

辣木籽油的提取及其中神经酸的纯化工艺研究

宋贤娟¹, 黄志远¹, 许波¹, 普岳红^{1,2}, 黄艾祥¹, 王雪峰^{1,2}

(1. 云南农业大学 食品科学技术学院, 昆明 650201; 2. 云南省畜产品加工工程技术研究中心, 昆明 650201)

摘要:为促进辣木籽油中神经酸的开发利用,以辣木籽为原料,采用低温压榨法、超临界 CO₂ 萃取法、索氏抽提法提取辣木籽油,筛选合适的提油方法,再以辣木籽油为原料制备混合脂肪酸,通过低温结晶法纯化辣木籽油中的神经酸,通过单因素实验和响应面实验优化神经酸的纯化工艺。结果表明:低温压榨法提取的辣木籽原油中神经酸含量较高,达到 0.88%;低温结晶法纯化辣木籽油中神经酸的最优工艺条件为料液比(混合脂肪酸与结晶溶剂质量体积比)1:4.2、结晶温度 -21℃、结晶时间 2.3 h,该条件下所得产品中神经酸含量为(5.36 ± 0.01)%,相比辣木籽原油中神经酸含量提升了 5.1 倍。通过低温压榨法提取辣木籽油,再采用低温结晶法纯化神经酸,能够获得神经酸含量较高的产品。

关键词:辣木籽油;神经酸;低温结晶法;响应面实验

中图分类号:TS225.1;TQ645 文献标识码:A 文章编号:1003-7969(2023)12-0026-06

Extraction of *Moringa oleifera* seed oil and purification technology of nervonic acid

SONG Xianjuan¹, HUANG Zhiyuan¹, XU Bo¹, PU Yuehong^{1,2},
HUANG Aixiang¹, WANG Xuefeng^{1,2}

(1. College of Food Science and Technology, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China;
2. Yunnan Animal Products Processing Engineering Technology Research Center, Kunming 650201, China)

Abstract: In order to promote the development and utilization of nervonic acid in *Moringa oleifera* seed oil, with *Moringa oleifera* seed as raw material, *Moringa oleifera* seed oil was extracted by low temperature pressing, supercritical CO₂ extraction and Soxhlet extraction to select suitable oil extraction method. Then, mixed fatty acids were prepared using *Moringa oleifera* seed oil as raw material, and the nervonic acid in *Moringa oleifera* seed oil was purified by low temperature crystallization method. The purification process of nervonic acid was optimized by single factor experiment combined with response surface methodology. The results showed that the content of nervonic acid in crude *Moringa oleifera* seed oil extracted by low temperature pressing method was higher, reaching 0.88%. The optimal purification process of nervonic acid from *Moringa oleifera* seed oil by low temperature crystallization method was obtained as follows: solid-liquid ratio (ratio of mixed fatty acid mass to crystallization solvent volume) 1:4.2, crystallization temperature -21℃ and crystallization time 2.3 h. Under these conditions, the nervonic acid content in the product was (5.36 ± 0.01)%, which was 5.1 times higher than that in crude *Moringa oleifera* seed oil. By extracting *Moringa oleifera* seed oil through low temperature pressing

method and purifying nervonic acid through low temperature crystallization method, products with high levels of nervonic acid can be obtained.

Key words: *Moringa oleifera* seed oil; nervonic acid; low temperature crystallization method; response surface methodology

收稿日期:2022-09-21;修回日期:2023-09-03

基金项目:云南省重大科技专项(202102AE090027)

