DOI:10.13652/j.issn.1003－5788.2016.07.038

超临界 CO_2 萃取条件对紫苏籽油脂肪酸组成的影响及工艺优化

Supercritical fluid extraction and quality analysis of perilla seed oil

付复华　　潘兆平　　谢秋涛　　尚雪波

FU Fu-hua　PAN Zhao-ping　XIE Qiu-tao　SHANG Xue-bo

（湖南省农产品加工研究所，湖南 长沙　410125）

（*Hunan Agricultural Product Processing Institute*, *Changsha*, *Hunan* 410125, *China*）

摘要：利用超临界萃取技术提取紫苏籽油，研究萃取压力、萃取温度、萃取时间、CO_2 流量对主要脂肪酸组分含量的影响，并以亚麻酸萃取率为评价指标采用正交试验进行工艺优化。结果表明，棕榈酸、硬脂酸含量与萃取压力和萃取时间负相关，因萃取温度与 CO_2 流量的变化趋势是先降后升；油酸、亚油酸含量因 CO_2 流量的变化趋势是先降后升；亚麻酸含量与萃取压力和萃取时间正相关，因萃取温度与 CO_2 流量的变化趋势是先升后降。超临界 CO_2 萃取紫苏籽油的最佳工艺条件为：萃取压力 25 MPa、萃取温度 40 ℃、萃取时间 2.0 h、CO_2 流量 20 L/h。在该工艺条件下亚麻酸萃取率为 88.09%。所得紫苏籽油符合食用植物油质量要求。

关键词：紫苏籽油；超临界 CO_2；脂肪酸组成；优化

Abstract: Orthogonal experiment was employed to optimize the extraction of linolenic acid from perilla seed by supercritical carbon dioxide extraction and the effects were investigated, such as extraction pressure, temperature, time and CO_2 flow rate on main fatty acid composition contents. The results showed that the contents of palmitic acid and stearic acid were negatively correlated with extraction pressure and time, had a change trend of descend firstly then ascend coinciding with temperature and CO_2 flow rate. Because the contents of oleic acid and linoleic acid had a change trend of descend firstly then ascend coinciding with CO_2 flow rate. There was a positive correlation between the contents of linolenic acid and extraction pressure and time because the change trend of temperature and flow rate was increased at first and decreased later. The optimal extraction conditions for linolenic acid were found to be 40 ℃ for 120 min with CO_2 flow rate 20 L/h under pressure 25 MPa, and the extraction rate of linolenic acid was 88.09% obtained under these optimal conditions. The perilla seed oil with the supercritical CO_2 extraction can meet requirements of standard plants edible oil.

Keywords: perilla seed oil; supercritical CO_2; linolenate; quality analysis

紫苏（*Perilla Frutescen*）属于唇形科（Labiatae）紫苏属一年生自花授粉草本植物，作为多用途的经济植物在中国已有 2 000 多年的栽培历史，是中国卫生部颁布的药食同源物品之一[1]。紫苏籽含油量达 46%以上，是目前发现的亚麻酸含量最高的植物油品种之一[2-4]。关于紫苏籽油的研究[3-8]主要集中在其提取工艺与生理功能方面。超临界 CO_2 萃取技术可以避免传统压榨法提油率低和溶剂浸提法有机溶剂残留等问题[9]，得到油脂提取研究领域的广泛关注，被应用于制取花生油[10]、杏仁油[11]、紫苏籽油[3,12-13]、燕麦麸油[14]、玉米胚芽油[15]、茶叶籽油[16]、白豆蔻油[17]、油茶籽油[18]等，主要是研究超临界萃取工艺对提油率的影响，研究超临界萃取工艺参数对紫苏籽油主要脂肪酸组成的影响还未见报道。

亚麻酸是 DHA 的母体，在体内可转化为 DHA、DPA、EPA 等，是一种对人体非常重要的不饱和脂肪酸。鉴于紫苏籽油中亚麻酸含量最高，可将其作为人体摄入亚麻酸的重要来源。经前期研究[3]，发现超临界萃取工艺参数对紫苏籽油主要脂肪酸组成的影响不同，仅以总萃取率为评价指标无法准确反映对亚麻酸等重要脂肪酸的萃取效果，在制取紫苏籽油时提高亚麻酸的萃取率比提高总萃取率更具意义。本研究拟在文献[3]的基础上，分析超临界 CO_2 萃取条件对紫苏籽油脂肪酸组成的影响，并以提高亚麻酸萃取率为评价指标进行工艺优化，以期为更合理利用紫苏籽资源提供一定的理论参考。

