

超临界 CO₂ 萃取功能性油脂的研究进展

马晓燕^{1,2}, 吴茂玉^{2,*}, 朱风涛², 宋 焱², 刘雪梅², 李丹丹^{1,2}

(1. 山东轻工业学院食品与生物工程学院, 山东济南 250353;

2. 中华全国供销合作总社济南果品研究院, 山东济南 250014)

摘要:对超临界 CO₂ 萃取技术的原理、特点和国内外研究现状进行了介绍, 综述了该技术在功能性油脂提取领域的研究进展。讨论了萃取压力、萃取温度、萃取时间、CO₂ 流量、夹带剂等因素对油脂萃取率的影响; 对比了不同类型油脂对超临界 CO₂ 萃取参数的需求, 并分析了超临界 CO₂ 萃取的油脂产品指标及品质优势, 对其应用前景做出展望。

关键词:超临界 CO₂ 萃取技术, 功能性油脂, 影响因素, 指标评价

Research progress in supercritical CO₂ extraction technology of functional oil

MA Xiao-yan^{1,2}, WU Mao-yu^{2,*}, ZHU Feng-tao², SONG Ye², LIU Xue-mei², LI Dan-dan^{1,2}

(1. College of Food and Biology Engineering, Shandong Institute of Light Industry, Jinan 250353, China;

2. Jinan Fruit Research Institute All China Federation of Supply and Marketing Co-operatives, Jinan 250014, China)

Abstract: In this article, the principles, characteristics and study status at home and abroad of supercritical CO₂ fluid (SCF) extraction technology were introduced. The research progress in SCF in functional oil extraction and the influence factors containing pressure, time, temperature, CO₂ flux etc. were reviewed. The SCF process parameters of different functional oils were compared, and the indicators and quality of oils extracted by SCF were analyzed. In addition, we performed application prospects of the SCF technology.

Key words: supercritical CO₂ extraction technology; functional oils; influence factors; index evaluation

中图分类号: TS224

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2013)19-0358-06

功能性油脂是一类具有特殊生理功能的油脂, 对人体有一定保健和药用功能, 通常所说的功能性油脂分为多不饱和脂肪酸和磷脂^[1]。植物油脂是功能性油脂的主要来源, 如枸杞籽油、沙葱籽油、汉麻籽油等含有大量的亚油酸, 油茶籽油中油酸含量超过 70% 等。近年来, 随着新的功能性油脂资源不断被开发, 其生理功能和作用逐渐被揭示, 如抗动脉粥样硬化、改善免疫功能、降低胆固醇等功效^[2], 如何开发低成本、高品质的功能油脂的萃取方法成为油脂工业关注的热点。目前, 功能性油脂制取常见方法有压榨法、溶剂浸出法、水-酶法等^[3]。

超临界流体萃取 (Supercritical fluid extraction, SFE) 技术是目前国内外竞相研究开发的高效分离技术^[7], 因其独特的溶剂性质, 被广泛应用在功能性油脂提取方面。用 SFE 技术得到的油脂纯度高, 色泽好; 无溶剂残留, 无污染; 而且工艺简单, 分离范围广、只需控制压力和温度等参数即可达到提取混合物中不同组分的目的^[8]; 对热敏和易氧化成分的活性保存较好, 特别适应于一些功能性油脂的提取^[9]。近年来, 研究者们对 SFE 在提取具有高附加值的功能

性油脂的方面进行了探索研究并取得较大进展。本文针对 SFE 研究中的最为广泛的超临界 CO₂ 流体萃取 (Supercritical CO₂ fluid, SCF) 萃取的相关原理、影响因素、工艺条件等进行分析, 阐述其在近年来功能性油脂方面的应用现状。

1 超临界 CO₂ 萃取技术

1.1 超临界 CO₂ 萃取的原理

稳定的纯物质都有固定的临界点, 包括临界压力 (Pc)、临界温度 (Tc)、临界密度 (ρc)。当某物质处于其临界温度和临界压力以上的状态时, 此时增加压力, 气体不会液化, 只是密度增大, 具有类似液态的性质, 同时还保留气体的性能, 这种状态的流体就被称为超临界流体^[10]。如图 1 所示, 超临界流体的密度与液体相近, 比相应常压气体要大 100~1000 倍; 黏度与气体的接近, 为相应液体的 1%~10%; 扩散系数介于气体和液体之间, 为普通液体的 10~100 倍^[11]。所以超临界流体具有非常好的渗透能力和溶解能力。超临界流体萃取技术就以这种流体为溶剂, 有选择性地使极性、沸点和分子量不同的成分从固体或液体样品中萃取出来^[12], 是一项国际上先进的物理萃取技术。

