

亚麻籽酚类化合物抗氧化和油相迁移特性研究进展

禹晓¹, 黄沙沙¹, 聂成镇¹, 相启森¹, 翟娅菲¹, 申瑞玲¹, 邓乾春^{2*}

(1. 郑州轻工业大学 食品与生物工程学院, 食品生产与安全河南省协同创新中心, 河南 郑州, 450001;

2. 中国农业科学院油料作物研究所, 油料脂质化学与营养湖北省重点实验室, 湖北 武汉, 430062)

摘要: 亚麻籽除了富含植物来源 n-3 多不饱和脂肪酸 α -亚麻酸外, 也是木酚素、酚酸等功能性植物化合物的重要来源。本文重点综述了品种和种植区域、成熟过程、不同预处理(萌动、烘烤/焙炒、微波)及制油工艺(压榨法、溶剂法)对亚麻籽典型酚类化合物丰度、存在形态、抗氧化及油相迁移特性的影响, 以期为亚麻籽油的提质制取及高值化应用提供理论依据。

关键词: 亚麻籽; 酚类化合物; 抗氧化; 预处理; 制油工艺

中图分类号: S563.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-9084(2019)04-0643-07

Research progress on antioxidant potential and migration characteristics into oil phase for flaxseed phenolic compounds

YU Xiao¹, HUANG Sha-sha¹, NIE Cheng-zhen¹, XIANG Qi-sen¹, ZHAI Ya-fei¹, SHEN Rui-ling¹, DENG Qian-chun^{2*}

(1. College of Food and Biological Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Henan Collaborative Innovation Center for Food Production and Safety, Zhengzhou 450001, China; 2. Oil Crops Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Hubei Key Laboratory of Lipid Chemistry and Nutrition, Wuhan 430062, China)

Abstract: Apart from being rich in plant-derived n-3 polyunsaturated fatty acid α -linolenic acid, flaxseed also became an important source of bioactive phytochemicals, including lignans, phenolic acids, etc. In this paper, we had reviewed the effects of various factors on flaxseed typical phenolic compounds. The factors included planting regions, maturation process, pretreatment (germination, baking/roasting and microwave) and processing technology (pressing and solvent extraction). The typical phenolic compounds traits included content, existing form, antioxidant potential and migration characteristics. The aim was to provide a theoretical basis for the extraction and high-value application of flaxseed oil.

Key words: flaxseed; phenolic compounds; antioxidant potential; pretreatment; oil processing technology

亚麻(*Linum usitatissimum* L.)是世界十大油料作物之一, 2017年我国亚麻籽产量约36万吨, 仅次于加拿大(50万吨), 居世界第二位^[1]。我国亚麻籽的种植区域主要分布在新疆、内蒙古、宁夏、甘肃、河北、山西等西北和华北地区。为了适应不同气候、土壤等环境条件或增加病虫害的抗性, 目前我国已培育出了50多个亚麻主栽品种, 包括伊亚、坝亚、陇亚、晋亚、轮选、宁亚、定亚等系列品种。亚麻籽除了能够提供植物来源 n-3 多不饱和脂肪酸

(n-3 polyunsaturated fatty acids, n-3PUFA) α -亚麻酸外, 还提供木酚素、酚酸、植物甾醇、生育酚等重要功能性植物化合物^[2]。

1 亚麻籽典型酚类化合物的空间定位及存在形态

木酚素作为一种具有弱雌激素效应的植物组分, 以亚麻籽中的含量最高^[3]。亚麻木酚素不仅作为构建亚麻籽内源性抗氧化体系的关键组分, 还与 α -

收稿日期: 2018-12-04

基金项目: 国家自然科学基金(31801502); 河南省科技攻关(182102110391); 郑州轻工业学院博士启动基金(2016BSJJ022)

