

# 亚麻籽油的营养成分、功能活性及应用研究进展

赖玉萍<sup>1</sup>, 姜福全<sup>2</sup>, 黄思苑<sup>1</sup>, 梁结桦<sup>1</sup>, 杜冰<sup>1</sup>, 黎攀<sup>1</sup>

(1. 华南农业大学食品学院, 广州 510642; 2. 艾斯普瑞(广州)食品有限公司, 广州 510635)

**摘要:** 亚麻籽油含有 $\alpha$ -亚麻酸、植物甾醇、维生素E和多酚等多种活性物质, 具有抗氧化、抗癌、抗炎、降压等功效, 并具有预防和改善神经系统和免疫性疾病、糖尿病和心血管疾病等作用, 其营养价值较高。对亚麻籽油的主要营养成分、功能活性及其在食品、医药、饲料及生物柴油领域的应用进行了阐述, 旨在为亚麻籽油的进一步研究及其在相关产业的深度加工和综合利用提供理论借鉴。

**关键词:** 亚麻籽油; 营养成分; 功能活性; 应用

中图分类号: TS225.1; TS221 文献标识码: A 文章编号: 1003-7969(2022)08-0109-07

## Progress on nutritional components, functional activities and application of flaxseed oil

LAI Yuping<sup>1</sup>, JIANG Fuquan<sup>2</sup>, HUANG Siyuan<sup>1</sup>,  
LIANG Jiehua<sup>1</sup>, DU Bing<sup>1</sup>, LI Pan<sup>1</sup>

(1. College of Food Science, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China;

2. ESPRAY (Guangzhou) Food Co., Ltd., Guangzhou 510635, China)

**Abstract:** Flaxseed oil contains a variety of active substances such as  $\alpha$ -linolenic acid, phytosterols, vitamin E and polyphenols, which have antioxidant, anticancer, anti-inflammatory and antihypertensive effects, and can prevent and improve the neurological and immune diseases, diabetes, and cardiovascular diseases, etc. Flaxseed oil has high nutritional value. The main nutritional components, functional activities of flaxseed oil and its applications in the fields of food, medicine, feed and biodiesel were described, aiming to provide theoretical references for further research on flaxseed oil and its deep processing and comprehensive utilization in related industries.

**Key words:** flaxseed oil; nutritional component; functional activity; application

亚麻(*Linum usitatissimum* L.), 属亚麻科一年生草本植物, 分为油纤兼用亚麻、纤维用亚麻和油用亚麻3类<sup>[1]</sup>。亚麻籽油是利用油用亚麻籽经不同的制油方法得到的油脂, 其富含 $\alpha$ -亚麻酸、植物甾醇、维生素E、木脂素(SDG)等营养成分<sup>[2]</sup>。这些营养成分使得亚麻籽油在对抗各种炎症性自身免疫性疾病、高血压、糖尿病等方面发挥着关键作用, 而且还可改善神经系统状况和适当的血液循环<sup>[3-4]</sup>。因

此, 亚麻籽油可作为一种具有较优生理功能和食用价值的保健植物油脂, 广泛应用于食品和保健品中, 且应用前景广阔。在此背景下, 本文综述了亚麻籽油的主要营养成分、功能活性及其在不同领域的应用。

### 1 营养成分

#### 1.1 $\alpha$ -亚麻酸

亚麻籽油中含有约73%的多不饱和脂肪酸、18%的单不饱和脂肪酸和9%的饱和脂肪酸<sup>[5]</sup>。多不饱和脂肪酸又以 $\alpha$ -亚麻酸(C18:3)含量最丰富。受到不同产地自然环境条件、加工工艺和品种等的影响, 亚麻籽油中的 $\alpha$ -亚麻酸含量会存在一定的差异。表1是来自不同地区的亚麻籽油中 $\alpha$ -亚麻酸的含量。

收稿日期: 2021-07-02; 修回日期: 2022-03-13

作者简介: 赖玉萍(1996), 女, 硕士研究生, 研究方向为植物活性成分的研究和评价(E-mail) lyp841616818@163.com。

通信作者: 黎攀, 副教授(E-mail) lp19900815@scau.edu.cn。

表1 不同地区亚麻籽油的 $\alpha$ -亚麻酸含量

地区	籽/油	$\alpha$ -亚麻酸含量	参考文献
突尼斯	亚麻籽	37.19%、53.80%	[6]
中国甘肃	冷榨亚麻籽油	47.16%	[7]
中国内蒙古	冷榨亚麻籽油	53.53%	[7]
中国新疆	冷榨亚麻籽油	46.98%	[7]
中国河北	亚麻籽	523.6 mg/g (坝亚9)、 542.1 mg/g (坝亚11)	[8]
中国山西	亚麻籽	392.5 mg/g (晋亚7)、 433.3 mg/g (晋亚8)	[8]
中国内蒙古	热榨亚麻籽油	55.11%	[9]
中国内蒙古	冷榨亚麻籽油	58.61%	[9]
中国内蒙古	浸出亚麻籽油	58.69%	[9]
中国内蒙古	精炼亚麻籽油	58.58%	[9]
土耳其	亚麻籽油	58.31%	[10]
新西兰	亚麻籽油	59.34%	[11]
新西兰	冷榨亚麻籽油	56.90%	[12]
加拿大北部	冷榨亚麻籽油	58.55%	[12]
加拿大西部	亚麻籽	53.18%、57.0%	[13]
巴西	亚麻籽	483.49 mg/g (金亚麻籽)、 396.56 mg/g (棕亚麻籽)	[14]

