

## 亚麻及其活性成分的开发应用研究进展

王莹<sup>1</sup>, 王雨晴<sup>1</sup>, 卢彦岑<sup>2</sup>, 车丹<sup>1</sup>, 潘峻铭<sup>1</sup>, 刘畅<sup>1</sup>, 杨春瑜<sup>1</sup>

(1. 哈尔滨商业大学 黑龙江省食品科学与工程重点实验室, 哈尔滨 150076;

2. 墨尔本大学 环境工程工程学院, 墨尔本 3000)

**摘要:** **目的** 简要概述亚麻所含组分在绿色保健食品和工厂加工等方面的利用价值, 以及最新的研究进展。**方法** 通过查阅国内外学者近年来对亚麻及其活性成分的各项研究报告, 对亚麻及其主要有效成分的制取方法及功能作用进行整理总结。**结果** 亚麻及其活性成分在日常生活、膳食组成和食品添加剂中占有一定的比重, 其研究价值和发展空间非常广阔。**结论** 通过对国内外亚麻及其活性成分的研究现状和进展可知, 亚麻及其活性成分拥有很大的研究价值, 并为今后的亚麻及其活性成分实验研究提供参考依据。

**关键词:** 亚麻;  $\alpha$ -亚麻酸; 添加剂; 研究进展

**中图分类号:** TS225; R944 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2019)21-0023-07

**DOI:** 10.19554/j.cnki.1001-3563.2019.21.004

## Research Progress of Development and Application of Flax and Its Active Components

WANG Ying<sup>1</sup>, WANG Yu-qing<sup>1</sup>, LU Yan-cen<sup>2</sup>, CHE Dan<sup>1</sup>, PAN Jun-ming<sup>1</sup>, LIU Chang<sup>1</sup>, YANG Chun-yu<sup>1</sup>

(1. Harbin University of Commerce, Key Laboratory for Food Science and Engineering of Heilongjiang Province, Harbin 150076, China; 2. School of Environmental Engineering, The University of Melbourne, Melbourne 3000, Australia)

**ABSTRACT:** The work aims to briefly review the utilization value and latest research progress of various components of flax in green health food and factory processing, etc. By reference to the research reports of flax and its active components of the scholars at home and abroad in recent years, the preparation methods and functions of flax and its main active components were sorted and summarized. The results showed that, the flax and its active components occupied a certain proportion in daily life, dietary composition and food additives, and its research value and development space were very broad. From the research status and progress of flax and its active components at home and abroad, the flax and its active components have great research value, and provide reference basis for future experimental research of flax and its active components.

**KEY WORDS:** flax;  $\alpha$ -linolenic acid; additive; research progress

世界卫生组织在 2012 年度的调查结果中显示, 三分之一的成人患有高血压, 十分之一的成人患有糖尿病, 此类非传染性疾病与缺乏身体活动、饮食营养不均、压力过大和吸烟等因素有关, 但最大的影响因素是人们不健康的饮食习惯。随着现代社会日益发

展, 人们生活水平有了明显提高后, 国民们渐渐把目光转到自我保健方向, 营养学家已开始关注膳食对降低心脑血管、肥胖和癌症等疾病可以起到的作用。不饱和脂肪酸是人体所必需的成分之一, 当体内缺少时会使得体内代谢失去平衡, 使身体被动地处于一个亚健康

收稿日期: 2019-05-17

作者简介: 王莹 (1995—), 女, 哈尔滨商业大学硕士生, 主攻农产品加工及贮藏工程。

通信作者: 杨春瑜 (1975—), 女, 博士, 哈尔滨商业大学教授, 主要研究方向为农产品加工及贮藏。

康的状态。其中,  $\omega$ -3 不饱和脂肪酸含有的  $\alpha$ -亚麻酸 (Alpha Linolenic Acid, ALA) 不能自我合成, 须从食物中摄入, 其可以降低出现心脑血管疾病、高胆固醇血症、糖尿病、类风湿性关节炎和高血压等疾病的概率, 而从日常膳食获取的  $n$ -3 系列脂肪酸比  $n$ -6 系列脂肪酸相对较少。亚麻籽中含有的不饱和脂肪酸可补充哺乳动物体内因缺少相关合成的去饱和酶而无法自我合成必需的脂肪酸, 因此食用亚麻籽是人体获取亚麻酸的渠道之一。除了亚麻籽具有食用价值外, 亚麻还可利用其纤维做成衣料<sup>[1-6]</sup>。亚麻的另一产物——亚麻籽胶本身形成的保护层将油水界面张力降低, 将油水界面混合, 能起到乳化作用, 是一种乳化剂<sup>[7]</sup>。