基金项目：湖南省农业科学院科技创新项目（编号：2013YB52）

作者简介：付复华（1978—），男，湖南省农产品加工研究所副研究员。E-mail: fhfu686@163.com

收稿日期：2016－05－09

1 材料与方法

1.1 原料与试剂

紫苏籽：吉林省永吉县联友农副产品经销处；

石油醚(沸程 30～60 ℃)：分析纯，长沙安泰精细化工有限公司；

硝酸、高氯酸：优级纯，国药集团化学试剂有限公司；

草酸、铁氢化钾、硼氢化钠、硫脲、三氧化二砷、无水硫酸钠：分析纯，国药集团化学试剂有限公司；

金属铅：国药集团化学试剂有限公司；

硫酸氢钠：分析纯，广东光华化学厂有限公司；

甲醇：色谱纯，江苏汉邦科技有限公司；

异辛烷：色谱纯，天津市科密欧化学试剂有限公司。

1.2 仪器与设备

超临界萃取设备：HA221-50-06 型，江苏华安科研仪器有限公司；

高速组织捣碎机：DS-1 型，江苏金城国胜试验仪器厂；

电子天平：FA1104 型，上海精密科学仪器有限公司；

旋转蒸发器，RE5286A 型，上海亚荣生化仪器厂；

鼓风干燥箱：DHG-9240A 型，上海精宏试验设备有限公司；

紫外－可见分光光度计：UV1700 型，日本 Shimadzu 公司；

马弗炉，Pyro-260 型，意大利 Milestone 公司；

原子荧光光度计：AFS-9130 型，北京吉天仪器有限公司；

酶标仪：MK3 型，美国 Thermo 公司；

气相色谱－质谱联用仪：7890C-5975A 型，配 7683B 自动进样器、NIST08 谱库，美国 Agilent 公司。

1.3 方法

1.3.1 紫苏籽油提取 分别采用索氏提取法和超临界 CO_2 萃取法提取紫苏籽油[3]，并计算紫苏籽含油率。

1.3.2 紫苏籽油脂肪酸组成分析 对索氏和超临界两种提取方法所得紫苏籽油采用酯交换法进行甲酯化[19]，应用 GC—MS 对紫苏籽油的脂肪酸组成用峰面积归一法进行分析。

(1) GC 条件：HP-88 型毛细管柱(100 m×250 μm×0.25 μm)；载气为 99.999%氦气，柱前压 0.244 MPa，载气流速 1 mL/min；进样量 1 μL；分流比 10∶1；初始柱温 140 ℃(保持 5 min)，以 4 ℃/min 升温到 240 ℃(保持 20 min)。

(2) MS 条件：EI 离子源，全扫描采集模式，电子能量 70 eV，离子源温度 230 ℃，四极杆温度 150 ℃，溶剂延迟 5.00 min，电子倍增电压 1.565 kV，增益系数 1.00。

1.3.3 单因素试验设计 以紫苏籽油中主要脂肪酸含量以及亚麻酸(以甲酯计)萃取率为评价指标，对萃取压力、萃取温度、萃取时间、CO_2 流量进行单因素试验。亚麻酸萃取率按式(1)计算：

$$E = \frac{m_1 \times c_1}{m_2 \times p \times c_2} \times 100\% , \quad (1)$$

式中：

E——亚麻酸萃取率，%；

m_1——紫苏籽油质量，g；

m_2——紫苏籽质量，g；

c_1——索氏提取之亚麻酸相对含量，%；

c_2——超临界提取之亚麻酸相对含量，%；

p——紫苏籽含油率，%。

(1) 萃取压力：固定萃取温度 40 ℃、萃取时间 1 h、CO_2 流量 15 L/h，分别在萃取压力 20，25，30，35，40 MPa 的条件下进行试验，考察萃取压力对紫苏籽油脂肪酸组成和亚麻酸萃取率的影响。

