

doi:10.3969/j.issn.1006-4931.2020.17.001

超临界二氧化碳萃取技术在中药领域的应用进展*

邓巧玉¹, 江 珊¹, 陈誉丹¹, 陈兴广¹, 梁 旭¹, 李余钊², 袁经权^{1△}

(1. 广西中医药大学科学实验中心, 广西南宁 530200; 2. 南宁师范大学化学与材料学院, 广西南宁 530001)

摘要:超临界二氧化碳萃取(SFE-CO₂)技术能快速有效地萃取出所需物质,在中药成分的提取分离中发挥着重要作用。通过比较SFE-CO₂和传统提取方法对有效成分的萃取率及药理活性,总结该技术在中药领域的应用进展,探讨不足之处及发展前景,为SFE-CO₂深入应用于中药研究提供参考。

关键词:超临界二氧化碳萃取技术;中药;化学成分;提取;分离;药理活性

中图分类号:R932;R284.2

文献标识码:A

文章编号:1006-4931(2020)17-0001-05

Application of Supercritical Fluid Extraction with CO₂ in Traditional Chinese Medicine

DENG Qiaoyu¹, JIANG Shan¹, CHEN Yudan¹, CHEN Xingguang¹, LIANG Xu¹, LI Yuzhao², YUAN Jingquan¹

(1. Scientific Experimental Center, Guangxi University of Chinese Medicine, Nanning, Guangxi, China 530200; 2. School of Chemistry and Materials, Nanning Normal University, Nanning, Guangxi, China 530001)

Abstract: Supercritical fluid extraction with CO₂(SFE-CO₂) has the characteristics of fast extraction and high content of effective components, which plays an important role in the extracting of traditional Chinese medicine components. By comparing the extraction rates and pharmacological activity of SFE-CO₂ and with that of traditional methods, the application of SFE-CO₂ in traditional Chinese medicine were reviewed, the deficiencies and the development of the SFE-CO₂ technology were prospected to provide reference for its further application of in traditional Chinese medicine.

Key words: supercritical fluid extraction with CO₂; traditional Chinese medicine; chemical component; extraction; separation; pharmacological activity

无论是制剂工业、新药开发,还是活性成分的物质基础研究,中药的提取分离都是关键一环。超临界二氧化碳萃取(SFE-CO₂)技术不仅能快速有效地萃取并分离出所需物质,且无溶剂残留问题,被誉为“绿色”工艺^[1]。在此通过比较SFE-CO₂技术和传统提取方法对中药有效成分的萃取率及药理活性,对SFE-CO₂技术在中药领域的应用进展进行介绍。

1 SFE-CO₂技术原理

SFE-CO₂技术将提取与分离相结合,调节系统的操作压力和温度,使得液态的CO₂成为超临界流体,并对物质有足够的溶解度,能萃取出所需物质,随后升温或降压,以分离物质^[2]。超临界二氧化碳流体是处于临界温度($T_c = 31.4\text{ }^\circ\text{C}$)和临界压力($P_c = 7.37\text{ MPa}$)以上的高密度流体,拥有液体的溶解能力和气体优良的传质性能^[3]。

2 SFE-CO₂萃取率的影响因素

通常,萃取率随萃取压力和萃取温度的增加而增加,但当到达一定峰值,萃取率随着温度和压力的增加反而减小,表明在SFE-CO₂萃取过程中存在最佳压力和温度^[4]。当萃取较大极性的物质时,加入夹带剂可增

加流体的极性,提高萃取效率^[5]。此外,样品的粒度、黏度等也会影响萃取率,原料粒度过大会导致浸提不充分,原料粒度过小易结板致溶剂流通不佳,且易堵塞金属筛,萃取效率反而下降^[6]。

3 SFE-CO₂技术在中药有效成分提取分离中的应用

SFE-CO₂技术可有效地萃取出中药挥发油、萜类、生物碱、黄酮类、蒽醌类、苯丙素类、皂苷、多糖类等有效成分。传统的水煎醇提等模式,提取选择性较差,耗时长,后续纯化工艺烦琐,易造成试剂污染^[7]。而SFE-CO₂技术能快速、有效地萃取出所需物质,纯度高,无污染^[11]。1970年,佐塞尔在马克斯普朗克研究所进行了咖啡中咖啡因的超临界萃取,被认为是这种分离技术的首次技术应用^[8]。

