常采用微波强化、超声波强化、电场强化、磁场强化以及搅拌等必要的措施来减少溶质的阻力,强化超临界流体萃取的传质效果<sup>[20]</sup>。

#### 4 超临界流体萃取在食品工业中的应用

超临界流体技术在萃取和精馏过程中,作为常规分离方法的替代方法,有着许多潜在的应用前景。近二十年来,该技术的研发取得了很大的进展,特别是超临界CO<sub>2</sub>流体萃取技术以其提取率高、产品纯度高、过程能耗低、处理简单、不产生有害物质等优势<sup>[21]</sup>在食品工业特别是农产品加工应用中正在不断扩展。

首先,用于食品风味成分的萃取。李松等<sup>[22]</sup>以瑯溪蜜柚果皮为原料,通过超临界萃取技术制取瑯溪蜜柚精油,获得了最佳提取条件:时间为92.4 min、温度为38.22℃、压力为18.26 MPa,在此条件下产物得率为10.28%。吴雪辉等<sup>[23]</sup>采用超临界CO<sub>2</sub>流体萃取肉桂精油,其最佳的萃取条件为压力15 MPa、温度40℃、时间2 h时,肉桂精油的产率为3.69%,

较传统水蒸气蒸馏法产率大大提高,萃取时间明显缩短,产品品质也有很大改善,且能有效保留肉桂中的天然香味和色泽。研究发现,超临界流体萃取在温度为30℃、压力为15 MPa时,提取的薄荷精油品质最好,且优于蒸汽蒸馏法<sup>[24]</sup>。

其次,用于动植物油油的萃取分离。郭宁平<sup>[25]</sup>研究发现,苦瓜籽油最佳萃取工艺参数:萃取压力为37 MPa、萃取温度为40℃、CO<sub>2</sub>流量为40 L/h、萃取时间为2 h,此条件下苦瓜籽油得率为97.2%。马玉花等<sup>[26]</sup>对苦杏仁脂肪油的超临界CO<sub>2</sub>萃取工艺进行了研究,在最佳萃取工艺条件下杏仁油的得率为52.98%,高于已有报道。此外,超临界CO<sub>2</sub>萃取技术还主要应用在大豆油<sup>[27]</sup>、葡萄籽油<sup>[28]</sup>以及月见草油、小麦胚芽油、沙棘油、红花籽油、高含二十碳五烯酸(eicosapentenoic acid, EPA)和二十二碳六烯酸(docosahexaenoic acid, DHA)的鱼油与海豹油等产量少而附加值高的功能性油脂制备上<sup>[19]</sup>。

再次,用于食品中某些特定成分的萃取。潘利华等<sup>[29]</sup>通过正交试验确定了超临界流体萃取大豆异黄酮的最佳萃取条件:CO<sub>2</sub>流量为8 L/h,静萃取时间120 min,动萃取时间60 min,每克脱脂豆粕的乙醇用量3 mL,萃取稳定55℃,萃取压力30 MPa。张德权等<sup>[30]</sup>采用超临界CO<sub>2</sub>萃取技术获得了大豆卵磷脂的最佳萃取工艺条件:萃取压力为40 MPa、萃取温度为40℃、萃取时间为150 min、乙醇添加量为20%,卵磷脂的萃取率为93%,纯度达78.24%。此外,王大为等<sup>[31]</sup>研究发现,经超临界CO<sub>2</sub>萃取玉米醇溶蛋白,萃取后玉米黄粉蛋白质含量为90.46%,与未经超临界CO<sub>2</sub>萃取处理的玉米黄粉相比,玉米醇溶蛋白提取率提高50.33%,玉米醇溶蛋白水解率提高47.16%。