注:表中文献[7]的数据均为各产地10个地区亚麻籽油的平均值

## 1.2 植物甾醇

植物甾醇是油脂中不皂化物的主要成分,其化学结构类似于胆固醇,仅侧链结构有所差异,广义上分为4-去甲基甾醇、4-甲基甾醇和4,4'-二甲基甾醇3类。亚麻籽油中主要是4-去甲基甾醇,如 $\beta$ -谷甾醇,而后二者的含量则相对要低得多<sup>[15]</sup>。植物甾醇具有较好的降胆固醇能力,可通过抑制肠道对胆固醇的吸收,进而有效降低血浆总胆固醇和低密度脂蛋白水平<sup>[16]</sup>。

冯妹元等<sup>[17]</sup>研究表明,亚麻籽油中植物甾醇的总量为441.83 mg/100 g,其中包括237.50 mg/100 g的 $\beta$ -谷甾醇、112.06 mg/100 g的菜油甾醇、53.53 mg/100 g的豆甾醇以及9.33 mg/100 g的菜籽甾醇。禹晓等<sup>[18]</sup>报道我国不同产区不同品种亚麻籽油中植物甾醇的含量范围为340~596 mg/100 g。Ciftci等<sup>[19]</sup>测定的亚麻籽油中植物甾醇含量为413.2 mg/100 g。

有研究表明,植物甾醇的含量受亚麻籽成熟度的影响。根据品种的不同,亚麻籽的早期发育阶段,植物甾醇的含量可高达1 336.22~1 977.92 mg/100 g,随着

亚麻籽的成熟而下降到492.03~722.66 mg/100 g<sup>[15]</sup>。这可能是因为种子形成的早期是一个细胞强烈分裂的时期,需要生物合成植物甾醇等膜结构所必需分子,从而植物甾醇含量高;而随着亚麻籽的成熟,其中的植物甾醇转化成了其他脂类化合物,如转化为类固醇激素和维生素以调节未成熟组织的生长发育<sup>[15,20]</sup>。

## 1.3 维生素E

维生素E是一种脂溶性维生素,是一类具有抗氧化活性、化学结构相似的生育酚、生育三烯酚及其衍生物的总称。亚麻籽油中的生育酚主要以 $\alpha$ -、 $\gamma$ -、 $\delta$ -生育酚形式存在,其中 $\gamma$ -生育酚占比约90%,并以该活性形式负责保护细胞脂肪和蛋白质免受氧化<sup>[21]</sup>。

不同产区亚麻籽油中的生育酚含量有所差异。如:马其顿冷榨亚麻籽油的总生育酚含量为69.7 mg/100 g<sup>[22]</sup>;克罗地亚冷榨亚麻籽油的总生育酚含量为77.6~93.6 mg/100 g<sup>[23]</sup>;而Franke等<sup>[24]</sup>报道了德国冷榨亚麻籽油中生育酚的总量为42.5 mg/100 g,包括0.7 mg/100 g的 $\alpha$ -生育酚、41.3 mg/100 g的 $\gamma$ -生育酚以及0.5 mg/100 g的 $\delta$ -生育酚。相较于产区,提取工艺对生育酚含量的影响较小,如Khattab等<sup>[25]</sup>研究表明,采用正己烷、超临界CO<sub>2</sub>、加速溶剂萃取得到的亚麻籽油中生育酚含量相差不大,在34.47~34.82 mg/100 g之间。

除了生育酚,亚麻籽油中还含有少量的生育三烯酚。Bozan等<sup>[10]</sup>测定的亚麻籽油中 $\alpha$ -生育三烯酚和 $\gamma$ -生育三烯酚含量分别为0.12、0.16 mg/100 g。

值得注意的是,亚麻籽油中脂肪酸的高不饱和度与高 $\gamma$ -生育酚含量有关,有研究表明C18:3的含量与 $\gamma$ -生育酚呈正相关<sup>[26]</sup>。

## 1.4 类胡萝卜素

亚麻籽油中还含有一种脂溶性色素类胡萝卜素,主要以 $\alpha$ -胡萝卜素、 $\beta$ -胡萝卜素、叶黄素以及玉米黄质等形式存在。类胡萝卜素作为维生素A(原蛋白A)的前体物,可通过去除自由基来保护人体免受氧化应激。Franke等<sup>[24]</sup>在冷榨亚麻籽油中检测到0.4 mg/100 g的类胡萝卜素;但未在精炼油中检出类胡萝卜素,这可能与类胡萝卜素在各个精炼步骤中被除去有关,如在脱色过程中类胡萝卜素被吸附损失,脱臭过程使类胡萝卜素发生热变质而引发损失<sup>[27-28]</sup>。