作者简介: 禹晓(1986-), 女, 讲师, 博士, 主要从事脂质化学与营养研究, E-mail: yuxiao775@126.com

* 通讯作者: 邓乾春(1979-), 男, 副研究员, 博士, 主要从事脂质化学与营养研究, E-mail: dengqianchun@caas.cn

亚麻酸(α -linolenic acid, ALA)共同构成了亚麻籽改善年龄相关退行性疾病发生发展的重要物质基础^[4]。

亚麻木酚素,即开环异落叶松树脂素(secoisolariciresinol, SECO)二葡萄糖苷(secoisolariciresinol diglucoside, SDG),主要存在于亚麻籽外种皮骨细胞的次生细胞壁中(~92%),仅少量存在于胚乳细胞内含体中(~8%)。在成熟的亚麻籽中,亚麻木酚素几乎不以游离形式存在,而与3-羟基-3-甲基-戊二酸(hydroxymethyl-glutaric acid, HMGA)通过酯键共价结合,平均每5个SDG与4个HMGA交联构成亚麻木酚素低聚体^[5]。进一步的研究发现,其它酚类化合物,包括咖啡酸糖苷(caffeic acid glucoside, CAG)、对香豆酸糖苷(*p*-coumaric acid glucoside, CouAG)、阿魏酸糖苷(ferulic acid glucoside, FAG)和草棉黄素糖苷(herbacetin diglucoside, HDG)参与构成亚麻木酚素大分子聚合物。其中,HDG直接与HMGA连接参与构成木酚素大分子的骨架结构,而CAG、CouAG和FAG则交联于SDG糖苷上,决定了亚麻木酚素大分子的链长和分子量大小(图1)^[6-8]。此外,除了结合态的酚酸外,亚麻籽仁中还富含游离和酯化态酚酸,包括没食子酸、原儿茶酸、丁香酸、阿魏酸甲酯、香草酸甲酯等^[9,10]。

因品种、种植区域对亚麻木酚素和酚酸含量的显著影响,导致对亚麻木酚素大分子精细结构的研究更趋复杂化。目前对亚麻木酚素大分子的结构解析仅停留在对SDG、CAG、CouAG、FAG等单一组分的定量分析上,而对不同酚酸参与构成的木酚素低聚体含量及分子结构的研究还鲜有涉及。

2 品种和种植区域对亚麻籽典型酚类化合物的影响

品种和种植区域对亚麻籽中木酚素、酚酸含量

具有重要影响。我们前期对32个品种亚麻籽木酚素和总酚含量进行了比较分析,木酚素含量最低值为11.37 mg/g,最高值为33.31 mg/g(以SDG计)^[11]。来自瑞典的14个品种、丹麦的15个品种和瑞士的6个品种亚麻籽木酚素含量分析也显示,亚麻籽木酚素含量具有明显的品种差异性,最高值分别是最低值的1.97倍,1.51倍和2.56倍^[12,13]。我们测试的32个品种亚麻籽中总酚含量最高值是最低值的2.25倍,范围为109.93~246.88 mg/100g(以没食子酸计)^[11]。来自埃及的5个品种亚麻籽总酚含量最高值是最低值的2.23倍(以没食子酸计)^[12]。此外,不同种植区域亚麻木酚素多聚体水解物组成和含量也具有明显差异,其中产自河北和内蒙古的亚麻籽品种具有较高的SDG含量,而产自新疆的亚麻籽则具有较高的CouAG含量。不同种植区域亚麻籽总酚含量结果显示,产自陕西和河北的亚麻籽总酚含量明显高于产自宁夏和新疆的亚麻籽^[9]。

3 亚麻籽成熟过程中典型酚类化合物的累积规律

目前关于亚麻木酚素等酚类化合物的研究主要以收获成熟的亚麻籽为材料,而对亚麻籽成熟过程中木酚素、酚酸、黄酮等典型酚类化合物合成动力学方面的研究仍相对较少。Herchi等^[14]研究表明,亚麻籽成熟过程中(亚麻开花第7~56d),总酚含量呈持续下降的趋势(140→80 mg没食子酸当量/kg油),而抗氧化活性则呈现先逐步增加后降低的趋势,在开花后第42d达到最大值(DPPH自由基清除活性为30.82%→55.37%→45.00%)。亚麻籽油中总酚含量与抗氧化活性之间的这种不一致性可能与成熟过程中亚麻籽中木酚素、酚酸等酚类物质存在形态和制油过程中迁移特性的改变有关^[15]。研究