作者简介:宋贤娟(1999),女,在读硕士,研究方向为食品加工与安全(E-mail)2867384336@qq.com。

通信作者:王雪峰,副教授,博士(E-mail)364135728@qq.com。

辣木(*Moringa oleifera*)为辣木科(Moringaceae)辣木属(*Moringa adans*)植物,起源于印度、非洲等地区^[1],20世纪初从缅甸被引种到我国云南省芒市,开始大面积种植,是云南的优势植物资源之一^[2]。辣木籽为辣木的种子,呈球形,富含油脂、蛋白质、维生素和膳食纤维等营养素^[3-4],具有抗胃溃疡、解酒^[5]、护肝且预防肝硬化、抗氧化^[6]、提高免疫、抗菌、降血糖和降血脂^[7]等功效,是辣木中营养成分和经济价值较高的部位^[8]。辣木籽种仁含油率高达39%,油中含有丰富的不饱和脂肪酸(约占82%),其中油酸含量在62%~75%之间,其脂肪酸的种类和组成与橄榄油类似,与橄榄油和山茶油被誉为“高档健康食用油三姐妹”^[9]。辣木全身是宝,但目前国内外对辣木的研究主要集中在辣木叶,而对辣木籽油资源开发利用的研究报道较少,如辣木籽油中超长链脂肪酸组成及其开发利用,成为辣木籽油资源深度利用的瓶颈。

神经酸(C24:1),又名顺-15-二十四碳烯酸,是一种超长链单不饱和脂肪酸,最早于鲨鱼脑中发现,因此又叫鲨鱼酸^[10]。神经酸是大脑神经细胞和神经组织的主要天然成分^[11],也是能促进受损伤的神经组织修复和再生的有效物质,同样也是神经细胞特别是大脑组织细胞、周围神经细胞、视神经细胞等维持正常生理功能的必需“高级营养素”,对人体健康起着至关重要的作用^[12]。神经酸仅在少量植物中存在^[13],且含量一般较低。目前报道含神经酸含量较高的植物有元宝枫、蒜头果、荆条等,其中元宝枫籽油中神经酸的含量在4%~6%之间^[14]。通过直接食用含神经酸的食物以补充机体所需营养素的成本方式成本高、效率低,因此将神经酸提取纯化成为必然。

低温结晶法是利用低温下不同脂肪酸在溶剂中溶解度的不同进行物质分离,在低温下,多不饱和脂肪酸在溶剂中的溶解度较高而保留在溶剂中,神经酸溶解度较低则通过结晶析出。低温结晶法操作简单、试剂用量少、分离条件较温和,易实现工业化生产^[15]。低温结晶法中常用的溶剂有石油醚、乙醚、丙酮、甲醇、乙醇等^[16]。林秀椿等^[17]采用低温结晶法提取荆条籽油中的神经酸,比较了乙醇、乙醇-水、丙酮、丙酮-乙醇对神经酸含量的影响,结果表明,以丙酮-乙醇为溶剂时,神经酸含量最高,为1.93%。提取方法会对油脂的脂肪酸含量产生影响,因此本实验以辣木籽为原料,采用低温压榨法、超临界CO₂萃取法、索氏抽提法提取辣木籽油,筛选出神经酸含量较高的

提油方法,再以丙酮-乙醇为结晶溶剂,通过低温结晶法纯化辣木籽油中的神经酸,并对纯化工艺进行优化,以期辣木籽油中神经酸的后续开发利用提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 实验材料

辣木籽,云南天佑科技开发有限公司;神经酸甲酯标准品(纯度≥99%),上海源叶生物科技有限公司;无水乙醇、甲醇、无水硫酸钠、石油醚、丙酮、尿素,天津市风船化学试剂科技有限公司;浓硫酸,重庆川东化工(集团)有限公司;氢氧化钾,广东光华科技股份有限公司;正己烷(色谱纯),上海试四赫维化工有限公司。

ZYJ-420型榨油机,东莞市房太电器有限公司;RE-52AA旋转蒸发仪,上海亚荣生化仪器公司;FLBP-200型超微粉碎机,上海菲力博食品机械有限公司;7890A气相色谱仪,安捷伦公司;TH12-5型超临界CO₂萃取装置,上海震樨机电科技发展有限公司;HWS24电热恒温水浴锅,上海一恒科学仪器有限公司;EPED-ESL-10TH纯水器,南京易普易达科技发展有限公司;DW-HL398S超低温冰箱,美菱科技有限公司;JJ500电子天平,常熟双杰测试仪器厂;AX223ZH/E电子天平,奥豪斯仪器(常州)有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 辣木籽油的提取