挥发油:SFE-CO₂常用于萃取挥发油。挥发油的沸点低,而该技术工作温度低不易破坏其中的热敏性成分,萃取时间短,并可通过控制试验条件增加目标成分的含量,相比传统方法更易获得较多的高品质挥发油^[9]。微波提取法也是一种新兴的物质提取技术,提取时间短,得率高,但不适合热敏性物质的提取,提取物易变形或糊化^[10]。SFE-CO₂可有效地萃取出艾叶、莪术、石菖

*基金项目:国家自然科学基金[81660656];广西中医药大学博士科研启动基金项目[2018BS048];广西中医药大学研究生教育创新计划项目[YCSY20190029]。

第一作者:邓巧玉,女,硕士研究生,研究方向为中药活性成分及新产品,(电子信箱)dqylky@163.com。

△通信作者:袁经权,男,博士研究生,教授,硕士研究生导师,研究方向为中药及天然药物,(电子信箱)yjqgx@163.com。

表1 部分中药挥发油的SFE-CO₂萃取工艺参数及与其他传统提取法的得油率比较

药材名称	SFE-CO ₂				水蒸气蒸馏法	微波萃取法	石油醚提取	参考文献
	萃取温度(℃)	萃取压力(MPa)	萃取时间(h)	得油率(%)	得油率(%)	得油率(%)	得油率(%)	
决明子	51	25	3.22	2.34				[11]
艾叶	31	16	1.67	2.42	0.585	4.85	2.08	[12-14]
莪术	45	25	2.00	3.80	2.400	3.36	3.62	[15-18]
石菖蒲	50	30	2.00	4.82	1.580			[19-20]
辛夷	35	14	1.00	3.95	2.280	6.59		[21-22]
羌活	45	25	1.50	8.91	1.376			[23]
肉桂	50	20	2.00	2.70	1.830	6.13	1.50	[24-26]
金银花	45	45	1.50	2.07	0.171			[27]

蒲等中药的挥发油,优化工艺参数见表1。可见,SFE-CO₂萃取得油率远高于部分中药传统提取方法的得油率。

生物碱:生物碱一般是指存在于植物中的碱性含氮化合物,是多种中草药的活性成分,传统的提取方法有醇提法、酸提碱沉法^[28]。近年来也有很多关于SFE-CO₂提取生物碱的报道,可有效地提取出苦参中的苦参碱,延胡索中的延胡索乙素等有效成分,如用SFE-CO₂萃取雷公藤生物碱的得率是传统方法的2.6倍^[29],具体优化工艺参数见表2。但萃取时需加入适量夹带剂。

黄酮类:黄酮类化合物种类繁多,传统提取方法包括有机溶剂提取法、碱提酸沉法等^[30]。SFE-CO₂能有效地萃取薄荷、桑叶等中药中的总黄酮,萃取率是传统方法的2倍,也有部分中药的萃取率低于传统方法,如山楂核中的总黄酮,具体优化工艺参数见表2。但萃取时需要加入适量夹带剂,以提高萃取率。

醌类:天然醌类成分有苯醌、萘醌、菲醌和蒽醌,其中以蒽醌类化合物最常见^[31]。SFE-CO₂能有效地萃取芦荟中的芦荟苷,通常萃取率高于传统方法,但大黄、何首乌的醇提总蒽醌得率高于SFE-CO₂萃取率,具体优化工艺参数见表2。

苯丙素类:苯丙素类化合物通常为亲脂性成分,可直接利用SFE-CO₂进行提取,如补骨脂中总香豆素的萃取,加入夹带剂对萃取率无影响^[32]。但萃取成分极性较大时,也需加入夹带剂,以提高萃取率。SFE-CO₂能有效萃取出南五味子中五味子素、蛇床子中蛇床子素等。程敏等^[6]采用SFE-CO₂技术萃取对南五味子中的木脂素,萃取率达2.929%,是传统提取方法的5.4倍,有效成分含量大小顺序为五味子酯甲(57.8 mg/g) > 五味子乙素(40.8 mg/g) > 五味子甲素(15.0 mg/g)。优化工艺参数见表2。

