

不同制油工艺对亚麻籽油品质及抗氧化活性的影响

糟帆, 丁彩云, 马玉婷, 刘慧燕, 傅婧

(宁夏大学食品与葡萄酒学院, 银川 750021)

摘要:为比较不同工艺制取的亚麻籽油品质及抗氧化活性, 分别以索氏提取法、冷榨法和热榨法制取亚麻籽油, 测定亚麻籽油得率、基本理化指标、生育酚含量、脂肪酸组成、挥发性成分及抗氧化活性。结果表明: 索氏提取法亚麻籽油得率最高, 为 52.77%, 热榨法亚麻籽油得率显著高于冷榨法; 冷榨亚麻籽油色泽、脂肪酸组成更佳, α -亚麻酸含量高达 54.49%; 索氏提取亚麻籽油总生育酚含量最高, 为 450.79 mg/kg, 冷榨和热榨亚麻籽油的总生育酚含量相当; 索氏提取和冷、热榨亚麻籽油挥发性成分分别为 21、17 种和 34 种, 5 种为共有成分, 其中 (*E, E*)-2,4-庚二烯醛是冷、热榨亚麻籽油的特征风味物质; 冷榨亚麻籽油具有较强的 ABTS⁺ 自由基清除能力, 而热榨亚麻籽油具有较强的 DPPH 自由基清除能力, 二者铁还原力相当, 索氏提取亚麻籽油具有较强的铁还原力。综上, 不同制油工艺对亚麻籽油的品质及抗氧化活性具有一定的影响。

关键词:制油工艺; 亚麻籽油; 品质; 抗氧化活性

中图分类号: TS224.3; TQ644.1 文献标识码: A 文章编号: 1003-7969(2022)09-0013-07

Effects of different extraction processes on quality and antioxidant activity of linseed oil

ZAO Fan, DING Caiyun, MA Yuting, LIU Huiyan, FU Jing

(School of Food and Wine, Ningxia University, Yinchuan 750021, China)

Abstract: In order to study the effects of different extraction processes on the quality and antioxidant activity of linseed oil, linseed oil was prepared by Soxhlet extraction, cold pressing and hot pressing, respectively. The yield of linseed oil, basic physicochemical properties, tocopherol content, fatty acid composition, volatile components and antioxidant activity were determined. The results showed that the yield of linseed oil by Soxhlet extraction was the highest with 52.77%, and the yield of linseed oil by hot pressing was significantly higher than that by cold pressing. Cold pressed linseed oil had better color and fatty acid composition, and the content of α -linolenic acid reached 54.49%. Soxhlet extracted linseed oil had the highest total tocopherol content, which was 450.79 mg/kg, and the total tocopherol content in cold and hot pressed linseed oil was similar. In addition, the volatile components of Soxhlet extracted and cold and hot pressed linseed oil were 21, 17 kinds and 34 kinds, respectively, and 5 kinds were common components, of which (*E, E*)-2,4-heptadienal was the characteristic flavor substance of cold and hot pressed linseed oil. Cold pressed linseed oil had strong ABTS⁺ free radical scavenging ability and hot pressed linseed oil had strong DPPH free radical scavenging ability, and both of which had the same iron reducing ability. Soxhlet extracted linseed oil had stronger iron reducing power. In conclusion, different oil extraction processes have some effects on the quality and antioxidant activity of linseed oil.

Key words: oil extraction process; linseed oil; quality; antioxidant activity

收稿日期: 2021-08-09; 修回日期: 2022-04-15

基金项目: 宁夏自然科学基金项目(2020AAC03101)

作者简介: 糟帆(1996), 女, 硕士研究生, 研究方向为食用油脂加工与营养(E-mail) 1084237038@qq.com。

通信作者: 傅婧, 讲师(E-mail) fujingfq@163.com。

亚麻(*Linum usitatissimum*)为亚麻科(Linaceae)亚麻属(*Linum*)一年生草本植物, 俗称胡麻^[1]。亚麻广泛分布于北温带地区, 全世界 50 多个国家均有

种植,我国亚麻的种植面积位居世界第三^[2],主要分布在宁夏、甘肃、内蒙古、青海等地^[3]。亚麻是世界十大油料作物之一,亚麻籽主要含脂肪(35%~45%)、蛋白质(28%~30%)、膳食纤维(约35%)和矿物质等营养物质。

