

# 天然抗氧化剂对亚麻籽甘油二酯油氧化稳定性的影响

姚怡心<sup>1</sup>, 刘 莹<sup>1</sup>, 李志刚<sup>2</sup>, 蓝东明<sup>1</sup>, 王卫飞<sup>3</sup>, 王永华<sup>1,4</sup>

(1. 华南理工大学 食品科学与工程学院, 广州 510640; 2. 华南理工大学 生物科学与工程学院, 广州 510640;  
3. 广东省农业科学院 蚕业与农产品加工研究所, 广州 510640; 4. 广东优酶生物制造研究院, 广东 佛山 528226)

**摘要:**为提高亚麻籽甘油二酯油的氧化稳定性,研究了抗坏血酸棕榈酸酯、迷迭香提取物和维生素E及其组合对亚麻籽甘油二酯油的抗氧化作用。以氧化诱导时间为响应值,在单因素实验基础上,通过响应面分析确定最优的抗氧化剂组合。考察了优化的抗氧化剂组合对亚麻籽甘油二酯油高温加热时反式脂肪酸含量的影响。结果表明:相较于单一的维生素E、迷迭香提取物和抗坏血酸棕榈酸酯,三者组合能显著提高亚麻籽甘油二酯油的氧化稳定性;最优抗氧化剂组合为抗坏血酸棕榈酸酯添加量84 mg/kg、迷迭香提取物添加量405 mg/kg、维生素E添加量1 808 mg/kg,在此条件下亚麻籽甘油二酯油的氧化诱导时间为11.13 h,是空白对照的6.79倍;该抗氧化剂组合能抑制油中反式脂肪酸的生成。天然抗氧化剂绿色、安全,可有效提高亚麻籽甘油二酯油的氧化稳定性。

**关键词:**亚麻籽甘油二酯油;天然抗氧化剂;氧化诱导时间;反式脂肪酸

中图分类号:TS201.6;TS225.6 文献标识码:A 文章编号:1003-7969(2022)12-0046-06

## Effects of natural antioxidants on oxidative stability of flaxseed – based diacylglycerol oil

YAO Yixin<sup>1</sup>, LIU Xuan<sup>1</sup>, LI Zhigang<sup>2</sup>, LAN Dongming<sup>1</sup>,  
WANG Weifei<sup>3</sup>, WANG Yonghua<sup>1,4</sup>

(1. College of Food Sciences and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;  
2. School of Bioscience and Bioengineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;  
3. Sericultural and Agri – food Research Institute, Guangdong Academy of Agricultural Sciences, Guangzhou 510640, China; 4. Guangdong Youmei Institute of Intelligent Bio – manufacturing, Foshan 528226, Guangdong, China)

**Abstract:** In order to improve the oxidative stability of flaxseed – based diacylglycerol oil (FDO), the antioxidant effects of ascorbate palmitate, rosemary extract, vitamin E and their combination on the FDO were studied. With oxidation induction time as response value, on the basis of single factor experiment, response surface methodology was used to determine the optimal antioxidant combination. The optimized antioxidant combination was applied to the high temperature heating of FDO to investigate its effect on the content of *trans* fatty acids. The results showed that compared with single antioxidant, the combination of ascorbate palmitate, rosemary extract and vitamin E could improve the oxidative stability of FDO significantly. The optimal antioxidant combination was obtained as follows: ascorbate palmitate 84 mg/kg,

rosemary extract 405 mg/kg and vitamin E 1 808 mg/kg. Under these conditions, the oxidation induction time of FDO was 11.13 h, which was 6.79 times of the blank control. The antioxidant combination could inhibit the formation of *trans* fatty acids. Natural antioxidants are green and safe, and can effectively improve the oxidative stability of FDO.