皂苷及多糖类:苷类和糖类相对分子质量较大、羟基多、极性大,用纯SFE-CO₂产率低,必须加大压力和加入适当的夹带剂^[33]以提高产率。SFE-CO₂能有效萃取出黄芪中的黄芪甲苷、三七中的三七总皂苷、茯苓中

的茯苓多糖、淮山中的淮山多糖,其萃取率均高于醇提法。优化工艺参数见表2。

萜类:萜类物质种类繁多,大多为异戊二烯聚合体及其衍生物^[34]。对于极性大的萜类成分,采用SFE-CO₂萃取时也要加入适量夹带剂。SFE-CO₂能有效萃取出白花蛇舌草中的齐墩果酸,迷迭香中的二萜酚类成分等,所含萃取物杂质少,含量较高。优化工艺参数见表2。

复方中药:文献大多报道SFE-CO₂对单味中药材的提取,但对于复方中药的提取报道较少。活血巴布膏可活血止痛,毕建云等^[35]用SFE-CO₂萃取其中的有效成分,桂皮醛得率为18.76 mg/g,萃取率为80.13%。程岚等^[36]采用响应面法优化SFE-CO₂萃取石菖蒲-苏合香挥发油工艺,得率为2.50%。优化工艺参数见表2。

4 SFE-CO₂技术在中药药理活性方面的应用

挥发油:SFE-CO₂在萃取挥发油方面的应用较多,对于其药理活性的报道也较多。羌药茹玛的挥发油有抑菌作用,李尧军等^[81]研究发现,SFE-CO₂萃取羌药茹玛挥发油得率(7.15%)是水蒸气蒸馏(SD)法(1.44%)的5倍,浓度为2%时,后者对金黄色葡萄球菌和大肠杆菌的抑制效果大于前者,对沙门氏菌和白色念珠菌的抑制效果相同,且对白色念珠菌的抑制效果最强;此外,前者对白色念珠菌的最小抑菌浓度(MIC)和最小杀菌浓度(MBC)均高于后者。可见,SFE-CO₂挥发油得率虽高于SD法,但抑菌量相对较低。薄荷挥发油具有抗氧化作用,李岗等^[82]研究发现,SFE-CO₂萃取薄荷挥发油的得率(3.20%)是SD法(0.84%)的4倍,且SFE-CO₂萃取物抗氧化能力高于SD法。赵鸿峰等^[83]研究益智叶挥发油的促透作用时发现,SFE-CO₂萃取益智叶挥发油的得率(3.3%)是SD法的4倍,浓度为3%时,两者对光甘草定促透作用最好,前者优于后者,且均优于常用促透剂氮酮。