## 1.5 总酚

植物油中的酚类化合物有利于提高油脂的氧化稳定性。酚类化合物,包括黄酮、酚酸、木酚素、酚醇

等,在预防各种与氧化应激相关的疾病方面具有显著的作用。酚类化合物对产品的稳定性、感官和营养特性有很大的影响,并可能通过猝灭负责脂质氧化的自由基来防止变质<sup>[29-31]</sup>。

不同产地、不同的加工方式会对亚麻籽油中的总酚含量产生影响。Affes等<sup>[32]</sup>对来自突尼斯和巴基斯坦的亚麻籽油中的总酚含量进行了评价,结果表明,突尼斯亚麻籽油的总酚含量为27.77 mg/100 g,显著高于巴基斯坦地区的5.20 mg/100 g。Siger等<sup>[33]</sup>用Folin-Ciocalteu法测定了亚麻籽油甲醇提取物中的总酚含量为1.14 mg/100 g,总酚酸含量为5.1 μg/100 g。Choo等<sup>[34]</sup>报道的冷榨亚麻籽油中总酚酸含量为76.8~307.3 mg/100 g,7种冷榨亚麻籽油样品中总黄酮含量在12.7~25.6 mg/100 g之间。

木脂素(SDG),亦称开环异落叶松酚二葡萄糖苷,是一种与人体雌激素极相似的植物雌激素,主要分布在亚麻籽皮中,仅有微量分布在亚麻籽油中。Toure等<sup>[35]</sup>发现不同来源的亚麻籽油中木酚素含量仅为0.093~0.110 μg/g,但Khattab等<sup>[25]</sup>报道的亚麻籽油中木酚素含量达到32.28 μg/g,这可能是受产地、提取工艺等的影响。流行病学研究表明,木酚素有降低心脏病、骨质疏松症、各种激素依赖性疾,以及结肠癌、乳腺癌发病率的功效<sup>[36]</sup>。

## 2 功能活性

### 2.1 减少神经系统和自身免疫性疾病

Moneim等<sup>[37]</sup>研究了亚麻籽油对醋酸铅诱导的大鼠脑氧化应激和神经毒性的影响,结果发现用亚麻籽油处理后大鼠的大多数研究参数和组织病理学特征得到了显著改善,这说明亚麻籽油显著降低了醋酸铅暴露对大脑的不利影响。Ismail等<sup>[38]</sup>通过测定脑损伤大鼠脑匀浆中抗氧化酶活性、血清中促炎细胞因子水平以及脑组织中相关酶的基因表达水平,研究了亚麻籽油对γ射线和/或四氯化碳(CCl<sub>4</sub>)诱导的大鼠脑急性神经毒性的作用,结果发现亚麻籽油改善了脑损伤大鼠脑组织中的抗氧化状态,抑制了炎症反应,调节了微量元素水平,说明亚麻籽油对γ辐射、CCl<sub>4</sub>及其联合效应诱导的大鼠脑损伤具有神经保护活性。

亚麻籽油还能以增加n-3脂肪酸浓度和降低血液及乳腺外体中n-6/n-3脂肪酸比例的方式,增强过氧化物酶体增殖物激活受体-γ的表达,降低炎症细胞因子水平,提高免疫功能<sup>[39]</sup>。

### 2.2 改善糖尿病

糖尿病是以高血糖为特征的代谢紊乱性疾病。

高血糖和氧化应激状态的亢进,会使体内无法被代谢的葡萄糖氧化,进而发生胰岛素的抵抗作用,甚至会启动细胞凋亡,最终导致或加剧糖尿病及其并发症的发生<sup>[40]</sup>。亚麻籽油中富含的α-亚麻酸可能通过降低组织及血液中的甘油三酯水平而减轻对葡萄糖糖酵解和有氧氧化的抑制,以及减轻胰岛素抵抗,通过抑制炎症细胞反应、阻断氧化应激等过程,以及促进微循环等环节来改善糖尿病及其并发症<sup>[41-42]</sup>。

2型糖尿病(T2DM)与慢性低度炎症、肠道菌群失调、高血糖、血脂异常密切相关。Zhu等<sup>[43]</sup>研究表明,膳食亚麻籽油通过调节炎症基因的表达,减轻了链脲佐菌素(STZ)-烟酰胺(NA)诱导的糖尿病大鼠的蛋白质糖基化状态,通过调节大鼠肠道菌群及其代谢产物醋酸盐的组成,改善了STZ-NA诱导的T2DM。肥胖引起的胰岛素抵抗是T2DM呈上升趋势的主要因素,Yu等<sup>[44]</sup>研究了亚麻籽油对高脂饮食(HFD)诱导的专注于脂肪组织脂肪分解的C57BL/6J小鼠的胰岛素抵抗的影响,结果发现中剂量的亚麻籽油能减弱HFD小鼠的胰岛素抵抗,而且抑制缺氧诱导因子HIF-1α和HIF-2α参与亚麻籽油介导的脂肪组织脂肪分解调节,并伴随着脂肪组织脂质部分中n-3多不饱和脂肪酸的特异性重组,下调了白细胞介素-6(IL-6)、肿瘤坏死因子-α(TNF-α)、IL-1β和脂质运载蛋白2的mRNA表达以及促进了脂联素的mRNA表达,表明亚麻籽油通过重塑肥胖脂肪组织中的脂质稳态来缓解慢性HFD诱导的胰岛素抵抗。