亚麻籽油富含多不饱和脂肪酸,尤其是 α -亚麻酸(ALA)含量高达50%以上,因此亚麻籽油也被称为“高原深海鱼油”^[4]。ALA属于 ω -3系列脂肪酸,在机体内通过代谢可直接合成二十二碳六烯酸(DHA)和二十碳五烯酸(EPA),是维持肌体正常生理功能和生长发育的必需脂肪酸,具有降血脂、降血压、增强免疫力、提高记忆力等诸多保健作用^[5-6]。此外,亚麻籽油中富含的有益脂质伴随物(生育酚、植物甾醇和多酚等),可促进亚麻籽油的抗氧化活性。目前,国内外对亚麻籽油抗氧化活性方面的研究较少。谢心美等^[7]认为 β -谷甾醇可抑制超氧阴离子自由基并清除羟自由基,在油脂中加入0.08%植物甾醇能最大程度延缓油脂的氧化;丁进锋等^[8]研究发现当亚麻籽油质量浓度为2 mg/mL时,对DPPH自由基、羟自由基及超氧阴离子自由基的清除率分别为39.40%、51.74%和31.04%;Sargi等^[9]报道,不同品种亚麻籽油对DPPH自由基、ABTS⁺自由基清除能力和铁还原力的影响显著,但无明显规律;Veličkovska等^[10]分别采用DPPH自由基与ABTS⁺自由基清除法评价包括亚麻籽油在内的8种冷榨植物油抗氧化能力,发现亚麻籽油对DPPH自由基的清除能力最强,但对ABTS⁺自由基的清除能力却较弱,表明不同自由基清除试验结果可能不统一。

亚麻籽油的提取方法主要以传统压榨法和浸提法为主,但基于油料种子结构和组成的特异性,不同制油工艺的亚麻籽油得率、品质及抗氧化活性可能存在差异。本研究以‘宁亚21号’亚麻籽为原料,以索氏提取法、冷榨法和热榨法制取亚麻籽油,研究不同制油工艺对亚麻籽油得率、品质及抗氧化活性的影响,旨在为亚麻籽油的开发及多值化利用提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

1.1.1 原料与试剂

‘宁亚21号’亚麻籽,宁夏君星坊食品科技有限公司;无水甲醇、正己烷、三氯乙酸、双氧水、冰乙酸、盐酸,均为分析纯;抗坏血酸(V_C)、DPPH、ABTS、TPTZ,阿拉丁试剂有限公司;37种脂肪酸甲酯混标、4种生育酚混标,北京中科质检生物技术有

限公司。

1.1.2 仪器与设备

ZYJ-709全自动冷热双榨油机,房太电器有限公司;SE-750高速粉碎机,圣象电器有限公司;GZX-9246MBE电热鼓风干燥箱,上海博迅实业有限公司;低速台式大容量离心机,上海安亭科学仪器有限公司;V-5100紫外/可见分光光度计,上海元析仪器有限公司;SZF-06A脂肪测定仪,上海洪纪仪器设备有限公司;SC-80I型色差计,北京京仪康光光学仪器有限公司;GC-2010 PLUS气相色谱仪、UFLC-超快速液相色谱仪、GCMS-TQ8040气质联用仪,日本岛津公司。

1.2 试验方法

1.2.1 亚麻籽油的制取

样品处理:称取适量除杂的亚麻籽烘干至恒重,用高速粉碎机粉碎后过0.425 mm(40目)筛,密封袋封存备用(用于索氏提取法制油),防止氧化。

索氏提取法制油:根据索氏抽提原理,参照GB/T 14488.1—2008方法以正己烷提取亚麻籽油,在50℃下旋转蒸发回收正己烷,得到索氏提取亚麻籽油。

冷榨法和热榨法制油:分别称取(100±5)g烘干至恒重的亚麻籽,将全自动冷热双榨油机预热至60、140℃进行压榨得到原油,原油经离心除去杂质,分别获得冷榨亚麻籽油和热榨亚麻籽油。

将不同工艺制取的亚麻籽油样品密封,并于4℃保存待测。

按下式计算亚麻籽油得率(X)。

$$X = m_1/m \times 100\% \quad (1)$$

式中: m_1 为亚麻籽油质量,g; m 为亚麻籽原料质量,g。

1.2.2 亚麻籽油基本理化指标的测定

酸值参照GB 5009.229—2016测定;过氧化值参照GB 5009.227—2016测定;水分及挥发物含量参照GB 5009.236—2016测定;色泽参照郭刚军等^[11]的方法测定,采用Hunter Lab色系统, L 值是明度变量, a 值和 b 值是色品坐标, L 值大表示偏亮, L 值小表示偏暗, a 值大表示偏红, a 值小表示偏绿, b 值大表示偏黄, b 值小表示偏蓝。

1.2.3 亚麻籽油生育酚含量的测定

参照GB 5009.82—2016采用外标法测定生育酚含量。

1.2.4 亚麻籽油脂肪酸组成分析

参照GB 5009.168—2016测定脂肪酸组成。

1.2.5 亚麻籽油挥发性成分分析

参照于文龙等^[12]的方法,并稍作修改。

萃取头老化:将萃取头于250℃老化80 min,去除杂质,直至无干扰杂峰出现。

SPME 萃取条件:萃取温度60℃,萃取时间30 min,解吸时间5 min。

GC 条件:Rtx - Wax 色谱柱(30 m × 0.25 mm × 0.25 μm);载气为氦气,流速0.8 mL/min;进样口温度250℃;采用程序升温,40℃保持3 min,以6℃/min升至120℃,然后以10℃/min升至230℃,保持8 min。