萜类:白花蛇舌草具有抗肿瘤、抗氧化作用。陆慧等^[67]研究发现,与醇提物相比,SFE-CO₂法萃取白花蛇舌草中的三萜类成分和齐墩果酸含量都偏低,但对人

表2 部分中药有效成分的SFE-CO₂萃取工艺参数

有效成分	药材名称	指标成分	SFE-CO ₂					醇提法得率 (%)	参考文献
			萃取温度(℃)	萃取压力(MPa)	萃取时间(h)	夹带剂	萃取率(%)		
生物碱类	浙贝母花	总生物碱	70	35	0.834	乙醇	0.352		[37]
	苦参	苦参碱	60	25	3.00	乙醇	2.375	0.215	[38-39]
	延胡索	延胡索乙素	45	20	2.50	乙醇	0.123	0.065	[40-41]
	雷公藤	雷公藤甲素	43	25	3.00	乙醇	1.090×10^{-3}	4.20×10^{-4}	[29,42]
	黄连	总生物碱	60	30	1.50	乙醇	14.24	25.29	[43-44]
黄酮类	薄荷	总黄酮	55	25	1.50	乙醇	3.58	2.17	[45-46]
	桑叶	总黄酮	40	25	3.00	乙醇	6.19	2.96	[47-48]
	金莲花	总黄酮	55	45	1.93	乙醇	8.323	4.66	[49-50]
	景天三七	总黄酮	45	30		乙醇	1.954	2.487	[51-52]
	山楂核	总黄酮	50	20	2.00	乙醇	2.827	7.89	[53-54]
蒽醌类	大黄	总蒽醌	45	45	1.50	乙醇	2.34	3.30	[55-56]
	芦荟	芦荟苷	30	25	1.17	乙醇	1.78	0.85	[57-58]
	决明子	蒽醌	60	20	2.00	乙醇	0.19		[59]
	何首乌	蒽醌	55	25	2.50	乙醇	0.70	1.47	[60-61]
苯丙素类	白芷	香豆素	55	20	1.50	乙醇	0.202	0.86	[62-63]
	补骨脂	总香豆素	62	35	3.00		0.812		[32]
	南五味子	木脂素	35	20	2.00	乙醇	2.929	0.54	[6,64]
	蛇床子	蛇床子素	55	35		乙醇	3.44	2.86	[65-66]
萜类	白花蛇舌草	齐墩果酸	40	15	1.50	乙醇	0.067		[67]
	迷迭香	二萜酚类	30	20	1.00	乙醇	3.791		[68]
	丹参	总丹参酮	45	30	2.00	乙醇	4.58	3.12	[69]
皂苷类	黄芪	黄芪甲苷	45	40	1.17	乙醇	19.83	14.51	[70]
	人参	人参总皂苷	45	30	4.00	乙醇	1.105	1.73	[71-72]
	三七	三七总皂苷	45	35	2.50	乙醇	9.98	4.69	[73-74]
多糖类	甘草	甘草多糖	62.6	37.7	1.38	乙醇	7.34	7.51	[75-76]
	淮山	淮山多糖	45	35	2.50	乙醇	0.32	0.25	[77-78]
	茯苓	茯苓多糖	50	21.78	2.50	乙醇	3.104	2.08	[79-80]
复方	活血巴布膏	桂皮醛	35	20	2.50		1.876		[35]
	石菖蒲-苏合香	挥发油	60	30	1.50		2.50		[36]

肺癌细胞(A549)的抑制率高,抗肿瘤效果好。黄东辉^[69]研究发现,丹参中的隐丹参酮具有较好的抑菌活性,丹参酮Ⅱ_A-P188有抗癌活性,且与质量浓度呈正相关,采用SFE-CO₂萃取丹参中隐丹参酮的纯度为94.97%,丹参酮Ⅱ_A的纯度可达96.69%,均优于传统方法。

黄酮类:金莲花中的黄酮类物质具有抗氧化作用,范翠丽等^[49]采用SFE-CO₂萃取金莲花总黄酮的得率高于传统方法,6 mg/mL的总黄酮萃取物对甜杏仁油的抗氧化效果相当于0.02%的人工合成抗氧化剂(TBHQ)。

生物碱:元胡白芷是常用止痛药,刘群^[84]研究发现,SFE-CO₂萃取元胡白芷药材中的延胡索乙素、欧前胡素及异欧前胡素含量均高于醇提法,同等剂量下,无论是大鼠福尔马林疼痛模型还是痛经模型,SFE-CO₂萃取物镇痛效果均优于醇提物。

多糖类:李青宇等^[75]采用SFE-CO₂萃取甘草中的甘草多糖,得率为7.34%,与传统方法的得率相当,甘草多糖具有抗氧化作用,其还原能力与含量相关。

其他:石菖蒲可开窍安神。现代药理学研究显示,其具有抗抑郁作用。王小萌等^[85]通过对比大鼠抑郁模型给药前后对外界刺激的反应、糖水偏爱度等,发现石菖蒲SFE-CO₂提取物可有效治疗大鼠抑郁,且恢复程度与剂量呈正相关。