用 SEF 提取分离天然产物时, 已研究过的萃取剂有多种, 如: 甲醇、乙醇、乙烯、乙烷、正戊烷、一氧化亚氮、二氧化碳等^[13]。在众多流体材料中, CO₂ 是

收稿日期: 2013-03-11 * 通讯联系人

作者简介: 马晓燕 (1989-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 食品资源开发。

基金项目: 国家“十二五”科技支撑计划 (2012BAD36B04)。

表1 功能油脂的常规提取方法比较

Table 1 The conventional extraction method comparison of functional oil

	原理	优点	缺点
压榨法	借助机械外力的作用,将油脂从油料中挤压出来的方法。主要设备有液压榨油机和螺旋榨油机	设备结构简单、操作安全,油脂清亮,无溶剂残留	出油率低,原料浪费大,油脂中活性物质含量低,榨油过程蒸炒的工序破坏了油粕中蛋白质的性质,使其生物效价低,只能用作饲料
溶剂萃取法	通过有机溶剂溶解油料中的油脂,将油脂从固相转移到液相的传质过程	出油率高,提取过程的温度相对较低,蛋白质变性程度小,粕的质量较好	产品纯度低,色泽深,且油脂中溶剂残留现象较为突出 ^[5] ,存在有机溶剂易燃、易爆的隐患
水酶法	利用酶制剂进行油脂分离	条件温和,工艺简单,能同时得到优质的油脂和再利用性强的蛋白质	酶制剂成本 ^[6] 制约,提取的油脂酸值偏高

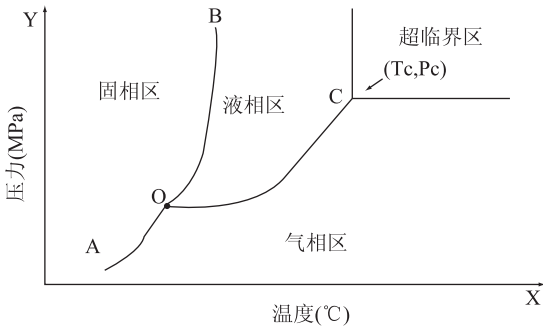


图1 超临界区域图

Fig.1 Supercritical area map

最为适合,也是应用最为广泛的流体。 CO_2 作为超临界流体的优势为: CO_2 的临界状态容易实现,其临界温度为 31.1°C ,临界压力为 7.3MPa ^[14],分离过程可以在室温下进行;超临界 CO_2 密度相对较大,溶解能力强,传质速率快;化学性质稳定, CO_2 为惰性气体,无腐蚀性、无可燃爆炸危险;安全、无毒、无化学污染,对食品分离过程有利; CO_2 来源方便,价格低且纯度高,可循环使用,经济性好^[15]。

1.2 超临界 CO_2 萃取的基本流程

SCF- CO_2 的流程依据萃取对象的不同而进行设计,但最基本的流程是相通的(见图2)。超临界 CO_2 流体的循环借助空气压缩机来完成^[16],基本萃取步骤如下:a.将预先处理,如粉碎、干燥的原料放入萃取釜中;b.超临界 CO_2 经过高压泵压缩升压,在萃取釜内达到设定的超临界状态;c.在萃取釜中原料中的可溶性成分溶解在超临界流体中并随着流体循环进入分离器中;d.通过改变分离器压力和温度得到分离产物;e.而超临界 CO_2 则经过压缩和热交换器,重新流入回路,实现循环使用。