(2) 萃取温度：固定萃取压力 25 MPa，萃取时间 1 h，CO_2 流量 15 L/h，分别在萃取温度 30，35，40，45，50 ℃的条件下进行试验，考察萃取温度对紫苏籽油脂肪酸组成和亚麻酸萃取率的影响。

(3) 萃取时间：固定萃取压力 25 MPa，萃取温度 40 ℃，CO_2 流量 15 L/h，分别在萃取时间 0.5，1.0，1.5，2.0，2.5 h 的条件下进行试验，考察萃取压力对紫苏籽油脂肪酸组成和亚麻酸萃取率的影响。

(4) CO_2 流量：固定萃取压力 25 MPa，萃取温度 40 ℃，萃取时间 1.5 h 条件下，分别在 CO_2 流量 10，15，20，25，30 L/h 的条件下进行试验，考察 CO_2 流量对紫苏籽油脂肪酸组成和亚麻酸萃取率的影响。

1.3.4 正交试验设计 根据单因素试验结果，以亚麻酸萃取率为评价指标，进行 $L_9(3^4)$ 正交试验，确定紫苏籽油超临界 CO_2 萃取的最优工艺条件。

1.3.5 紫苏籽油品质分析 按 GB 2716—2005《食用植物油卫生标准》执行。

2 结果与分析

2.1 紫苏籽含油量

含水率 7.32%，含油率 52.94%。

2.2 紫苏籽油的脂肪酸组成分析

采用气—质联用方法分析索氏提取所得紫苏籽油的脂肪酸组成，结果见表 1。

由表 1 可知，本试验所采用紫苏籽含主要脂肪酸 13 种，其中亚麻酸含量达 57.66%。选择相对含量大于 1%、总含量达 98.91%的棕榈酸、硬脂酸、油酸、亚油酸、亚麻酸为考察对象。

2.3 单因素试验结果

2.3.1 萃取压力的影响 由图 1 可知，随着萃取压力的升高，棕榈酸和硬脂酸的含量逐渐下降，油酸含量略有减少，亚油酸含量变化不大，亚麻酸含量逐渐增加，其增加幅度呈逐渐减缓趋势，在压力达到 35 MPa 后，基本不再增加；随着萃取压力的升高，亚麻酸的萃取率逐渐增加，其萃取率增加幅度呈渐缓趋势，萃取压力达到 25 MPa 后，增加不明显。这可能是：增加萃取压力可提高超临界流体的密度，增大其溶解能力，长链脂肪酸及不饱和脂肪酸萃取率随之上升，当萃取压力逐渐增加到一定程度时，其溶解度渐趋饱和，萃取率也

表 1　紫苏籽油脂肪酸成分及相对含量

Table 1　The constituents and relative contents of fatty acid in perilla seed oil

脂肪酸名称	保留时间/min	相对含量/%
肉豆蔻酸	17.65	0.03
十五烷酸	19.35	0.01
棕榈酸	21.11	8.11
棕榈油酸	22.14	0.23
十七烷酸	22.74	0.03
硬脂酸	24.41	1.44
油酸	25.34	14.00
十九烯酸	26.39	0.17
亚油酸	26.69	17.70
花生酸	27.36	0.02
亚麻酸	28.23	57.66
二十二烷酸	30.19	0.02
二十三烷酸	31.18	0.01

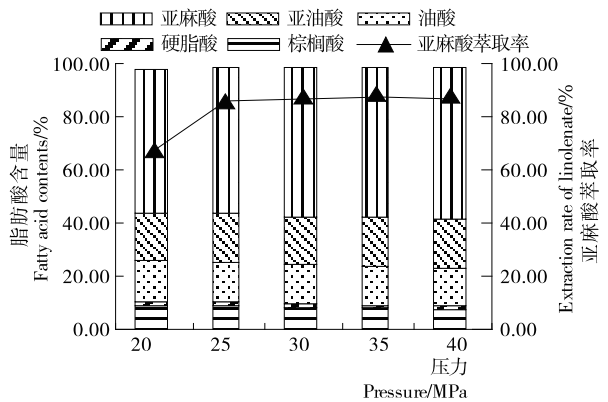

图 1　萃取压力对紫苏籽油脂肪酸组成和亚麻酸萃取率的影响

Figure 1　Influence of extraction pressure on the fatty acid composition and the linolenate extraction rate of perilla seed oil