## 1 亚麻的介绍

亚麻 (*Linum Usitatissimum*) 属于双子叶植物纲蔷薇亚纲亚麻属, 可分为油用、纤维用及油纤兼用等 3 种, 是一种主要依靠自花传粉的喜光照、干燥的一年生作物。亚麻最早被发现是在欧洲地中海沿岸、中东和印度等地区, 欧洲关于亚麻籽亚麻栽培最古老的发现可以追溯到大约公元前 5000 年的新石器时代 (晚期石器时代), 我国对亚麻的利用也有 2000 多年的历史, 现在亚麻在世界范围内被种植。亚麻的产物包括亚麻纤维和亚麻籽, 亚麻籽又可以产出亚麻籽油、亚麻籽胶、亚麻蛋白等。早期古埃及等地将亚麻用于编织纤维, 亚麻的纤维结构是众多天然纤维中唯一的束纤维, 拥有良好的透气性、吸湿性等, 这些性质使得一些发达国家中一直将亚麻纤维制品作为身份象征被人们所喜爱。亚麻制得的服装具有凉快干爽、防辐射、防静电、防过敏、抑制细菌增长等特点, 因此在现代社会中亚麻作为绿色纺织原料受到越来越多人的青睐。亚麻可以整粒、研磨、烤籽、榨油和面粉的形式食用, 亚麻籽由脂肪酸组成, 具有较高的营养价值, 食用其可提高人体所需的基本营养摄入量, 并在减少癌症、心血管疾病, 降低胆固醇和血管舒张等方面起到一定的作用, 因此油用亚麻也可以认为是一种功能性食品, 后续研究中发现亚麻的壳和仁均可榨油, 现作为世界主要的油料作物之一<sup>[8-12]</sup>。几个世纪以来, 亚麻因其有益健康的功效而闻名, 如今它成为越来越重要的饮食成分<sup>[13]</sup>。

## 2 亚麻活性成分的背景介绍

### 2.1 亚麻籽

亚麻籽 (Flax seed 或者 Lin seed) 又称胡麻籽, 是由亚麻产生的小而平的种子。种子中含有一种固定的油脂, 即是目前已知  $n$ -3 系列脂肪酸含量最高植物

油之一——亚麻籽油, 其主要成分为亚油酸甘油和亚麻酸, 其中  $\alpha$ -亚麻酸的质量分数高达 40%~60%<sup>[14]</sup>。亚麻籽的价值主要归功于其丰富的生物活性成分, 包括亚麻胶、木酚素、膳食纤维和多糖等功能性成分, 亚麻籽的其他生物活性化合物来自酚类化合物, 其中包括木酚素, 亚麻籽的种皮是含有木酚素植物雌激素的最高已知来源。木酚素是一种很好的抗氧化剂, 可有效地防止蛋白质、脂肪和组织中的其他化合物与氧气发生作用, 避免机体被动地产生有害物质。除此之外, 木酚素还能减少自由基的产生, 具有一定的抗氧化能力, 其生物活性还包括保护心血管、抗肿瘤等作用。亚麻籽中的膳食纤维包括可溶性膳食纤维和不溶性膳食纤维, 亚麻籽中的可溶性和不溶性纤维形成典型的粘性胶一旦被消化, 可通过增加通过时间和增加胆汁酸排泄来降低循环总胆固醇 (Total Cholesterol) 和低密度脂蛋白 (Low-Density Lipoprotein) 胆固醇水平。可溶性膳食纤维对胃及小肠调节餐后血糖反应会产生生理作用, 不溶性纤维的主要作用为增强胰岛素敏感性。另外, 亚麻籽中的蛋白富含天冬氨酸、谷氨酸、亮氨酸及精氨酸, 故它对营养不良人群及牛奶蛋白过敏人群具有潜在的健康益处。由此可见, 亚麻籽对疾病预防具有积极作用, 能提供健康有益的成分。通常, 亚麻籽所含各成分的质量分数分别为: 油脂 40%, 膳食纤维 25%, 蛋白质 20%, 灰分 4%, 水分 6%, 具体组成成分与含量见表 1<sup>[1,15-20]</sup>。

表 1 亚麻籽的组成成分及含量  
Tab.1 Components and content of flax seed

组成成分	各成分质量分数/%
油脂	35~48
木酚素	1~4
膳食纤维	20~27.3
蛋白	20~25
亚麻籽胶 (表皮部分)	8~14
微量元素	≤2
灰分	4~7
水分	≤6

任海伟<sup>[21]</sup>等研究了亚麻籽的营养成分及含量, 同时对亚麻籽油的理化指标和脂肪酸的组成进行了分析, 最后实验测得亚麻籽全粒含油率达到 43.58%, 蛋白质的质量分数为 20%以上。通过高效液相色谱图可以看出, 亚麻籽油中  $\gamma$ -Ve 所占比例最高, 且在亚麻籽油中含有大量的不饱和脂肪酸, 其质量分数超过 90%, 其对人们长时间处于亚健康状态下的肌体有一定缓解改善的作用<sup>[22]</sup>。