1.2.1.1 超临界CO₂萃取法

称取粉碎过0.25 mm(60目)筛的辣木籽粉1 000 g加入超临界CO₂萃取装置的萃取罐,扭好盖子。将萃取罐置于萃取器上,旋好盖子,不漏气方可进气。设置参数:压力30 MPa,分离罐I温度40℃,分离罐II温度35℃,循环萃取时间2 h。平均每0.5 h接1次萃取油。

1.2.1.2 索氏抽提法

称取粉碎过0.25 mm(60目)筛的辣木籽粉100 g,用定性滤纸包好装于索氏抽提器中,加入500 mL石油醚(沸程50~60℃),于45℃下水浴加热循环5 h后将抽提得到的油装于旋蒸瓶中50℃旋蒸5 min,回收溶剂,用一次性吸管收集旋蒸瓶中的油,于60℃干燥箱中干燥2 h,冷却至室温。

1.2.1.3 低温压榨法

称取辣木籽1 000 g,于45℃恒温干燥箱中恒温干燥2 h,榨油机预热,将干燥好的辣木籽于榨油机中进料,压榨得到辣木籽油,静置去除沉淀,保存备用。

1.2.2 神经酸含量的测定

标准溶液的配制:准确称取神经酸甲酯标准品适量,以正己烷为溶剂,配制标准溶液。

辣木籽油皂化:向 250 mL 圆底烧瓶中加入 50 g 辣木籽油,加入 50 mL 20% 的 KOH - 乙醇溶液,80 °C 水浴加热回流 2 h,加热期间不时摇动,使其皂化后,取下烧瓶备用。

混合脂肪酸制备:用 10% 的稀硫酸溶液将皂化液 pH 调至 2~3,于分液漏斗中静置分层,将下层溶液排出,留取上清液,用 60 °C 热水多次洗涤上清液直至中性备用。

脂肪酸甲酯制备:按料液比 1:3 向混合脂肪酸中加入甲醇,于水浴中混合均匀后,按料液比 1:0.5 缓慢滴入浓硫酸,于 60 °C 恒温水浴中搅拌反应 30 min,按 1:2 的比例加入正己烷溶解,用分液漏斗分出下层溶液,多次用水洗涤上层溶液并过无水 Na₂SO₄ 漏斗除水,经 0.22 μm 微孔滤膜过滤,得供试品溶液,进气相色谱仪分析。

气相色谱条件:HP-88 毛细管柱(60 mm × 250 μm × 0.2 μm);柱初始温度 125 °C,保持 2 min,以 8 °C/min 升到 145 °C,保持 26 min,以 2 °C/min 升到 220 °C,保持 1 min;进样口温度 250 °C;分流比 50:1;氢火焰离子化检测器(FID)温度 240 °C;载气为高纯氮气,流量 4 mL/min;氢气流量 40 mL/min;空气流量 450 mL/min;进样量 1.0 μL。

以标准品的保留时间定性,按峰面积归一化法定量。

1.2.3 低温结晶法纯化辣木籽油中的神经酸

辣木籽油经皂化、酸化(方法同 1.2.2)得到混合脂肪酸。于 50 mL 离心管中加入 1 g 混合脂肪酸,再加入一定体积的丙酮 - 无水乙醇(体积比 1:1)结晶溶剂,于 50 °C 水浴条件下使混合脂肪酸在结晶溶剂中充分溶解至无沉淀,冷却至室温后置于一定温度的低温冰箱中结晶一定时间。取出样品,尽快抽滤,留取上层结晶部分,即为神经酸产品。取神经酸产品于分液漏斗中用 50 °C 的温水充分洗涤,除去洗涤液,离心回收洗涤液中的油相,按 1.2.2 方法经甲酯化后,上样分析神经酸含量。