此外,用于食品脱色脱臭。张郁松<sup>[32]</sup>研究了辣椒红素有机回流萃取和超临界CO<sub>2</sub>萃取,对比了萃取条件、色素得率、感官品质及产品稳定性。结果显示,采用超临界CO<sub>2</sub>萃取法提取出来的辣椒红素得率高出溶剂法53.89%,且色素色价高,色泽鲜艳呈暗红色的油状液体,无辣味,感官品质优于溶剂法。还有研究发现,采用超临界萃取紫草所得紫草素产率高于有机溶剂提取,且可用于工业化生产<sup>[33]</sup>。

超临界CO<sub>2</sub>萃取技术能够对食品工业生产过程中产生的副产品及废弃物进行处理,分离出有价值的产物,进而实现副产品及废弃物的再次利用。Wu

等<sup>[34]</sup>采用超临界 CO<sub>2</sub> 萃取技术结合改性剂乙醇从生产黄酒的副产物酒糟中提取多酚类物质, 效果较好且所用的时间较传统的溶剂提取更短。此外, Kas-sama 等<sup>[35]</sup>利用中心复合旋转设计模型研究了超临界流体萃取番茄皮中番茄红素的研究, 确定出了最高产率所需的工艺条件。

总之, 超临界 CO<sub>2</sub> 萃取技术采用的萃取剂具有无燃性、无化学反应、无污染、无毒、安全性高等优点, 其在提取各种天然产物中的生理活性物质方面显示出许多独特的优越性, 成为了近几年超临界流体技术的研究热点。

## 5 超临界流体萃取技术与其他高新技术联用

与传统的提取技术相比, 尽管超临界 CO<sub>2</sub> 萃取技术具有无可比拟的优越性, 但也存在着自身不可克服的问题, 如对极性大、相对分子质量超过 500 的物质萃取效果较差; 需要大量实验来确定流体的种类及配比; 对于成分复杂的原料, 单独采用超临界 CO<sub>2</sub> 流体萃取技术往往不能有效地分离各组分, 使得提取纯度不够等<sup>[36]</sup>。随着科学技术的发展, 国产设备技术逐渐成熟, 超临界设备的投资将会大大降低, 若与其它单元操作结合应用将进一步提高生产效率。

首先, 结合 SFE-精馏分离技术。为了提高超临界流体的分离效果, 可将超临界流体萃取装置与分子蒸馏、精馏柱、层析柱联用, 最大限度的发挥超临界流体的萃取分离效果。魏福祥等<sup>[37]</sup>采用超临界 CO<sub>2</sub> 萃取-精馏技术从小米细糠中提取小米糠油, 出油率可达 19.69%, 且各项理化指标均优于市售小米糠油。吴永平等<sup>[38]</sup>研究超临界 CO<sub>2</sub> 萃取和分子蒸馏联用提取泽泻中的 23-乙酰泽泻醇 B, 所得的产物含量为 13.89%, 且操作过程高效无污染。

其次, 与 SFE-GC 联用。这是 SFE 与色谱技术联用最成功的一种模式。大多通过一根毛细管限流器对 SFE 进行降压, 然后低温补集萃取物, 再快速升温切换进样而实现的。玄淑华等<sup>[39]</sup>采用气相色谱-质谱 (gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS) 法对关苍术 CO<sub>2</sub> 超临界萃取物进行了测定分析, 从中鉴定出了 70 余种化合物。蔡定建等<sup>[40]</sup>通过超临界萃取及气相色谱质谱联用仪测得脐橙油中的主要成分为柠檬烯, d-蒎烯, 月桂烯, 还有少量的 VE、 $\beta$ -水芹烯、苯和蒎烯。危晴等<sup>[41]</sup>利用超临界萃取技术对薏米的营养成分进行提取, 并用 GC-MS 分析了其化学成