收稿日期:2021-12-24;修回日期:2022-01-10

基金项目:国家重点研发计划(2019YFD1002403);国家自然科学基金(31930084);国家杰出青年科学基金(31725022);广东省科技计划项目(2019A050503002);佛山市科技创新项目(FSOAA-KJ919-4402-0013)

作者简介:姚怡心(1997),女,硕士研究生,研究方向为油脂工程(E-mail)yaoyixin2339@163.com。

通信作者:王永华,教授(E-mail)yonghw@scut.edu.cn。

**Key words:** flaxseed-based diacylglycerol oil; natural antioxidant; oxidation induction time; *trans* fatty acid

亚麻籽甘油二酯油富含 $\alpha$ -亚麻酸,其含量超过40%<sup>[1]</sup>。 $\alpha$ -亚麻酸作为人体必需脂肪酸,在提高记忆力、保护视力、降血脂、降血压等方面功效显著<sup>[2]</sup>,应用价值较高。研究表明, $\alpha$ -亚麻酸甘油二酯(ALA-DAG)可增加人体脂肪氧化和能量消耗,长期食用能够减轻体质量<sup>[3-5]</sup>。

亚麻籽甘油二酯油的不饱和脂肪酸含量在85%以上<sup>[1]</sup>,而不饱和脂肪酸在加工储藏过程中极易氧化,尤其在光、热、氧、金属离子等因素的影响下易产生自由基,进而产生氢过氧化物和二级氧化产物醛、酮等有害物质,从而造成油脂营养价值下降<sup>[6]</sup>。因此,如何有效控制亚麻籽甘油二酯油的氧化对于其在食品工业中的应用具有重要意义。

在油脂工业中,添加抗氧化剂是延缓油脂氧化最常用的方法。抗氧化剂可通过清除自由基、氧、过氧化氢,猝灭单线态氧或螯合金属离子等途径来抑制油脂氧化<sup>[7]</sup>。根据来源不同可分为天然抗氧化剂和合成抗氧化剂,其中合成抗氧化剂如特丁基对苯二酚(TBHQ)、丁基羟基苯甲醚(BHA)和丁基羟基甲苯(BHT)等,被认为可能致畸、致癌,并可能引起一些慢性疾病<sup>[8]</sup>,而天然抗氧化剂绿色安全且具有较好的抗氧化性,是近年来研究的热点,如:孙逸雯等<sup>[9]</sup>使用维生素E和迷迭香提取物延缓亚麻籽油的氧化;党玲等<sup>[10]</sup>通过复配合成抗氧化剂和天然抗氧化剂延长室温储存亚麻籽油的氧化稳定时间。此外,刘李春等<sup>[11]</sup>研究发现,抗氧化剂的添加能够抑制热加工过程中反式脂肪酸的生成,且不同抗氧化剂的抑制作用存在差异。

目前针对亚麻籽油的抗氧化研究较多,对亚麻籽甘油二酯油的抗氧化研究较少,因此本文根据抗氧化剂的不同作用机制和在脂质体系中溶解度的差异,选择3种天然抗氧化剂(抗坏血酸棕榈酸酯、迷迭香提取物和维生素E),研究这3种抗氧化剂及其组合对亚麻籽甘油二酯油氧化稳定性的影响,通过响应面分析确定最优组合,最后研究该组合对亚麻籽甘油二酯油高温加热时产生反式脂肪酸的抑制作用,以期为提高亚麻籽甘油二酯油的氧化稳定性提供理论基础。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验材料

#### 1.1.1 原料与试剂

不含抗氧化剂的亚麻籽甘油二酯油(DAG含量

80%),参考郑平玉等<sup>[12]</sup>的方法制备;抗坏血酸棕榈酸酯,河北兴润生物科技股份有限公司;迷迭香提取物,北京北方霞光食品添加剂有限公司;维生素E,宁波大红鹰生物工程股份有限公司。

