

复合溶剂提取燕麦麸油工艺优化及其抗氧化活性物质分析

Optimization on compound solvent extraction of oat bran oil and its antioxidants analysis

袁汝玲¹ 王 韧^{1,2} 王 莉^{1,2} 罗小虎^{1,2}

YUAN Ru-ling¹ WANG Ren^{1,2} WANG Li^{1,2} LUO Xiao-hu^{1,2}

李永富^{1,2} 李亚男^{1,2} 陈正行^{1,2}

LI Yong-fu^{1,2} LI Ya-nan^{1,2} CHEN Zheng-xing^{1,2}

(1. 江南大学食品学院, 江苏 无锡 214122; 2. 江南大学粮食发酵工艺与技术国家工程实验室, 江苏 无锡 214122)

(1. The School of Food Science and Technology, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China;

2. National Engineering Laboratory for Cereal Fermentation Technology,

Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China)

摘要:为获得具有较高抗氧化活性的燕麦麸油,选用正己烷和乙醇为浸提溶剂,考察溶剂配比、液料比、提取时间和提取温度对燕麦麸油得率和抗氧化活性的影响。试验结果表明,燕麦麸油的最佳浸提工艺条件为正己烷:乙醇=1:1(V/V),液料比 8:1(V/m),提取时间 2 h,提取温度 50℃;该条件下燕麦麸油的得率为 7.08%,燕麦麸油对 DPPH 自由基清除的 IC₅₀ 值为 1.347 mg/mL,其中主要的抗氧化活性物质酚类物质、生育酚(V_E)、甾醇的含量分别为(1 297.94±4.04) mg/kg, (73.15±2.76) mg/kg 和 (516.20±5.69) mg/100 g;GC—MS 结果显示燕麦麸油主要含有棕榈酸、油酸、亚油酸等 8 种脂肪酸,其中不饱和脂肪酸占总脂肪酸的 79.35%,多不饱和脂肪酸(主要是亚油酸)占 34.87%。

关键词:燕麦;麸油;抗氧化活性;脂肪酸

Abstract:In order to obtain higher antioxidant activities of oat bran oil, used n-hexane and ethanol as extraction solvent were selected as the extracting solvents. The effects of volume ratio of n-hexane to ethanol, mass ratio of extraction solvent to oat bran, extraction time and temperature on the yield and the antioxidant activities of oat bran oil were investigated. The result showed that the optimum extraction conditions of oat bran oil were volume ratio of n-hexane to ethanol 1:1, the liquid-solid 8:1 (V/m), extraction time 2 h, extraction temperature 50℃; In this condition, the yield and the IC₅₀ of DPPH radical scavenging of oat bran oil were 7.08% and 1.347 mg/mL, respectively. The content of phenolic compounds, Tocopherols(V_E), and sterols in oat bran oil were (1 297.94±4.04) mg/kg, (73.15±

2.76) mg/kg and (516.20±5.69) mg/100 g, respectively. Finally, oat bran oil was analysed by GC—MS and the results showed that there were 8 fatty acids, including palmitic acid, oleic acid and linoleic acid. Unsaturated fatty acid in total fatty acid was 79.35%, and polyunsaturated fatty (the main component was linoleic acid) acid was 34.87%.

Keywords: oat; bran oil; antioxidant activity; fatty acid

燕麦(*Avena sativa* L)分为裸粒型裸燕麦和带稃型皮燕麦两大类,是禾谷类作物之一,具有较高的营养价值。燕麦又有“油麦”之称,其脂质含量居谷类作物之首,一般为 2%~12%^[1],且 90% 以上分布在麸皮和胚乳中^[2]。燕麦油含有优质脂肪酸,棕榈酸、油酸和亚油酸占总脂肪酸含量的 95% 以上^[3]。同时燕麦中还含有丰富的 V_E、植酸、酚类、燕麦蒽酰胺、甾醇等抗氧化活性物质^[4],具有抑制低密度蛋白氧化、促进活性氧清除等功能^[5]。燕麦油因其所具有的独特理化功能特性,在食品、高级化妆品、药物中显示出巨大的应用潜力。

谷物的麸皮中富含活性多糖、酚类化合物、维生素 E 等多种生理活性物质,对人体的健康发挥着重要的作用^[6]。燕麦的加工过程中产生了大量燕麦麸皮(富集了 70% 以上的燕麦营养素^[7]),在中国目前主要被用作饲料,造成了优质营养资源的严重浪费。以燕麦麸皮为原料提取具有独特理化功能的燕麦麸油,可以大大提高燕麦的附加值。

从燕麦中提取燕麦油最常见的方法为超临界 CO₂ 萃取法和溶剂浸提法,超临界 CO₂ 萃取法萃取效率高,方法简单,但设备昂贵;溶剂浸提法缺乏高效萃取燕麦脂质的溶剂体系。目前,以乙醇和己烷为主体的烃—醇型复合溶剂已被油脂工业界广泛采用,与单一溶剂相比,复合溶剂的协同作用