分。研究表明, 薏米的超临界提取物中油酸和亚油酸的含量较高, 具有很好的营养保健作用。

再次, 与 SFE-HPLC 联用。SFE-HPLC 具有高选择性、高灵敏性、自动化程度高等特点, 其操作简单快速, 可完成动态分析过程。SFE-HPLC/2D-HPLC 在线联用系统已被成功地应用于灵芝子实体的高效、快速萃取和在线分离分析<sup>[42]</sup>。据相关报道<sup>[43-45]</sup>, SFE-HPLC 联用法操作简便快速, 萃取完全。宿树兰等<sup>[46]</sup>采用正交试验优化超临界流体萃取姜黄素的工艺条件, 采用 HPLC 法测定姜黄素的含量, 结果显示该法操作简便、无有机溶剂残留, 切实可行。

此外, 超临界流体萃取技术还可与核磁共振<sup>[47]</sup>、微波处理<sup>[48]</sup>、吸附分离及超滤分离<sup>[49]</sup>等技术联合应用, 并取得了较好的试验效果。总之, 超临界流体萃取技术与其他分离分析技术联用, 提高了分离分析的准确度、精密度与操作速度。同时, 联用技术也极大地推动了超临界流体萃取技术的发展, 为进一步探索开发超临界流体萃取技术的应用前景提供了借鉴和参考。

## 6 结语与展望

目前, 超临界流体萃取技术已经取得了较好的发展, 应用于食品工业特别是从咖啡中提取咖啡因、从啤酒花中提取有效成分等研究均取得了成功。但是该技术至今仍未获得大规模的推广应用, 并存在萃取过程基本热力学模型缺乏、萃取过程物性数据少、设备不完善等问题。因此, 超临界流体萃取技术仍需进一步的研究与完善。

随着人们物质生活水平的提高和对健康的日益重视, 提高产品质量和研究开发高附加值、高档次、高质量的产品逐渐成为人们的新要求。超临界 CO<sub>2</sub> 流体萃取技术是一种纯净、安全、稳定性强的分离方法, 能够保持分离物质的生物活性, 且具有色味纯正、提取率高等优点, 已经成为天然产物开发中一种具有相当发展潜力的高新提取分离方法。我国超临界 CO<sub>2</sub> 萃取技术在食品工业的研究起步较晚, 但是随着高新技术的不断发展和人们研究的不断深入, 超临界 CO<sub>2</sub> 流体萃取技术必将取得更瞩目的发展。此外, 超临界萃取技术与精馏、GC 和 HPLC 等先进分析技术的联用, 能够充分发挥这些现代分析技术的优点, 对萃取效率、萃取物组分、有效成分含量以及萃取物纯度等进行深入研究, 为全过程的质量控制提供了保证。