5 结语

SFE-CO₂作为一种新型先进“绿色”分离技术,操作简便,不仅能快速、有效地萃取并分离出所需物质,且收率和所得物质的纯度也高于传统方法,为从中药中快速提取分离有效成分提供了好的方法。但SFE-CO₂也存在一定不足,目前对于单味中药的提取效果较好,对于复方中药的提取较困难。此外,对于提取极性大的

物质,虽可通过加夹带剂或增压的方式提高萃取率,但与传统方法的萃取率相比较低。大部分 SFE - CO₂ 萃取物得率高,药理活性强,也有部分中药虽然总体得率较高,但相同剂量下有效成分含量低,药理活性较传统提取方法偏弱。另外,该设备资金的投入也较高,容量有限,导致一次投料量有限,且在使用 SFE - CO₂ 技术时,要考察温度、压力等的最优条件,做到最大限度地提取、利用中药资源。

参考文献:

- [1] 张 乐,宋凤瑞,王 琦,等. 人参中稀有皂苷超临界二氧化碳提取[J]. 应用化学,2010,27(12):1483-1485.
- [2] 关金龙. 超临界二氧化碳萃取技术在中药提取中的应用[J]. 机电信息,2015(29):44-46.
- [3] 姜泽放,林 敏,李 雪,等. 超临界萃取山柚油及其 Sn-2 位脂肪酸的测定[J]. 食品科技,2019,44(1):330-335.
- [4] 李晓朋. 超临界萃取工艺及其测控技术的研究[D]. 长春: 长春工业大学,2018.
- [5] 尹文红,陈克勋. 夹带剂对穿心莲内酯超临界萃取的影响[J]. 中成药,2011,37(6):958-962.
- [6] 程 敏,赵艳艳,贾 朝,等. 超临界 CO₂ 萃取南五味子木脂素的工艺研究[J]. 现代中医药,2016,36(5):86-89.
- [7] 宋天有. 旋覆花精油 CO₂ 超临界萃取工艺及抑菌活性研究[D]. 郑州:河南农业大学,2011.
- [8] COELHO JP, CRISTINO AF, MATOS P, et al. Extraction of Volatile Oil from Aromatic Plants with Supercritical Carbon Dioxide: Experiments and Modeling[J]. Molecules, 2012, 17(12): 10550-10573.
- [9] 热增才旦,刘 斌,董 芳,等. 藏药毕毕林二氧化碳超临界流体萃取精油化学成分研究[J]. 北京中医药大学学报, 2011,34(10):694-698.
- [10] 张劲松. 滇重楼甾体皂甙类有效成分超高压提取及偏诺皂甙合成研究[D]. 长春:吉林大学,2007.
- [11] 王立英,王艳珍,吴丽艳,等. 响应面法优化超临界 CO₂ 萃取决明子挥发油工艺及其抑菌活性研究[J]. 药物分析杂志, 2016,36(4):594-601.
- [12] 李 静,熊维政,李 磊,等. 2 种不同方法提取艾叶挥发油的效果比较[J]. 中国药房,2016,27(28):3982-3984.
- [13] 曾虹燕,张晓云,冯 波. 超临界 CO₂ 和微波辅助萃取艾叶挥发油工艺的研究[J]. 广西植物,2005,25(3):285-288.
- [14] 何正有,张艳红,魏 冬,等. 三种不同提取方法制备的艾叶挥发油化学成分分析[J]. 中国医药生物技术,2008, 3(4):284-288.
- [15] 祝冬青,王静文. 莪术挥发油提取工艺研究[J]. 中国民族民间医药,2018,27(22):34-36.
- [16] 王 娟,刘汉清. 超临界 CO₂ 流体萃取莪术油的工艺研究[J]. 中国医药指南,2010,8(8):20-22.
- [17] 张学愈,盛 勇,邹 俊,等. 石油醚提取过 50 目和过 325 目筛温莪术粉挥发油收率比较[J]. 时珍国医国药,2009, 20(2):292-293.