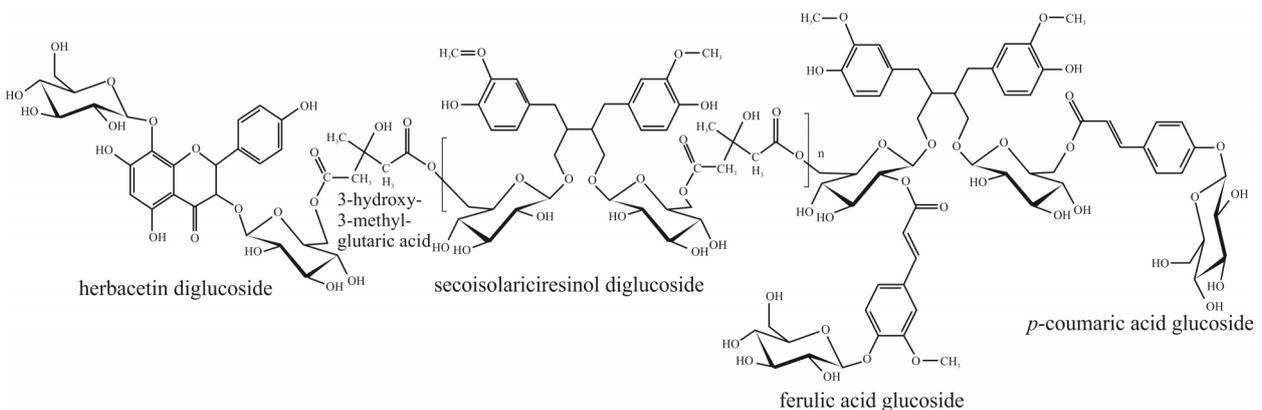


图1 亚麻木酚素大分子聚合物的化学结构

Fig. 1 Chemical structure of flaxseed lignan macromolecular

表明,尿苷二磷酸-葡萄糖基转移酶UGT74S1是调控亚麻籽中SECO糖苷化生成SDG的关键酶。亚麻籽SDG的单体苷元SECO及其中间产物单葡萄糖苷(secoisolariciresinol monoglucoside, SMG)几乎不在成熟亚麻籽中累积^[6]。

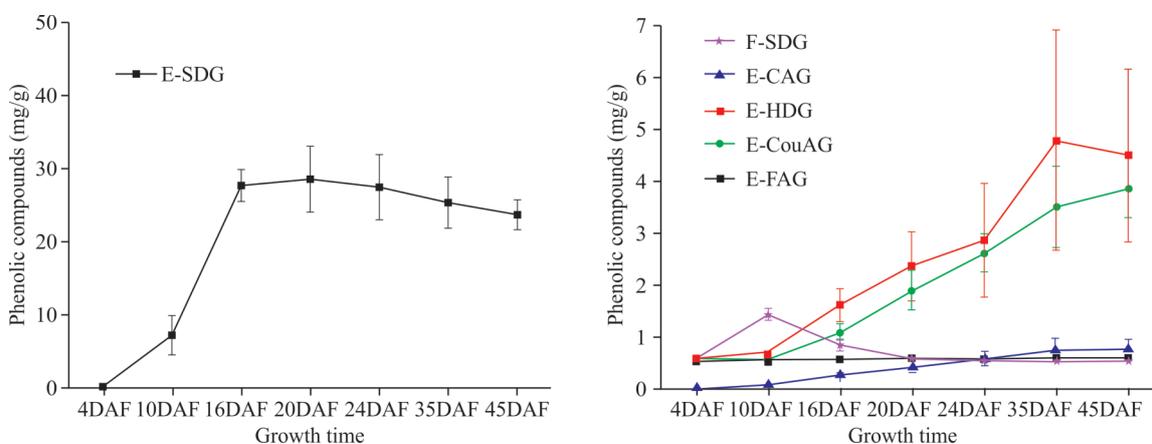
此外,Ramsay等^[6]研究了亚麻籽成熟过程中构成亚麻木酚素大分子的亚组分累积规律。如图2所示,游离态SDG(F-SDG)也仅存在于亚麻开花第4~24d(S0~S4阶段),在亚麻开花第10d(S1阶段)达到最大值(0.86 mg/g)。酯化态SDG(E-SDG)在亚麻开花第16~20d(S2~S3阶段)达到最大值(27.66~28.60mg/g),在亚麻开花第24~45d(S4~S6阶段)则呈逐步降低趋势(27.51→23.72mg/g)。参与构建亚麻木酚素大分子的HDG,则在亚麻籽生长的整个阶段主要以酯化态(E-HDG)形式存在。其中,在亚麻开花第4~35d(S0~S5阶段)呈持续增加的趋势(0.04→4.07mg/g),在亚麻开花第45d(S6阶段)则稍有降低(3.79mg/g)。相比较而言,酯化态CouAG(E-CouAG)、CAG(E-CAG)和FAG(E-CAG)则在亚麻籽整个成熟过程中呈持续增加的趋势,在S6阶段分别达到最大值3.18mg/g、0.74mg/g和1.08mg/g。在研究亚麻籽中 α -亚麻酸累积规律的基础上,探讨木酚素等典型酚类化合物的累积特性,对最大限度增加亚麻籽营养特性,指导亚麻籽收获成熟度具有重要意义。但这一累积规律是否具有品种特异性仍待进一步的研究。