基金项目:公益性行业(农业)科研专项经费项目(编号:201303069)

作者简介:袁汝玲,女,江南大学在读硕士研究生。

通讯作者:陈正行(1960—),江南大学教授,博士。

E-mail:zxchen_2008@126.com

收稿日期:2015-12-11

可有效提高脂质的浸出率^[8-9]。本试验旨在研究正己烷/乙醇复合溶剂对燕麦麸油的得率及其抗氧化活性的影响,并通过对其主要抗氧化活性成分的分析,解释其抗氧化活性提高的机理,为高抗氧化活性燕麦麸油的制备提供指导和借鉴。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

燕麦麸皮:燕麦(坝蓓 3 号)选自山西朔州,经布勒 MLU-202 型实验磨粉机处理后得到试验用燕麦麸皮原料(化学成分组成见表 1);

1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl,DPPH);美国 Sigma-Aldrich 公司;

乙醚、正己烷、乙醇、甲醇:分析纯,国药集团化学试剂有限公司;

福林酚试剂:生化试剂,国药集团化学试剂有限公司。

表 1 燕麦麸皮的化学成分组成

Table 1 Chemical constituents of oat bran %				
蛋白质	脂肪	淀粉	灰分	水分
16.47	8.53	46.90	2.61	11.24

1.2 仪器与设备

离心机:LXJ-IIB 型,上海安亭科学仪器厂;
旋转蒸发仪:RV10 型,德国 IKA 有限公司;
电显电热恒温水浴锅:HH-6 型,江苏省金坛市荣华仪器制造有限公司;

分光光度计:UV1102 型,无锡市科达智能仪器厂;
高效液相色谱仪:Agilent 高效液相色谱仪 1260 系列,带紫外检测器(VWD),美国 Agilent 科技有限公司;
岛津气相色谱仪:GC-2010 型,日本岛津公司;
气相色谱—质谱联用仪:Scion SQ 456 型,美国 BRUK-ER 公司。

1.3 试验方法

1.3.1 燕麦麸油提取 称取 50 g 燕麦麸皮(40 目),放入烧杯中,加入提取溶剂浸提,一段时间后,在 4 000 r/min 的条件下离心 30 min,取上清液,40 ℃ 真空旋转蒸发除去溶剂,即得到燕麦麸油。

1.3.2 单因素试验

(1) 溶剂比对得率和 IC_{50} 值的影响:固定提取温度 40 ℃,提取时间 2 h,液料比 4:1(V/m)。考察溶剂配比(正己烷:乙醇=1:0,正己烷:乙醇=4:1,正己烷:乙醇=1:1,正己烷:乙醇=1:4,正己烷:乙醇=0:1)对得率和 IC_{50} 值的影响。

(2) 提取温度对得率和 IC_{50} 值的影响:固定溶剂为正己烷:乙醇(1:1),提取时间 1 h,液料比 4:1(V/m)。考察提取温度(20,30,40,50 ℃)对得率和 IC_{50} 值的影响。

(3) 液料比对得率和 IC_{50} 值的影响:固定在溶剂为正己烷:乙醇(1:1),提取时间 1 h,提取温度 40 ℃。考察液料比(2:1,4:1,6:1,8:1,10:1,V/m)对得率和 IC_{50} 值的影响。

(4) 提取时间对得率和 IC_{50} 值的影响:固定溶剂为正己烷:乙醇(1:1),液料比 8:1(V/m),提取温度 40 ℃的条件下,考察提取时间(0.5,1.0,2.0,3.0,4.0 h)对提取效果的影响。

1.3.3 正交试验 在单因素试验的基础上,以溶剂配比、液料比、提取时间和提取温度为试验因素,采用 $L_9(3^4)$ 正交表进行正交试验设计。

1.4 分析方法

1.4.1 燕麦麸油得率 根据式(1)计算:

$$Y = \frac{m_2 - m_1}{m_0} \times 100\%, \tag{1}$$

式中:
Y——燕麦麸油得率,%;
 m_2 ——空瓶和粗油质量,g;
 m_1 ——空瓶质量,g;
 m_0 ——燕麦麸皮粉末质量,g。

1.4.2 燕麦麸油 DPPH 清除能力的测定 根据文献[10],修改如下:采用体积比为 1:1 的正己烷与乙醇混合溶剂溶解燕麦麸油,将质量浓度为 5 mg/mL 的燕麦麸油溶液稀释成 5 个不同浓度梯度(2.5,2.0,1.0,0.5,0.25 mg/mL),作为待测样品溶液。利用系列溶液的清除率绘制曲线,由曲线读取 DPPH 自由基清除率为 50% 时所需燕麦麸油溶液浓度为 IC_{50} ,以 IC_{50} 值表示燕麦油清除 DPPH 自由基能力, IC_{50} 值越小,表示清除能力越强。