- [18] 赵晶晶. 微波萃取莪术挥发油及其成分分析[J]. 中国兽药杂志,2012,46(11):31-33.
- [19] 金建忠,黄丽娜. 超临界 CO₂ 萃取石菖蒲挥发油的工艺研究[J]. 浙江树人大学学报(自然科学版),2010,10(3):23-25.
- [20] 李 欧,戈振凯,蔡小燕,等. 星点设计-效应面法优化石菖蒲挥发油提取工艺[J]. 中兽医医药杂志,2016,35(5):5-7.
- [21] 曹明卓,王亚君,王宪岭. 超临界 CO₂ 流体萃取法和水蒸气蒸馏法对辛夷挥发油萃取率和萃取质量的比较[J]. 中国医药科学,2018,8(17):58-61.
- [22] 蔡 红,马扩彦,黎洪利,等. 辛夷花挥发油提取工艺研究[J]. 九江学院学报(自然科学版),2017,32(4):8-12.
- [23] 金 宏,牛真真,王沙沙,等. 超临界萃取羌活挥发油工艺及其抑制酪氨酸酶活性研究[J]. 食品工业,2018,39(5):132-136.
- [24] 赫光中,果秋婷,李 昱,等. 肉桂挥发油提取工艺优化研究[J]. 辽宁中医药大学学报,2018,20(4):5-8.
- [25] 刘 彤,付 彬. 肉桂油五种提取工艺的比较研究[J]. 天津药学,2018,30(1):28-30.
- [26] 柴向华,张 浩,吴克刚,等. 肉桂精油的微波减压提取及组成分析[J]. 粮食与油脂,2018,31(1):19-22.
- [27] 任美玲. 金银花有效成分提取技术研究[D]. 新乡:河南师范大学,2017.
- [28] 李永芳. 生物碱的提取和分离方法综述[J]. 中山大学研究生学刊(自然科学医学版),2015,36(2):7-13.
- [29] 李红茹,李淑芬,段宏泉,等. 超临界流体萃取雷公藤中有效成分的工艺优化[J]. 天津大学学报,2007,40(3):269-274.
- [30] 王军妮. 桑树黄酮类化合物代谢调控研究[D]. 泰安:山东农业大学,2008.
- [31] 赵建国,彭新君,高 星. 现代分析技术在醌类化合物中的应用[J]. 时珍国医国药,2005,16(2):140-141.
- [32] 严优芍,孙 悦. 补骨脂中总香豆素的超临界 CO₂ 流体萃取工艺研究[J]. 中成药,2012,34(6):1034-1038.
- [33] 葛云初,黎 阳. 超临界流体萃取技术及其在中药提取中的应用[J]. 现代药物与临床,2009,24(5):279-282.
- [34] 唐仕荣. 超临界 CO₂ 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.
- [35] 毕建云,刘善新,梁瑞雪,等. 超临界流体萃取复方活血巴布膏中肉桂药材的有效成分[J]. 中成药,2016,38(1): 191-193.
- [36] 程 岚,刘 爽,宋晓黎,等. 超临界 CO₂ 萃取法提取石菖蒲-苏合香中挥发油工艺研究[J]. 亚太传统医药,2018, 14(4):28-31.
- [37] 石一飞,陈巧青,徐永进,等. 超临界流体 CO₂ 萃取浙贝母花生物碱的工艺研究[J]. 农产品加工,2017(10):34-36.
- [38] 刘修树,周 晶,何晓丽,等. 超临界 CO₂ 法萃取苦参中苦参碱的工艺优化[J]. 中国现代中药,2012,14(11):46-48.
- [39] 邸 敏. 苦参提取方法的研究[D]. 北京:北京化工大学, 2012.
- [40] 刘 雷,祁俊生,梁克中,等. 超临界 CO₂ 提取延胡索乙素最优工艺条件探索[J]. 现代盐化工,2017,44(6):46-48.
- [41] 杨 波,纪宏宇,吴琳华,等. 正交试验法优选延胡索中延