逐渐稳定,这与 Manninen 等[20]和刘光敏等[21]的研究结论相吻合。综合考虑操作便利与经济等因素,选择 25 MPa 为较佳萃取压力。

2.3.2　萃取温度的影响　由图 2 可知,当温度低于 40 ℃时,随着温度的升高,棕榈酸与硬脂酸含量逐渐减少,油酸变化不大,亚油酸略有波动,亚麻酸略有增加,亚麻酸萃取率随之增加;而当温度高于 40 ℃后,棕榈酸与硬脂酸含量逐渐由降转升,油酸与亚油酸略有减少,亚麻酸略有减少,亚麻酸萃取率略有下降。这可能是:萃取温度低于 40 ℃时,萃取温度升高可提高物料的扩散系数,对紫苏籽油溶解能力的影响占主导,从而提高了萃取率;当萃取温度达到 40 ℃之后,温度升高,超临界 CO_2 密度下降,对紫苏籽油溶解能力的影响逐渐占主导,从而降低了萃取率。综合考虑,选择 40 ℃为较佳萃取温度。

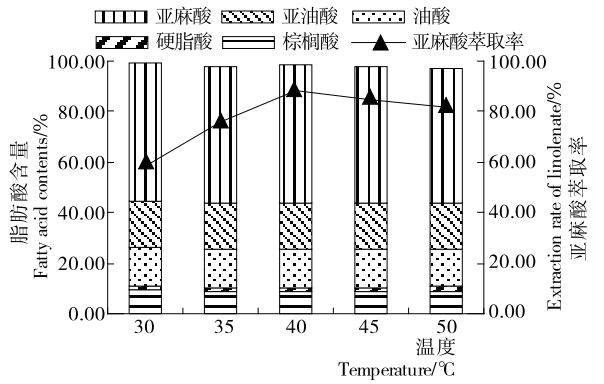

图 2　萃取温度对紫苏籽油脂肪酸组成和亚麻酸萃取率的影响

Figure 2　Influence of extraction temperature on the fatty acid composition and the linolenate extraction rate of perilla seed oil

2.3.3　萃取时间的影响　由图 3 可知,随着萃取时间的增加,棕榈酸和硬脂酸、油酸的含量逐渐下降,亚油酸含量呈略先降后升的变化,亚麻酸含量逐渐增加,其增加幅度呈逐渐减缓趋势,在时间达到 2.0 h 后,基本不再增加;随着萃取时间的增加,亚麻酸的萃取率逐渐增加,其萃取率增加幅度呈渐缓趋势,萃取时间达到 1.5 h 后,增加不明显,至 2.5 h 后略有下降。这可能是:萃取时间延长,有利于油脂充分溶解到 CO_2 中,使萃取更完全,当萃取时间达到一定量时,溶解渐趋稳定,时间继续增加,其他长链脂肪酸等成分被萃取出,使紫苏籽油得率超过亚麻酸得率,导致亚麻酸萃取率略有下降。综合时间与能耗因素,选择 1.5 h 为较佳萃取时间。

2.3.4　CO_2 流量的影响　由图 4 可知,随着 CO_2 流量的加大,紫苏籽油棕榈酸、硬脂酸、油酸、亚油酸含量都是先降后升,亚麻酸含量与亚麻酸萃取率都是先升后降,其中棕榈酸、油酸、亚油酸的含量变化拐点为 20 L/h,硬脂酸、亚麻酸含量的变化及亚麻酸萃取率的变化拐点为 15 L/h。这可能是:CO_2 流量增加,油脂在 CO_2 中的扩散速度随之增加,较快地达到溶解度平衡,从而提高萃取能力,对溶解度相对低的长