1.4.3 多酚含量的测定

(1) 多酚提取:称取 0.2 g 油样,加入 80% 甲醇 0.6 mL,涡旋混合 4 min,3 000 r/min 离心 10 min,重复 3 次合并上清,氮气吹干,加入 50% 乙醇 1 mL 复溶,待测^[11]。

(2) 多酚含量测定:采用福林酚试剂法。取 0.5 mL 多酚待测液置于 50 mL 容量瓶中,加入 30 mL 水,再分别加入 1 mL 福林酚试剂和 3 mL $NaCO_3$ (1 mol/L),定容,室温避光 2 h,765 nm 测吸光度。

1.4.4 生育酚含量的测定 按 NY/T 1598—2008 中 HPLC 法执行。色谱条件:流动相为甲醇+水(98:2,V/V);柱温 30 ℃;色谱柱 Agilent ZORBAX SB-C₁₈ (150 mm×4.6 mm,5 μm);流速 1 mL/min;进样量 20 μL;紫外检测波长 300 nm。

1.4.5 甾醇含量的测定

(1) 样品前处理:称取样品 2 g,加入 1 mol/L 氢氧化钾—乙醇皂化处理,乙醚多次提取不皂化物,定容至 100 mL,取 5 mL 吹干。加入 250 μL 吡啶和 250 μL BSTFA+TMCS (99:1)硅烷化处理^[12]。

(2) 色谱条件:色谱柱 SE-54 (30 m×0.32 mm×0.25 μm);柱温 265 ℃;载气 He;进样口温度 280 ℃;检测温度 290 ℃;分离比 20:1/10:1。

1.4.6 燕麦麸油的脂肪酸分析

(1) 甲酯化:称取 200 mg 油样,加入 0.5 mol/L NaOH—CH₃OH 溶液 2 mL,混匀后,65 ℃ 水浴加热至油珠完全溶解。冷却后,加入 25% 的 BF₃—CH₃OH 溶液 2 mL,

65 ℃酯化 20 min,冷却后加入 2 mL 正己烷,摇匀,加入 2 mL 饱和 NaCl 溶液振摇,离心取上层有机相,加入少量无水 NaSO₄ 除去微量的水^[13]。

(2) 色谱条件:FID 检测器;DB-WAX 型毛细管色谱柱;进样口温度 250 ℃,检测器温度 250 ℃;载气 He;柱子升温程序:初温 170 ℃,保持 15 min,以 5 ℃ 的速率升温到 240 ℃。

(3) 质谱条件:离子化模式 EI;电子能量 70 eV;传输线温度 250 ℃;离子源温度 200 ℃;分子离子碎片扫描范围为 m/z 50~550。

2 结果与分析

2.1 单因素试验

2.1.1 溶剂配比对提取效果的影响 由图 1 可知,溶剂对比对燕麦麸油得率和抗氧化活性有一定的影响,单独采用正己烷作为浸提溶剂,燕麦麸油抗氧化活性较低(IC_{50} 值最大);单独采用乙醇作为浸提溶剂,虽然燕麦麸油抗氧化活性较高(IC_{50} 值较小),但得率最小;而采用复合溶剂能有效克服上述缺陷,尤其当正己烷/乙醇配比为 1:1 时,得率和抗氧化活性均达到最高。因此,提取溶剂选用等比例的正己烷/乙醇复合溶剂。本试验结果与魏决等^[14]研究结果一致,其采用索氏抽提法提取燕麦油,研究了乙醚、丙酮、丙酮/无水乙醇、正己烷 4 种不同的溶剂对燕麦油提取效果的影响,结果表明以丙酮/无水乙醇复合溶剂浸提燕麦油时,得率较高且抗氧化能力也较强。王璐等^[15]在微藻油的提取方法中也进行了相似研究,试验结果表明正己烷/乙醇复合溶剂适合浸提湿藻泥中的油脂且油脂的品质较好。

2.1.2 提取温度对提取效果的影响 由图 2 可知,在所考察的温度范围内,温度的变化对燕麦麸油得率的影响不显著,这可能是正己烷和乙醇 1:1 混合后沸点降低,导致温度对溶剂的扩散作用影响不显著,所以得率变化不大;而当温度高于 40 ℃ 时,得率略有下降,可能是溶剂挥发造成的。蔡红燕^[16]的研究结果与本试验一致,其以正己烷为溶剂,从燕麦籽粒中提取燕麦油,在温度单因素试验中发现提取温度接近溶剂沸点时,溶剂易汽化而不易渗入燕麦细胞中,导致燕麦

油提取效率不高。随提取温度的升高,燕麦麸油的 IC_{50} 值呈现出减小的趋势,50 ℃ 时 IC_{50} 值最小,燕麦麸油的抗氧化活性最高,这可能是随温度的升高抗氧化活性物质逐渐溶出,导致 IC_{50} 值随温度的升高而减小。李巨秀等^[17]在研究温度对燕麦粉中多酚提取效果的影响试验中得出,随温度的升高可以促进有效成分浸出,与本试验结果一致。综合考虑得率和抗氧化活性,本试验提取温度选择 40 ℃。