### 2.3 改善酒精性肝病

血清和肝组织活检中n-3多不饱和脂肪酸(PUFA)水平低是酒精性肝病患者的共同特征。Meng等<sup>[45]</sup>通过构建酒精性肝脂肪变性小鼠模型研究了亚麻籽油对乙醇诱导的肝脂肪变性的潜在保护作用,发现亚麻籽油减弱了肝脏脂肪酸的摄取和甘油三酯的合成,并上调了血浆脂联素浓度、肝脂联素受体2表达和肝单磷酸腺苷活化蛋白激酶的激活,这说明膳食富含n-3 PUFA的亚麻籽油能通过改善脂肪组织-肝轴的脂质稳态来防止酒精性肝脂肪变性。Zhang等<sup>[46]</sup>研究了亚麻籽油对小鼠酒精性肝病衰减的可能影响,结果发现,膳食亚麻籽油显著降低了变形杆菌门的种类,以及血浆和肝组织中的TNF-α、IL-1β和IL-6水平,这表明亚麻籽油通过抗炎和调节小鼠肠道菌群改善酒精性肝病。

### 2.4 抗氧化

脂质、蛋白质和核酸都是自由基的氧化目标物

质,而过多的自由基则会引起体内脂质的链式反应,进而诱发机体出现多种疾病。亚麻籽油中多不饱和脂肪酸的不饱和双键可与人体内的自由基反应,进而减少因过氧化物或自由基产生造成的对人体不利的影 响。亚麻籽油中丰富的脂类受到诸如维生素 E 和酚类等抗氧化剂的保护<sup>[46]</sup>。

亚麻籽油中含有的  $\alpha$ -亚麻酸、生育酚、酚类物质等均是具备清除自由基功效的抗氧化剂。这些抗氧化物质可通过调控降低机体某些部位的氧气浓度,干扰氧化反应的发生,及时清除自由基控制脂质过氧化链式反应;还可以与金属阳离子结合,阻断羟自由基引发的系列反应,破坏脂质过氧化反应;最终去除脂质过氧化反应过程中产生的自由基<sup>[41]</sup>。此外,摄入一定量的亚麻籽油不仅能提高抗氧化剂超氧化物歧化酶和谷胱甘肽的含量,还能降低机体氧化产物丙二醛的水平,进而增加机体抗氧化的能力<sup>[41]</sup>。

### 2.5 预防动脉粥样样性心血管疾病、降压

亚麻籽油能通过抑制血小板聚集和血栓形成、降低炎症反应、改善血脂和降血压等机制来预防动脉粥样样性心血管疾病。Han 等<sup>[47]</sup>研究了亚麻籽油对 *ApoE* 基因敲除 (*ApoE*-KO) 小鼠动脉粥样硬化的影响,结果表明,亚麻籽油在改善动脉粥样硬化、优化整体脂质水平、抑制炎症和减少氧化应激方面具有协同作用,这些数据与参与脂质代谢 (PPAR $\alpha$ 、HMGCR 和 SREBPs)、炎症 (IL-6、TNF、MCP-1 和 VCAM-1) 和氧化应激 (NADPH 氧化酶) 相关基因表达水平的修饰效应有关。还有研究发现亚麻籽油能降低关节炎小鼠中的 TNF- $\alpha$  水平以及 TNF-R1、IL-6 蛋白的表达<sup>[48]</sup>。Allman 等<sup>[49]</sup>研究发现,服用亚麻籽油可使血小板中 EPA 与花生四烯酸 (AA) 比率 (血栓素生成和血小板聚集潜能的标志物) 增加,表明亚麻籽油有降低血小板聚集的趋势,可对心血管疾病起到保护作用。Freese 等<sup>[50]</sup>通过对 29 名健康受试者随机接受亚麻籽油的研究发现,食用亚麻籽油能适度减少二磷酸腺苷 (ADP) 诱导的血小板聚集。

Akrami 等<sup>[51]</sup>对 60 名患有代谢综合征 (MetSyn) 的志愿者进行随机对照干预实验,结果发现,食用亚麻籽油可有效降低血压和脂质过氧化。Watanabe 等<sup>[52]</sup>报道了亚麻籽油对醋酸脱氧皮质酮 (DOCA) 盐引起的高血压和肾损伤大鼠的影响,结果发现,亚麻籽油抑制了收缩压的增加、肾血管紧张素转换酶 (ACE) 活性、交感神经活性以及肾脏和下丘脑炎症介质基因表达的增加,说明亚麻籽油对