MS 条件:电子电离源,离子源温度200℃,灯丝发射电流200 μA,电子能量70 eV,接口温度250℃,质量扫描范围33~373 u。

通过 NIST 谱库进行检索,与标准物的质谱图进行对比,从而对挥发性成分进行定性分析,当相似度大于80%时,确定为该物质。采用峰面积归一化法确定各组分相对含量。

1.2.6 亚麻籽油体外抗氧化活性测定

亚麻籽油 DPPH 自由基、ABTS⁺ 自由基清除能力和铁还原力(以吸光度大小表示铁还原力强弱)测定参考周洋^[13]的方法。以样品的质量浓度为横坐标,抗氧化能力为纵坐标,研究其相关性与变化趋势,求得线性回归方程并计算半抑制浓度(IC₅₀)以评价亚麻籽油抗氧化能力。IC₅₀指自由基清除率为50%或吸光度为0.5时所需抗氧化剂的质量浓度。IC₅₀值越小,表明抗氧化能力越强^[11]。

1.2.7 数据分析

采用 Origin 2018、SPSS 12.00 软件应用单因素方差分析与邓肯氏法进行显著性分析,以 $p < 0.05$ 为差异具有统计学意义。所有试验均重复3次,结果以“平均值 ± 标准差”表示。

2 结果与分析

2.1 不同制油工艺对亚麻籽油得率及基本理化指标的影响(见表1)

表1 不同制油工艺对亚麻籽油得率及基本理化指标的影响

制油工艺	得率/%	水分及挥发物含量/%	过氧化值/(mmol/kg)	酸值(KOH)/(mg/g)	色泽		
					L 值	a 值	b 值
索氏提取	52.77 ± 0.49 ^a	1.47 ± 0.09 ^a	2.55 ± 0.40 ^a	1.27 ± 0.05 ^a	17.87 ± 0.13 ^a	2.80 ± 0.03 ^a	17.83 ± 0.32 ^b
热榨	42.21 ± 0.02 ^b	0.05 ± 0.02 ^b	0.98 ± 0.02 ^b	0.92 ± 0.01 ^b	13.40 ± 0.19 ^b	2.76 ± 0.10 ^a	12.42 ± 0.59 ^c
冷榨	20.90 ± 0.01 ^c	0.15 ± 0.01 ^b	1.19 ± 0.05 ^b	0.36 ± 0.01 ^c	17.14 ± 0.14 ^a	2.09 ± 0.07 ^b	19.54 ± 0.24 ^a

注:同列肩标小写字母不同表示差异显著($p < 0.05$)。下同

由表1可知:索氏提取法亚麻籽油得率最高,为52.77%,显著高于热榨法和冷榨法,而热榨法亚麻籽油得率显著高于冷榨法;索氏提取亚麻籽油的水分及挥发物含量最高,其原因可能是旋转蒸发过程中溶剂未旋蒸完全;3种制油工艺所得亚麻籽油的过氧化值范围为0.98~2.55 mmol/kg,酸值(KOH)范围为0.36~1.27 mg/g,其中索氏提取亚麻籽油的过氧化值和酸值均最高,热榨和冷榨亚麻籽油的相对较低。除索氏提取亚麻籽油水分及挥发物含量外,其他质量指标均满足 GB/T 8235—2019《亚麻籽油》规定。

色泽是评价油脂品质的重要指标之一。由表1可知:索氏提取和冷榨亚麻籽油的 L 值分别为

17.87 和 17.14,均高于热榨亚麻籽油的,说明索氏提取和冷榨亚麻籽油色泽更为明亮;热榨和索氏提取亚麻籽油的 a 值分别为 2.76 和 2.80,高于冷榨亚麻籽油的,说明索氏提取和热榨亚麻籽油色泽偏红;热榨亚麻籽油的 b 值为 12.42,显著低于索氏提取和冷榨亚麻籽油的,说明热榨亚麻籽油黄色更淡。这可能与热榨法制油过程中,一部分色素溶解到油中,且由于热榨温度较高导致油料内还原糖类物质的分解产物与氨基酸或蛋白质反应生成某种有色物质有关^[14]。综合分析可知,冷榨亚麻籽油色泽最佳。

2.2 不同制油工艺对亚麻籽油生育酚组成的影响(见表2)