1.2.4 数据处理

每批样品至少做 3 次平行实验,结果以“平均值 ± 标准差”表示。

2 结果与分析

2.1 提取方法对辣木籽油得率及神经酸含量的影响

提取方法对辣木籽油得率及神经酸含量的影响

见图 1。由图 1 可知,3 种提取方法所得辣木籽油中神经酸含量大小依次为低温压榨法(0.88%) > 索氏抽提法(0.76%) > 超临界 CO₂ 萃取法(0.34%),索氏抽提法和超临界 CO₂ 萃取法得到的辣木籽油中神经酸含量较低的原因有待进一步分析。邵婷等^[18]的研究结果显示,不同提取方法(低温压榨法、溶剂浸提法、水酶法、超临界 CO₂ 萃取法)得到的脂肪酸含量有所差异,可能是不同提取方法的温和性影响其稳定性。3 种提取方法所得辣木籽油得率大小依次为索氏抽提法(32.90%) > 低温压榨法(25.20%) > 超临界 CO₂ 萃取法(22.60%),索氏抽提法虽然辣木籽油得率高,但所得油脂中有溶剂残留且其工艺复杂、成本高,而低温压榨法所得辣木籽油中神经酸含量最高,且操作简单、不使用试剂、成本低,因此选取低温压榨法提取辣木籽油。

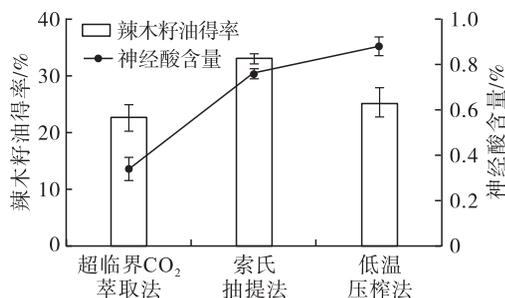


图 1 提取方法对辣木籽油得率和神经酸含量的影响

2.2 低温结晶法纯化辣木籽油中神经酸的单因素实验

2.2.1 料液比对神经酸含量的影响

在结晶温度 -20 °C,结晶时间 2 h,料液比(混合脂肪酸与结晶溶剂质量体积比)1:3、1:4、1:5、1:6、1:7 条件下,考察料液比对神经酸含量的影响,结果见图 2。

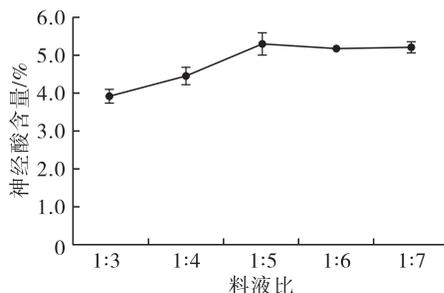


图 2 料液比对神经酸含量的影响

由图 2 可知:在料液比 1:3 ~ 1:5 时,神经酸含量随料液比的减小呈上升趋势,可能是料液比过大时,体系的黏度大致使神经酸分离不完全,而随着溶剂用量的增加,体系黏度减小,饱和脂肪酸析出,部分单不饱和脂肪酸也慢慢析出,神经酸含量逐渐增加;当料液比为 1:5 时,神经酸含量达最高,为

5.29% ;当料液比小于 1:5 后,神经酸含量变化趋于稳定,可能是绝大部分饱和脂肪酸、单不饱和脂肪酸已经析出,而多不饱和脂肪酸则稳定地溶解在有机溶剂中,这与罗庆华等^[19]的研究结果一致。过低的料液比所需溶剂多,造成资源浪费,所以选择料液比 1:5 为最佳。

2.2.2 结晶温度对神经酸含量的影响

在料液比 1:5,结晶时间 2 h,结晶温度分别为 -5、-10、-15、-20、-25 °C 条件下,考察结晶温度对神经酸含量的影响,结果见图 3。

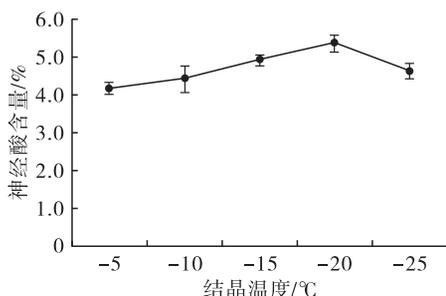


图3 结晶温度对神经酸含量的影响

不同脂肪酸在同一溶剂中的溶解度不同,其结晶速度也不相同^[20]。由图 3 可知,神经酸含量随结晶温度的降低整体呈上升趋势,在 -20 °C 时达到最高,为 5.36%,可能是随着结晶温度的降低,饱和脂肪酸和单不饱和脂肪酸在溶液中的溶解度降低,致使析出的结晶体增多;当结晶温度低于 -20 °C 时,随着温度的降低,神经酸含量下降,可能是随着结晶温度的持续降低,多不饱和脂肪酸也被逐渐结晶出来,使得神经酸含量有所下降,这与林秀椿等^[17]的研究结果相似。因此,选择结晶温度 -20 °C 为最佳。