王磊<sup>[23]</sup>分别用干法脱毒法、溶液浸提法对亚麻籽进行脱除生氰糖苷和亚麻籽油、亚麻籽胶及亚麻木酚素实验, 得出结论: 干法脱毒法是既可将脱除生氰糖

苷率达到 86%, 又不影响其他组分的最佳方法, 亚麻籽中主要组分所占比例为亚麻油 > 亚麻蛋白 > 亚麻胶, 在各自最佳提取条件下的收率是亚麻籽油 > 亚麻籽胶 > 亚麻蛋白。

谢冬微<sup>[24]</sup>等通过实验对 221 份亚麻籽中含有木酚素的变异情况进行了测定, 以含量、蒴果数、分枝数、千粒质量、工艺长、株高等 6 种因素为指标, 实验结果得出木酚素含量的变异幅度最大, 千粒质量的幅度最小, 说明亚麻籽生产环境的差异对亚麻种籽资源的影响较大。

## 2.2 亚麻籽胶

亚麻籽胶 (flaxseed gum) 也称富兰克胶, 是一种近年来新开发使用的天然绿色食品添加剂及药品原料, 其实质是含有蛋白质化学组份的多糖类物质。亚麻籽胶在亚麻仁中的质量分数为 2%~10%, 主要是在亚麻仁中加水提取, 其中蛋白质的质量分数约为 6%, 存在的主要形式为结合蛋白, 少量的状态为游离态; 淀粉、矿物质等其他物质质量分数大约为 17%, 具体组成成分与含量见表 2。亚麻籽胶是混合多糖, 分中性和酸性等 2 个组分, 中性组分包括 L-阿拉伯糖、D-木糖、D-半乳糖和阿拉伯木聚糖; 酸性组分包括 L-鼠李糖、L-岩藻糖、L-半乳糖和 D-半乳糖。亚麻籽胶与果胶、阿拉伯胶等诸多添加剂类似, 在食品添加中可以起到增稠剂、乳化剂等作用<sup>[25-28]</sup>。据报道, 高盐、高脂肪的摄入会对人的心脑血管和体质产生一定的负面效果, 此时在食品中添加一定比例的亚麻籽胶具有重要积极意义; 在医药方面, 由于亚麻籽本身具有降血糖、减轻肥胖症和癌症等功效, 现已被日本和美国作为药物原料列入《食品化学药品典》和《美国药典》内<sup>[29]</sup>。

表 2 亚麻籽胶的化学成分及含量

Tab.2 Chemical components and content of flaxseed gum

组成成分	质量分数/%
蛋白质	≤5.34
多糖	≤71.52
水分	≤6.10
其他成分	≤17

梁珊<sup>[30]</sup>等以亚麻籽胶、双氧水为原料, 通过液相色谱法得知: 利用全自动高压蒸汽灭菌锅制备得到的亚麻籽胶低聚糖由鼠李糖等 7 种单糖组成; 通过体外抗氧化实验得出, 其具有 3 价铁离子还原的能力; 乳酸菌增殖实验结果表明, 其可有效促进鼠李糖乳杆菌等 4 种杆菌的生长和发酵产酸。由此可见, 亚麻籽胶作为亚麻的副产物对食品开发具有一定潜在的能力。

邓思杨<sup>[31]</sup>等通过在速冻猪肉丸中加入亚麻籽胶和复配淀粉 (包括醋酸酯淀粉和磷酸酯淀粉) 来改善

速冻猪肉丸的品质和水分存贮时间。从亚麻籽胶和复配淀粉分别作用于速冻猪肉丸中的实验结果可以看出, 在其质量分数为 0.35%, 质量比为 5:5 时, 速冻猪肉丸的品质和水分保持在最佳状态, 由此可知按一定比例添加亚麻籽胶可以改善食物的品质。

## 2.3 亚麻籽油的开发利用

亚麻籽油也被称为亚麻油或胡麻籽油, 是从亚麻籽中制取的干性油, 其中富含  $\omega$ -3 和  $\omega$ -6 不饱和脂肪酸功能性油脂, 具有营养保健及药疗功效, 是国际医药界研究的热点之一<sup>[32-34]</sup>。由于在食品水环境中的不相容性 (即却反溶解性) 以及其固有的抗氧化不稳定性, 故亚麻籽油在与食品的结合时易受阻。亚麻籽油也因其亚麻酸含量较高, 在贮藏条件不适宜的情况下易腐败变质, 产生哈喇味道, 故保证其贮藏条件适宜是决定因素之一。