异辛烷、甲醇,色谱纯;氢氧化钾、硫酸氢钠等均为分析纯。

#### 1.1.2 仪器与设备

892 Professional Rancimat 油脂氧化稳定性分析仪,瑞士万通公司;8860型气相色谱仪,美国安捷伦公司;电子天平,上海舜宇恒平科学仪器有限公司;恒温磁力搅拌器,巩义市予华仪器有限责任公司。

### 1.2 实验方法

#### 1.2.1 油样配制及高温加热处理

分别配制不同抗氧化剂添加量的亚麻籽甘油二酯油样品。根据GB 2760—2014中的限量要求(抗坏血酸棕榈酸酯和迷迭香提取物分别为200 mg/kg和700 mg/kg,维生素E按需添加),设置单一抗氧化剂中抗坏血酸棕榈酸酯和迷迭香提取物的添加量分别为0~200 mg/kg和0~700 mg/kg,参考文献[13]方法设置维生素E添加量为0~2 000 mg/kg。另外,设置抗坏血酸棕榈酸酯、迷迭香提取物、维生素E添加量分别为200、700、200 mg/kg进行组合配比。

准确称取10.0 g油样于烧杯中,在220℃恒温磁力搅拌油浴锅中加热处理2 h,冷却至室温,取出油样并在-20℃储存。

#### 1.2.2 基本理化指标的测定

酸值测定参考GB 5009.229—2016中的第一法,过氧化值测定参考GB 5009.227—2016中的第一法。

#### 1.2.3 脂肪酸组成及反式脂肪酸含量测定

亚麻籽甘油二酯油中脂肪酸组成及反式脂肪酸含量参考GB 5009.257—2016进行测定。

取60 mg样品,加入4 mL异辛烷溶解后,与0.2 mL 2 mol/L氢氧化钾-甲醇溶液反应。涡旋混匀1 min后,静置至试管内澄清。加入1 g硫酸氢钠后涡旋混匀30 s,于4 000 r/min下离心5 min,上清液经0.45  $\mu$ m滤膜过滤后待测。

气相测定条件:火焰离子化检测器;CP-Sil 88色谱柱(60 m $\times$ 0.25 mm $\times$ 0.20  $\mu$ m);进样量1  $\mu$ L;进样口温度260℃;检测器温度280℃;升温程序为初温180℃,保持5 min,以2℃/min的速度升至220℃,再以5℃/min的速度升至240℃,保持10 min。

### 1.2.4 氧化诱导时间测定

参考 GB/T 21121—2007, 采用 Rancimat 法测定氧化诱导时间。

准确称取 3.0 g 样品于测试管中, 在空气流量为 10 L/min、加速氧化温度为 100 ℃ 的条件下, 使用油脂氧化稳定性分析仪测定样品的氧化诱导时间, 以此评价亚麻籽甘油二酯油的氧化稳定性。其中氧化诱导时间为 Stabnet 软件对电导率-时间曲线进行二阶求导后得出的最大值。

### 1.2.5 数据处理与分析

采用 GraphPad Prism 6 对实验数据进行分析 and 制图, 使用 Excel 对实验数据进行显著性分析, 采用 Design-Expert 8.0.6 软件进行响应面设计、分析及方差分析。

## 2 结果与讨论

### 2.1 亚麻籽甘油二酯油基本理化指标和脂肪酸组成

亚麻籽甘油二酯油的酸值和过氧化值见表 1。由表 1 可知, 亚麻籽甘油二酯油的酸值和过氧化值均处于 GB 2716—2018 规定的范围内。

表 1 亚麻籽甘油二酯油的基本理化指标

酸值 (KOH)/(mg/kg)	过氧化值/(g/100 g)
0.13 ± 0.01	0.048 ± 0.002

对亚麻籽甘油二酯油的脂肪酸组成进行测定, 结果如图 1 所示。

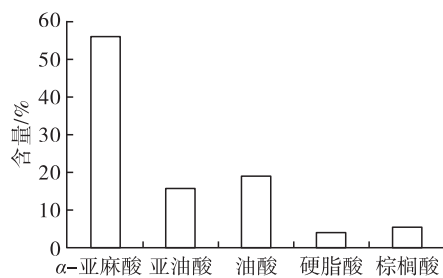


图 1 亚麻籽甘油二酯油脂肪酸组成

由图 1 可知, 亚麻籽甘油二酯油中含有丰富的 α-亚麻酸, 占比达到 55.49%, 其次是油酸 (18.84%) 和亚油酸 (15.96%), 不饱和脂肪酸含量达 85% 以上, 与刘艳平等<sup>[1]</sup>的研究结果一致。不饱和脂肪酸极易氧化并产生有害物质<sup>[6]</sup>, 因此富含不饱和脂肪酸的亚麻籽甘油二酯油不稳定, 需添加抗氧化剂提高其氧化稳定性。