表2 不同制油工艺对亚麻籽油生育酚组成的影响

制油工艺	mg/kg			
	α-生育酚	γ-生育酚	δ-生育酚	总生育酚
索氏提取	1.38 ± 0.33 ^b	447.27 ± 35.64 ^a	2.15 ± 0.25 ^b	450.79 ± 35.10 ^a
热榨	5.83 ± 0.15 ^a	336.86 ± 17.36 ^b	5.33 ± 0.22 ^a	348.02 ± 17.27 ^b
冷榨	5.94 ± 0.10 ^a	351.74 ± 27.37 ^b	5.38 ± 0.33 ^a	363.06 ± 26.96 ^b

由表2可知,亚麻籽油主要以 γ-生育酚为主。不同制油工艺对亚麻籽油生育酚含量具有显著影响

($p < 0.05$),其中索氏提取亚麻籽油中总生育酚含量最高,为450.79 mg/kg,其次是冷榨(363.06 mg/kg)

和热榨(348.02 mg/kg)亚麻籽油,这与任我行等^[15]研究结果相似。这可能是由于生育酚色满环上连接的长碳链使生育酚的极性相对较弱,而与正己烷亲和力和力较强,从而利于在索氏提取过程中迁移至油中^[16]。

2.3 不同制油工艺对亚麻籽油主要脂肪酸组成及含量的影响(见表3)

表3 不同制油工艺对亚麻籽油主要脂肪酸组成及含量的影响 %

脂肪酸	索氏提取	热榨	冷榨
棕榈酸(C16:0)	5.92	5.99	6.08
硬脂酸(C18:0)	5.41	4.66	4.75
油酸(C18:1)	29.88	20.32	18.44
亚油酸(C18:2)	13.32	15.22	16.24
α -亚麻酸(C18:3)	44.73	51.66	54.49
饱和脂肪酸	11.33	10.65	10.83
单不饱和脂肪酸	29.88	20.32	18.44
多不饱和脂肪酸	58.05	66.88	70.73
总不饱和脂肪酸	87.93	87.20	89.17

脂肪酸是评价油脂营养价值的重要依据。亚麻籽油富含多不饱和脂肪酸,中等含量的单不饱和脂肪酸和少量的饱和脂肪酸^[2]。由表3可知,不同工艺制取的亚麻籽油其脂肪酸组成差异不大,均为 α -亚麻酸含量最高,然后依次是油酸、亚油酸、棕榈酸和硬脂酸,这与 Ciftci 等^[17]的研究结果一致。本研究中亚麻籽油不饱和脂肪酸含量接近90%,其中 α -亚麻酸含量在50%左右,冷榨亚麻籽油 α -亚麻酸含量高达54.49%。 α -亚麻酸属于人体必需脂肪酸,已被证明对心血管疾病和某些癌症的预防具有显著作用,也有助于降低血糖和胆固醇水平^[6]。此外,冷榨亚麻籽油饱和脂肪酸和单不饱和脂肪酸含量较低,分别为10.83%和18.44%,多不饱和脂肪酸和总不饱和脂肪酸含量最高,分别为70.73%和89.17%,而油脂中脂肪酸不饱和程度越高,油脂氧化稳定性越低,因此冷榨亚麻籽油可能会更容易氧化^[15]。热榨亚麻籽油多不饱和脂肪酸含量低于冷榨亚麻籽油,这可能与制油过程中热榨工艺温度过高导致部分脂肪酸被破坏有关,说明热处理对亚麻籽中甘油三酯稳定性有一定的影响^[18]。另外,索氏提取亚麻籽油多不饱和脂肪酸含量最低,饱和脂肪酸含量最高,原因有待于进一步分析。

2.4 不同制油工艺对亚麻籽油挥发性成分的影响

挥发性成分作为评价植物油品质的重要指标,对植物油整体香气至关重要^[15]。不同制油工艺对亚麻籽油挥发性成分相对含量的影响见表4。

表4 不同制油工艺对亚麻籽油挥发性成分相对含量的影响 %

化合物	索氏提取	热榨	冷榨
醛类			
正己醛	-	2.71	0.46
壬醛	2.05	3.26	-
正辛醛	-	1.09	-
苯乙醛	-	1.12	-
(E)-2-庚烯醛	-	1.56	-
(E,E)-2,4-庚二烯醛	-	6.70	6.11
(E)-2-戊烯醛	-	-	0.48
(E)-2-癸烯醛	-	0.74	0.48
(E)-2-己烯-4-氧代-醛	-	1.90	-
醇类			
辛醇	4.97	2.03	-
1-壬醇	1.71	0.63	-
苯甲醇	0.85	0.81	-
苯乙醇	0.71	0.70	-
正己醇	-	9.07	0.44
正庚醇	-	1.44	-
1-戊醇	-	0.80	-
1-戊烯-3-醇	-	0.84	-
1-辛烯-3-醇	-	1.13	-
4,4,5-三甲基-1,3-二氧六环-5-醇	-	0.95	-
酸类			
己酸	3.49	5.66	0.41
乙酸	1.37	7.54	0.79
丙酸	-	1.70	-
甲酸	-	-	0.51
正戊酸	-	0.63	-
酯类			
γ -己内酯	-	1.37	-
乙酸丁酯	3.67	-	-
4-羟基丁酸乙酰酯	-	2.69	-
酮类			
3,5-辛二烯-2-酮	-	-	2.88
2-戊烷三酮	-	-	0.67
苯乙酮	-	3.77	-
杂环类			
2,3,5-三甲基吡嗪	-	1.00	-
苯并吡啶	10.27	-	0.61
1H-吡啶-3,4-二胺	-	1.60	-
5-甲基四氢化萘	3.50	-	-
1,2,3,4-四氢萘	0.98	-	-
烷烃类			
4,6-二甲基十二烷	1.57	-	-
2,6,10-三甲基十三烷	0.87	-	-