- 胡索乙素提取工艺[J]. 中国药师, 2017, 20(2): 273-276.
- [42] 巴文强, 王利胜, 王 玗, 等. 正交试验优选雷公藤提取工艺[J]. 中国实验方剂学杂志, 2014, 20(14): 16-19.
- [43] 佟若菲, 张秋爽, 朱雪瑜. 黄连中生物碱的超临界 CO₂ 萃取工艺研究[J]. 天津药学, 2010, 22(5): 71-73.
- [44] 张宏川, 刘思洋, 孙宁阳, 等. 响应面分析法优化黄连生物碱提取工艺的研究[J]. 中药材, 2016, 39(1): 143-146.
- [45] 华燕青, 王云云, 李娟丽. 超临界 CO₂ 萃取薄荷总黄酮的工艺研究[J]. 江苏中医药, 2018, 50(3): 76-78.
- [46] 李 静, 李长春, 陈锦华, 等. 超声波辅助提取薄荷中黄酮的工艺研究[J]. 湖北工程学院学报, 2018, 38(3): 15-19.
- [47] 谢玉龙, 石全雨, 缪伟伟, 等. 正交实验法优化超临界二氧化碳萃取桑叶总黄酮[J]. 生物技术进展, 2017, 7(4): 345-349.
- [48] 张 齐. 桑叶黄酮的提取及黄酮类成分桑色素的抗癌活性研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2018.
- [49] 范翠丽, 李继红, 孙洪生. 超临界 CO₂ 萃取金莲花总黄酮的工艺以及萃取物抗氧化作用研究[J]. 中药材, 2016, 39(12): 2828-2832.
- [50] 刘 洋, 隋 新, 马先红, 等. 超声波辅助法提取金莲花中黄酮工艺研究[J]. 农产品加工, 2012(12): 52-55.
- [51] 张兴桃, 张东京, 董 增, 等. 超临界 CO₂ 萃取景天三七总黄酮的工艺优化[J]. 宿州学院学报, 2017, 32(5): 119-122.
- [52] 晋丛斌. 景天三七中总黄酮的提取分离及抗氧化活性研究[D]. 上海: 上海应用技术大学, 2016.
- [53] 公衍玲, 牛真真, 王沙沙. 超临界萃取山楂核总黄酮的研究[J]. 青岛科技大学学报(自然科学版), 2018, 39(2): 32-36.
- [54] 郭文娟, 王 娜, 王娜娜, 等. 山楂核总黄酮的超声提取及抗氧化活性[J]. 精细化工, 2016, 33(2): 152-156.
- [55] 未作君, 林 立, 倪晋仁. 超临界 CO₂ 萃取大黄总蒽醌工艺研究[J]. 化学工程, 2006, 34(8): 63-66.
- [56] 艾克拜尔·安扎尔, 夏木西努尔·肖盖提, 斯拉甫·艾白. 土大黄蒽醌的提取工艺研究[J]. 医药导报, 2012, 31(7): 907-909.
- [57] 卢 智. 超临界流体萃取芦荟苷的研究[J]. 食品工业, 2012, 33(1): 33-34.
- [58] 吉惠杰, 杨艳俊, 薛俊礼, 等. 超声波提取芦荟中芦荟苷的工艺研究[J]. 黑龙江农业科学, 2015(2): 94-98.
- [59] 董金香, 邱智东, 董雪莲. SCFE-CO₂ 法提取决明子中蒽醌类成分的工艺研究[J]. 长春中医药大学学报, 2010, 26(6): 826-827.
- [60] 李 敏, 黄小梅, 谈文林. 何首乌中蒽醌类物质提取及抗氧化活性研究[J]. 食品研究与开发, 2018, 39(14): 41-45.
- [61] 黄小梅, 邓 祥, 吴 狄. 何首乌中蒽醌类物质的超声波提取工艺优化[J]. 化学研究, 2015, 26(2): 166-169.
- [62] 邱婧然, 王志祥, 戈振凯, 等. 超临界 CO₂ 萃取白芷中香豆素类成分工艺研究[J]. 辽宁中医药大学学报, 2014, 16(2): 59-62.
- [63] 蓝耀宏. 响应面优化白芷总香豆素提取工艺的研究[J]. 化工技术与开发, 2014, 43(2): 20-24.