### 2.2 单一抗氧化剂对亚麻籽甘油二酯油氧化稳定性的影响

研究了单一抗氧化剂对亚麻籽甘油二酯油氧化稳定性的影响, 结果如图 2 所示。

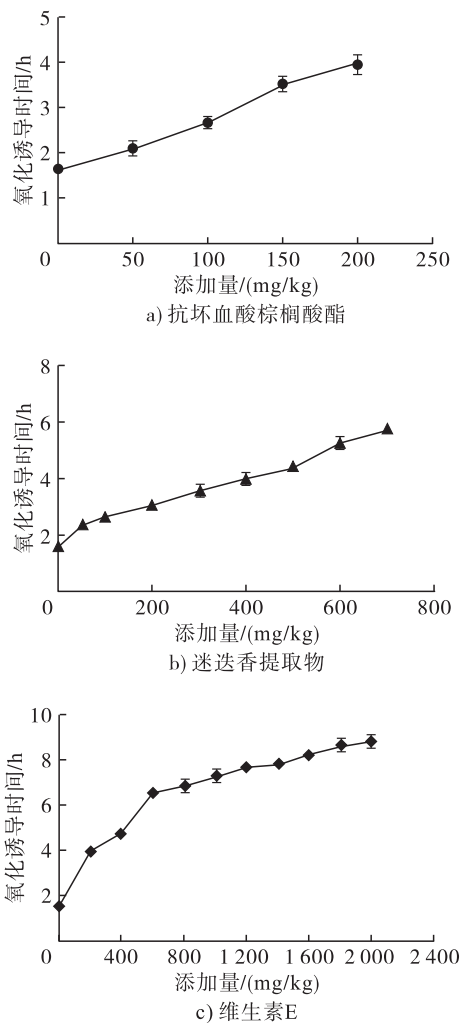


图 2 不同抗氧化剂对亚麻籽甘油二酯油氧化稳定性的影响

由图 2 可知, 加入抗氧化剂后, 亚麻籽甘油二酯油的氧化诱导时间均提高, 表明抗氧化剂的添加对亚麻籽甘油二酯油的氧化起到抑制作用。在添加量为 200 mg/kg 时, 3 种抗氧化剂的抗氧化能力有所差异, 其中维生素 E 的抗氧化效果最好, 其氧化诱导时间比未添加抗氧化剂时提高了 2.37 h, 迷迭香提取物的抗氧化效果最差, 其氧化诱导时间比未添加抗氧化剂时仅提高 0.92 h。此外, 在实验浓度范围内, 亚麻籽甘油二酯油的氧化稳定性均随抗氧化剂添加量的增加而提高, 但增长趋势逐渐减缓。有研究指出抗氧化剂在适当的浓度范围内, 能够有效延缓油脂的氧化<sup>[14]</sup>, 但高浓度的抗氧化剂可能会加速油脂的氧化<sup>[15]</sup>, 由此说明本实验设计的抗氧化剂浓度范围较合适。

### 2.3 不同抗氧化剂组合对亚麻籽甘油二酯油氧化稳定性的影响

研究了 3 种抗氧化剂不同组合对比对亚麻籽甘油二酯油氧化稳定性的影响, 结果如表 2 所示。

表2 不同抗氧化剂组合对亚麻籽甘油二酯油氧化稳定性的影响

组别	添加量/(mg/kg)			氧化诱导时间/h
	抗坏血酸棕榈酸酯	迷迭香提取物	维生素 E	
1	-	-	-	1.64 ± 0.03 <sup>a</sup>
2	200	-	-	3.69 ± 0.04 <sup>b</sup>
3	-	-	200	4.01 ± 0.06 <sup>c</sup>
4	-	700	-	5.72 ± 0.05 <sup>e</sup>
5	200	-	200	5.20 ± 0.08 <sup>d</sup>
6	200	700	-	6.24 ± 0.10 <sup>f</sup>
7	-	700	200	7.51 ± 0.05 <sup>g</sup>
8	200	700	200	9.34 ± 0.12 <sup>h</sup>