DOCA 盐诱导的高血压和肾损伤大鼠具有降压和肾脏保护作用。

### 2.6 抗癌

在人体内, $n-3$  多不饱和脂肪酸能通过直接抑制细胞的异常增殖来达到抗癌作用<sup>[53]</sup>。Sung 等<sup>[54]</sup>通过体外实验研究了亚麻籽油中的天然活性肽 Linusorbs (LO) B3 对腹腔巨噬细胞、C6 人胶质母细胞瘤细胞系、U251 人胶质母细胞瘤细胞系和 MDA-MB-231 人乳腺癌细胞系的抗癌作用,结果表明,LOB3 通过调节凋亡相关分子、肌动蛋白聚合、原癌基因诱导细胞凋亡和抑制 C6 细胞的迁移而发挥抗癌作用。Mason 等<sup>[55]</sup>通过管腔型乳腺癌动物模型研究了亚麻籽油对乳腺肿瘤的影响,结果发现,亚麻籽油改变了可能对信号通路产生影响的肿瘤脂肪酸谱,降低了生长因子受体和脂肪酸合酶的表达和活性,增加了肿瘤抑制磷酸酶和张力蛋白同源物的表达,这表明亚麻籽油可能能够减少肿瘤的发生并调节人表皮生长因子受体 2 (HER2) 表达和生长因子受体信号通路,增强曲妥珠单抗抑制 HER2 过度表达的人类乳腺肿瘤 (BT-474) 生长的效果。

## 3 应用

### 3.1 食品领域

亚麻籽油中丰富的不饱和脂肪酸和其他营养成分,使其抗氧化性、生物利用度、热稳定性以及水中溶解度较差。因此,科研人员将亚麻籽油与和其具有相同或不同功效的食品原料进行复配,以达到协同增效或功效互补的作用,并由此拓宽研究应用领域。李哲等<sup>[56]</sup>将亚麻籽油与具备较好抗氧化功效的天然葡萄籽油进行复配,制成一种氧化稳定性能优于单一亚麻籽油的葡萄籽-亚麻籽调和油。Matumoto-Pintro 等<sup>[57]</sup>将具有抗氧化性的市售木脂素提取物添加到富含亚麻籽油的乳制饮料配方中,制成了一款具有良好氧化稳定性的产品。

适宜的  $n-6/n-3$  脂肪酸比例能带来有益于人体健康的变化,若二者的摄入比例失衡则会引发一系列的健康问题。针对人们日常使用的食用油中大都存在  $n-3$  PUFA 含量过低的现象,研究人员根据人体需摄入脂肪酸的最佳比例,将亚麻籽油与其他油脂进行复配,制成营养均衡的食用调和油。如:Joshi 等<sup>[58]</sup>将具有较低  $n-6$  脂肪酸含量的棕榈油与亚麻籽油复配,研发了一种具有良好氧化稳定性和热稳定性且  $n-6$  与  $n-3$  脂肪酸比率提高的调和油;杨林伟<sup>[59]</sup>报道了一种以亚麻籽油和橄榄油为原料的功能性植脂食品配料的制备方法,该配料可提

高  $n-3$  多不饱和脂肪酸的摄入量,同时还具有提高免疫力、预防心血管疾病和降低胆固醇等作用。

此外,亚麻籽油还能作为功能性食品或添加剂添加到各种食品配方中。如:Aguiar 等<sup>[60]</sup>将面包配方中的部分大豆油用亚麻籽油替代后,提高了面包中  $\alpha$ -亚麻酸的含量,降低了  $n-6/n-3$  脂肪酸比值,且对面包的技术质量或感官特性并没有造成负面影响;田世民等<sup>[61]</sup>以亚麻籽油和磷虾油为原料,制成了对人体有辅助降血脂功效的亚麻籽油磷虾油软胶囊。

### 3.2 其他

在医药领域,药品中亚麻籽油的加入,可在保证  $\alpha$ -亚麻酸摄入的同时,预防和治疗心血管疾病的发生,提高免疫力,增强抗癌、降压效果。目前市场上基于亚麻籽油的药品形式主要有药片、水溶性粉末制品、胶囊、液体药剂以及中药配伍药方。王金珠<sup>[62]</sup>报道了一种止血去疤的中药组合物的制备方法,其配方为亚麻籽油 3 份,金樱子、桑叶和苎叶各 4 份,冬青草和荞麦各 2 份,石灰和蜂蜜各 1 份,檀木 6 份,芦荟 5 份。

在饲料行业,通过添加亚麻籽油来调控动物饲料的组成和结构,使其不饱和脂肪酸的比例更加均衡,从而改善动物的健康水平及与其相关产品的品质。Leikus 等<sup>[63]</sup>在育肥猪的日粮中加入了一定量的亚麻籽油,发现肉中  $\alpha$ -亚麻酸、EPA 和 DPA 含量以及  $n-3$  脂肪酸总量均有明显增加,肉中的  $n-6/n-3$  脂肪酸比例也得到了较好改善。

在化工领域,Tariq 等<sup>[64]</sup>以亚麻籽油为原料合成了一种可再生的亚麻籽油生物柴油,其符合美国材料试验协会的生物柴油和柴油标准,作为石化柴油的替代品具有良好的潜力。

## 4 结束语

亚麻籽油中含有的  $\alpha$ -亚麻酸、植物甾醇和生育酚等多种具有保健功效的活性物质,在预防和治疗糖尿病、心血管疾病、神经系统性疾病以及提高免疫力、抗氧化等方面具有一定的潜力。因此,可进一步挖掘亚麻籽油功能活性成分在营养保健和医药等领域的发展潜力,加快亚麻籽油的研究和综合利用进程,从而增加其经济附加价值。但亚麻籽油极易发生氧化酸败,导致营养成分变化。因此,如何提高亚麻籽油的稳定性有待更进一步的探究。

### 参考文献:

[1] DZUVOR C, TAYLOR J, ACQUAH C, et al. Bioprocessing of functional ingredients from flaxseed[J/OL]. *Molecules*, 2018, 23(10):2444[2021-07-02]. <https://doi.org/10.3390/molecules23102444>.