## 参考文献

- [1] 霍鹏, 张青, 张滨, 等. 超临界流体萃取技术的应用与发展[J]. 河北化工, 2010, 33(3): 25–29.  
Huo P, Zhang Q, Zhang B, *et al.* Development and application of supercritical fluid extraction technology [J]. Hebei Chem Eng Ind, 2010, 33(3): 25–29.
- [2] 邵弘. 超临界二氧化碳萃取技术在大豆及其它食品加工中的应用[J]. 大豆通报, 2003, (2): 27–28.  
Shao H. Application of supercritical carbon dioxide extraction technology in soybean and other food processing [J]. Soybean Bull, 2003, (2): 27–28.
- [3] 管荷兰, 徐吉成, 蔡笑笑, 等. 超临界技术的发展现状与前景展望[J]. 污染防治技术, 2008, 21(2): 30–34.  
Guan HL, Xu JC, Cai XX, *et al.* Advances and prospects of supercritical technology [J]. Poll Control Technol, 2008, 21(2): 30–34.
- [4] 李志军, 杨东辉, 陈金珠, 等. 超临界流体技术的应用及研究进展[J]. 化工技术与开发, 2006, 35(10): 22–25, 33.  
Li ZJ, Yang DH, Chen JZ, *et al.* Progress on research and application of supercritical technology [J]. Technol Dev Chem Ind, 2006, 35(10): 22–25, 33.
- [5] 刘宝菊, 张艳稳, 刘晓峰, 等. 超临界萃取技术在酿酒生产中的应用进展[J]. 酿酒, 2009, 36(1): 18–20.  
Liu BJ, Zhang YW, Liu XF, *et al.* Study on supercritical fluid extraction technology in the production of alcohol [J]. Liquor Mak, 2009, 36(1): 18–20.
- [6] 王莹. 超临界萃取在中药提取中的应用于发展[J]. 中医临床研究, 2011, 3(9): 101.  
Wang Y. Applications and development of SFE in TCM extraction [J]. Clin J Chin Med, 2011, 3(9): 101.
- [7] 唐仕荣. 超临界 CO<sub>2</sub> 萃取技术及其在天然产物提取中的应用[J]. 化工时刊, 2007, 21(7): 71–74.  
Tang SR. Application of supercritical CO<sub>2</sub> extraction in study of natural products [J]. Chem Ind Time, 2007, 21(7): 71–74.
- [8] 李弈为, 赖万东. 大蒜精油的超临界 CO<sub>2</sub> 萃取技术与有效成分分析[J]. 化工设计通讯, 2013, 39(3): 80–85.  
Li YW, Lai WD. Supercritical CO<sub>2</sub> extracting technology of garlic essential oil and active components analysis [J]. Chem Eng Design Comm, 2013, 39(3): 80–85.
- [9] 周也, 田震, 王丽雯. 超临界萃取技术研究现状与应用[J]. 山东化工, 2012, 41(5): 37–39.  
Zhou Y, Tian Z, Wang LW. Application and progress of research on supercritical fluid extraction technology [J]. Shangdong Chem Ind, 2012, 41(5): 37–39.
- [10] 于娜娜, 张丽坤, 朱江兰, 等. 超临界流体萃取原理及应用[J]. 化工中间体, 2011, (8): 38–43.  
Yu NN, Zhang LK, Zhu JL, *et al.* Theory and application of supercritical fluid extraction [J]. Chem Intermed, 2011, (8): 38–43.
- [11] Xiao JP, Fan CZ. Progress in research of supercritical fluid technology[J]. Prog Chem, 2001, 13(2): 94–101.
- [12] Panfili G, Cinquanta L, Fratianni A, *et al.* Extraction of wheat germ oil by supercritical CO<sub>2</sub>: oil and defatted cake characterization [J]. J Am Oil Chem Soc, 2003, 80(2): 157–161.
- [13] Reverchon E, Marco ID. Supercritical fluid extraction and fractionation of natural matter [J]. J Supercrit Fluids, 2006, 38(2): 146–166.
- [14] Ravnets M, Duarte, Alarcon R. Application and possibilities of supercritical CO<sub>2</sub> extraction in food processing industry: an overview [J]. Food Sci Technol Int, 2002, 8(5): 269–284.
- [15] David F, Verschuere M, Sndra P. Off-line supercritical fluid extraction-capillary GC applications in environmental analysis [J]. Anal Chem, 1992, (344): 479–485.
- [16] Careri M, Furlattini L, Mangia A, *et al.* Supercritical fluid extraction for liquid chromatographic determination of carotenoids in *Spirulina Pacifica* algae: a chemometric approach [J]. J Chromatogr A, 2001, 912(1): 61–71.
- [17] Machmudah S, Kondo M, Sasaki M, *et al.* Pressure effect in supercritical CO<sub>2</sub> extraction of plant seeds [J]. J Supercrit Fluids, 2008, 44(3): 301–307.
- [18] 刘杰. 超临界流体萃取工艺的响应面优化分析与模拟[D]. 辽宁: 大连理工大学, 2013.  
Liu J. Optimization of supercritical fluid extraction process using response surface method and simulation [D]. Liaoning: Dalian University of Technology, 2013.
- [19] 杨柏崇. 超临界 CO<sub>2</sub> 萃取猕猴桃籽油的研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2003.  
Yang BC. Study on the extraction of Kiwi fruit seed oil by supercritical carbon dioxide [D]. Yangling: Northwest Agr For Univ, 2003.
- [20] 岳松, 马力, 张国栋, 等. 超临界流体萃取技术及其在食品工业中的应用[J]. 四川工业学院学报, 2002, 21(3): 73–75, 89.  
Yue S, Ma L, Zhang GD, *et al.* The technology of supercritical fluid extraction and its application to food industry [J]. J Sichuan Univ Sci Technol, 2002, 21(3): 73–75, 89.
- [21] 张德权, 胡晓丹. 食品超临界 CO<sub>2</sub> 流体加工技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.  
Zhang DQ, Hu XD. Supercritical CO<sub>2</sub> fluid extraction processing technology [M]. Beijing: Chem Ind Press, 2005.
- [22] 李松, 吴光斌, 陈发河. 超临界萃取涪溪蜜柚精油工艺优化及组分分析[J]. 食品与机械, 2013, 29(1): 113–117, 156.  
Li S, Wu GB, Chen FH. Studies on essential oil extraction