注:同列不同字母表示数据间存在显著性差异( $p < 0.01$ )

由表2可知,3种抗氧化剂组合(组合5~8)后的氧化诱导时间均比空白对照组(组合1)长,与相应的单一抗氧化剂(组合2~4)的组别相比,其氧化诱导时间也显著延长。结果表明,抗坏血酸棕榈酸酯、迷迭香提取物和维生素E的组合能够显著提高亚麻籽甘油二酯油的氧化稳定性,但3种抗氧化剂的最优组合配比需进一步优化。

#### 2.4 响应面法优化抗氧化剂组合

在单因素实验的基础上,采用 Optimal 设计对抗氧化剂组合进行优化,使用 Design - Expert 8.0.6 软件进行响应面设计及分析。以抗坏血酸棕榈酸酯添加量(A)、迷迭香提取物添加量(B)和维生素E添加量(C)为自变量,亚麻籽甘油二酯油的氧化诱导时间(Y)为响应值,根据 GB 2760—2014 的添加剂使用规范,设定限制条件为  $A/200 + B/700$  在 0~1 之间,响应面实验因素水平见表3,响应面实验设计及结果见表4。

表3 响应面实验因素水平 mg/kg

水平	A	B	C
-1	0	0	0
1	200	700	2 000

表4 响应面实验设计与结果

实验号	A/(mg/kg)	B/(mg/kg)	C/(mg/kg)	Y/h
1	0	315.00	580.00	6.43
2	115.43	296.00	1 070.00	10.08
3	100.00	59.50	100.00	3.12
4	100.00	59.50	100.00	3.22
5	100.00	0	2 000.00	9.64
6	40.00	0	1 000.00	7.08
7	0	700.00	2 000.00	10.27
8	0	350.00	1 600.00	8.92

续表4

实验号	A/(mg/kg)	B/(mg/kg)	C/(mg/kg)	Y/h
9	200.00	0	0	3.75
10	0	350.00	1 600.00	8.79
11	0	700.00	385.20	8.21
12	84.28	405.00	2 000.00	10.82
13	115.43	296.00	1 070.00	9.92
14	81.08	416.20	0	5.76
15	0	0	2 000.00	8.91
16	40.00	0	1 000.00	6.77
17	0	0	0	1.72
18	185.00	35.00	1 000.00	8.55
19	200.00	0	2 000.00	10.56
20	0	315.00	580.00	5.78

对表4数据进行回归拟合,得到各因素与响应值之间的回归方程: $Y = 9.81 + 2.49A + 3.29B + 2.68C + 1.59AB - 0.088AC - 0.94BC + 0.42A^2 + 0.83B^2 - 1.57C^2$ 。

为解释回归方程的有效性和显著性,对回归模型进行方差分析,结果见表5。

表5 回归模型方差分析

方差来源	平方和	自由度	均方	F	p	显著性
模型	144.58	9	16.06	313.37	<0.000 1	极显著
A	5.39	1	5.39	105.10	<0.000 1	极显著
B	8.54	1	8.54	166.58	<0.000 1	极显著
C	40.35	1	40.35	787.08	<0.000 1	极显著
AB	1.73	1	1.73	33.80	0.000 2	极显著
AC	0.04	1	0.04	0.70	0.422 8	不显著
BC	3.53	1	3.53	68.85	<0.000 1	极显著
A <sup>2</sup>	0.30	1	0.30	5.82	0.036 5	显著
B <sup>2</sup>	1.04	1	1.04	20.31	0.001 1	极显著
C <sup>2</sup>	7.32	1	7.32	142.79	<0.000 1	极显著
残差	0.51	10	0.051			
失拟项	0.23	5	0.045	0.80	0.596 2	不显著
纯误差	0.29	5	0.057			
总离差	145.10	19				