ALA 通过将摄入的食物在人体经众多酶转化成 EPA 和 DHA, 以降低人体内总胆固醇、甘油三酯含量, 它既是脑细胞和组织细胞重要成分的来源之一, 又是提供和维持生命活动所必需的原料<sup>[35]</sup>。市售的大多数食用油中都含有 ALA (花生油不含 ALA), 其他油中 ALA 的质量分数均在 10% 以下, 而亚麻籽油中 ALA 的质量分数约为 50%, 是目前为止 ALA 含量相对于其他植物油和海洋油而言, 含量最高的食用油<sup>[36-38]</sup>。由于  $\omega$ -3 不饱和脂肪酸中的 ALA 对高温、氧气和金属离子非常敏感, 在加工和贮存过程中易产生具有异味和腐臭味的化合物, 所以亚麻籽油在饮食方面只是被用作沙拉用油, 不能用于烹饪及煎炸等高温条件下用油来使用, 也因为亚麻籽油的这种性质, 所以限制了其在食品和乳制品工业中的应用<sup>[39]</sup>。

Rabie Y<sup>[40]</sup>等通过实验, 采用超临界流体 CO<sub>2</sub> 萃取技术得到了亚麻籽油的优缺点, 亚麻籽油的缺点: 不饱和脂肪酸含量高, 在 CO<sub>2</sub> 中溶解度比其他植物油低, 回收率也低于使用常规萃取方法时的回收率。使用超临界流体 CO<sub>2</sub> 萃取技术与溶剂萃取相比也有很多优点, 如利用超临界 CO<sub>2</sub> 可以有选择地提取中性脂质, 当加入极性溶剂 (如乙醇) 可使脱脂膳食中含有酚类和磷脂类等极性化合物, 而亚麻籽油中的酚类物质含量的增加会产生附加油, 稳定性得到增强, 保质期被延长。

张东<sup>[41]</sup>等通过高效液相色谱和质谱联用仪对比了牡丹籽油和亚麻籽油的化学成分, 实验结果得出二者共同的脂肪酸组成主要均为亚麻酸、亚油酸和油脂, 两者相比亚麻籽油中亚麻酸的质量分数较高, 为 54.93%, 是亚麻酸含量最高的油脂。

赵芳<sup>[42]</sup>等在实验研究中对比了恒温避光贮藏亚麻籽油和葡萄籽油这 2 种可食用油的过氧化值、p-茴香胺值、脂肪酸组成及维生素 E 含量的变化, 以及对其功能性成分的影响。结果表明, 在 35 °C 下恒温避

光贮藏 60 d 后,葡萄籽油和亚麻籽油的 3 种测量值均有显著增长,但 2 种油中的不饱和脂肪酸均有下降,也可说明油脂对贮藏条件有一定的要求。

## 2.4 亚麻籽产品在食品、药品行业中应用

亚麻籽在食品中主要的用途是作为功能性食品的配料,也可用于保健食品中,如制成胶囊、液体药剂、药片,以增加人体的脂肪酸、蛋白质摄入量,补充人体所需营养,达到强身健体等目的<sup>[43—44]</sup>。通过微胶囊化技术,将亚麻籽制成一种半透明或者密封的微型胶囊薄膜,这一技术可以规避含有大量不饱和双键的油脂,因受到外界因素而腐败变质易氧化等缺点,为食品加工和储存过程中所处于的恶劣环境、消化过程中出现的有针对性的释放,提供抗饱和脂肪酸氧化保护的作用<sup>[45—46]</sup>。在药品中加入亚麻籽油,可保证 $\alpha$ -亚麻酸的供给,提供人体健康的 EDA 和 DHA,达到预防心脑血管疾病的形成、抗癌、促进大脑发育、抗衰老、提高免疫力和抑制炎症等功效。

## 3 亚麻及其活性成分的国内外研究发展现状

亚麻经过加工后得到的产品被用于人们日常饮食中,可在一定程度上补充人体本身不能合成的营养成分。国内外多名学者通过对亚麻及其产品的实验研究,得出了亚麻及其活性成分应用时的最佳条件,能为后续研究提供参考。

2018 年,赵圆圆<sup>[47]</sup>等用红花籽油和亚麻籽油的复合油对糖尿病小鼠的血糖进行降糖实验,结果表明复合油不仅可以降低小鼠血糖,其最优效果时间是在进餐后的 30 min,除此之外还可以提高其胰岛 $\beta$ 细胞分泌功能,提高胰岛素与葡萄糖的结合效率。

2017 年,张晓霞<sup>[48]</sup>等通过 GC-MS 法测定了不同产地产出亚麻籽的含油率,实验可知不同产地产出亚麻籽的含油率明显不同,可能与亚麻籽的生长环境变化、气温条件或者种植方式等因素有关,通过分析得出,还与产地经纬度和(或)海拔有关。不同地区的亚麻籽脂肪酸组分主要为软脂酸、硬脂酸、油酸、亚油酸及亚麻酸等 5 种,其它脂肪酸组成及相对含量有很大区别。结果显示,亚麻酸质量分数最高范围为 53.36%~65.84%,软脂酸质量分数最低范围为 2.41%~7.97%。