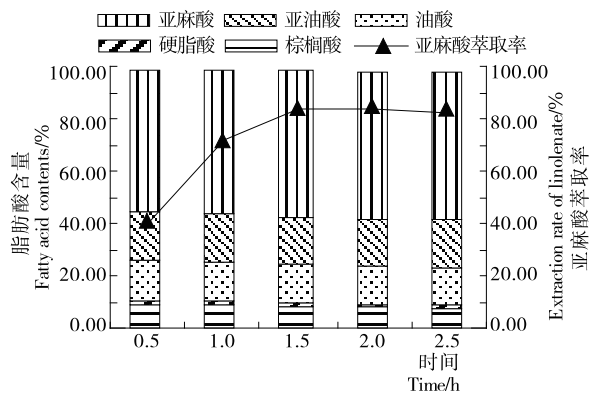

图 3　萃取时间对紫苏籽油脂肪酸组成和亚麻酸萃取率的影响

Figure 3　Influence of extraction time on the fatty acid composition and the linolenate extraction rate of perilla seed oil

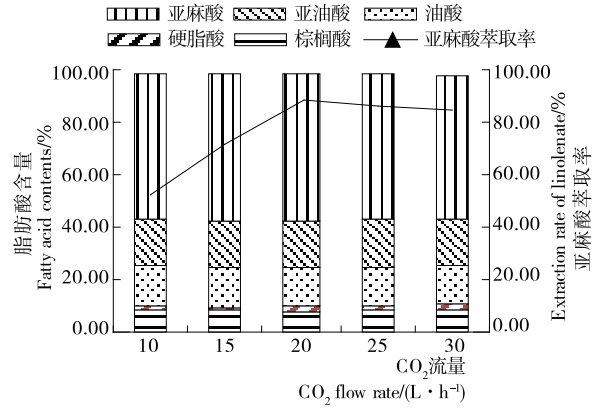

图 4 CO_2 流量对紫苏籽油脂肪酸组成和亚麻酸萃取率的影响

Figure 4 Influence of CO_2 flow on the fatty acid composition and the linolenate extraction rate of perilla seed oil

链脂肪酸和多不饱和脂肪酸的影响要更强。综合考虑,选择 20 L/h 为较佳 CO_2 流量。

2.4 正交试验结果

根据单因素试验结果,设计正交试验因素与水平见表 2。

表 2 正交试验因子水平表

Table 2 Factors and levels of the ultrasonic assisted orthogonal test table

水平	A 萃取压力/MPa	B 萃取温度/℃	C 萃取时间/min	D CO_2 流量/(L·h^{-1})
1	20	35	1.0	15
2	25	40	1.5	20
3	30	45	2.0	25

正交设计方案及结果见表 3。

表 3 正交试验设计方案与结果

Table 3 Designs and results of orthogonal test

试验号	A	B	C	D	亚麻酸萃取率/%
1	1	1	1	1	72.02
2	1	2	2	2	79.55
3	1	3	3	3	74.98
4	2	1	2	3	80.07
5	2	2	3	1	87.59
6	2	3	1	2	81.37
7	3	1	3	2	78.91
8	3	2	1	3	84.34
9	3	3	2	1	78.72
k_1	75.517	77.000	79.243	79.443	
k_2	83.010	83.827	79.447	79.943	
k_3	80.657	78.357	80.493	79.797	
R	7.493	6.827	1.250	0.500	

由表 3 可知,影响亚麻酸萃取率的因素主次顺序为:A>B>C>D,其最佳工艺为:$A_2B_2C_3D_2$,即萃取压力 25 MPa、萃取温度 40 ℃、萃取时间 2.0 h、CO_2 流量 20 L/h。按该条件进行 3 次验证实验,得亚麻酸萃取率为(88.09±2.07)%,相对于 9 组试验结果均处于较高水平,故可认为 $A_2B_2C_3D_2$ 为最佳萃取工艺条件。