4 亚麻籽典型酚类化合物的抗氧化特性

亚麻籽中木酚素、酚酸等酚类化合物特异性的存在形态可能对其抗氧化活性的发挥存在影响。

已有研究表明,相同浓度条件下(0.04~0.08 mmol/100g油),与SDG相比,SECO则表现出更有效地抑制菜籽油自动氧化的潜力(氧化诱导时间:9.37~10.23~h vs. 8.86~9.80 h),但二者之间无统计学差异。而亚麻木酚素多聚体(浓度:10~30 mg;氧化诱导时间9.10~10.18 h)抗纯粹油脂体系中脂质氧化的能力低于其水解产物SDG和SECO^[17]。更值得注意的是,亚麻籽水提取物(主要为亚麻木酚素多聚体)及其碱水解物(主要为SDG,其次为HMGA、HDG、CAG、CouAG和FAG)均不能有效抑制葵花籽油的自动氧化,而亚麻籽水提取物及其碱+酸水解产物(主要为SDG、HDG、CAG、CouAG和FAG苷元)则能够有效抑制 β -胡萝卜素/亚油酸乳化体系的自动氧化^[18]。进一步的研究表明,相同浓度条件下(500 μ mol/kg),SECO抑制亚麻籽油及亚麻籽油乳液氧化稳定性的能力优于天然抗氧化剂 α -生育酚和人工合成抗氧化剂丁基羟基茴香醚(BHA)^[19]。从构效关系上来说,SDG和SECO的抗氧化活性主要取决于其苯环上的3-甲氧基-4-羟基取代基团,但亚麻木酚素多聚体的空间位阻效应和SDG羟基糖基化一定程度上阻碍了其清除自由基活性,从而表现出较差的抑制纯粹油脂体系自动氧化的能力^[18]。相反,亚麻木酚素/酚酸复合物这一多聚体存在形态可能使其在乳液体系中兼具抗氧化、空间位阻和立体排斥多重效应,从而提高了乳液体系的氧化稳定性。

我们课题组比较分析了木酚素大分子、SDG及其苷元SECO和CouAG对亚麻籽油纳米乳液氧化稳定性的影响,发现作为构建亚麻木酚素大分子的CouAG拮抗乳液体系脂质氧化的能力最弱,远低于



注:由文献[6]结果整理而成。F-: 游离态;E-: 酯化态

Note: Figure 2 is integrated from reference [6]. DAF: days after flowering; F-: Free; E-: Estered