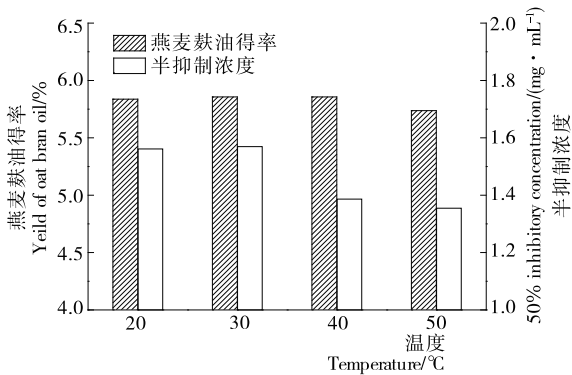


图 2 提取温度对得率及抗氧化活性(IC_{50})的影响

Figure 2 Effect of temperature on yield and antioxidant activity (IC_{50})

2.1.3 液料比对提取效果的影响 由图 3 可知,随着液料比的增加,燕麦麸油的得率也不断增大,在液料比达到 8:1 (V/m) 时,得率最高,抗氧化活性也较好(IC_{50} 值相对较低)。由于液料比较小时,燕麦麸皮难以与提取溶剂充分混合,不利于燕麦麸油和抗氧化活性物质的溶出,当液料比超过 8:1 (V/m) 时,进一步增大液料比,可能容易浸出其他溶于正己烷和乙醇复合溶剂的杂质,使 IC_{50} 值增大,抗氧化活性降低,得率略微下降。本试验结果与郭守军等^[18]采用石油醚提取乌榄种仁油的研究结果一致,其试验结果表明,当料液比大于 1:16 (m/V) 时,乌榄种仁的出油率略有降低。综合考虑得率和抗氧化活性,提取液料比选择 8:1 (V/m)。

2.1.4 时间对提取效果的影响 由图 4 可知,燕麦麸油的得率随时间的延长而增大,2 h 后得率的增加逐渐趋于平缓,此时燕麦麸油的抗氧化活性最好(IC_{50} 值最小)。由于刚开始

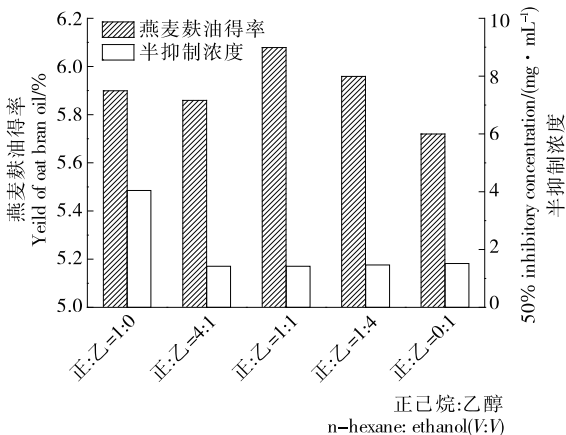


图 1 溶剂对比对得率及抗氧化活性(IC_{50})的影响

Figure 1 Effect of solvent on yield and antioxidant activity (IC_{50})

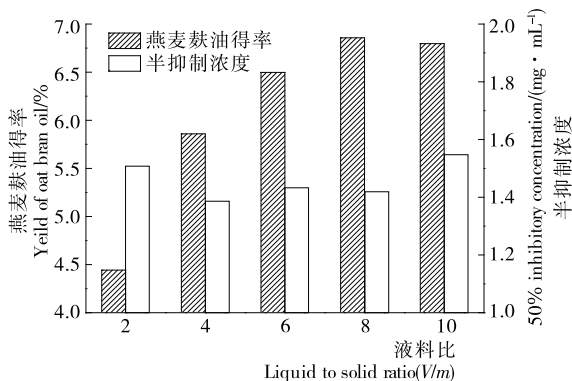


图 3 液料比对得率及抗氧化活性(IC_{50})的影响

Figure 3 Effect of liquid to solid ratio on yield and antioxidant activity (IC_{50})

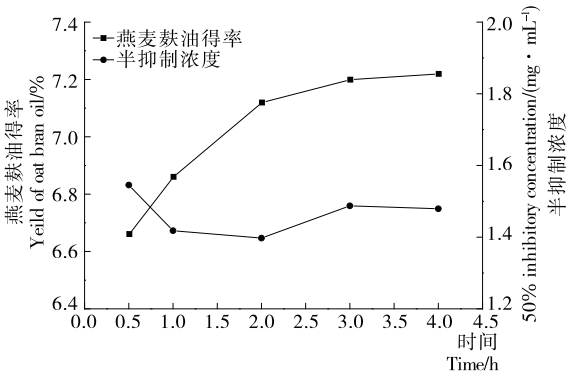


图 4 时间对得率及抗氧化活性(IC_{50})的影响
Figure 4 Effect of time on yield and antioxidant activity (IC_{50})