- process optimization by supercritical CO<sub>2</sub> and chemical components analysis of Guanxi honey pomelo [J]. *Food Mach*, 2013, 29(1): 113–117, 156.
- [23] 吴雪辉, 黄永芳, 高强, 等. 肉桂精油的超临界 CO<sub>2</sub> 萃取工艺及成分研究[J]. *食品工业科技*, 2007, 28(1): 69–71, 74.  
Wu XH, Huang YF, Gao Q, *et al.* Study on component of cinnamon essential oil by supercritical CO<sub>2</sub> extraction technology [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2007, 28(1): 69–71, 74.
- [24] Al-Marzouqi AH, Rao MV, Jobe B. Comparative evaluation of SFE and steam distillation methods on the yield and composition of essential oil extracted from apearmint (*Mentha spicata*) [J]. *J Liq Chromatogr R T*, 2007, 30(4): 463–475.
- [25] 郭宁平. CO<sub>2</sub> 超临界萃取法提取苦瓜籽油及其 GC-MS 分析[J]. *广东农业科学*, 2013, (11): 77–79.  
Guo NP. Bitter melon seed oil was extracted with supercritical CO<sub>2</sub> extraction and analyzed by GC-MS [J]. *Guangdong Agr Sci*, 2013, (11): 77–79.
- [26] 马玉花, 赵忠, 李科友, 等. 超临界 CO<sub>2</sub> 流体萃取杏仁油工艺研究[J]. *农业工程学报*, 2007, 23(4): 272–275.  
Ma YH, Zhao Z, Li KY, *et al.* Optimization of technology for almond oil extraction by supercritical CO<sub>2</sub> [J]. *Trans CSAE*, 2007, 23(4): 272–275.
- [27] Dobarganes NM, Molero GA, Martinez DLO. Characterisation and process development of supercritical fluid extraction of soybean oil [J]. *Food Sci Technol Int*, 2002, 8(6): 337–342.
- [28] Beveridge THJ, Girard B, Kopp T, *et al.* Yield and composition of grape seed oils extracted by supercritical carbon dioxide and petroleum ether: varietal effects [J]. *Agric Food Chem*, 2005, 53(5): 1799–1804.
- [29] 潘利华, 罗建平. 大豆异黄酮超临界流体萃取工艺与动力学模型[J]. *农业机械学报*, 2010, 41(6): 137–141.  
Pan LH, Luo JP. Process and kinetics of supercritical fluid extraction for soybean isoflavones [J]. *Trans Chinese Soc Agr Mach*, 2010, 41(6): 137–141.
- [30] 张德权, 陈卫涛, 张柏林. 超临界 CO<sub>2</sub> 萃取大豆卵磷脂工艺研究[J]. *中国粮油学报*, 2007, 22(2): 32–35, 39.  
Zhang DQ, Chen WT, Zhang BL. Extracting soybean lecithin with supercritical carbon dioxide [J]. *J Chin Cereal Oil Assoc*, 2007, 22(2): 32–35, 39.
- [31] 王大为, 邵信儒, 张艳荣. 超临界 CO<sub>2</sub> 萃取对玉米醇溶蛋白提取率及水解度影响的研究[J]. *食品科学*, 2005, 26(8): 166–170.  
Wang DW, Shao XR, Zhang YR. Study on affect of supercritical CO<sub>2</sub> extrating on extraction rate and hydrolytic degree of zein [J]. *Food Sci*, 2005, 26(8): 166–170.