2.2.3 结晶时间对神经酸含量的影响

在料液比 1:5,结晶温度 -20 °C,结晶时间分别为 0.5、1、2、3、4 h 条件下,考察结晶时间对神经酸含量的影响,结果见图 4。

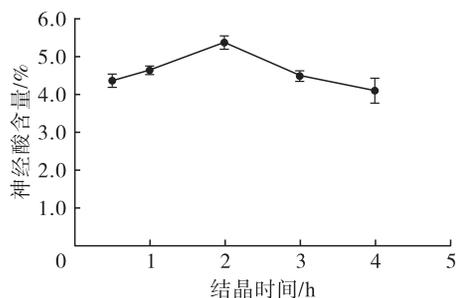


图4 结晶时间对神经酸含量的影响

由图 4 可知:神经酸含量随结晶时间的延长呈先升高后降低的趋势,当结晶时间为 0.5 ~ 2 h 时,神经酸含量缓慢上升,在 2 h 时达到最高,为

5.36%,说明结晶时间较短时,结晶反应还未进行完全;结晶时间大于 2 h 时,神经酸含量呈缓慢下降趋势,可能是随着结晶时间的继续延长,多不饱和脂肪酸依次析出,而单不饱和脂肪酸已析出完全,致使神经酸含量降低,该结果与王晓玲等^[21]的分析结果相似,并且结晶时间过长会增加能耗,导致生产成本增加。因此,选择结晶时间 2 h 为宜。

2.3 低温结晶法纯化辣木籽油中神经酸的响应面优化实验

2.3.1 响应面实验设计及结果

在单因素实验基础上,利用响应面实验设计,以神经酸含量为响应值,选取料液比(A)、结晶温度(B)、结晶时间(C)3个因素,进行三因素三水平的实验设计,优化辣木籽油中神经酸的纯化工艺。响应面实验因素及水平见表 1,响应面实验设计及结果见表 2。

表1 响应面实验因素及水平

水平	A 料液比	B 结晶温度/°C	C 结晶时间/h
1	1:4	-15	1
0	1:5	-20	2
-1	1:6	-25	3

表2 响应面实验设计及结果

实验号	A	B	C	Y 神经酸含量/%
1	1	1	0	5.043 ± 0.124
2	1	-1	0	5.145 ± 0.132
3	1	0	1	5.256 ± 0.201
4	-1	1	0	4.800 ± 0.178
5	0	0	0	5.337 ± 0.153
6	1	0	-1	5.051 ± 0.214
7	0	1	-1	4.848 ± 0.045
8	0	0	0	5.326 ± 0.159
9	0	1	1	4.952 ± 0.158
10	-1	0	-1	4.808 ± 0.243
11	0	0	0	5.295 ± 0.214
12	-1	0	1	4.892 ± 0.132
13	0	-1	-1	4.950 ± 0.165
14	0	0	0	5.341 ± 0.025
15	-1	-1	0	4.902 ± 0.413
16	0	-1	1	5.105 ± 0.213
17	0	0	0	5.334 ± 0.335

2.3.2 显著性检验

利用 Design - Expert 8.0.6 软件,对表 2 数据进行二次多项式回归拟合,得到回归模型方程为 $Y = 5.33 + 0.15A - 0.064B + 0.065C - 0.03AC - 0.013BC - 0.16A^2 - 0.20B^2 + 0.17C^2$ 。模型的方差分析如表 3 所示。