2 影响油脂萃取的因素

影响超临界 CO_2 萃取的因素主要包括 CO_2 流量、萃取压力、萃取温度、萃取时间,原料的含水量、粉碎细度、夹带剂等因素对萃取率也有一定的影响。

2.1 CO_2 流量

CO_2 流量对萃取过程有两个方面的影响^[10]。一方面,随着 CO_2 流量的增加,萃取过程中的传质推动力增加,传质速率加快,萃取过程在较短的时间达到

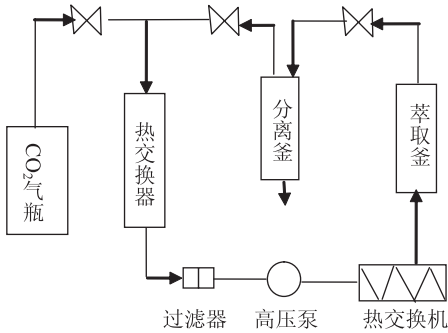


图2 超临界 CO_2 萃取的流程图

Fig.2 The flow chart of supercritical CO_2 extraction

平衡;同时增大了 CO_2 与被提取物料的接触面积,有利于萃取^[14]。另一方面,增加 CO_2 的流量,加快了萃取器内 CO_2 的流速, CO_2 在釜内停滞时间短,不利于萃取过程进行;同时流速增大,容易导致热质传递不均,引起萃取釜中物料返混,降低分离效果^[17]。因此, CO_2 流量在萃取中存在一个最佳值。朱莉^[18]在超临界 CO_2 萃取棕榈籽油的研究中发现, CO_2 的最适流量为 20L/h ,随着 CO_2 流量的增加,棕榈籽油在棕榈粉和 CO_2 流体之间的浓度差趋近最大,再继续增大流量对提高籽油萃取率的贡献不大,且增加了生产成本;超临界萃取番茄籽油^[19]、花椒籽油^[20]、南瓜子油^[21]等的研究中作者也基本采用 $15\sim 20\text{L/h}$ 的 CO_2 流速。

2.2 萃取压力

萃取压力是超临界 CO_2 萃取的最重要工艺参数之一。通过改变萃取压力可以使超临界流体的密度发生变化,改变传质距离,从而改变它对物质的溶解能力。萃取温度一定时,压力增大,流体密度增大,油脂的溶解度增大;但压力增至一定程度时,溶解能力增加缓慢,而且操作压力的增加会加快设备损耗且油脂中色素含量增多,影响油脂品质。通常在功能性油脂提取中, $20\sim 35\text{MPa}$ 是较为合适的压力,在规模生产中萃取压力为 25MPa 甚至更低^[22]。

2.3 萃取温度

萃取温度对超临界 CO_2 萃取过程的影响要比萃取压力复杂得多。在一定萃取压力下,萃取温度对油脂萃取的影响有两个方面^[8]:一方面,温度对超临

表2 功能性油脂分类及提取条件

Table 2 Classification and extraction condition of functional oil

	籽油	碘价 $\text{gI}_2/100\text{g}$	提取条件
干性油脂	枸杞籽油 ^[30]	146	压力为 25~35MPa, 温度在 40~50℃。 枸杞、桑椹、沙棘籽油等研究都表明, 萃取压力过高时油脂中的色素含量会增加, 在 20MPa 下得到籽油色泽浅黄、透明。
	大豆油 ^[32]	130~142	
	亚麻籽油 ^[42]	176~180	
	猕猴桃籽油 ^[36]	171	
	南瓜籽油 ^[21]	176	
	桑椹籽油 ^[29]	133	
	沙棘籽油 ^[14]	170	
半干性油脂	番茄籽油 ^[19]	110~120	半干性油脂压力 15~35MPa, 温度 35~50℃。压力和温度的增加不仅会对油脂产生不良影响, 同时也会导致设备投资大幅度增加。
	花椒籽油 ^[20]	121	
	苹果籽油 ^[37]	115	
	山楂籽油 ^[40]	122	
	槟榔籽油 ^[31]	98	
非干性油脂	茶籽油 ^[6]	89	非干性油脂压力 35~45MPa, 温度 35~45℃。以茶籽油为例: 压力在 35MPa 时提取率已接近 90%, 40MPa 时提取率虽超过 90%, 但油脂颜色变为深黄色, 需要进一步精炼脱色; 温度 35℃ 时萃取出的油脂颜色为黄色, 但 45℃ 时已成为深黄色, 因此萃取温度应低于 45℃。
	花生籽油 ^[34]	80~97	
	沙葱籽油 ^[39]	98	

界 CO_2 流体密度的影响。随着温度升高, 流体密度下降, 导致流体的溶剂化效应下降, 使萃取物在其中的溶解度下降; 另一方面, 温度对萃取物蒸汽压的影响。随着温度增高, 萃取物蒸汽压增大, 使物质在 CO_2 中的溶解度增大而有利于萃取。另外, 温度升高, 杂质的溶解度也会增大, 这反而降低产品的纯度和得率, 并且在高温条件下易造成某些成分的变性、分解或失效, 因此在选择萃取温度时要综合考虑这些因素。由于功能性油脂含有大量不饱和脂肪酸, 故萃取温度应较为温和, 一般在 30~50℃ 之间^[11,19-20]。