由表5可知:模型的p值小于0.000 1,表明回归方程模型极显著,拟合精度高;失拟项p值为0.596 2,大于0.05,表明回归方程拟合较好。3个因素的一次项A、B、C,交互项AB、BC,以及二次项B<sup>2</sup>、C<sup>2</sup>对响应值影响极显著( $p < 0.01$ ),二次项A<sup>2</sup>对响应值影响显著( $p < 0.05$ ),表明抗坏血酸棕榈酸酯、迷迭香提取物和维生素E添加量对亚麻籽甘油二酯油的氧化稳定性具有显著影响。根据因素的F值大小推断3个因素对氧化诱导时间影响的主次顺序为C>B>A,即维生素E添加量对亚麻籽甘油二酯油的氧化稳定性影响最大,其次是迷迭香提取物

添加量,抗坏血酸棕榈酸酯添加量的影响最小。

对回归方程进行误差统计分析,结果如表6所示。由表6可知:判定系数为0.9965,表明本实验模型相关性较好;调整判定系数与预判判定系数较高且其差值小于0.2,表明本模型能够充分说明工艺过程;变异系数为3.05%,小于10%,表明实验的可信度和精确度高;精密度是有效信号与噪声的比值,本实验中为58.070,大于4,较合理<sup>[16]</sup>。根据上述分析,拟合的回归方程适应性较好,能够用于预测和分析抗氧化剂组合对亚麻籽甘油二酯油氧化稳定性的影响。

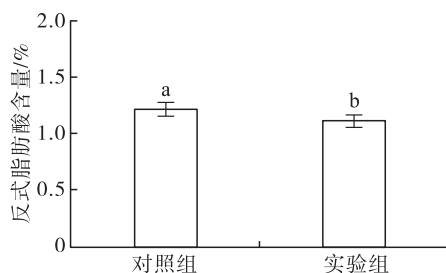
表6 回归方程误差统计分析

项目	统计值	项目	统计值
标准差	0.23	判定系数	0.9965
均值	7.42	调整判定系数	0.9933
变异系数/%	3.05	预判判定系数	0.9819
预测残差平方和	2.62	精密度	58.070

利用响应面优化得到的最优抗氧化剂组合为抗坏血酸棕榈酸酯添加量84 mg/kg、迷迭香提取物添加量405 mg/kg、维生素E添加量1808 mg/kg,在此组合配比下,预测的亚麻籽甘油二酯油氧化诱导时间为10.96 h。为验证模型的有效性,在此组合配比条件下进行3次重复性平行实验,得到亚麻籽甘油二酯油氧化诱导时间的平均值为11.13 h,与预测值接近,表明优化所得结果可靠。优化后,氧化诱导时间是空白对照的6.79倍,亚麻籽甘油二酯油的稳定性大大提高。

### 2.5 抗氧化剂对亚麻籽甘油二酯油高温下产生反式脂肪酸的影响

将优化得到的抗氧化剂组合应用于亚麻籽甘油二酯油中,在220℃下加热2 h后,测定其反式脂肪酸含量,结果见图3。



注:不同字母表示数据间具有显著性差异( $p < 0.01$ )

图3 抗氧化剂对亚麻籽甘油二酯油高温下产生反式脂肪酸的影响

高温加热过程中,在不同抗氧化剂组合或环境等因素的影响下,抗氧化剂对油脂形成反式脂肪酸的影响不同。姚梦莹等<sup>[17]</sup>研究发现,在椰子油热加

工过程中,抗氧化剂TBHQ和鼠尾草酸的加入能够抑制和延缓反式油酸和反式亚油酸的形成,而于文秀等<sup>[18]</sup>研究发现,添加复配抗氧化剂(维生素E、茶多酚、迷迭香提取物)造成调和油在煎炸过程中反式脂肪酸含量的升高。由图3可知,在高温加热后,实验组反式脂肪酸的含量较空白对照组显著减少( $p < 0.01$ ),说明在高温加热条件下,此抗氧化剂组合对反式脂肪酸的生成具有抑制作用。