2013 年,Maureen<sup>[49]</sup>等通过动物和人体临床实验对亚麻籽及其相关产物对绝经期妇女的心血管疾病风险进行了研究。在动物实验的研究中表明,亚麻籽中含有的木酚素作为植物雌性激素三大主要类群之一,除了具有保护心脏作用外,还可以预先调节脂质和(或)改善内皮功能。木酚素还能显著降低高脂饮

食的小鼠内脏和肝脏脂肪堆积、高脂血症、高胆固醇血症、高胰岛素血症和高寿素血症的发生率。在人体临床试验的研究中表明,亚麻籽能减少绝经妇女的总胆固醇和低密度脂蛋白胆固醇,但对其血浆脂质浓度、抗氧化能力及内皮功能无影响。总之,动物和人体临床试验都表明,经常食用亚麻籽可以降低心血管疾病的发生率,特别是在绝经妇女的饮食中加入亚麻籽比单独食用添加亚麻籽纤维、ALA 和木聚糖更加有益。

2017 年, M.P. Arrieta<sup>[50]</sup>等将环氧化亚麻油作为改性剂,松香三乙二醇脂作为天然增粘剂,对聚氯乙烯进行了增塑剂改性。环氧化亚麻籽油是一种将亚麻籽经加压或萃取后,再经环氧化处理的环保型植物油。通过实验结果得出,环氧化亚麻油提高了材料的柔韧性,松香三乙二醇脂提高了材料的抗拉强度和弹性模量,且这 2 种添加剂本身的生物基性、可生物降解性和环氧化亚麻油均对聚氯乙烯机体的热稳定性有一定影响,现被广泛推荐作为聚氯乙烯配方中的增塑剂和(或)稳定剂使用。

## 4 结语

综上所述,亚麻及其活性成分在各个领域均有很大作用,是开发前景较大的健康功能食品原料。从食品方面来说,食用亚麻籽油可提供人体每日所需的 $\alpha$ -亚麻酸;亚麻籽胶作为食品中的添加剂来说,是对人体无毒、绿色、天然环保的新型添加剂材料,可在食品的制作过程中广泛使用。从生活方面来说,亚麻纤维具有透气性、不易裂和吸水性等特点,在生活中被制成亚麻服装、亚麻纱、纸张等,备受好评。现有的研究表明,我国亚麻产业的政府补贴资金较少,培育模式较传统,基础设备、市场管理体制还不够健全。另外,对于除亚麻籽油中各成分研究较多外,其他的成分实验研究还有大量的空白,这需要政府、科研单位和企业相互配合,将技术、资金和政策整合,实现互利共赢。

### 参考文献:

- [1] GOYAL A, SHARMA V, SIHAG M K. Oxidative Stability of Alpha-linolenic Acid ( $\omega$ -3) in Flaxseed Oil Microcapsules Fortified Market Milk[J]. Society of Dairy Technology, 2017, 70(2): 188—196.
- [2] 周亚东,李明. 世界油用亚麻生产发展回顾与展望[J]. 中国农学通报, 2010, 26(9): 151—155.  
ZHOU Ya-dong, LI Ming. Review and Prospection for Linseed Production in the World[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2010, 26(9): 151—155.
- [3] 夏学莲,史向阳,刘文涛,等. 纤维表面改性对