2.4 萃取时间

文献^[18]表明, 萃取时间一般也有一个最适值。通常在萃取刚开始, 由于溶质在超临界 CO_2 流体中的溶解度较小, 出油率较低; 随着时间延长, 传质达到良好的状态, 萃取率逐渐增大; 但继续增加时间, 萃取率增长速度逐渐变缓, 此时, 存在一个经济时间的终点, 且萃取的选择性也下降。为降低成本, 提高设备效率, 功能性油脂的萃取时间一般为 1~3h。

2.5 夹带剂

夹带剂也称为携带剂, 是在超临界流体溶剂中加入与被萃取物亲和力强的组分, 可以与流体溶剂混溶的、挥发性介于被萃取物质与超临界组分之间, 以提高其对萃取组分的选择性和溶解度为主要目的的一类物质, 这类物质可以是某一种纯物质, 也可以是两种或多种物质的混合物^[23]。纯 CO_2 是非极性溶剂, 其萃取能力有限, 当萃取含极性成分较多的油脂时, 就需要添加极性夹带剂。夹带剂可强化超临界 CO_2 萃取过程的选择性、溶解能力和提取效率。在 SCF 萃取过程中, Johnston 等^[24] 添加了摩尔分数为 0.028 的 CH_3OH , 萃取物苯二酚的溶解度提高 10 倍, 而添加摩尔分数为 0.02 的磷酸三丁酯后苯二酚的溶解度提高 250 倍。可见夹带剂对超临界萃取效果有极大的强化作用。禹慧明^[25] 等研究表明, 加入质量分数为 10% 的甲醇作夹带剂, 可将 CO_2 密度从

0.95 g/cm^3 降为 0.75 g/cm^3 , 可使操作压力从 38.3MPa 降至 13.4MPa, 因此可大大降低对容器材料的耐高压要求, 从而降低生产成本, 减少生产操作的危险性。

2.6 其他

原料的粒度大小对超临界 CO_2 萃取过程也有着重要的影响。一方面, 原料粒度越细, 传质面积越大, 内传质阻力也越低, 越有利于提高萃取率; 对于植物油脂而言, 大多籽油存在于种子内部, 破碎有利于破壁, 使油脂溢出^[26]。但另一方面, 原料粒度太小, 则堆积密度增大, 增加了外传质阻力, 在压力作用下使原料板结成块, 易导致气路堵塞, 造成无法连续萃取, 不利于提取。文献[20~22]中提到的较适粒度多为 40~60 目。

原料的含水量对萃取率也有一定的影响。少量的水分在萃取过程中起到了夹带剂的作用, 有利于萃取率的提高; 然而水分含量较高时, 容易在原料表面形成一层连续相的水膜, 不利于油脂的溶出, 使萃取变得困难。研究表明, 原料含水量在 5%~7% 时, 在超临界萃取过程中的萃取率最高^[27]。

3 超临界 CO_2 萃取技术在功能性油脂加工中的应用

3.1 超临界 CO_2 萃取功能性油脂的工艺研究

随着社会的不断进步, 人们生活水平的不断提高, 安全、绿色、天然的食品成为人类追求的理想食品, 而传统的加工技术的温度过高, 有机溶剂残留等问题使人们的需要无法得到满足, 加工高品质的功能性油脂已成为行业的当务之急。超临界 CO_2 萃取技术在油脂的萃取上应用比较广泛, 其得率高, 杂质含量低, 萃取工艺简单, 可以完成脱胶过程, 并部分起到脱酸、脱臭和脱色效果^[28], 而且萃取后的残粕保留了原样, 可方便用于制取蛋白质, 掺入食品或用作饲料。

确定超临界 CO_2 萃取过程的工艺条件, 通常有

表3 常见功能性油脂的 SCF-CO₂ 萃取参数
Table 3 Supercritical CO₂ extraction parameters of common functional oil