### 3 结论

采用Rancimat法评估抗坏血酸棕榈酸酯、迷迭香提取物和维生素E及三者组合对亚麻籽甘油二酯油氧化稳定性的影响,结果发现,维生素E添加量对亚麻籽甘油二酯油的氧化稳定性影响最大,其次是迷迭香提取物添加量,抗坏血酸棕榈酸酯添加量的影响最小。经响应面优化得到最优抗氧化剂组合为抗坏血酸棕榈酸酯添加量84 mg/kg、迷迭香提取物添加量405 mg/kg、维生素E添加量1808 mg/kg,在此条件下亚麻籽甘油二酯油的氧化诱导时间为11.13 h。将得到的最优抗氧化剂组合添加到亚麻籽甘油二酯油中进行高温加热实验,发现其能显著降低反式脂肪酸的生成。

### 参考文献:

- [1] 刘艳丰,黄惠华. 酶催化亚麻籽甘油制备富含 $\alpha$ -亚麻酸的甘油二酯的研究[J]. 食品工业科技,2012,33(7):216-219.
- [2] 周政. 我国亚麻籽油产业发展现状及存在问题[J]. 中国油脂,2020,45(9):134-136.
- [3] ANDO Y, SAITO S, YAMANAKA N, et al. *Alpha* linolenic acid-enriched diacylglycerol consumption enhances dietary fat oxidation in healthy subjects: a randomized double-blind controlled trial [J]. J Oleo Sci, 2017, 66(2): 181-185.
- [4] BUSHITA H, ITO Y, SAITO T, et al. A 90-day repeated-dose toxicity study of dietary *alpha* linolenic acid-enriched diacylglycerol oil in rats[J]. Regul Toxicol Pharm, 2018, 97: 33-47.
- [5] SAITO S, MORI A, OSAKI N, et al. Diacylglycerol enhances the effects of *alpha*-linolenic acid against visceral fat: a double-blind randomized controlled trial [J]. Obesity, 2017, 25(10): 1667-1675.
- [6] MOHANAN A, NICKERSON M T, GHOSH S. Oxidative stability of flaxseed oil: effect of hydrophilic, hydrophobic and intermediate polarity antioxidants [J]. Food Chem, 2018, 266: 524-533.
- [7] SHAHIDI F, ZHONG Y. Lipid oxidation and improving the oxidative stability [J]. Chem Soc Rev, 2010, 39(11): 4067-4079.

(下转第69页)