[2] TOMASZEWSK G J, ISLAM M, GRZEA L, et al. Comprehensive thermal characteristics of different cultivars of flaxseed oil (*Linum usitatissimum* L.) [J/OL]. *Molecules*, 2021, 26:1958[2021-07-02]. <https://doi.org/10.3390/molecules26071958>.

[3] PUNIA S, SANDHU K S, DHULL S B, et al. Kinetic, rheological and thermal studies of flaxseed (*Linum usitatissimum* L.) oil and its utilization[J]. *J Food Sci Technol*, 2020, 57(11):4014-4021.

[4] ZHANG Z S, LI D, ZHANG L X, et al. Heating effect on the DSC melting curve of flaxseed oil[J]. *J Therm Anal Calorim*, 2014, 115(3):2129-2135.

[5] GOYAL A, SHARMA V, UPADHYAY N, et al. Flax and flaxseed oil: an ancient medicine & modern functional food [J]. *J Food Sci Technol*, 2014, 51(9):1633-1653.

[6] HERCHI W, SAKOUHI F, BOUKHCHINA S, et al. Changes in fatty acids, tocopherols, carotenoids and chlorophylls content during flaxseed development[J]. *J Am Oil Chem Soc*, 2011, 88(7): 1011-1017.

[7] 廖丽萍,肖爱平,冷鹏,等.不同产地亚麻籽冷榨油脂肪酸的 GC-MS 分析[J]. *中国麻业科学*, 2018, 40(5): 234-238.

[8] 王丽艳,王鑫淼,荆瑞勇,等.不同品种亚麻籽营养成分分析与品质综合评价[J]. *食品与机械*, 2021, 37(7): 26-32.

[9] 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.

[10] BOZAN B, TEMELLI F. Chemical composition and oxidative stability of flax, safflower and poppy seed and seed oils [J]. *Bioresour Technol*, 2008, 99(14): 6354-6359.

[11] THE S S, BIRCH J. Physicochemical and quality characteristics of cold-pressed hemp, flax and canola seed oils [J]. *J Food Compos Anal*, 2013, 30(1): 26-31.

[12] 周洋,黄健花,金青哲,等.不同产地冷榨亚麻籽油的脂质组成比较[J]. *中国油脂*, 2018, 43(9):125-128.

[13] BARTHET V J, KLENSPORE-PAWLIK D, PRZYBYLSKI R. Antioxidant activity of flaxseed meal components [J]. *Can J Plant Sci*, 2014, 94(3): 593-602.

[14] SARGI S C, SILVAB 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.

[15] HERCHI W, HARRABI S, SEBEI K, et al. Phytosterols accumulation in the seeds of *Linum usitatissimum* L. [J]. *Plant Physiol Biochem*, 2009, 47(10):880-885.

[16] RYAN E, GALVIN K, O'CONNOR T P, et al.