油脂产品	萃取条件						文献
	颗粒细度	压力 (MPa)	温度 (℃)	时间 (h)	CO ₂ 流量	萃取率 (%)	
枸杞籽油	40~60 目	25~30	35~45	3	40kg/h	90	[30]
槟榔籽油	40 目	30	35	3	/	3.71	[31]
茶籽油	40~60 目	35	40	3	/	89.97	[6]
大豆胚芽油	/	30	45	2	25kg/h	91.38	[32]
番茄籽油	/	15~25	40~50	1~2	20kg/h	87.6	[19]
胡麻籽油	0.2mm	30	45	2.5	23kg/h	42.71	[33]
花椒籽油	60 目	35	50	6	20kg/h	97.86	[20]
花生油	20 目	39	39	2	30kg/h	93	[34]
葵花籽油	/	30	35	2.5	20kg/h	90.85	[35]
猕猴桃籽油	40~60 目	25~35	40~45	2.5	25kg/h	/	[36]
南瓜籽油	5mm	30	45	1.5	15L/h	39.83	[21]
苹果籽油	0.297mm	35	30~35	2	25kg/h	22.85	[37]
葡萄籽油	0.35mm	20	40	2	1.5L/min	92	[38]
桑椹籽油	0.9mm	37	50	2	10L/h	29.89	[29]
沙葱籽油	/	31.5	46	1.5	/	15.07	[39]
山楂籽油	/	30	40	3	/	6.53	[40]
石榴籽油	40	30	40	3	/	18.35	[41]
杏仁油	60	35	50	2	24L/h	52.98	[5]
亚麻籽油	/	30	45	3~4	100kg/h	95	[42]
油茶籽油	0.605mm	30	50	1.5	30L/h	91	[43]
月见草油	50	30	35~45	3	/	95.97	[44]
紫苏籽油	/	20	40	6	30L/h	37.2	[45]

两种途径:一是利用平衡理论进行定性分析,建立数学模型;另一种是根据经验确定方案再用实验论证方案。在实际应用操作中,通常采用后一种途径,通过对油脂性质的分析,确定初步方案,再通过正交或响应面实验设计得到最优化的方案。

功能性油脂根据其碘价分为干性油脂碘价 >130、半干性油脂碘价为 100~130 和非干性油脂碘价 <100^[29]。碘价能代表油脂上加成的卤素(I₂)的质量,油脂中所包含的脂肪酸有不饱和脂肪酸与饱和脂肪酸之分,而其中的不饱和脂肪酸能与卤素发生加成反应,因而可以吸收一定数量的卤素。碘价的大小在一定范围内反映了油脂的不饱和程度。表 2 具体介绍了不同类型的油脂对超临界 CO₂ 萃取条件的需求。

通过对现有文献研究,表 3 对实验论证的国内外常见油脂超临界 CO₂ 萃取参数进行了列举介绍。

3.2 超临界 CO₂ 流体萃取功能性油脂的产品性质分析

超临界 CO₂ 流体萃取技术对热敏和易氧化成分的活性保存较好,特别适应于一些功能性油脂的提取,所提取油脂在理化性质和脂肪酸成分及含量都优于传统提取方法,表 4 对功能性油脂的各项指标进行对比分析。

超临界 CO₂ 流体萃取技术提取的油脂,其过氧化值、皂化价明显低于压榨法、有机溶剂法,超临界 CO₂ 萃取法以其操作温度低、作用时间短的优点获得

了氧化程度较低的油脂,更有利于油脂的贮藏,其色泽也好于其他方法提得的产品。

油脂中脂肪酸的组成一定程度上取决于超临界萃取的条件,吴彩娥^[36]在提取猕猴桃籽油的研究发现,通过程序升压可使其 α-亚麻酸的含量达到 73.53%;物料流量从 3.3~5.1g/min,α-亚麻酸含量从 70.35%~75.18%。Roy^[47]、Zaidul^[48]等研究都表明,在超临界提取初期低碳链脂肪酸(C_{10:0}、C_{12:0}、C_{13:0}、C_{14:0}、C_{14:1})等含量较高。薛松等^[46]人用 SCF 萃取玉米胚芽油时发现,其他条件固定,随萃取时间的延长,油中易挥发组分棕榈酸的含量减少,难挥发组分油酸的含量逐渐增多。

SCF 可较好的保留功能性油脂的脂肪酸成分,其中以亚油酸为主的多不饱和脂肪酸保留程度最好,亚油酸具有免疫调节、抗肿瘤、降血脂、降血糖等功效,对人体健康十分有益;棕榈酸和硬脂酸等饱和脂肪酸的含量较其他方法也有所提高;虽然 SFE 萃取产品中油酸含量较传统方法有所损失,但 SFE 提取的油脂纯度高、品质好,省去了精炼脱胶的步骤。所以综合分析,超临界 CO₂ 流体萃取技术在提取功能性油脂方面有着不可替代的位置。

4 超临界 CO₂ 萃取技术的局限性及展望

目前,超临界 CO₂ 萃取技术在食品、医药、化工等领域都受到空前的重视,在理论上和应用上都被证明了具有广阔的前景。但是作为一种新技术,超临界 CO₂ 萃取也有其自身的局限性。首先,超