取、酶解和共价色谱法富集可得到亚麻籽巯基肽。

### 参考文献:

- [1] 周政. 我国亚麻籽油产业发展现状及存在问题[J]. 中国油脂, 2020, 45(9): 134 - 136.
- [2] 深圳市诚致生物开发有限公司, 佛山科学技术学院. 一种提高亚麻籽粕中蛋白质水解度的方法: CN201910939357.9[P]. 2019 - 12 - 13.
- [3] 李赫, 张文敏, 应知伟, 等. 亚麻籽蛋白及其活性肽的研究进展[J]. 食品工业科技, 2019, 40(6): 330 - 335, 341.
- [4] 李燕青, 金军. 亚麻籽中氨基酸组成及含量的研究[J]. 食品研究与开发, 2018, 39(7): 169 - 173.
- [5] DOYEN A, UDENIGWE C C, MITCHELL P L, et al. Anti - diabetic and antihypertensive activities of two flaxseed protein hydrolysate fractions revealed following their simultaneous separation by electrodialysis with ultrafiltration membranes [J]. Food Chem, 2014, 145: 66 - 76.
- [6] TEHRANI M H H, BATAL R, KAMALINEJAD M, et al. Extraction and purification of flaxseed proteins and studying their antibacterial activities[J]. J Plant Sci, 2014, 2(1): 10 - 12.
- [7] XU Y, HALL C, WOLF - HALL C. Antifungal activity stability of flaxseed protein extract using response surface methodology[J]. J Food Sci, 2010, 73(1): 9 - 14.
- [8] 王惠敏, 李茜, 蔡甜甜, 等. 亚麻籽粕抗氧化肽制备工艺的响应面法优化[J]. 食品工业科技, 2018, 39(3): 220 - 225.
- [9] UDENIGWE C C, ADEBIYI A P, DOVEN A, et al. Low molecular weight flaxseed protein - derived arginine - containing peptides reduced blood pressure of spontaneously hypertensive rats faster than amino acid form of arginine and native flaxseed protein [J]. Food Chem, 2012, 132(1): 468 - 475.
- [10] 郑睿. 降胆固醇亚麻籽蛋白酶解肽的制备及结构表征[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2016.
- [11] 包小兰, 刘晓静, 郑睿, 等. 亚麻籽降胆固醇活性肽的酶解工艺优化及分级制备[J]. 中国油脂, 2020, 45(6): 30 - 35.
- [12] 王倩. 蜂胶黄酮对小鼠铅中毒的保护作用及其机制研究[D]. 西安: 西北大学, 2020.
- [13] 刘秀红. 大豆抗氧化肽的制备及其协同促排铅效果的研究[D]. 黑龙江 大庆: 黑龙江八一农垦大学, 2010.
- [14] 丁秀臻. 大豆球蛋白酶解物中巯基肽的分布、制备及其与重金属离子作用的研究[D]. 江苏 无锡: 江南大学, 2016.
- [15] 于立博. 新疆鹰嘴豆中金属硫蛋白对铅毒性作用的干预研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆医科大学, 2013.
- [16] 刘晓静. 亚麻籽肽降胆固醇作用的研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2020.
- [17] ELLMAN G L. Tissue sulfhydryl groups [J]. Arch Biochem Biophys, 1959, 82(1): 70 - 77.
- [18] THANNHAUSER T W, KONISHI Y, SCHERAGA H A. Sensitive quantitative analysis of disulfide bonds in polypeptides and proteins[J]. Anal Biochem, 1984, 138(1): 181 - 188.
- (上接第 50 页)
- [8] LAGUERRE M, BAYRASY C, PANYA A, et al. What makes good antioxidants in lipid - based systems? The next theories beyond the polar paradox [J]. Crit Rev Food Sci, 2015, 55(2): 183 - 201.
- [9] 孙逸雯, 魏训娇, 吴昕月, 等. 复合天然抗氧化剂及新型包装对亚麻籽油氧化稳定性的影响[J]. 中国油脂, 2019, 44(11): 86 - 89.
- [10] 党玲, 祁乐乐, 冯耀, 等. 抗氧化剂对室温储存亚麻籽油过氧化值变化的影响[J]. 中国油脂, 2019, 44(5): 25 - 29.
- [11] 刘李春, 蒋玉洁, 申明月, 等. 天然抗氧化剂对红烧肉烹饪过程中热加工危害物形成的控制[J]. 食品科学, 2021, 42(15): 50 - 57.
- [12] 郑平玉, 王卫飞, 王永华, 等. 高纯度甘油二酯的酶法合成及性质研究[J]. 中国油脂, 2013, 38(3): 43 - 46.
- [13] BUDILARTO E S, KAMAL - ELDIN A. Stabilization of cod liver oil with a quaternary combination of  $\alpha$  - tocopherol and synergists: method of assessment [J]. Eur J Lipid Sci Tech, 2015, 117(10): 1598 - 1606.
- [14] 孙晓伟, 梁金. 化学发光法研究迷迭香抗脂质过氧化性能[J]. 河南科学, 2014, 32(7): 1204 - 1207.
- [15] 李甜甜, 黄丽君, 周蕊, 等. 维生素 E 在油脂中抗氧化与促氧化研究进展[J]. 农村经济与科技, 2017, 28(21): 155 - 157.
- [16] 李莉, 张赛, 何强, 等. 响应面法在试验设计与优化中的应用[J]. 实验室研究与探索, 2015, 34(8): 41 - 45.
- [17] 姚梦莹, 匡婷, 云永欢, 等. 鼠尾草酸对椰子油热加工过程中主要理化性质、脂肪酸组成与自由基的影响研究[J]. 中国油脂, 2020, 45(8): 39 - 44.
- [18] 于文秀, 刘玉兰, 曲宗乔, 等. 不同抗氧化剂对调和油煎炸性能影响研究[J]. 中国油脂, 2018, 43(8): 89 - 93, 103.