图2 亚麻成熟过程中木酚素大分子的累积规律

Fig. 2 Accumulation of lignan macromolecular during flaxseed development

亚麻木酚素大分子和SECO(未刊出)。研究还发现,从全脂亚麻籽粉提取的酚类化合物比从脱脂粉提取的酚类化合物具有更强的自由基清除活性(58% vs. 7~21%),作者推测这可能与全脂亚麻籽粉含有游离态酚酸而脱脂亚麻籽粉则主要为结合态酚酸有关^[7]。评价体系也是影响亚麻木酚素SDG及其苷元SECO、哺乳动物木酚素肠二醇(enterodiol, ED)和肠内酯(enterolactone, EL)抗氧化活性的关键因素。研究发现,SDG和SECO,而非ED和EL,具有较强且相当的DPPH自由基清除活性(100 μ mol/L; 82.4%, 78.6%)。而对AAPH诱导的DNA损伤和脂质过氧化,抗氧化活性分别为SDG>SECO>ED \approx EL和SDG>SECO \approx ED \approx EL \approx Trolox(60 μ mol/L)。作者推测植物和哺乳动物木酚素的抗氧化活性可能分别在细胞外和细胞内起作用^[20]。因此,进一步研究亚麻籽中典型酚类化合物存在形态及其在不同脂质体系中的氧化/抗氧化特性对指导亚麻籽油的提质制取具有重要意义。

5 不同预处理及制油工艺对亚麻籽典型酚类化合物及其油相迁移的影响

为进一步提高亚麻籽油的营养特性和氧化稳定性,国内外研究学者逐步开展了不同前处理及制取工艺对亚麻籽油中关键抗氧化组分和抗氧化特性影响的研究。我们课题组前期在建立亚麻籽油营养评价模型过程中发现,与其它脂质伴随物相比,亚麻籽油总酚含量与亚麻籽油体外抗氧化活性的相关性更为显著^[21],推测其对亚麻籽油抗氧化活性的贡献度较大。因此,亚麻籽中特定种类和存在形态的酚类化合物的油相迁移成为提升亚麻籽油氧化稳定性的关键。

5.1 萌动预处理

萌动作为生物体最有活力的阶段,随着籽粒碳水化合物、蛋白质、脂质等水解导致的干物质损耗加剧,多酚、黄酮、维生素C等活性组分的含量明显增加,从而提高其保健功能^[22]。为改善亚麻籽中因木酚素大分子存在形态对其抗氧化活性的影响,近年来关于萌动预处理对亚麻籽营养特性及酚类化合物影响的研究正逐步被开展。王笑园等从蛋白质、脂肪、矿物质、维生素E和C等组分含量变化的角度整体剖析了萌动处理对亚麻籽营养特性的影响^[23],但未涉及木酚素等酚类化合物的动态变化规律。Herchia等^[24]研究了萌动过程对亚麻籽油抗氧化特性和总酚含量的影响。结果表明,亚麻籽油中

总酚含量(以阿魏酸计)在亚麻籽萌动0~4d过程中呈逐步下降的趋势,黄酮含量(以木犀草素计)则呈先增加后降低的趋势,在萌动第2d达到最大值。相比较而言,萌动亚麻籽油的总抗氧化活性则表现出先降低后增加的趋势,在萌动第3d达到最小值。Wang等人^[25]研究了萌动过程对亚麻籽总酚和抗氧化活性的影响。结果表明,与未萌动亚麻籽相比,萌动8d亚麻籽中总酚和黄酮含量分别增加2.67和5.48倍,过氧化自由基和氧自由基清除能力分别增加3倍和4倍。在萌动0~10d过程中,亚麻籽中游离态咖啡酸和对香豆酸呈持续增加的趋势,而结合态的咖啡酸、对香豆酸和阿魏酸则呈先逐步增加,后基本趋于稳定的趋势。进一步的研究表明,与未萌动亚麻籽相比,萌动8d亚麻籽中SDG和SECO含量分别增加6.3倍和4.5倍,且伴随着编码SDG生物合成相关基因表达的增加。而总酚、黄酮含量和抗氧化活性(ORAC值)则在萌动第10d达到最大值,分别增加5.6倍、55倍和192.51 μ mol Trolox equiv/g^[26]。以上研究表明,适宜的萌动时间不仅能够明显增加亚麻籽中木酚素等酚类化合物的含量,还可能改变木酚素的存在形态,从而提高亚麻籽的体外抗氧化活性。但能否进一步影响亚麻籽油制取过程中酚类化合物的油相迁移特性,仍需进一步研究。