表4 超临界 CO₂ 流体萃取功能性油脂指标分析Table 4 Index analysis on functional oil of SCF-CO₂

油脂种类	方法	理化指标	脂肪酸含量
枸杞籽油	SCF	油脂色泽清亮,酸价和过氧化值较低	脂肪酸种类和含量保持较好,不饱和脂肪酸达 88%,其中亚油酸 63.05%
	压榨法	酸价和过氧化值高于 SCF 法	亚油酸 67.19%
紫苏籽油	SCF	金黄色透明油状液体	亚麻酸含量为 73.1%
	有机溶剂法	浅黄色,有异味	亚麻酸损失较大,为 67.4%
汉麻籽油	SCF	油脂浅黄色,微浊	脂肪酸含量高,亚油酸含量最高 56.3%
	压榨法	油脂呈黄绿色,浑浊,含水 0.06%	亚油酸 51.7%
苹果籽油	SCF	金黄,澄清均一,水分 0.042%	亚油酸、油酸、棕榈酸的含量分别为 51.40%、52.6%、6.55%
	压榨法	水分及挥发物含量 0.1%	亚油酸 46.56%,油酸 39.98%
茶籽油	SCF	具有茶特有的滋味和气味,色泽金黄,澄清透明	油酸含量为 47.5%,亚油酸 23.9%,棕榈酸 18.8%
	有机溶剂法	色泽浅棕黄,微浊,酸价和过氧化值略高	油酸含量为 52.6%,优于 SCF 法

临界 CO₂ 萃取技术对于非极性和分子质量较小的物质适用性较好,而对极性 or 相对分子质量偏大物质的提取率较差,对于此类物质通常需加入合适的夹带剂,而夹带剂可能会在产品残留;其次,超临界 CO₂ 萃取技术还存在着处理成本高、设备生产能力低等问题,超临界设备必须密封性好、抗腐蚀、耐高压,所以在企业规模化生产方面受到限制,只能选择附加值高的产品作为萃取对象。随着国产设备技术的成熟,超临界设备的投资将会逐渐步降低,并呈现出与超声、电场、微波技术、计算机技术联合使用的发展趋势,使得超临界技术加快工业化步伐,推动功能性食品产业品质提升。

参考文献

- [1] 孙志芳,高荫榆,郑渊月.功能性油脂的研究进展[J].中国食品添加剂,2005(3):4-6.
- [2] 刘佩,沈生荣,阮辉,等.共轭亚油酸的生理学功能及健康意义[J].中国粮油学报,2009,24(6):160-164.
- [3] 袁光辉.超临界 CO₂ 萃取技术及在植物油脂制备中的应用[J].广东农业科学,2011(2):111-113.
- [4] 姜文选,郭继志.超临界流体技术的研究和应用[J].石油化工高等学校学报,2001,14(2):15-17.
- [5] 马玉花,赵忠,李科友,等.超临界 CO₂ 流体萃取杏仁油工艺研究[J].农业工程学报,2007,23(4):272-273.
- [6] 郭华.高档茶籽油的提取及茶籽综合利用技术研究[D].湖南:湖南农业大学,2007.
- [7] Clifford T.Fundamentals of supercritical fluids [M].New York,USA:Oxford University Press,1999:51-52.
- [8] 任飞,韩发,石丽娜,等.超临界 CO₂ 萃取技术在植物油脂中的应用[J].中国油脂,2010,35(5):14-16.
- [9] Johnston K P, Harrison, Kklarke M J.Water-in-carbon dioxide microemulsions: an environment for hyrophilcs including proteins[J].Science,1996,271(2):624-626.
- [10] Alexander W S, Brusewitz G H, Maness N O.Pecan oil

recovery and composition as affected by temperature, pressure, and supercritical CO₂ flow rate[J].J Food Sci,1997,62(4):762-766.

- [11] Chan K, Ismail M.Supercritical carbon dioxide fluid extraction of Hibiscus cannabinus L.seed oil:a potential solvent-free and high antioxidative edible oil [J].Food Chem, 2009, (114):970-975.

- [12] Bernardo Gil MG, Lina M.Cardosolopes.Supercritical fluid extraction of Cucurbita ficifolia seed oil [J].Eur Food Res Technol,2004,(219):593-597.

- [13] 陈必春,毛多斌,郭鹏,等.超临界萃取技术在食品工业中的应用[J].食品工程,2008,6(2):6-9.