- [64] 金银萍, 王 博, 刘兴医, 等. Box-Behnken 响应曲面法优化五味子木脂素的提取工艺[J]. 江苏农业科学, 2017, 45(22): 210-212.
- [65] 李 志, 祖彦鑫. 正交设计法优选蛇床子 CO₂ 超临界萃取工艺[J]. 黑龙江科技信息, 2011(25): 22.
- [66] 刘亚倩, 胡亚刚, 牛晓峰. 蛇床子中蛇床子素提取工艺研究[J]. 现代中医药, 2016, 36(2): 79-81.
- [67] 陆 慧, 贾晓斌, 施 峰, 等. 超临界 CO₂ 萃取白花蛇舌草中三萜类成分的工艺研究[J]. 中成药, 2011, 33(8): 1429-1432.
- [68] 潘利明, 梁晓原. 超临界二氧化碳萃取迷迭香中二萜酚类成分的工艺研究[J]. 云南中医中药杂志, 2006, 27(1): 48-49.
- [69] 黄东辉. 丹参中丹参酮提取工艺优化及活性研究[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2018.
- [70] 何 昊, 许 畅, 王兴中, 等. 四种不同方法提取黄芪中黄芪甲苷的对比研究[J]. 化工科技, 2016, 24(3): 25-28.
- [71] 樊红秀, 刘婷婷, 刘鸿铖, 等. 超临界萃取人参皂苷及 HPLC 分析[J]. 食品科学, 2013, 34(20): 121-126.
- [72] 王维坚, 侯丽丽, 陈洪海. 人参总皂苷提取工艺研究[J]. 食品安全导刊, 2018(27): 169-170.
- [73] 黄 雪, 冯光炷, 雒廷亮, 等. 超临界 CO₂ 萃取三七总皂苷[J]. 精细化工, 2008, 25(3): 238-242.
- [74] 曾以旺, 王少平, 陈燕瑞, 等. 三七乙醇提取工艺优选[J]. 辽宁中医药大学学报, 2014, 16(12): 44-46.
- [75] 李青宇, 孟 哲, 王 磊. 响应面法优化超临界 CO₂ 提取甘草多糖及抗氧化活性研究[J]. 食品工业, 2017, 38(9): 1-5.
- [76] 刘永岭, 王艳艳. 正交设计优选甘草多糖的提取工艺[J]. 价值工程, 2018, 37(26): 249-251.
- [77] 杨孝辉, 郭 君. 正交试验优化超临界 CO₂ 流体萃取淮山多糖工艺[J]. 山东化工, 2018, 47(23): 34-36.
- [78] 聂凌鸿. 淮山活性多糖的分离纯化、结构与生物活性的研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2004.
- [79] 段丽丽, 句荣辉, 王 辉, 等. 响应面法优化超临界提取茯苓多糖工艺研究[J]. 中国农业科技导报, 2016, 18(5): 193-199.
- [80] 郭毓菲, 张诗泉, 王汉迪, 等. 超声波法提取水溶性茯苓多糖工艺优化及其抗氧化活性探究[J]. 中国酿造, 2018, 37(12): 160-164.
- [81] 李尧军, 张晓喻, 王战国, 等. 两种方法提取羌活羌活挥发油成分分析及其抑菌活性的研究[J]. 中国民族医药杂志, 2018, 24(11): 46-52.
- [82] 李 岗, 余德顺, 杨 军, 等. 超临界 CO₂ 萃取薄荷挥发油及其抗氧化能力的研究[J]. 食品科技, 2013, 38(1): 276-279.
- [83] 赵鸿峰, 骆骄阳, 孔维军, 等. 益智叶挥发油的化学成分和促透皮作用研究[J]. 中药材, 2017, 40(12): 2864-2869.
- [84] 刘 群. 二氧化碳超临界萃取元胡白芷配方的镇痛作用研究[D]. 济南: 山东大学, 2012.
- [85] 王小萌, 吴全娥, 石 鑫, 等. 石菖蒲超临界萃取物对抑郁模型大鼠行为学的影响[J]. 医学综述, 2019, 25(10): 2064-2068.

(收稿日期: 2019-09-24; 修回日期: 2020-02-05)