续表 4

化合物	索氏提取	热榨	冷榨	%
十一烷	1.66	-	-	
十二烷	3.36	0.92	-	
十四烷	4.90	-	-	
正十七烷	2.65	-	-	
正二十四烷	2.01	1.68	11.24	
正三十六烷	-	2.98	9.53	
正五十四烷	1.52	2.20	53.49	
其他类				
间二甲苯	1.03	2.81	-	
二甲基砷	-	1.29	-	
苯乙烯	5.01	4.87	0.49	
(E)- β -金合欢烯	-	-	0.34	
2,4-二甲基-2-癸烯			0.61	

注: - 表示未检出; 少部分无法匹配名称的成分未列出

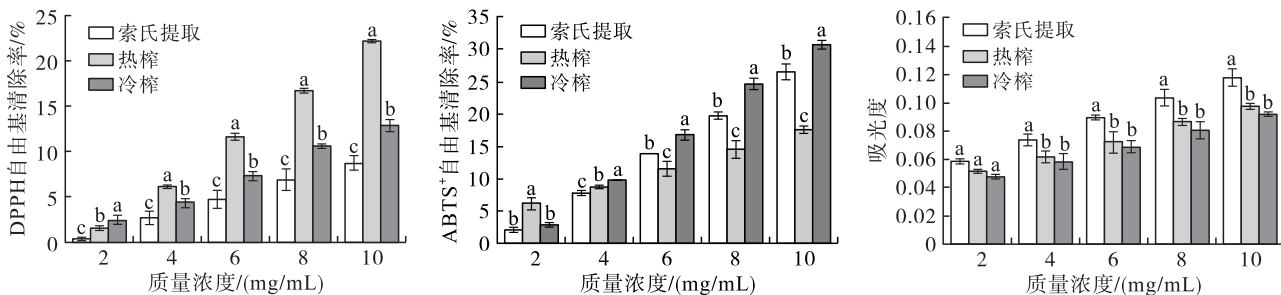
植物油中挥发性成分生成途径主要包括美拉德反应和脂质氧化, 美拉德反应生成呋喃、吡嗪、吡咯等, 脂质氧化生成醛、酮等物质^[19]。由表 4 可知, 通过 GC-MS 鉴定 3 种工艺制取的亚麻籽油挥发性成分共 49 种, 包括 9 种醛类物质、10 种醇类物质、5 种酸类物质、3 种酯类物质、3 种酮类物质、5 种杂环类物质、9 种烷烃类物质及 5 种其他类物质。其中, 索氏提取亚麻籽油挥发性成分 21 种, 热榨亚麻籽油挥发性成分 34 种, 冷榨亚麻籽油挥发性成分 17 种, 3 种工艺制取的亚麻籽油含 5 种共有成分。热榨亚麻籽油挥发性成分种类多于冷榨和索氏提取亚麻籽油, 可见热榨亚麻籽油风味物质复杂, 这可能与热榨工艺过程中油脂发生美拉德反应有关^[20]。于文龙等^[12]通过 GC-MS 分析冷/热榨亚麻籽油中挥发性成分共有 49 种, 其中冷榨 27 种, 热榨 42 种, 高于本

试验结果, 这可能与亚麻籽的产地和品种的差异有关。

杨金娥等^[21]研究表明, 冷榨亚麻籽油带有一种固有的清香气味, 热榨亚麻籽油则带有一种浓香烤香味。醇类物质主要为油脂提供清香、醇香、果香等味; 酸类物质主要由脂氧合酶路径中的酶解反应产生, 具有干酪、油脂味^[12]; 杂环类物质具有焦糊味、烤坚果香等气味特征, 主要来源于油料加热过程中还原糖和氨基酸或蛋白质的美拉德反应^[20]。大部分醛类挥发性物质的风味阈值相对较低, 因此醛类挥发性物质对亚麻籽油整体香气的贡献相对较大。不饱和醛类物质是亚麻籽油香气成分的主要组成部分, 并且多数呈现较强的不同香气, 如油脂味、甜香味、青草味、花香味及香草味等^[12]。从表 4 可以看出, 冷、热榨亚麻籽油中均含有 (E,E)-2,4-庚二烯醛, 且在醛类物质中相对含量最高, 分别为 6.11% 和 6.70%。(E,E)-2,4-庚二烯醛具有脂肪、水果香等香气, 属于风味贡献较大的醛类物质, 而且是亚麻籽油中含量最高的多不饱和脂肪酸 α -亚麻酸的主要氧化产物, 因此可以认为其是冷、热榨亚麻籽油的特征风味物质, 这与韩玉泽等^[19]的研究结果一致。此外, 正己醇是冷、热榨亚麻籽油中共有的醇类物质, 乙酸和己酸为 3 种制油工艺亚麻籽中共有的酸类物质。