- Phytosterol, squalene, tocopherol content and fatty acid profile of selected seeds, grains, and legumes[J]. *Plant Foods Hum Nutr*,2007,62(3):85-91.
- [17] 冯妹元,韩军花,刘成梅,等. 常见精炼油中植物甾醇测定方法的建立及含量分析[J]. *中国食品卫生杂志*,2006(3):197-201.
- [18] 禹晓,黄沙沙,程晨,等. 不同品种亚麻籽组成及抗氧化特性分析[J]. *中国油料作物学报*,2018,40(6):879-888.
- [19] CIFTCI O N, PRZYBYLSKI R, RUDZINSKA M. Lipid components of flax, perilla, and chia seeds[J]. *Eur J Lipid Sci Technol*,2012,114(7):794-800.
- [20] BERTI M T, JOHNSON B L, MANTHEY L K. Seed physiological maturity in *Cuphea*[J]. *Indust Crops Prod*,2006,25(2):190-201.
- [21] KAMAL-ELDIN A. Effect of fatty acids and tocopherols on the oxidative stability of vegetable oils[J]. *Eur J Lipid Sci Technol*,2006,108(12):1051-1061.
- [22] VELICKOVSKA S K, BRUHL L, MITREV S, et al. Quality evaluation of cold-pressed edible oils from Macedonia [J]. *Eur J Lipid Sci Technol*, 2015, 117(12):2023-2035.
- [23] OBRANOVIC M, SKEVIN D, KRALJIC K, et al. Influence of climate, variety and production process on tocopherols, plastochromanol-8 and pigments in flaxseed oil [J]. *Food Technol Biotechnol*, 2015, 53(4):496-504.
- [24] FRANKE S, FROHLICH K, WERNER S, et al. Analysis of carotenoids and vitamin E in selected oilseeds, press cakes and oils[J]. *Eur J Lipid Sci Technol*,2010,112(10):1122-1129.
- [25] KHATTAB R Y, ZEITOUN M A. Quality evaluation of flaxseed oil obtained by different extraction techniques [J]. *LWT - Food Sci Technol*, 2013,53(1):338-345.
- [26] TAVARINII S, CASTAGNA A, CONTE G, et al. Evaluation of chemical composition of two linseed varieties as sources of health-beneficial substances [J/OL]. *Molecules*, 2019, 24(20):3729 [2021-07-02]. <https://doi.org/10.3390/molecules24203729>.
- [27] SU Q, ROWLEY K G, ITSIOPOULOS C, et al. Identification and quantitation of major carotenoids in selected components of the Mediterranean diet:green leafy vegetables, figs and olive oil[J]. *Eur J Clin Nutr*,2002,56(11):1149-1154.
- [28] MOREAU R A, JOHNSTON D B, HICKS K B. A comparison of the levels of lutein and zeaxanthin in corn germ oil, corn fiber oil and corn kernel oil[J]. *J Am Oil Chem Soc*,2007,84(11):1039-1044.
- [29] RUTH S M V, SHAKER E S, MORRISSEY P A. Influence of methanolic extracts of soybean seeds and soybean oil on lipid oxidation in linseed oil[J]. *Food Chem*,2001,75(2):177-184.
- [30] QUILES J L, RAMIREZ-TORTOSA M C, GOMEZ J A, et al. Role of vitamin E and phenolic compounds in the antioxidant capacity, measured by ESR, of virgin olive, olive and sunflower oils after frying [J]. *Food Chem*, 2002,76(4):461-468.
- [31] KOSKI A, PEKKARINEN S, HOPIA A, et al. Processing of rapeseed oil: effects on sinapic acid derivative content and oxidative stability[J]. *Eur Food Res Technol*,2003,217(2):110-114.
- [32] AFFES M, FAKHFAKH J, AYADI M, et al. Characterization of *Linum usitatissimum* L. used in Tunisia as food crop[J]. *J Food Meas Charact*, 2017, 11(2):781-791.
- [33] SIGER A, NOGALA-KALUCKA M, LAMPART-SZCZAPA E. The content and antioxidant activity of phenolic compounds in cold-pressed plant oils [J]. *J Food Lipid*, 2008, 15(2):137-149.
- [34] CHOO W S, BIRCH J, DUFOUR J P. Physicochemical and quality characteristics of cold-pressed flaxseed oils [J]. *J Food Compos Anal*,2006,20(3):202-211.
- [35] TOURE A, XU X M. Flaxseed lignans: source, biosynthesis, metabolism, antioxidant activity, bio-active components, and health benefits [J]. *Compr Rev Food Sci Food Saf*, 2010, 9(3):261-269.
- [36] HERCHI W, SAWALHA S,ARRAEZ-ROMAN D, et al. Determination of phenolic and other polar compounds in flaxseed oil using liquid chromatography coupled with time-of-flight mass spectrometry [J]. *Food Chem*, 2011,126(1):332-338.
- [37] MONEIM A, DKHIL M A, ALQURAI SHY S. Effects of flaxseed oil on lead acetate-induced neurotoxicity in rats [J]. *Biol Trace Elem Res*, 2011, 144(1/2/3):904-913.
- [38] ISMAIL A, SAIEM A, EASSAWY M. Modulation of gamma-irradiation and carbon tetrachloride induced oxidative stress in the brain of female rats by flaxseed oil [J]. *J Photochem Photobiol B*, 2016, 161:91-99.
- [39] 王力,魏堂鸿,邓继彦,等. 亚麻籽及其加工副产品的营养价值及其在猪生产中的应用[J]. *中国饲料*,2020(23):4-10,29.
- [40] ASHRAF N U, SHEIKH T A. Endoplasmic reticulum stress and oxidative stress in the pathogenesis of non-alcoholic fatty liver disease[J]. *Free Radic Res*,2015,49(12):1405-1418.
- [41] 杨野全. 亚麻籽油抗氧化及降血糖功效的研究[D]. 长春:吉林大学,2016.
- [42] 忻志鸣,王彪. 中药有效成分防治糖尿病的研究进展