随着时间延长,溶出物逐渐增多,得率增大, IC_{50} 值减小,随着时间继续延长,溶剂体系的渗透到达平衡,得率变化不大,然而杂质物质可能会相应地增加, IC_{50} 值增大,抗氧化活性降低。综合考虑得率和抗氧化活性,提取时间选择 2 h。

2.2 正交试验

在单因素的基础上,为了全面讨论试验的影响因素,设计了四因素三水平 $L_9(3^4)$ 的正交试验,因素水平见表 2,正交试验结果见表 3。

表 2 正交试验因素水平表

Table 2 Factor level of orthogonal test

水平	A 溶剂配比 (V/V)	B 液料比 (V/m)	C 提取时 间/h	D 提取温 度/℃
1	4 : 1	4 : 1	1	30
2	1 : 1	6 : 1	2	40
3	1 : 4	8 : 1	3	50

由表 3 可知,各因素对燕麦麸油得率影响的大小顺序是: $B>A>C>D$,即液料比对得率的影响最大,其次为溶剂配比和提取时间,提取温度的影响最小。由此得出最佳条件组合: $A_2B_3C_3D_3$,即溶剂配比为正己烷:乙醇=1:1(V/V),液料比 8:1(V/m),时间 3 h,温度 50℃;各因素对燕麦麸油抗氧化影响的大小顺序是: $A>D>B>C$,即溶剂比对得率的影响最大,其次为提取温度和提取液料比,提取时间的影响最小。由此得出最佳条件组合: $A_2B_3C_2D_3$,即溶剂配比为正己烷:乙醇=1:1(V/V),液料比 8:1(V/m),时间 2 h,温度 50℃。与方案 $A_2B_3C_3D_3$ 对比,2 h 后燕麦麸油得率增加缓慢,综合考虑燕麦麸油的得率和抗氧化活性,燕麦麸油最佳提取工艺条件选用 $A_2B_3C_2D_3$,即溶剂配比为正己烷:乙醇=1:1(V/V),液料比 8:1(V/m),时间 2 h,温度 50℃。对最佳工艺验证条件进行验证,燕麦麸油的得率为 7.08%, IC_{50} 值为 1.347 mg/mL。

2.3 抗氧化活性物质分析

由表 4 可知,燕麦麸油中总酚含量为 $(1\,297.94 \pm 4.04)$ mg/kg,生育酚总含量为 (73.15 ± 2.76) mg/kg,其中主要为 α -生育酚和 γ -生育酚;甾醇总含量为 $(516.20 \pm$

5.69) mg/100 g,其中主要为 β -谷甾醇、豆甾醇和菜油甾醇,还检测出有少量的胆甾醇。蔡红燕^[19]用正己烷从燕麦籽粒中提取的燕麦油得出生育酚(V_E)总含量为 142.8 mg/kg。Tong Li-tao 等^[20]采用超临界 CO_2 从燕麦籽粒萃取的燕麦油中生育酚总含量为 383 mg/kg、甾醇总含量为 1 263 mg/100 g。本试验得出生育酚和甾醇的总含量较文献[19—20]的低,可能是燕麦品种不同造成的。但是本试验提取的燕麦麸油中含有大量的酚类物质,显著增强了燕麦麸油的抗氧化活性。已有研究^[4, 21]表明,燕麦中酚类物质在体内体外均具有较高的抗氧化活性。Cheryld L. Emmons 等^[22]研究表明,燕麦中主要的酚酸物质为阿魏酸、*p*-香豆酸、咖啡酸、香草酸、对羟基苯甲酸及其衍生物。

2.4 燕麦麸油脂肪酸组成定性和定量分析

由图 5 可知,燕麦麸油主要有 8 种脂肪酸。由表 5 可知,其主要的脂肪酸是棕榈酸、油酸、亚油酸,不饱和脂肪酸占 79.35%,多不饱和脂肪酸主要是亚油酸,占总脂肪酸的

表 3 正交试验设计与结果

Table 3 The design and results of orthogonal test

试验号	A	B	C	D	得率/ %	IC_{50} / (mg · mL ⁻¹)
1	1	1	1	1	5.68	1.653
2	1	2	2	2	6.32	1.572
3	1	3	3	3	6.72	1.505
4	2	1	2	3	5.90	1.351
5	2	2	3	1	6.68	1.466
6	2	3	1	2	6.86	1.325
7	3	1	3	2	5.88	1.447
8	3	2	1	3	6.52	1.342
9	3	3	2	1	6.40	1.386
得率	k_1	6.240	5.820	6.350	6.250	优组合: $A_2B_3C_3D_3$
	k_2	6.480	6.510	6.210	6.350	
	k_3	6.270	6.660	6.430	6.380	
	R	0.240	0.840	0.220	0.130	
IC_{50}	k_1	1.577	1.484	1.440	1.502	优组合: $A_2B_3C_2D_3$
	k_2	1.381	1.460	1.436	1.448	
	k_3	1.392	1.405	1.473	1.399	
	R	0.196	0.078	0.036	0.102	