2.5 紫苏籽油的品质分析

对本试验所得最优工艺条件下紫苏籽油的品质分析结果与 GB 2716—2005 规定对比见表 4。

由表 4 可知,本试验所得的紫苏籽油各项指标均达到食用植物油的指标要求。

表 4 紫苏籽油的品质分析结果

Table 4 Analysis of perilla seed oil quality

项目(指标)		紫苏籽油	GB 2716—2005 标准	
			植物原油	食用植物油
色泽		淡黄色	产品正常色泽	产品正常色泽
透明度		澄清透明	产品正常透明度	产品正常透明度
气味、滋味		紫苏籽油固有的气味和滋味,无异味	产品正常气味和滋味,无焦臭、酸败及其他异味	产品正常气味和滋味,无焦臭、酸败及其他异味
酸价(KOH)/(mg·g^{-1})		2.8	≤4	≤3
过氧化值/(10^{-2}g·g^{-1})		0.021	≤0.25	≤0.25
浸出油溶剂残留/(mg·kg^{-1})		未检出	≤100	≤50
总砷(以 As 计)/(mg·kg^{-1})		0.039	≤0.1	≤0.1
铅(Pb)/(mg·kg^{-1})		0.03	≤0.1	≤0.1
黄曲霉毒素 B_1/(μg·kg^{-1})		0.007 4	≤10	≤10
苯并(a)芘/(μg·kg^{-1})		未检出	≤10	≤10
农药残留(按 GB 2763)	乐果/(mg·kg^{-1})	未检出	≤0.05	
	敌草快/(mg·kg^{-1})	未检出	≤0.05	
	倍硫磷/(mg·kg^{-1})	未检出	≤0.01	
	毗氟甲禾灵/(mg·kg^{-1})	未检出	≤1	
	腐霉利/(mg·kg^{-1})	未检出	≤0.5	

3　结论

(1) 超临界 CO_2 萃取紫苏籽油中棕榈酸、硬脂酸含量与萃取压力和萃取时间负相关,因萃取温度与 CO_2 流量的变化趋势是先降后升;油酸、亚油酸含量随萃取压力、萃取温度的变化不大,因 CO_2 流量的变化趋势是先降后升,油酸随萃取时间的增加略有下降,亚油酸随萃取时间的增加略有先降后升;亚麻酸含量与萃取压力和时间正相关,因萃取温度与 CO_2 流量的变化趋势是先升后降。

(2) 超临界 CO_2 萃取紫苏籽油的最佳工艺条件为:萃取压力 25 MPa、萃取温度 40 ℃、萃取时间 1.5 h、CO_2 流量 20 L/h,在该工艺条件下亚麻酸萃取率为 88.09%。

(3) 超临界 CO_2 萃取的紫苏籽油无需精炼,符合中国食用植物油标准。

(4) 本试验尚未对超临界 CO_2 萃取参数对紫苏籽油中脂肪酸组成的联动关系进行分析,后续将研究其变化规律,为紫苏籽资源的高效利用提供理论基础。

参考文献

[1] 中华人民共和国药典编写委员会. 中华人民共和国药典[S]. 北京:人民卫生出版社,1990:39.

[2] 张洪,黄建韶,赵东海. 紫苏营养成分的研究[J]. 食品与机械,2006,22(3):41-43.

[3] 潘兆平,付复华,谢秋涛,等. 响应面法优化紫苏籽油超临界萃取工艺[J]. 中国食品学报,2015,15(5):113-119.

[4] 王卫东,谢巍. 紫苏油的保健功能[J]. 中国食物与营养,2004(5):50-51.

[5] UMEZAWA M, OHTA A, TOJO H, et al. Dietary α-linolenate/ linoleate balance influences learning and memory in the senescence-accelerated mouse (SAM) [J]. Brain Research, 1995, 669: 225-233.

[6] 周丹,韩大庆,王永奇. 紫苏子油对小鼠学习记忆能力的影响[J]. 中草药,1994,25(5):251-252.

[7] 韩大庆,周丹,王永奇. 紫苏油抗衰老作用[J]. 中国老年学杂志,1995,15(1):47.

[8] LONGVAH T, DEOSTHALE Y G, KUMAR P U. Nutritional and short term toxicological evaluation of Perilla seed oil[J]. Food Chemistry, 2000, 70(1): 13-16.

[9] TSUJI E. The effects of rice bran oil and perilla oil on serum and liver lipid levels[C]// Atherosclerosis. Paris: 11th International Symposium on Atherosclerosis, 1997: 335.

[10] 李林静,章宝,李高阳. 响应面优化超临界 CO_2 萃取花生油工艺研究[J]. 北京工商大学学报:自然科学版,2012,30(5):26-31.

[11] 马玉花,赵忠,李科友,等. 超临界 CO_2 流体萃取杏仁油工艺研究[J]. 农业工程学报,2007,23(4):272-275.

[12] KIM H K, CHOI S, CHOI H. Suppression of hepatic fatty acid synthase by feeding α-linolenic acid rich perilla oil lowers plasma triacylglycerol level in rats[J]. Journal of Nutritional Biochemistry, 2004, 15(8): 485-492.