- [14] Derevich I V, Shindyapkin A A.Extraction of organic oil from sea buckthorn seeds with supercritical carbon dioxide [J].Theor Found Chem Eng,2004,38(3):274-283.

- [15] 高拥军.沙棘油的超临界 CO₂ 萃取与应用[D].南京:南京林业大学,2004.

- [16] Salgin U.Extraction of jojoba seed oil using supercritical CO₂ tetanolmixture in green and high-tech separation process [J].J Supercrit.Fluids,2009,(39):330-337.

- [17] 廖传华,黄振仁.夹带剂对超临界 CO₂ 萃取过程的影响[J].香料香精化妆品,2004(1):34-36.

- [18] 朱莉.超临界 CO₂ 萃取槟榔籽油的研究[D].海南:海南大学,2011.

- [19] 孙杰庆,丁宵霖.超临界流体萃取番茄籽油的研究[J].中国油脂,1998(3):59-61.

- [20] 刘雄,阚建全,陈宗道.超临界 CO₂ 萃取和精炼花椒籽油的研究[J].中国粮油学报,2003,18(4):59-62.

- [21] 陈国东.超临界 CO₂ 流体萃取南瓜子油的研究[D].陕西:西北农林大学,2008.

- [22] 汪昌国,刘震.植物油脂的超临界 CO₂ 提取[J].中国油脂,1997,22(6):3-6.

- [23] 刘晓耕,陈梅梅,谢亚桐.夹带剂及其对超临界 CO₂ 萃取效能的影响[J].食品科学,2004,25(11):353-355.

- [24] Johnston K P, Harrison, Kklarke M J.Water-in-carbondiox

- idemicroemulsions: an environment for hydrophiles including proteins[J]. Science, 1996, 271(2): 624-626.
- [25] 禹慧明, 姚汝华, 林炜铁. 夹带剂对超临界 CO₂ 萃取被孢霉中 γ -亚麻酸油脂的影响[J]. 中国油脂, 1999, 24(2): 38-40.
- [26] Valle J M, Uquiche EL. Particle size effects on supercritical CO₂ extraction of oil-containing seeds[J]. J Am Oil Chem Soc, 2002, 79(12): 1261-1266.
- [27] XIAO Jianping, FAN Chongzheng. Progress in research of supercritical fluid technology[J]. Prog Chem, 2001, 13(2): 94-101.
- [28] Zaidul S M, Norulaini N N, Omar A K M, et al. Supercritical carbon dioxide (SC-CO₂) extraction and fractionation of palm kernel oil from palm kernel as cocoa butter replacers blend[J]. J Food Eng, 2006, 73(3): 210-216.
- [29] 张志伟. 超临界 CO₂ 流体萃取桑椹籽油的研究[D]. 陕西: 西北农林科技大学, 2006.
- [30] 潘太安, 刘敦华, 毛忠英, 等. 超临界 CO₂ 萃取枸杞籽油的研究[J]. 宁夏大学学报: 自然科学版, 2000, 21(2): 156-158.
- [31] 曲丽洁. 槟榔籽油的提取、分析及抗氧化活性研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2012.
- [32] 宋玉卿, 于殿宇, 张晓红, 等. 大豆胚芽油的超临界 CO₂ 萃取研究[J]. 食品科学, 2007, 28(10): 293-295.
- [33] 黄雪, 胡巧珍, 刘国际. 超临界萃取胡麻籽油的工艺研究[J]. 仲恺农业工程学院学报, 2010, 23(1): 37-39.
- [34] 吕微, 纵伟, 王培敏. 超临界 CO₂ 萃取花生油工艺研究[J]. 郑州轻工业学院学报, 2011, 26(1): 39.
- [35] Andrich G, Balzini S, Zinnai A, et al. Supercritical fluid extraction in sunflower seed technology[J]. Eur J Lipid Sci Technol, 2001(103): 151-156.
- [36] 吴彩娥. 猕猴桃籽油 α -亚麻酸的富集及猕猴桃籽油微
- (上接第 351 页)
- Bioresource Technology, 2003, 89: 103-106.
- [6] Martínez-Bustos F, López-Soto M, San Martín-Martínez E, et al. Effects of high energy milling on some functional properties of jicama starch (*Pachyrhizus erosus* L. Urban) and cassava starch (*Manihot esculenta* Crantz)[J]. Journal of Food Engineering, 2007, 78: 1212-1220.
- [7] Amaya-Llano SL, Martínez-Alegría AL, Zazueta-Morales JJ, et al. Acid thinned jicama and maize starches as fat substitute in stirred yogurt[J]. LWT, 2008, 41: 1274-1281.
- [8] Ramirez-Santiago C, Ramos-Solis L, Lobato-Calleros C, et al. Enrichment of stirred yogurt with soluble dietary fiber from *Pachyrhizus erosus* L. Urban: Effect on syneresis, microstructure and rheological properties[J]. Journal of Food Engineering, 2010, 101: 229-235.
- [9] 陈俊芳, 张慧, 付湘晋, 等. 阳明山高山雪莲果块根营养成分分析[J]. 湖南林业科技, 2012, 39(1): 64-66.
- [10] 周新勇, 宋曙辉, 王文琪, 等. 紫参薯及其同属植物铁杆