表 4 燕麦麸油中主要抗氧化活性物质[†]

Table 4 The main antioxidants in oat bran oil

活性物质	含量/(mg · kg ⁻¹)	活性物质	含量/(10 ⁻² mg · g ⁻¹)
总酚	1 297.94±4.04	胆甾醇	16.15±1.31
α -生育酚	39.55±1.06	菜油甾醇	35.58±1.54
β -生育酚	—	豆甾醇	78.21±1.63
γ -生育酚	33.60±1.70	β -谷甾醇	386.25±7.56
δ -生育酚	—		

[†] “—”表示未检出;生育酚总量(73.15±2.76) mg/kg;甾醇总含量(516.20±5.69) mg/100 g。

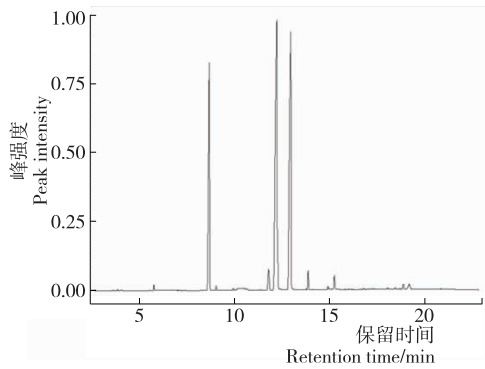


图 5 燕麦麸油脂肪酸分析 GC—MS 图谱
Figure 5 GC—MS chromatogram of oat bran oil for fatty acid analysis

表 5 燕麦麸油脂肪酸组成及相对含量
Table 5 Fatty acid compositions and relative contents of oat bran oil

脂肪酸名称	保留时间/min	相对含量/%
肉豆蔻酸	5.779	0.25±0.04
棕榈酸	8.689	17.01±0.24
棕榈油酸	9.044	0.19±0.01
硬脂酸	11.799	1.64±0.33
油酸	12.233	44.29±0.62
亚油酸	12.965	33.79±0.14
亚麻酸	13.877	0.93±0.12
花生酸	14.920	0.15±0.02
饱和脂肪酸		18.90±0.54
单不饱和脂肪酸		44.48±0.61
多不饱和脂肪酸		34.87±0.01

34.87%，高含量的亚油酸可为人类及哺乳动物提供丰富的必需脂肪酸。除上述 3 种主要脂肪酸外,燕麦麸油的脂肪酸组成中还含有少量的硬脂酸、亚麻酸、肉豆蔻酸、花生酸。李林等^[23]研究了以正己烷、甲醇为溶剂,以及不添加与添加乙醇为夹带剂的超临界 CO₂萃取燕麦油,分析其脂肪酸组成及含量。气相色谱分析结果显示,脂肪酸组成与本试验结果一致,但不同方法提取的不饱和脂肪酸相对含量略有差异,分别为 77.56%,76.51%,79.41%,77.86%。

3 结论

经过以上试验,可知采用正己烷:乙醇(1:1)复合溶剂提取燕麦麸油,不仅可以提高燕麦麸油的得率,也增强了燕麦麸油的抗氧化活性。本试验系统地探究了燕麦麸油中抗氧化活性物质(酚类物质、生育酚、甾醇)的组成及含量,对燕麦油的抗氧化性提供了理论分析,而已有研究仅仅停留在燕麦油体外抗氧化性的试验上。本试验 GC—MS 结果显示燕麦麸油中不饱和脂肪酸占总脂肪酸的 79.35%,单不饱和脂肪酸与多不饱和脂肪酸比例约为 1.2:1.0。因此,后续研究可以将燕麦麸油作为化妆品原料,可起到清除自由基抗衰老、吸收紫外线防晒等用途,而且燕麦麸油中丰富的不饱和

脂肪酸,对皮肤的渗透性好,可以软化和增加皮肤的弹性,使皮肤柔软光滑。

参考文献

[1] Aro H, J Rvenp E, K Nk KS, et al. The characterisation of oat lipids produced by supercritical fluid technologies[J]. Journal of Cereal Science, 2007, 45(1): 116-119.

[2] White D A, Fisk I D, Gray D A. Characterisation of oat (Avena sativa L.) oil bodies and intrinsically associated E-vitamins[J]. Journal of Cereal Science, 2006, 43(2): 244-249.

[3] Zhou Mei-Xue, Glennie Holmes M, Robards K, et al. Fatty acid composition of lipids of Australian oats[J]. Journal of Cereal Science, 1998, 28(3): 311-319.

[4] Ryan D, Kendall M, Robards K. Bioactivity of oats as it relates to cardiovascular disease[J]. Nutrition research reviews, 2007, 20(2): 147-162.

[5] Chen Chung-Yen, Milbury P E, Kwak H K, et al. Avenanthramides and phenolic acids from oats are bioavailable and act synergistically with vitamin C to enhance hamster and human LDL resistance to oxidation [J]. The Journal of nutrition, 2004, 134(6): 1 459-1 466.