2.5 不同制油工艺对亚麻籽油抗氧化活性的影响

DPPH 自由基清除能力测定是基于氢原子转移 (HAT) 机制及单电子转移 (SET) 机制结合作用, 而 ABTS⁺ 自由基、铁还原力测定是基于单电子转移 (SET) 机制^[22]。不同制油工艺对亚麻籽油抗氧化活性的影响见图 1。



注: 不同制油工艺间不同小写字母表示差异显著 ($p < 0.05$)

图 1 不同制油工艺对亚麻籽油抗氧化活性的影响

制油工艺会对植物油中有益脂质伴随物产生影响, 而植物油的抗氧化活性与之密切相关, 因此不同的制油工艺会影响植物油的抗氧化活性^[14]。由图 1 可知, 不同工艺制得的亚麻籽油 DPPH 自由基清除率、ABTS⁺ 自由基清除率、铁还原力均随着油样质

量浓度增大而逐渐增大, 但通过对照试验发现, 均远低于 V_c 。当质量浓度为 2 mg/mL 时, 冷榨亚麻籽油的 DPPH 自由基清除率显著高于索氏提取和热榨亚麻籽油。丁进锋等^[8]采用超声波辅助提取亚麻籽油, 并研究亚麻籽油的抗氧化性能, 结果发现, 当亚麻

籽油质量浓度为 2 mg/mL 时,其 DPPH 自由基清除率为 39.40%,高于本试验结果,这可能与制油工艺、产地及品种的差异有关。当质量浓度为 4 mg/mL 及以上时,冷榨亚麻籽油的 DPPH 自由基清除率显著高于索氏提取亚麻籽油,但显著低于热榨亚麻籽油。研究发现,亚麻籽经 160 °C 加热后,压榨制得的油样中多酚含量是对照组的近 4 倍^[21],且生育酚与胡萝卜素之间具有良好的协同抗氧化作用^[23]。因此,热榨亚麻籽油具有较好的 DPPH 自由基清除能力,可能是由于其多酚含量较高且含有较多胡萝卜素等色素的缘故。当质量浓度为 2 mg/mL 时,热榨亚麻籽油 ABTS⁺ 自由基清除率显著高于索氏提取和冷榨亚麻籽油;当质量浓度为 6 mg/mL 及以上时,热榨亚麻籽油 ABTS⁺ 自由基清除率显著低于索氏提取和冷榨亚麻籽油,且冷榨亚麻籽油 ABTS⁺ 自由基清除率最高。唐琳琳等^[24] 研究发现不同方法提取的红树莓籽油抗氧化能力存在差异,可能与油中脂肪酸、脂溶性活性成分相关。冷榨亚麻籽油之所以具有较好的 ABTS⁺ 自由基清除能力,可能是由于冷榨工艺较好地保留了亚麻籽油中的脂溶性活性成分。随着质量浓度的增加,冷榨亚麻籽油的铁还原力随之增加(吸光度越大表示铁还原力越大),但始终低于索氏提取和热榨亚麻籽油。当质量浓度为 4 mg/mL 及以上时,冷榨亚麻籽油与热榨亚麻籽油的铁还原力显著低于索氏提取亚麻籽油,其原因可能是索氏提取亚麻籽油含有较多生育酚。

不同制油工艺对亚麻籽油抗氧化 IC₅₀ 的影响见表 5。由表 5 可知:不同工艺制取的亚麻籽油 DPPH 自由基清除能力的大小为热榨法 > 冷榨法 > 索氏提取法;ABTS⁺ 自由基清除能力的大小为冷榨法 > 索氏提取法 > 热榨法;铁还原力的大小为索氏提取法 > 热榨法 > 冷榨法。

表 5 不制油工艺对亚麻籽油抗氧化

制油工艺	IC ₅₀ 的影响		mg/mL
	DPPH 自由基清除率	ABTS ⁺ 自由基清除率	
索氏提取	49.20	17.83	61.54
热榨	20.80	32.76	79.43
冷榨	37.10	15.35	82.80