- PLA/Flax 复合材料性能的影响[J]. 包装工程, 2018, 39(1): 91—96.
- XIA Xue-lian, SHI Xiang-yang, LIU Wen-tao, et al. Effects of Fiber Surface Modifications on Performances of PLA/Flax Composites[J]. Packaging Engineering, 2018, 39(1): 91—96.
- [4] 林凤英, 林志光, 邱国亮, 等. 亚麻籽的功能成分及应用研究进展[J]. 食品工业, 2014, 35(2): 220—223.
- LIN Feng-ying, LIN Zhi-guang, QIU Guo-liang, et al. Progress and Application Research in Functional Components of Flaxseed[J]. The Food Industry, 2014, 35(2): 220—223.
- [5] 李瑞, 刘云, 阚欢, 等. 云南17种核桃仁主要营养成分测定及脂肪酸研究[J]. 包装工程, 2019, 40(7): 19—25.
- LI Rui, LIU Yun, KAN Huan, et al. Determination of Main Nutrient Components and Fatty Acids in 17 Kinds of Walnut Kernels in Yunnan[J]. Packaging Engineering, 2019, 40(7): 19—25.
- [6] 马方, 杨宜婷, 陈则华. 不同类型 *n*-3 多不饱和脂肪酸对心血管疾病的防治作用及其机制研究进展[J]. 中国油脂, 2018, 43(2): 65—69.
- MA Fang, YANG Yi-ting, CHEN Ze-hua. Role and Mechanism of Different Types of *n*-3 Polyunsaturated Fatty Acids in Prevention of Cardiovascular Diseases[J]. China Oils and Fats, 2018, 43(2): 65—69.
- [7] 徐松滨, 李威娜. 亚麻籽胶的特性研究[J]. 黑龙江科技信息, 2007(21): 32.
- XU Song-bin, LI Wei-na. Study on the Characteristics of Flaxseed Gum[J]. HeiLongjiang Science and Technology Information, 2007(21): 32.
- [8] 张雪娇, 王向红, 桑亚新, 等. 响应面法优化亚麻籽油制备工艺条件[J]. 中国食品学报, 2013, 13(9): 99—107.
- ZHANG Xue-jiao, WANG Xiang-hong, SANG Ya-xin, et al. Optimization of Process Parameters for Flaxseed Oil by Response Surface Methodology[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2013, 23(9): 99—107.
- [9] VIEIRA G, FREIRE B, FREIRE J T. Drying of Brown Flaxseed (*Linum Usitatissimum* L) in Fixed and Fluidized Bed[C]// The 18th International Drying Symposium Conference, 2012: 1—7.
- [10] 王丽英, 姜丽芳. 绿色植物——亚麻的开发利用[J]. 黑龙江纺织, 2017(2): 1—3.
- WANG Li-ying, JIANG Li-fang. The Development and Utilization of Green Plant—Flax[J]. HeiLongjiang Textile, 2017(2): 1—3.
- [11] IVA S, OSCAR G, MARIE B, et al. Phenotypic Evaluation of Flax Seeds by Image Analysis[J]. Industrial Crops and Products, 2013, 47: 232—238.
- [12] GOYAL A, SHARMA V, UPADHYAY N, et al. Flax and Flaxseed Oil: an Ancient Medicine & Modern Functional Food[J]. Journal of Food Science and Technology, 2014, 51(9): 1633—1653.
- [13] PRACZYK M, HELLER K, SILSKA G, et al. Analysis of Accumulation of Cadmium in Seeds of Selected Breeding Linseed (*Linum Usitatissimum* L) Genotypes Cultivated for Medicinal Purposes[J]. Herba Polonica, 2015, 61(1): 19—30.
- [14] EDWARDS S E, ROCHA I D C, WILLIAMSON E M, et al. Linseed (Flaxseed): *Linum Usitatissimum* L[J]. Phytopharmacy: an Evidence-Based Guide to Herbal Medical Products, 2015: 246—250.
- [15] KAUSHIK P, DOWLIN K, MCKNIGHT S, et al. Preparation, Characterization and Functional Properties of Flax Seed Protein Isolate[J]. Food Chem, 2016, 197(Part A): 212—220.
- [16] GOUDA N, SINGH R. K., MEHER S. N., et al. Production and Characterization of Bio Oil and Bio Char from Flax Seed Residue Obtained from Supercritical Fluid Extraction Industry[J]. Journal of the Energy Institute, 2017(90): 265—275.
- [17] CARRARO C, CRISTINA J, DANTAS, et al. Flaxseed and Human Health: Reviewing Benefits and Adverse Effects[J]. Food Reviews International, 2012, 28 (2): 203—230.
- [18] 洪兵. 木酚素防治糖尿病的研究进展[J]. 医药导报, 2010, 29(8): 1039—1042.
- HONG Bing. Research Progress of Lignans in the Prevention and Treatment of Diabetes Mellitus[J]. Herald of Medicine, 2010, 29(8): 1039—1042.
- [19] 孙益民, 陈海娟, 张晓, 等. 超临界二氧化碳萃取亚麻籽油工艺的可视化分析[J]. 天然产物研究与开发, 2013, 25(4): 533—538.
- SUN Yi-min, CHEN Hai-juan, ZHANG Xiao. Visual Analysis of Supercritical Carbon Dioxide Extraction Process for Linseed Oil[J]. Natural Product Research and Development, 2013, 25(4): 533—538.
- [20] 金军, 李燕青, 宋辉. 冷榨亚麻籽油中絮状物成分研究[J]. 现代食品, 2017(24): 95—97.
- JIN Jun, LI Yan-qing, SONG Hui. Study on the Composition of Floc in Cold Pressed Linseed Oil[J]. Modern Food, 2017(24): 95—97.
- [21] 任海伟, 李雪, 唐学慧. 亚麻籽粒及其油脂的特性分析与营养评价[J]. 食品工业科技, 2011, 32(6): 143—145.
- REN Hai-wei, LI Xue, TANG Xue-hui. Characteristic Analysis and Nutrition Evaluation of Flaxseed and Its Oil[J]. Science and Technology of Food Industry, 2011, 32(6): 143—145.
- [22] 连莹君. 制油工艺及内源添加剂对亚麻籽油氧化稳定性影响研究[D]. 广州: 暨南大学, 2016: 1—10.
- LIAN Ying-jun. Effect of Preparation Methods and Endogenous Additives on the Oxidative Stability of Flax Oil[D]. Guangzhou: Jinan University, 2016: 1—10.
- [23] 王磊. 亚麻籽的综合利用[D]. 北京: 北京化工大学,