[6] 杜振亚, 陈复生, 布冠好. 小麦麸皮及其保健功能研究进展[J]. 食品与机械, 2015, 31(1): 253-256.

[7] 章海燕, 张晖, 王立, 等. 燕麦研究进展[J]. 粮食与油脂, 2009 (8): 7-9.

[8] 梁华. 菜籽冷榨饼油脂萃取混合溶剂的筛选及制油工艺初探 [D]. 武汉: 华中农业大学, 2008: 6-7.

[9] 李昌. 新型油脂浸出溶剂的筛选[D]. 无锡: 江南大学, 2009: 3-4.

[10] 时东方, 赵骥民, 任长忠, 等. 燕麦中油脂类成分的提取分离及抗氧化活性研究[J]. 广东农业科学, 2009(11): 14-18.

[11] Bail S, Stuebiger G, Krist S, et al. Characterisation of various grape seed oils by volatile compounds, triacylglycerol composition, total phenols and antioxidant capacity[J]. Food Chem. , 2008, 108(3): 1 122-1 132.

[12] Martins P F, De Melo M M R, Sarmiento P, et al. Supercritical fluid extraction of sterols from Eichhornia crassipes biomass using pure and modified carbon dioxide. Enhancement of stigmasterol yield and extract concentration[J]. The Journal of Supercritical Fluids, 2016, 107: 441-449.

[13] Kivini H, Jarvenpaa E P, Aro H, et al. Qualitative and quantitative liquid chromatographic analysis methods for the determination of the effects of feed supplements on hen egg yolk phospholipids[J]. J. Agr. Food Chem. , 2004, 52(13): 4 289-4 295.

[14] 魏决, 郭玉蓉, 金小培. 不同溶剂提取燕麦油脂的抗氧化活性研究[J]. 食品科技, 2008, 33(12): 148-150.

[15] 王璐, 樊星, 张东梅, 等. 微藻食用油脂浸提溶剂的选择与分析[J]. 过程工程学报, 2014, 14(2): 319-323.

[16] 蔡红燕. 燕麦油的提取, 抗氧化活性及应用研究[D]. 武汉: 武汉工业学院, 2012: 22-23.

[17] 李巨秀, 李利霞, 曾王旻, 等. 燕麦多酚化合物提取工艺及抗氧化活性的研究[J]. 中国食品学报, 2010(5): 14-21.

(下转第 164 页)

[2] Guan Wen-qiang, Li Shu-fen, Yan Rui-xiang, et al. Comparison of composition and antifungal activity of *Artemisia argyi* Lévl. et Vant inflorescence essential oil extracted by hydrodistillation and supercritical carbon dioxide[J]. Natural Product Research: Formerly Natural Product Letters, 2006, 20(11): 992-998.

[3] Hageman R H, Waygood E R. Methods for the extraction of enzymes from cereal leaves with especial reference to the triosephosphate dehydrogenases[J]. Plant Physiology, 1959, 34(4): 396-400.

[4] 张春红, 许宁, 杨悦, 等. 微波辅助法提取野生软枣猕猴桃茎黄酮的工艺优化[J]. 食品工业科技, 2011, 32(12): 335-337.

[5] Delazar A, Nahar L, Hamedeyazdan S, et al. Microwave-assisted extraction in natural products isolation[J]. Methods in Molecular Biology, 2012, 864: 89-115.

[6] Afoakwah A N, Owusu J, Adomako C, et al. Microwave assisted extraction (MAE) of antioxidant constituents in plant materials [J]. Global Journal of Bio-Science & Biotechnology, 2012, 1(2): 132-140.

[7] Viorica L A, Richard Y, Werner F B. Microwave-assisted extraction of organic compounds from standard reference soils and sediments [J]. Analytical Chemistry, 1994, 66(7): 1 097-1 106.

[8] 汪志慧, 孙智达, 谢笔钧. 响应曲面法优化双酶法提取莲房原花青素[J]. 食品科学, 2011, 32(4): 64-68.

[9] 周小楠, 董群. 正交试验优化酶法提取金银花多糖工艺[J]. 食品科学, 2012, 33(22): 119-121.

[10] Nanna R K, Marcel T A, Anne S M. Seaweed Hydrocolloid Production: An Update on enzyme assisted extraction and modification technologies[J]. Marine Drugs, 2015, 13(5): 3 340-3 359.

[11] Zuorro A, Lavecchia R. Mild enzymatic method for the extraction of lycopene from tomato paste[J]. Biotechnology & Biotechnological Equipment, 2010, 24(2): 1 854-1 857.

[12] 蔡延渠, 朱盛山, 李润泽. 新型提取联用技术在中药提取中的应用进展[J]. 中成药, 2011, 33(5): 863-866.

[13] 揭广川, 陈红杰, 李必金. 微波辅助复合酶法提取草菇中的风味物质[J]. 食品与机械, 2015, 31(1): 164-166.