[13] KIM H K, CHOI H. Stimulation of acyl-CoA oxidase by α-linolenic acid-rich perilla oil lowers plasma triacylglycerol level in rats[J]. Life Sciences, 2005, 77(12): 1 293-1 306.

[14] 韩舜愈,宋雪梅,祝霞,等. 超临界 CO_2 萃取燕麦麸油及其脂肪酸分析[J]. 食品科学,2010,31(16):253-257.

[15] 程霜,崔庆新,冯泽静,等. 玉米胚芽油的超临界 CO_2 萃取[J]. 中国粮油学报,2000,15(6):29-33.

[16] 赖锡湖,黄卓,李坚,等. 超临界 CO_2 萃取茶叶籽油及其成分分析[J]. 食品与机械,2011,27(2):38-40.

[17] 商学兵,李超,刘军军. 超临界 CO_2 萃取白豆蔻挥发油的工艺优化及其动力学研究[J]. 食品科学,2012,33(14):60-63.

[18] 李莉,陈爱政,王士斌,等. 超临界二氧化碳流体萃取油茶籽油及其 GC/MS 分析[J]. 广州化工,2011,39(11):49-52.

[19] 国家粮食局. GB/T 17376—2008 动植物油脂 脂肪酸甲酯制备[S]. 北京:中国标准出版社,2009.

[20] MANNINEN P, PAKARINEN J, KALLIO H. Large-scale supercritical carbon dioxide extraction and supercritical carbon dioxide countercurrent extraction of cloudberry seed oil[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1997, 55(1): 191-205.

[21] 刘光敏,徐响,高彦祥. 超临界 CO_2 萃取草莓籽油工艺研究及其对脂肪酸组成的影响[J]. 中国粮油学报,2009,24(3):84-88.

(上接第 105 页)

[2] 吴伟,李彤,蔡勇建,等. 三种稻米在贮藏过程中蒸煮特性变化的比较[J]. 食品与机械,2014,30(3):122-126.

[3] ZHOU Zhong-kai, CHRIS B, STUART H, et al. Fatty acid composition of three rice varieties following storage[J]. Journal of Cereal Science, 2003(37): 327-335.

[4] ZHONG Ye-jun, TU Zong-cai, LIU Cheng-mei, et al. Effect of microwave irradiation on composition, structure and properties of rice (Oryza sativa L.) with different milling degrees[J]. Journal of Cereal Science, 2013(58): 228-233.

[5] 孙术国,杨涛,林亲录,等. 加工方式对稻米抗氧化性的影响[J]. 食品与机械,2014,30(6):132-134,254.

[6] 陈玮. 大米气调储藏过程中脂质的变化研究[D]. 天津:天津科技大学,2007.

[7] 高山,张瑛,宋美,等. 水稻脂肪氧化酶研究进展[J]. 安徽农业科学,2005,33(1):126-127,141.

[8] 谢宏. 稻米储藏陈化作用机理及调控的研究[D]. 沈阳:沈阳农业大学,2007:5-6.

[9] 张瑛,吴跃进,卢义宣,等. 脂肪氧化酶同工酶缺失对水稻耐储藏特性的影响[J]. 安徽农业科学,2003,31(6):911-913.

[10] WU Jian-yong, CHEN Jun, LIU Wei, et al. Selective peroxidase inactivation of lightly milled rice by superheated steam[J]. Journal of Cereal Science, 2014, 60(3): 623-630.

[11] YIN Guang-kun, XIN Xia, SONG Chao, et al. Activity levels and expression of antioxidant enzymes in the ascorbate-glutathione cycle in artificially aged rice seed[J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2014, 80: 1-9.

[12] YIN Li-na, WANG Shi-wen, ELTAYEB A E, et al. Overexpression of dehydroascorbate reductase, but not monodehydroascorbate reductase, confers tolerance to aluminum stress in transgenic tobacco[J]. Planta, 2010, 231(3): 609-621.

[13] 孟庆虹,严松,王少元,等. 留胚米加工专用品种筛选研究[J]. 中国稻米,2014,20(3):50-53.

[14] 振环. 留胚米的碾制及质量要求[J]. 粮食与饲料工业,2008(7):1-2.