- [32] 张郁松. 辣椒红素超临界萃取与有机溶剂萃取的比较[J]. *中国调味品*, 2013, 38(4): 101–103.  
Zhang YS. Comparison of supercritical extraction and organic solvents extraction of capsorubin [J]. *China Condiment*, 2013, 38(4): 101–103.
- [33] Akgun IH, Erkucuk A, Pilavtepe M, *et al.* Optimization of total alkannin yields of *Alkanna tinctoria* by using sub-and supercritical carbon dioxide extraction [J]. *J Supercrit Fluid*, 2011, 57(1): 31–37.
- [34] Wu JJ, Lin JC, Wang CH, *et al.* Extraction of antioxidative compounds from wine lees using supercritical fluids and associated anti-tyrosinase activity [J]. *J Supercrit Fluid*, 2009, 50(1): 33–41.
- [35] Kassama LS, Shi J, Mittal GS. Optimization of supercritical fluid extraction of lycopene from tomato skin with central composite rotatable design model [J]. *Sep Purif Technol*, 2008, 60(3): 278–284.
- [36] 梁叶星, 熊家艳. 超临界 CO<sub>2</sub> 技术应用于天然色素萃取的研究进展[J]. *饮料工业*, 2013, 16(7): 1–7.  
Liang YX, Xiong JY. Research progress in supercritical CO<sub>2</sub> extraction of natural pigments [J]. *Beverage Ind*, 2013, 16(7): 1–7.
- [37] 魏福祥, 李世超, 王浩然, 等. 超临界 CO<sub>2</sub> 萃取-精馏小米糠油[J]. *食品科学*, 2011, 32(8): 78–82.  
Wei FX, Li SC, Wang HR, *et al.* Extraction and rectification of millet bran oil with supercritical fluid caron dioxide [J]. *Food Sci*, 2011, 32(8): 78–82.
- [38] 吴永平, 徐群杰, 苏国强, 等. 超临界萃取和分子蒸馏联用提取泽泻中的 23-乙酰泽泻醇 B[J]. *中成药*, 2010, 32(5): 866–868.  
Wu YP, Xu QJ, Su GQ, *et al.* Extraction of 23- acetyl alisol B in rhizoma *alismatis* by supercritical fluid extraction and molecular distillation [J]. *Chin Tradit Pat Med*, 2010, 32(5): 866–868.
- [39] 玄淑华, 张善玉, 朴惠善. 气相色谱-质谱法分析关苍术化学成分[J]. *延边大学医学学报*, 2010, 33(2): 114–117.  
Xuan SH, Zhang SY, Piao HS. Analysis of chemical constituents from the *atractylodes japonica* by GC-MS [J]. *J Med Sci Yanbian Univ*, 2010, 33(2): 114–117.
- [40] 蔡定建, 彭肖, 刘慧, 等. 超临界萃取-气相色谱-质谱联用检测富硒脐橙油成分研究[J]. *中国食品添加剂*, 2009, (5): 176–182.  
Cai DJ, Peng X, Liu H, *et al.* The application of SFE-GC-MS in determination of component in selenium enriched navel orange [J]. *China Food Addit*, 2009, (5): 176–182.
- [41] 危晴, 李晔, 刘俊英, 等. 薏米营养成分的超临界萃取与 GC-MS 分析[J]. *江苏农业科学*, 2012, 40(1): 274–275, 362.  
Wei Q, LiY, Liu JY, *et al.* Supercritical fluid extraction and GC-MS analysis of nutritional components of barley [J]. *Jiangsu Agr Sci*, 2012, 40(1): 274–275, 362.