- [J]. 安徽医药, 2011, 15(2): 138 - 141.
- [43] ZHU L, SHA L, LI K, et al. Dietary flaxseed oil rich in *omega*-3 suppresses severity of type 2 diabetes mellitus via anti-inflammation and modulating gut microbiota in rats[J]. *Lipids Health Dis*, 2020, 19(1): 1 - 16.
- [44] YU X, TANG Y H, LIU P Y, et al. Flaxseed oil alleviates chronic HFD-induced insulin resistance through remodeling lipid homeostasis in obese adipose tissue[J]. *J Agric Food Chem*, 2017, 65(44): 9635 - 9646.
- [45] MENG W, ZHANG X J, FENG K, et al. Dietary  $\alpha$ -linolenic acid-rich flaxseed oil prevents against alcoholic hepatic steatosis via ameliorating lipid homeostasis at adipose tissue-liver axis in mice[J]. *Sci Rep*, 2016, 6: 1 - 11.
- [46] ZHANG X X, WANG H, YIN P P, et al. Flaxseed oil ameliorates alcoholic liver disease via anti-inflammation and modulating gut microbiota in mice[J]. *Lipids Health Dis*, 2017, 16(1): 1 - 10.
- [47] HAN H, YAN P P, CHEM L, et al. Flaxseed oil containing  $\alpha$ -linolenic acid ester of plant sterol improved atherosclerosis in *ApoE* deficient mice[J/OL]. *Oxid Med Cell Longev*, 2015, 2015: 958217 [2021 - 07 - 02]. <https://doi.org/10.1155/2015/958217>.
- [48] SINGH S, NAIR V, GUPTA YK, et al. Linseed oil: an investigation of its antiarthritic activity in experimental models[J]. *Phytother Res*, 2012, 26(2): 246 - 252.
- [49] ALLMAN M A, PENA M M, PANG D. Supplementation with flaxseed oil versus sunflowerseed oil in healthy young men consuming a low fat diet: effects on platelet composition and function[J]. *Eur J Clin Nutr*, 1995, 49(3): 169 - 178.
- [50] FREESE R, MUTANEN M, VALSTA L M, et al. Comparison of the effects of two diets rich in monounsaturated fatty acids differing in their linoleic/*alpha*-linolenic acid ratio on platelet aggregation[J]. *Thromb Haemost*, 1994, 71(1): 73 - 77.
- [51] AKRAMI A, NIKAEIN F, BABAJAFARI S, et al. Comparison of the effects of flaxseed oil and sunflower seed oil consumption on serum glucose, lipid profile, blood pressure, and lipid peroxidation in patients with metabolic syndrome[J]. *J Clin Lipidol*, 2018, 12(1): 70 - 77.
- [52] WATANABE Y, OHATA K, FUKANOKI A, et al. Antihypertensive and renoprotective effects of dietary flaxseed and its mechanism of action in deoxycorticosterone acetate-salt hypertensive rats[J]. *Pharmacology*, 2020, 105(1/2): 54 - 62.
- [53] 王晓菡,任小娜,曾俊. 亚麻籽油的提取工艺及其生理功能的研究进展[J]. *粮油加工*, 2014(6): 43 - 46.
- [54] SUNG N Y, JEONG D, SHIM Y Y, et al. The anti-cancer effect of linusorb B3 from flaxseed oil through the promotion of apoptosis, inhibition of actin polymerization, and suppression of Src activity in glioblastoma cells[J/OL]. *Molecules*, 2020, 25(24): 5581 [2021 - 07 - 02]. <https://doi.org/10.3390/molecules25245581>.
- [55] MASON J K, FU M H, CHEM M H, et al. Flaxseed oil enhances the effectiveness of trastuzumab in reducing the growth of HER2-overexpressing human breast tumors (BT-474)[J]. *J Nutr Biochem*, 2015, 26(1): 16 - 23.
- [56] 李哲,贾有青,吴隆坤,等. 葡萄籽-亚麻籽调和油的制备及理化性质测定[J]. *中国粮油学报*, 2020, 35(3): 116 - 120, 126.
- [57] MATUMOTO-PINTRO P T, PETIT H V, GIROUX H J, et al. Effect of flaxseed lignans added to milk or fed to cows on oxidative degradation of dairy beverages enriched with polyunsaturated fatty acids[J]. *J Dairy Res*, 2011, 78(1): 111 - 117.
- [58] JOSHI A, HEGDE M, ZANWAR A. Flaxseed oil and palm olein blend to improve *omega*-6:*omega*-3 ratio[J]. *J Food Sci Technol*, 2021, 59(2): 498 - 509.
- [59] 杨林伟. 一种功能性植脂食品配料的添加应用方法: 200710018507.X[P]. 2008-01-23.
- [60] AGUIAR A C D, BOROSKI M, MONTEIRO A R G, et al. Enrichment of whole wheat flaxseed bread with flaxseed oil[J]. *J Food Process Pres*, 2011, 35(5): 605 - 609.
- [61] 田世民,翟磊,陈建国,等. 亚麻籽油磷虾油软胶囊辅助降血脂作用人体试食研究[J/OL]. *食品与发酵工业*, 2021(4): 1 - 6 [2021 - 07 - 02]. <https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.027805>.
- [62] 王金珠. 用于止血去疤的中药组合物及其制备方法: 200810025930.7[P]. 2009-01-21.
- [63] LEIKUS R, JUSKIENE V, JUSKA R, et al. Effect of linseed oil sediment in the diet of pigs on the growth performance and fatty acid profile of meat[J/OL]. *Rev Bras Zootec*, 2018, 47: 104 [2021 - 07 - 02]. <https://doi.org/10.1590/rbz4720170104>.
- [64] TARIQ M, QURESHI A K, KARIM S, et al. Synthesis, characterization and fuel parameters analysis of linseed oil biodiesel using cadmium oxide nanoparticles[J/OL]. *Energy*, 2021, 222(8): 120014 [2021 - 07 - 02]. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2021.120014>.