- 2015: 23—28.  
WANG Lei. The Comprehensive Utilization of Flaxseed[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2015: 23—28.
- [24] 谢冬微, 路颖, 赵德宝, 等. 亚麻种质资源木酚素含量及农艺性状分析与评价[J]. 中国麻业科学, 2016, 38(4): 145—151.  
XIE Dong-wei, LU Ying, ZHAO De-bao, et al. Lignan Content and Agronomic Traits Analysis and Evaluation of Flax Germplasm[J]. Plant Fiber Sciences in China, 2016, 29(4): 145—151.
- [25] 陈海华, 许时婴. 亚麻籽胶中多糖含量的测定[J]. 粮油加工与食品机械, 2003(10): 116—117.  
CHEN Hai-hua, XU Shi-ying. Determination of Polysaccharides in Linseed Gum[J]. Machinery for Cereals Oil and Food Processing, 2003(10): 116—117.
- [26] 陈海华, 许时婴, 王璋. 亚麻籽胶化学组成和结构的研究[J]. 食品工业科技, 2004(1): 103—105.  
CHEN Hai-hua, XU Shi-ying, WANG Zhang. Study on Chemical Composition and Structure of Linseed Gum[J]. Science and Technology of Food Industry, 2004(1): 103—105.
- [27] LUO Jian-ming, LI Yue-tong, MAI Yun-shi, et al. Flaxseed Gum Reduces Body Weight by Regulating Gut Microbiota[J]. Journal of Functional Foods, 2018, 47: 136—142.
- [28] 李轩领. 亚麻籽胶酸性多糖和亚麻籽蛋白的泡沫分离研究[D]. 西宁: 青海师范大学, 2015: 2—3.  
LI Xuan-ling. Research of Acidic Polysaccharides in Flaxseed Gum and Flaxseed Protein by Foam Separation[D]. Xining: Qinghai Normal University, 2015: 2—3.
- [29] 杨金娥, 黄庆德, 黄凤洪, 等. 打磨法提取亚麻籽胶粉的工艺[J]. 农业工程学报, 2013, 29(13): 270—276.  
YANG Jin-e, HUANG Qing-de, HUANG Feng-hong, et al. Process of Extracting Flaxseed Gum Powder by Abrasion[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(13): 270—276.
- [30] 梁珊, 张宁, 韩子晟, 等. 亚麻籽胶低聚糖的制备及其生物活性评价[J]. 中国粮油学报, 2018, 33(1): 62—68.  
LIANG Shan, ZHANG Ning, HAN Zi-sheng, et al. Preparation of Flaxseed Gum Oligosaccharides and Their Bioactivity Evaluation[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2018, 33(1): 62—68.
- [31] 邓思杨, 蒋悦, 乔雨, 等. 亚麻籽胶与变性淀粉对速冻猪肉丸品质影响的研究[J]. 食品研究与开发, 2018, 39(11): 59—64.  
DENG Si-yang, JIANG Yue, QIAO Yu, et al. Effect of Flaxseed Gum and Compound Starch on the Quality of Quick-frozen Pork Meatballs[J]. Food Research And Development, 2018, 39(11): 59—64.
- [32] 吴艳霞. 亚麻籽及亚麻籽油[J]. 西部粮油科技, 1994(2): 22—23.  
WU Yan-xia. Linseed and Linseed Oil[J]. China West Grain and Oil Technology, 1994(2): 22—23.
- [33] 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.  
WANG Rui-yuan. The Consumption Market of Flaxseed Oil in China is Promising[J]. China Oils and Fats, 2018, 43(1): 1—3.
- [34] LIU S, LOW N H, NICKERSON M T. Entrapment of Flaxseed Oil Within Gelatin-gum Arabic Capsules[J]. Journal of the American Oil Chemists' Society, 2010, 87(7): 809—815.
- [35] 黄敏, 姚莉, 赵玲华. 喷雾干燥法制备胡麻籽油微胶囊工艺的优化[J]. 农产品加工, 2015(4): 42—45.  
HUANG Min, YAO Li, ZHAO Ling-hua. Research on Microencapsulation of Linseed Oil by Spray Drying[J]. Farm Products Processing, 2015(4): 42—45.
- [36] 胡晓军, 刘超, 李群, 等. 我国胡麻籽油加工业现状及对策研究[J]. 农产品加工(学刊), 2014(4): 63—64.  
HU Xiao-jun, LIU Chao, LI Qun, et al. Study on Present Situation and Countermeasures of Flax Seed Oil Processing Industry in China[J]. Academic Periodical of Farm Products Processing, 2014(4): 63—64.
- [37] KAUSHIKP, DOWLINGK, MCKNIGHT, et al. Microencapsulation of Flaxseed Oil in Flaxseed Protein and Flaxseed Gum Complex Coacervates[J]. Food Research International, 2016, 86: 1—8.
- [38] 梁少华, 王金亚, 董彩文, 等. 亚麻籽和亚麻籽油理化特性及组成分析[J]. 中国粮油学报, 2016, 31(12): 61—66.  
LIANG Shao-hua, WANG Jin-ya, DONG Cai-wen, et al. Physical and Chemical Characteristics and Composition Analysis of the Flaxseed and Flaxseed Oil[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2016, 31(12): 61—66.
- [39] GOYAL A, SHARMA V, SIHAG M K, et al. Effect of Microencapsulation and Spray Drying on Oxidative Stability of Flaxseed Oil and Its Release Behavior under Simulated Gastrointestinal Conditions[J]. Drying Technology, 2016, 34(7): 810—821.
- [40] RABIE Y K, MOHAMMAD A Z. Quality Evaluation of Flaxseed Oil Obtained by Different Extraction Techniques[J]. Lebensmittel-Wissenschaft und-Technologie, 2013, 3(1): 338—345.
- [41] 张东, 薛雅琳, 段章群, 等. 牡丹籽油和亚麻籽油化学组成分析与比较[J]. 中国油脂, 2017, 42(10): 34—38.  
ZHANG Dong, XUE Ya-lin, DUAN Zhang-qun. Analysis and Comparison of Chemical Composition in Peony Seed Oil and Flaxseed Oil[J]. China Oils and Fats, 2017, 42(10): 34—38.
- [42] 赵芳, 李桂华, 罗世龙. 葡萄籽油和亚麻籽油储藏期间氧化对功能性成分影响[J]. 粮食与油脂, 2011(5): 19—22.  
ZHAO Fang, LI Gui-hua, LUO Shi-long. Effects of Oxidation on Functional Ingredients of Grape Seed Oil