5.2 蒸炒预处理+压榨法制油

目前针对高品质亚麻籽油所采用的制取工艺主要为低温压榨+冷析法精炼,这一制取工艺避免了热处理对油中 α -亚麻酸及生物活性脂质伴随物的破坏。但研究发现,亚麻籽酚类化合物尤其是木酚素因其特异性的存在形态在全籽粒冷压榨过程中具有较低的溶出和油相迁移特性。此外,冷榨法制得的亚麻籽油中木酚素仍以多聚体的形式存在,这不利于其抗氧化活性的发挥^[21]。烘烤和焙炒是热榨亚麻籽油制取过程中两种重要的热处理方式。相对于冷榨工艺,热压榨工艺能够提高亚麻籽油得率,改善其品质特性和风味^[27,28]。重要的是,基于酸价、过氧化值、共轭二烯值等评价结果显示,与冷榨油相比,热榨亚麻籽油还具有较高的贮藏稳定性^[29],这可能与高温烘烤/焙炒处理增加亚麻籽中木酚素多聚体和游离态酚酸等抗氧化组分的油相迁移有关。但因亚麻木酚素特异性的存在形态,传统热处理不会诱导多聚体降聚效应^[30],因此不足以显著提高其在纯粹油脂体系的抗氧化潜力。

5.3 微波预处理+压榨法制油

微波作为绿色、有效的前处理方法正逐步用于

亚麻籽油的高效提质制取工艺的研究。与传统高温烘烤/焙炒相比,适度微波预处理+压榨亚麻籽油的氧化稳定性明显提高(过氧化值:25.09~28.04mmol/kg vs. 7.97mmol/kg)^[29]。此外,微波场处理能够不同程度地增加亚麻籽油中总酚酸(35mg/100g, +75%)、黄酮(39.9 mg/100g, +37.3%)的含量^[31]。我们课题组的研究也表明,水分调质+微波预处理+压榨+冷析法精炼亚麻籽油中总酚含量是直接压榨亚麻籽油的1.42倍(119.33mg/100g vs. 84.4mg/100g)^[32]。这些研究表明,适度微波预处理具有增加亚麻木酚素、酚酸等酚类化合物油相迁移的潜力。但这一过程是否发生了木酚素大分子解聚效应、特定酚酸的转化及极性变化,从而增强其定向溶出/释放,仍待进一步深入研究。

与其它油籽不同的是,亚麻籽种皮最外层含有约9%亲水性胶体—亚麻籽胶。作为水溶性杂多糖,亚麻籽胶具有高黏性、强持水性、胶凝特性和乳化性^[33]。在全籽压榨制油过程中可能会不同程度地“捕获”来自外种皮骨细胞层的木酚素大分子以及来自胚乳细胞的游离酚酸,从而抑制亚麻籽中酚类化合物的释放和油相迁移。微波场诱导亚麻木酚素的释放主要基于其对亚麻籽细胞壁的破坏效应,那么水介质下微波场则可能通过强化其对亚麻籽胶多糖结构的影响(如适度降解),影响多糖胶分支相互交联、空间网状凝胶结构形成^[34],诱导更强烈的细胞壁破坏效应,从而增加临近亚麻籽胶多糖的木酚素大分子和胞内酚酸的溶出/释放。

5.4 溶剂萃取法制油

为提升油脂品质特性,油脂的溶剂萃取法制油正逐步从传统溶剂萃取转向加速溶剂萃取、亚临界、超临界流体萃取等新型制油方法。易志^[29]比较

了不同提取工艺亚麻籽油中酚类化合物含量和氧化稳定性。结果表明,与传统溶剂提取法相比,亚临界萃取所得亚麻籽油氧化稳定性最好,且伴随着较高浓度的多酚和黄酮类物质在油相的富集。Khattab等^[35]研究也发现,与传统溶剂提取和加速溶剂提取相比,超临界CO₂提取能够明显增加亚麻籽油中酚类化合物含量(47.58μg/g vs. 20.88μg/g和15.69μg/g),主要表现为亚麻木酚素的油相迁移(32.28μg/g)。与压榨法相比,溶剂法尤其是亚麻临界和超临界流体提取能够诱导亚麻籽中特定的脂质伴随物,如木酚素、酚酸等靶向性释放和油相迁移。但这些新型制取工艺受设备投资成本、批处理能力等因素的制约,一定程度上阻碍其在高脂质伴随物含量和抗氧化亚麻籽油工业化生产中的应用。