综上,冷榨亚麻籽油具有较强的 ABTS⁺ 自由基清除能力,而热榨亚麻籽油具有较强的 DPPH 自由基清除能力,二者铁还原力相当,这与李志晓等^[25] 对油茶籽油的研究结果相同。与冷、热榨亚麻籽油相比,索氏提取亚麻籽油具有较强的铁还原力。

3 结论

索氏提取法、冷榨法和热榨法制取的亚麻籽油的品质和抗氧化活性存在一定差异。冷榨亚麻籽油色泽、脂肪酸组成等指标优于索氏提取和热榨亚麻籽油,而索氏提取亚麻籽油生育酚含量高于冷榨和热榨亚麻籽油。3 种工艺制取的亚麻籽油共鉴定出 49 种挥发性成分,其中 5 种为共有成分。(E,E)-2,4-庚二烯醛是冷榨和热榨亚麻籽油特征风味物质。不同工艺制取的亚麻籽油均具有一定的抗氧化活性,其中冷榨亚麻籽油具有较强的 ABTS⁺ 自由基清除能力,热榨亚麻籽油具有较强的 DPPH 自由基清除能力,而索氏提取亚麻籽油具有较强的铁还原力。

参考文献:

- [1] 史湘铃, 孙桂菊. 亚麻籽调节糖脂代谢作用的研究进展[J]. 食品科学, 2020, 41(13): 242-248.
- [2] PRIYANKA K, ALKA S, DEV R S. Flaxseed: a potential functional food source [J]. J Food Sci Technol, 2015, 52(4): 1857-1871.
- [3] 王瑞元. 我国亚麻籽油的消费市场前景看好[J]. 中国油脂, 2018, 43(1): 1-3.
- [4] 李雅珊, 孙华. 亚麻成分提取方法及功效研究综述[J]. 天津科技, 2018, 45(4): 53-56, 61.
- [5] 万分龙. 亚麻籽油的研究现状及展望[J]. 轻工科技, 2019, 35(8): 17-19.
- [6] BANIK M, DUGUID S, CLOUTIER S. Transcript profiling and gene characterization of three fatty acid desaturase genes in high, moderate, and low linolenic acid genotypes of flax (*Linum usitatissimum* L.) and their role in linolenic acid accumulation [J]. Genome, 2011, 54(6): 471-483.
- [7] 谢心美, 郝海鑫, 何剑斌. 植物甾醇的生理功能及其应用[J]. 草业科学, 2013, 30(12): 2105-2109.
- [8] 丁进锋, 赵凤敏, 李少萍, 等. 亚麻籽油红外光谱分析及体外抗氧化活性研究[J]. 食品科技, 2016, 41(9): 254-257.
- [9] SARGI S C, SILVA B C, SANTOS H M C, et al. Antioxidant capacity and chemical composition in seeds rich in omega-3: chia, flax, and perilla [J]. Food Sci Technol, 2013, 33(3): 541-548.
- [10] VELIČKOVSKA S K, BRÜHL L, MITREV S, et al. Quality evaluation of cold-pressed edible oils from Macedonia [J]. Eur J Lipid Sci Tech, 2015, 117(12): 2023-2035.
- [11] 郭刚军, 胡小静, 彭志东, 等. 不同压榨方式澳洲坚果油品质及抗氧化活性比较[J]. 食品科学, 2018, 39(13): 125-132.
- [12] 于文龙, 郝楠, 吴凯晋, 等. HS-SPME-GC-MS-O 联用分析不同加工工艺亚麻籽油特征香气成分[J]. 食品科学, 2019, 40(18): 266-272.

(下转第 25 页)