- [42] 张洁, 段继诚, 梁振, 等. 一种新型超临界流体萃取-高效液相色谱在线联用系统的构建[J]. 高等学校化学学报, 2005, 26(10): 1832-1834.  
Zhang J, Duan JC, Liang Z, *et al.* Establishment of a new on-line coupled supercritical fluid extraction (SFE) with high performance liquid chromatography (HPLC) system [J]. Chem J Chin Univ, 2005, 26(10): 1832-1834.
- [43] 佳红, 柳正良. SFE-HPLC-测定银杏叶粗提物中黄酮类化合物的含量[J]. 中草药, 2000, 31(2): 101-103.  
Jia H, Liu ZL. Determination of flavonoids content in crude extracting from ginkgo biloba leaves by SFE-HPLC [J]. Chin Tradit Herb Drug, 2009, (5): 176-182.
- [44] 徐敦明, 陈安良, 余向阳, 等. 超临界流体萃取气相色谱法测定鱼肉中的毒死蜱残留[J]. 分析化学研究简报, 2005, 33(4): 451-454.  
Xu DM, Chen AL, Yu XY, *et al.* Determination of chlorpyrifos in fish tissue by supercritical fluid extraction and gas chromatography [J]. Chin J Anal Chem, 2005, 33(4): 451-454.
- [45] 赵婕, 吴国华, 刘洁. SFE-HPLC 法测定强化大米中的  $\beta$ -胡萝卜素[J]. 中国卫生检验杂志, 2002, 12(3): 302-303.  
Zhao J, Wu GH, Liu J. Determination of beta carotene in fortified rice by SFE-HPLC method [J]. J Chin Health Lab Technol, 2002, 12(3): 302-303.
- [46] 宿树兰, 吴启南, 欧阳臻, 等. 超临界  $\text{CO}_2$  萃取测定姜黄中姜黄素的实验研究[J]. 中国中药杂志, 2004, 29(9): 857-860.  
Su SL, Wu QN, Ou YZ, *et al.* Study on the SFE condition for curcumin in *Curcuma longa* [J]. J China Mat Med, 2004, 29(9): 857-860.
- [47] 陈志伟, 陈忠. 超临界流体分离与 NMR 联用技术及其应用[J]. 光谱实验室, 2001, 18(2): 139-144.  
Chen ZW, Chen Z. Hyphenation of supercritical fluid separation with nuclear magnetic resonance and their applications [J]. J Chin Spectrosc Lab, 2001, 18(2): 139-144.
- [48] 余先纯, 李湘苏, 龚铮午. 微波与超临界  $\text{CO}_2$  萃取联用提取橘皮精油的研究[J]. 安徽农业科学, 2010, 38(32): 18586-18588.  
Yu XC, Li XS, Gong ZW. Research on the extraction of essential oil from orange peel with the technique of microwave and supercritical  $\text{CO}_2$  [J]. J Anhui Agr Sci, 2010, 38(32): 18586-18588.
- [49] 冯志强. 超临界流体萃取联用技术的应用[J]. 分析仪器, 2005, (1): 6-10.  
Feng ZQ. Applications of supercritical fluid extraction coupled techniques [J]. Anal Instrum, 2005, (1): 6-10.

(责任编辑: 赵静)

### 作者简介



王晶晶, 博士, 讲师, 主要研究方向为食品营养与安全。  
E-mail: jjlive2007@126.com



冯叙桥, 博士, 教授, 主要研究方向为果蔬质量与安全控制。  
E-mail: feng\_xq@hotmail.com