- and Linseed Oil in the Course of Preservation[J]. *Cereals and Oils*, 2011(5): 19—22.
- [43] 黄海浪, 张水华. 亚麻籽的营养成分及其在食品工业中的应用[J]. *食品研究与开发*, 2006, 27(6): 147—149.
- HUANG Hai-lang, ZHANG Shui-hua. The Nutritional Substances of Flaxseed and The Application in Food Industry[J]. *Food Research And Development*, 2006, 27(6): 147—149.
- [44] 徐江波. 亚麻籽深加工关键技术研究[D]. 西宁: 青海师范大学, 2014: 2—4.
- XU Jiang-bo. Key Technology for Deep Processing of Flax Seed[D]. Xining: Qinghai Normal University, 2014: 2—4.
- [45] 柏薇薇.  $\alpha$ -亚麻酸的功效[J]. *食品界*, 2017(10): 99.
- BAI Wei-wei.  $\alpha$ -Linolenic Acid[J]. *Food Industry*, 2017(10): 99.
- [46] KARACA A C, NICKERSON M, LOWN H. Microcapsule Production Employing Chickpea or Lentil Protein Isolates and Maltodextrin: Physicochemical Properties and Oxidative Protection of Encapsulated Flaxseed Oil[J]. *Food Chemistry*, 2013, 139(1/4): 448—457.
- [47] 赵圆圆, 杨梦娟, 李心爽, 等. 红花籽亚麻籽复合油对小鼠血糖的干预作用[J]. *现代食品科技*, 2018, 34(10): 57—63.
- ZHAO Yuan-yuan, YANG Meng-juan, LI Xin-shuang, et al. Effect of Mixture of Safflower and Flaxseed Oil on Blood Glucose in Diabetic Mice[J]. *Modern Food Science and Technology*, 2018, 34(10): 57—63.
- [48] 张晓霞, 尹培培, 杨灵光, 等. 不同产地亚麻籽含油率及亚麻籽油脂脂肪酸组成的研究[J]. *中国油脂*, 2017, 42(11): 142—146.
- ZHANG Xiao-xia, YIN Pei-pei, YANG Ling-guang. Oil Contents in Flaxseeds from Different Origins and Fatty Acid Compositions of Flaxseed Oils[J]. *China Oils and Fats*, 2017, 42(11): 142—146.
- [49] MEISTER M, SMITH B J, BAHRAM H, et al. Effects of Flaxseed on Cardiovascular Disease Risk Factors in Menopause[J]. *Nutrition and Diet in Menopause*, 2013: 201—211.
- [50] ARRIETA M P, SAMPER M D, JIMÉNEZ-LÓPEZ M, et al. Combined Effect of Linseed Oil and Gum Rosin as Natural Additives for PVC[J]. *Industrial Crops and Products*, 2017, 99: 196—204.