- 胶囊化技术研究[D]. 陕西: 西北农林科技大学, 2005.
- [37] 杨继红, 李元瑞, 蒋晶. 苹果籽油的超临界 CO₂ 萃取及脂肪酸含量分析[J]. 西北农林科技大学学报, 2007, 35(3): 195-197.
- [38] Gomez A M, Lopez C P, Ossa E M. Recovery of grape seed oil by liquid and supercritical carbon dioxide extraction: a comparison with conventional solvent extraction[J]. Chem Eng J, 1996(61): 227-231.
- [39] 张君萍. 沙葱籽油和多糖的提取及其降血脂作用[D]. 南京: 南京农业大学, 2011.
- [40] 刘洪民. 超临界 CO₂ 萃取山楂籽油及其化学成分的研究[D]. 陕西: 西北农林大学, 2006.
- [41] 臧红霞. 新疆石榴籽油超临界萃取工艺条件研究[J]. 安徽农业学报, 2011(15): 161-162.
- [42] 陈元, 杨基础. 超临界二氧化碳萃取亚麻籽油的研究[J]. 天然产物研究与开发, 2001, 13(3): 14.
- [43] 卢泽湘, 范立维, 郑德勇, 等. 超临界 CO₂ 萃取油茶籽油的工艺及其脂肪酸成分分析[J]. 福建林学院学报, 2010, 30(4): 344-348.
- [44] 王腾宇, 李振岚, 齐颖, 等. 超临界 CO₂ 萃取月见草油的研究[J]. 食品科技, 2010(10): 157-160.
- [45] 隋晓, 韩玉谦. 紫苏籽油超临界萃取最佳工艺条件的研究[J]. 青岛大学学报, 1999, 12(3): 79-81.
- [46] 薛松, 张侃, 陈受斯, 等. 超临界二氧化碳流体萃取玉米胚芽油[J]. 现代化工, 1997(9): 30-31.
- [47] Roy B C, Gotom H T. Temperature and pressure effects on supercritical CO₂ extraction of tomato seed oil[J]. Int J Food Sci Technol, 1996, 31(2): 137-141.
- [48] Zaidul I S, Norulainan O. Supercritical carbon dioxide (SC-CO₂) extraction and fractionation of palm kernel oil from palm kernel as cocoa butter replacers blend[J]. J Food Eng, 2006, 73(3): 210-216.
- 山药中营养成分分析[J]. 安徽农业科技, 2010, 38(35): 20005-20007.
- [11] 何士敏, 秦家顺, 何秀丽, 等. 速冻贮藏和保鲜蔬菜营养成分比较[J]. 食品研究与开发, 2010, 31(10): 201-205.
- [12] Noman ASM, Hoque MA, Haque MM, et al. Nutritional and anti-nutritional components in *Pachyrhizus erosus* L. tuber[J]. Food Chemistry, 2007, 102: 1112-1118.
- [13] 于东, 林跃伟, 陈桂星, 等. 紫山药营养成分分析研究[J]. 营养学报, 2010, 32(2): 190-192.
- [14] 李爱珍, 邵秀芝, 严奉伟. 莲藕中多酚类物质的提取工艺研究[J]. 中国食品添加剂, 2009(5): 80-83.
- [15] 师超, 卞科. 黄肉甘薯多酚类提取物的抗氧化活性研究[J]. 河南工业大学学报: 自然科学版, 2011, 32(2): 16-20.
- [16] 石晋, 栾雨时, 赵宁. 雪莲果块茎中绿原酸及总酚酸的含量测定[J]. 中药材, 2009, 32(2): 230-232.
- [17] 严守雷, 王清章, 彭光华. 莲藕多酚抗氧化作用研究[J]. 中国粮油学报, 2005, 20(4): 77-81.