[14] 陈健, 欧阳玥, 闫静. 磷酸盐缓冲溶液对邻二氮菲—Fe²⁺氧化法测定羟基自由基的影响[J]. 分子科学学报, 2012, 28(4): 350-352.

[15] 孙玉亮, 池建淮, 万毅. 艾叶挥发油提取工艺的研究进展[J]. 淮海医药, 2012, 30(4): 374-375.

[16] 洪宗国, 魏海胜, 张令令, 等. 不同采集期艾叶挥发油含量和化学成分的研究[J]. 中南民族大学学报: 自然科学版, 2013, 32(2): 32-35.

[17] 童红, 唐军, 张正方. 响应面法优化微波辅助水蒸气提取薰衣草挥发油的工艺研究[J]. 中国调味品, 2013, 38(10): 61-65.

[18] 李灵凤, 翟新, 金光远, 等. 真空微波破裂植物细胞壁的力学模型[J]. 食品与机械, 2014, 30(6): 18-22.

[19] 席彩彩, 张文芳, 侯明月, 等. 微波技术在植物胞内有效成分提取中的应用[J]. 中国药业, 2014, 23(3): 94-96.

[20] 孟利娜, 于敏, 许静. 酶法辅助提取北苍术挥发油的工艺及成分分析[J]. 中成药, 2013, 35(4): 844-847.

[21] Yu Xian-chun, Sun De-lin, Li Xiang-su. Preparation of furfural through the hydrolysis of rice hull using a combined biological and chemical approach[J]. Asian Journal of Chemistry, 2012, 24(4): 1 743-1 746.

(上接第 68 页)

[9] Zhu Wei-xia, Yang Ji-zhou, Liu Ya-feng, et al. Simultaneous determination of 13 aminoglycoside residues in foods of animal origin by liquid chromatography-electrospray ionization tandem mass spectrometry with two consecutive solid-phase extraction steps[J]. Journal of Chromatography A, 2008, 1 207(1/2): 29-37.

[10] 宋佩, 孟萌, Sergei A Eremin, 等. 荧光偏振免疫分析方法快速检测沙拉沙星残留[J]. 分析化学, 2012, 40(8): 1 247-1 251.

[11] 王书源, 李忠海, 付湘晋, 等. 高荧光 CdTe 量子点荧光探针测定 Cu²⁺ [J]. 食品与机械, 2015, 31(2): 125-129.

[12] 李萌立, 李忠海, 李节, 等. 量子点荧光探针技术在食源性致病菌检测中的应用[J]. 食品与机械, 2013, 29(5): 241-244.

[13] 毛永强, 李卓然, 王继仁, 等. 基于 CdTe 量子点内滤效应同步荧光猝灭法测定四环素[J]. 分析测试学报, 2015, 34(1): 96-100.

[14] Vaishnavi E, Renganathan R. CdTe quantum dot as a fluorescence probe for vitamin B₁₂ in dosage form[J]. Spectrochimica Acta Part A, 2013, 115(11): 603-609.

[15] 元晓云, 王天伦, 关婷婷, 等. 以 CdTe 量子点为荧光探针测定黄瓜中链霉素的残留量[J]. 分析测试学报, 2015, 34(4): 463-467.

[16] Ge Shen-guang, Lu Juan-juan, Ge Lei, et al. Development of a novel deltamethrin sensor based on molecularly imprinted silica nanospheres embedded CdTe quantum dots[J]. Spectrochimica Acta Part A, 2011, 79(5): 1 704-1 709.

[17] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 22969—2008 奶粉和牛奶中链霉素、双氢链霉素和卡那霉素残留量的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.

(上接第 153 页)

[18] 郭守军, 杨永利, 黄惠萍, 等. 乌榄种仁油的提取工艺及脂肪酸组成[J]. 食品与机械, 2013, 29(2): 88-92.

[19] 蔡红燕, 齐玉堂, 刘英. 燕麦油理化性质及成分分析[J]. 食品科学, 2012, 33(18): 202-205.

[20] Tong Li-tao, Zhong Kui, Liu Li-ya, et al. Oat oil lowers the plasma and liver cholesterol concentrations by promoting the excretion of faecal lipids in hypercholesterolemic rats[J]. Food Chem. , 2014, 142: 129-134.

[21] Shewry P R, Piironen V, Lampi A M, et al. Phytochemical and fiber components in oat varieties in the HEALTHGRAIN diversity screen[J]. J. Agr. Food Chem. , 2008, 56(21): 9 777-9 784.

[22] Emmons C L, Peterson D M, Paul G L. Antioxidant capacity of oat (*Avena sativa* L.) extracts. 2. In vitro antioxidant activity and contents of phenolic and tocol antioxidants[J]. J. Agr. Food Chem. , 1999, 47(12): 4 894-4 898.

[23] 李林, 张大顺. 不同方法萃取的燕麦油脂肪酸组成及清除 DP-PH 自由基活性研究[J]. 食品科学, 2010, 31(7): 146-149.