表3 模型的方差分析

方差来源	平方和	自由度	均方	<i>F</i>	<i>p</i>
模型	0.65	12	0.05	157.90	<0.000 1 **
<i>A</i>	0.09	1	0.09	269.10	<0.000 1 **
<i>B</i>	0.02	1	0.02	47.49	0.002 3 **
<i>C</i>	0.02	1	0.02	48.99	0.002 2 **
<i>AB</i>	0.00	1	0.00	0.00	1.000 0
<i>AC</i>	3.660E-003	1	3.660E-003	10.69	0.030 8 *
<i>BC</i>	6.503E-004	1	6.503E-004	1.90	0.240 2
<i>A</i> ²	0.11	1	0.11	307.27	<0.000 1 **
<i>B</i> ²	0.16	1	0.16	472.78	<0.000 1 **
<i>C</i> ²	0.12	1	0.12	342.23	<0.000 1 **
失拟项	2.268E-003	3	7.559E-004	2.21	0.229 6
纯误差	1.369E-003	4	3.423E-004		
总方差	0.65	16			

注：* 表示差异显著, $p < 0.05$; ** 表示差异极显著, $p < 0.01$

从表3可以看出,回归模型 F 值为 157.90, $p < 0.01$,表明二次多元回归模型极显著。模型的相关系数 (R^2) 为 0.997 9,表明方程的拟合度和可信度高,可用于预测神经酸含量。变异系数(CV)表示实验本身的精度,CV 越小,实验的可靠性越高。本实验中 CV 为 0.36%,表明实验操作的可信度极高,具有实用性指导意义。一次项 A 、 B 、 C ,二次项 A^2 、 B^2 、 C^2 的影响极显著 ($p < 0.01$),交互项 AC 影响显著,其他因素不显著。根据 F 值可知,各个因素对神经酸含量影响的大小顺序为 A (料液比) $> C$ (结晶时间) $> B$ (结晶温度)。

2.3.3 最佳条件的确定和回归模型验证

通过响应面实验得到辣木籽油中神经酸纯化的最佳工艺条件为料液比 1:4.2、结晶温度 -20.8°C 、结晶时间 2.32 h,在此条件下神经酸含量理论值可达 5.37%。结合实际将最佳工艺条件调整为料液比 1:4.2、结晶温度 -21°C 、结晶时间 2.3 h,在此条件下进行 5 组平行实验验证,得到神经酸平均含量为 $(5.36 \pm 0.01)\%$,与理论值非常接近,说明通过此方法得到的模型参数准确可靠,最佳工艺可行性高。

3 结论

本实验以辣木籽为原料,采用低温压榨法、超临界 CO_2 萃取法、索氏抽提法提取辣木籽油,结果表明,低温压榨法提取的辣木籽原油中神经酸含量最高,达到 0.88%;再以辣木籽油为原料制备混合脂肪酸,通过低温结晶法纯化辣木籽油中的神经酸,通过单因素实验和响应面实验得到最佳纯化工艺条件

为料液比(混合脂肪酸与结晶溶剂质量体积比) 1:4.2、结晶温度 -21°C 、结晶时间 2.3 h,在此条件下所得产品中神经酸含量达到 $(5.36 \pm 0.01)\%$,相比辣木籽原油中神经酸含量提升了 5.1 倍。通过低温压榨法提取辣木籽油,设备简单、易操作、成本低,所得油脂神经酸含量较高,再通过低温结晶法进行纯化能够获得神经酸含量较高的产品,可为后续辣木籽油的功能性应用提供科学依据。

参考文献:

- [1] KOU X, LI B, OLAYANJU J B, et al. Nutraceutical or pharmacological potential of *Moringa oleifera* Lam. [J/OL]. *Nutrients*, 2018, 10(3): 343 [2022-09-21]. <https://doi.org/10.3390/nu10030343>.
- [2] 王宏,刘月,饶露,等.辣木籽提取物对高脂血症小鼠血脂及肝脏的影响[J].*中国油脂*,2022,47(7):66-70.
- [3] LEONE A, SPADA A, BATTEZZATI A, et al. *Moringa oleifera* seeds and oil: characteristics and uses for human health[J/OL]. *Int J Mol Sci*, 2016, 17(12): 2141 [2022-09-21]. <https://doi.org/10.3390/ijms17122141>.
- [4] 刘威良,徐晴芳,高秀,等.辣木籽油对人小脑颗粒细胞氯离子通道的影响[J].*甘肃农业大学学报*,2022,57(4):177-183.
- [5] 朱景山.特色解酒饮品解酒效果分析及其酒店推广模式研究[J].*食品研究与开发*,2017,38(7):174-177.
- [6] 林恋竹,朱启源,赵谋明.辣木籽抗氧化肽的制备及其对氧化损伤红细胞的保护作用[J].*食品科学*,2019,40(7):40-46.
- [7] 余建兴.辣木油提取技术及对大鼠辅助降血脂作用的研究[D].昆明:昆明医学院,2009.
- [8] 朱宝生,陈军,余远江,等.辣木有效成分及其开发利用研究进展[J].*轻工科技*,2018,34(7):19-21,23.
- [9] ANWAR F, BHANGER M I. Analytical characterization of *Moringa oleifera* seed oil grown in temperate regions of Pakistan[J]. *J Agric Food Chem*, 2003, 51(22): 6558-6563.
- [10] TU X, WAN J, XIE Y, et al. Lipid analysis of three special nervonic acid resources in China[J]. *Oil Crop Sci*, 2020, 5(4): 180-186.
- [11] 宝日玛.神经酸酿酒酵母细胞菌株的构建[D].呼和浩特:内蒙古师范大学,2018.
- [12] 夏俊杰.高产神经酸工程菌的构建及发酵条件的优化[D].北京:北京化工大学,2020.
- [13] LIU F, WANG P, XIONG X, et al. A review of nervonic acid production in plants: prospects for the genetic engineering of high nervonic acid cultivars plants[J/OL]. *Front Plant Sci*, 2021, 12: 626625 [2022-09-21]. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.626625>.

(下转第44页)

参考文献:

- [1] MAKI K C, LAWLESS A L, KELLEY K M, et al. Corn oil improves the plasma lipoprotein lipid profile compared with extra-virgin olive oil consumption in men and women with elevated cholesterol: results from a randomized controlled feeding trial[J]. *J Clin Lipidol*, 2015, 9(1): 49-57.
- [2] 王旭, 赵月, 李婷婷, 等. 天然抗氧化剂对玉米油稳定性的影响[J]. *食品科学*, 2018, 39(16): 7-12.
- [3] ZHANG Z, WANG Y, MA X, et al. Characterisation and oxidation stability of monoacylglycerols from partially hydrogenated corn oil[J]. *Food Chem*, 2015, 173: 70-79.
- [4] 杨洋, 高航. 玉米油的营养功能及提取工艺研究[J]. *江苏调味副食品*, 2016, 33(4): 5-8.
- [5] HAN C, LIU Q, JING Y, et al. Ultrasound-assisted aqueous enzymatic extraction of corn germ oil: analysis of quality and antioxidant activity[J]. *J Oleo Sci*, 2018, 67(6): 745-754.
- [6] JIA Y, KUMAR D, WINKLER-MOSER J K, et al. Recoveries of oil and hydrolyzed sugars from corn germ meal by hydrothermal pretreatment: a model feedstock for lipid-producing energy crops[J]. *Energies*, 2020, 13: 91-103.
- [7] YILMAZ S, GUNESER E, AYDENIZ B. Cold pressed versus refined winterized corn oils: quality, composition and aroma[J/OL]. *Grasas Aceites*, 2017, 68(2): 194 [2022-11-10]. <https://doi.org/10.3989/GYA.1168162>.
- [8] AKINOSO R, ABOABA S A, OLAYANJU T. Effects of moisture content and heat treatment on peroxide value and oxidative stability of un-refined sesame oil[J]. *Afr J Food Agric Nutr Dev*, 2010, 10(10): 4268-4285.
- [9] SENEVIRATNE R W, BELTRANENA E, NEWKIRK R W, et al. Processing conditions affect nutrient digestibility of cold-pressed canola cake for grower pigs[J]. *J Anim Sci*, 2011, 89(8): 2452-2461.
- [10] 肖怀秋, 李玉珍, 林亲录, 等. 响应面优化冷榨花生粕酶法制备多肽工艺的研究[J]. *中国粮油学报*, 2013, 28(9): 50-55.
- [11] COFRADES S, SERRANO A, AYO J, et al. Characteristics of meat batters with added native and preheated defatted walnut[J]. *Food Chem*, 2008, 107(4): 1506-1514.
- [12] 邓博心. 预烘烤对花生水酶法制油油脂释放行为及品质的影响[D]. 江苏无锡: 江南大学, 2018.
- [13] 肖小年, 桂静芬, 刘唤, 等. 冷榨法制备紫苏子油及其脂肪酸组分分析[J]. *中国食品学报*, 2018, 18(2): 183-190.
- [14] 赵月, 江连洲, 韩翠萍, 等. 复配生物酶法提取黑米花色苷工艺研究[J]. *中国食品学报*, 2017, 17(10): 99-106.
- [15] DICKEY L C, KURANTZ M J, PARRIS N. Oil separation from wet-milled corn germ dispersions by aqueous oil extraction and aqueous enzymatic oil extraction[J]. *Ind Crop Prod*, 2008, 27(3): 303-307.
- [16] 姜欢笑, 蒲彪, 周婷. 响应面法同步优化花椒冷榨饼中蛋白质和油脂的提取工艺[J]. *中国油脂*, 2015, 40(3): 15-19.
- [17] EVANGELISTA R L, ISBELL T A, CERMAK S C. Extraction of pennycress (*Thlaspi arvense* L.) seed oil by full pressing[J]. *Ind Crop Prod*, 2012, 37(1): 76-81.
- [18] 潘小平, 刘浦泳, 王国通. ZY338型螺旋榨油机的创新与研制[J]. *中国油脂*, 2009, 34(7): 55-58.
- [19] EZEHO, GORDON M H, NIRANJAN K. Enhancing the recovery of tiger nut (*Cyperus esculentus*) oil by mechanical pressing: moisture content, particle size, high pressure and enzymatic pre-treatment effects[J]. *Food Chem*, 2016, 194: 354-361.
- [20] 朱秀清, 曾剑华, 房媛媛, 等. 纤维素酶结合碱性蛋白酶提高冷榨大豆出油率的工艺优化[J]. *中国油脂*, 2019, 44(5): 13-17.
- [21] 王志军, 朱佳伟. 酶法辅助适温压榨制取红花籽油工艺技术[J]. *中国油脂*, 2017, 42(3): 24-29.
- [14] 魏伊楚, 樊金拴, 徐丹. 元宝枫油成分、加工工艺及功能性研究进展[J]. *中国油脂*, 2018, 43(1): 34-38.
- [15] 葛智勤, 金文华, 黄楠, 等. 低温结晶法纯化元宝枫籽油中神经酸[J]. *中国油脂*, 2021, 46(4): 99-102.
- [16] 付一笑. 蒜头果光合生理及其种子中神经酸的提取纯化[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2020.
- [17] 林秀椿, 王建中, 武建云. 荆条籽油的理化性质和神经酸的分离提纯[J]. *中国油脂*, 2008, 33(10): 37-39.
- [18] 邵婷, 覃小丽, 钟金锋, 等. 辣木籽油的提取方法及其应用[J]. *食品与发酵工业*, 2019, 45(17): 286-293.
- [19] 罗庆华, 宋英杰, 王海磊, 等. 低温结晶法富集鳃鱼内脏油中多不饱和脂肪酸[J]. *中国油脂*, 2015, 40(10): 36-39.
- [20] 许宁侠, 崔宁, 王培, 等. 响应面法优化元宝枫种仁油中神经酸的分离纯化工艺[J]. *中药材*, 2022, 45(6): 1440-1443.
- [21] 王晓玲, 杨青, 刘高强, 等. 低温结晶法富集马尾松毛虫幼虫中的多不饱和脂肪酸[J]. *食品与发酵工业*, 2010, 36(9): 70-74.

(上接第30页)