- [30] 赵新楠, 王秀嫔, 李培武, 等. 液相色谱-串联质谱法准确定量植物油中主要甘油三酯[J]. 中国油料作物学报, 2020, 42(3): 356-363.
- [31] WEI W, SUN C, JIANG W, et al. Triacylglycerols fingerprint of edible vegetable oils by ultra-performance liquid chromatography-Q-ToF-MS[J/OL]. LWT-Food Sci Technol, 2019, 112:108261 [2021-11-01]. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.108261>.
- [32] ENDO Y, OHTA A, KIDO H, et al. Determination of triacylglycerol composition in vegetable oils using high-performance liquid chromatography: a collaborative study[J]. J Oleo Sci, 2011, 60(9):451-456.
- [33] CUNHA S C, OLIVEIRA M B P P. Discrimination of vegetable oils by triacylglycerols evaluation of profile using HPLC/ELSD[J]. Food Chem, 2006, 95(3): 518-524.
- [34] 张东, 龙伶俐, 薛雅琳, 等. 液质联用分析常见植物油甘油三酯[J]. 粮油食品科技, 2012, 20(6): 33-37.
- [35] 柴杰, 金青哲, 薛雅琳, 等. 制油工艺对葵花籽油品质的影响[J]. 中国油脂, 2016, 41(4): 56-61.
- [36] 杨湄, 刘昌盛, 周琦, 等. 加工工艺对菜籽油主要挥发性风味成分的影响[J]. 中国油料作物学报, 2010, 32(4): 551-557.
- [37] 魏长庆. 新疆胡麻油特征香气成分鉴别及其产生机制研究[D]. 江苏 无锡:江南大学, 2015.
- [38] 李亚茹. 多酚在高温条件下对茶油氧化稳定性的影响[D]. 长沙:中南林业科技大学, 2019.
- [39] 高蓓, 章晴, 杨悠悠, 等. 固相微萃取-气质联用技术测定5种食用植物油挥发性成分[J]. 食品安全质量检测学报, 2015, 6(7): 2846-2856.
- [40] 吴忠红, 裴龙英, 张健, 等. 亚临界提取甜瓜籽油风味与脂肪酸关系分析[J]. 新疆农业科学, 2021, 58(10): 1791-1801.
- [41] 杨文鸽, 邓思瑶, 吕梁玉, 等. 电子束辐照前处理对梅鱼鱼糜凝胶挥发性成分的影响[J]. 农业机械学报, 2017, 48(9): 344-351.
- [42] 孙灵霞, 李苗云, 靳春杰, 等. 基于电子鼻和气质联用技术分析不同品牌道口烧鸡的香气差异性[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(6): 238-243.
- [43] 闫鉴, 兰天, 王家琪, 等. 基于电子鼻和气质联用技术分析市售牡丹籽油产品的香气差异性[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(19): 264-274.
- [44] BOCCI F, FREGA N. Analysis of the volatile fraction from sunflower oil extracted under pressure[J]. J Am Oil Chem Soc, 1996, 73(6):713-716.
- [45] 谢婧, 徐俐, 张秋红, 等. 顶空固相微萃取法提取菜籽油挥发性风味成分[J]. 食品科学, 2013, 34(12): 281-285.
- [46] 高蓓, 章晴, 杨悠悠, 等. 固相微萃取-气质联用技术测定5种食用植物油挥发性成分[J]. 食品安全质量检测学报, 2015, 6(7): 2846-2856.
- [47] VUJASINOVIC V, DJILAS S, DIMIC E, et al. The effect of roasting on the chemical composition and oxidative stability of pumpkin oil[J]. Eur J Lipid Sci Tech, 2012, 114(5): 568-574.

(上接第18页)

- [13] 周洋. 加工对亚麻籽油有益脂质伴随物和抗氧化能力的影响[D]. 江苏 无锡:江南大学, 2018.
- [14] 武家琪. 精炼工艺对高酸值米糠油谷维素含量及色泽的影响研究[D]. 沈阳:沈阳师范大学, 2020.
- [15] 任我行, 刘玉兰, 徐建国. 不同工艺制取亚麻籽油的品质差异分析[J]. 粮食与食品工业, 2017, 24(1): 3-7.
- [16] 于坤, 禹晓, 程晨, 等. 制油工艺对亚麻籽油品质及脂质伴随物含量的影响[J]. 食品科学, 2020, 41(16): 233-243.
- [17] CIFTCI O N, PRZYBYLSKI R, MAGDALENA R, et al. Lipid components of flax, perilla, and chia seeds[J]. Eur J Lipid Sci Tech, 2012, 114(7): 794-800.
- [18] 秦玉川, 刘本同, 薛锦松, 等. 冷榨法与热榨法制取山茶油品质差异研究[J]. 中国粮油学报, 2020, 35(5): 97-104.
- [19] 韩玉泽, 王兴瑞, 李应霞, 等. SPME-GC-MS分析与鉴别青海亚麻籽油挥发性组分[J]. 食品工业科技, 2021(20): 255-260.
- [20] 师瑞, 尹文婷, 马雪婷, 等. SDE-GC-O-MS鉴定浓香葵花籽油香气活性物质[J]. 中国粮油学报, 2021, 36(8): 113-117.
- [21] 杨金娥, 黄庆德, 郑畅, 等. 烘烤温度对压榨亚麻籽油品质的影响[J]. 中国油脂, 2011, 36(6): 28-31.
- [22] 刘国艳, 李思童, 梁丽, 等. 油茶籽油不同形态酚类化合物的抗氧化互作关系[J]. 食品科学, 2021, 42(11): 34-39.
- [23] IYEUN L, EUNOK C. Effects of phospholipids on the antioxidant activity of α -tocopherol in the singlet oxygen oxidation of canola oil[J]. New Biotechnol, 2011, 28(6): 691-697.
- [24] 唐琳琳, 桑英, 陈思睿, 等. 不同提取方法的红树莓籽油品质及体外抗氧化活性对比[J]. 现代食品科技, 2020, 36(3): 80-88.
- [25] 李志晓, 金青哲, 黄健花, 等. 制油工艺对油茶籽油品质的影响[J]. 中国油脂, 2015, 40(4): 47-51.