6 结论与展望

目前功能性脂质的制取工艺仍存在过度加工、制备工艺同质化等问题,不利于酚类化合物等具有抗氧化和生物活性的脂质伴随物的油相迁移和富集,从而影响功能脂质的抗氧化活性和营养价值。α-亚麻酸、木酚素和酚酸是亚麻籽油发挥其生物活性的重要物质基础。在不明显降低亚麻籽脂肪含量的前提下,适度萌动预处理不仅能够增加木酚素、酚酸含量,还能够改变其存在形态,提升其抗氧化活性。与传统的热处理相比,微波预处理对诱导亚麻木酚素大分子解聚增活提供了可能,并能够进一步增加亚麻籽整粒压榨过程中木酚素、酚酸等典型酚类化合物的油相迁移。总之,通过构建适宜的亚麻籽油的绿色提质制取技术,靶向调控木酚素、酚酸等的油相迁移,对进一步提升其氧化稳定性和营养特性具有重要意义。

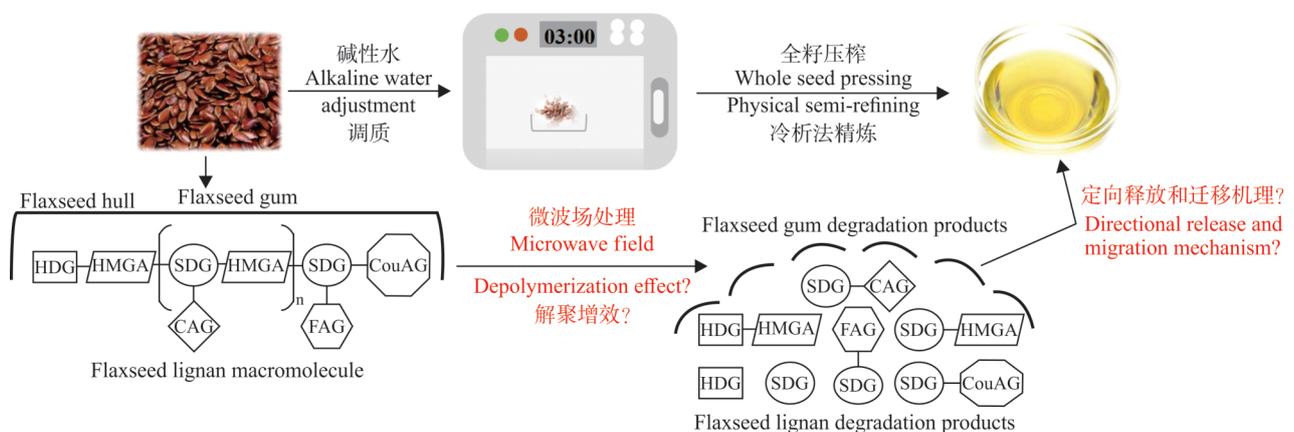


图3 微波预处理增加亚麻木酚素油相迁移的可能机制

Fig. 3 Possible mechanism for increased oil phase migration of flaxseed lignans mediated by microwave pretreatment

参考文献:

- [1] FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). FAOSTAT Database. [http://faostat3.fao.org/download/Q/QC/E\[OL\]](http://faostat3.fao.org/download/Q/QC/E[OL]).
- [2] 邓乾春, 马方励, 魏晓珊, 等. 亚麻籽加工品质特性研究进展[J]. 中国油料作物学报, 2016, 38(1): 126-134.
- [3] Kajla P, Sharma A, Sood D R. Flaxseed: a potential functional food source[J]. J Food Sci Technol, 2015, 52(4): 1857-1871.
- [4] Pilar B, Güllich A, Oliveira P, et al. Protective role of flaxseed oil and flaxseed lignan secoisolariciresinol diglucoside against oxidative stress in rats with metabolic syndrome[J]. J Food Sci, 2017, 82(12): 3029-3036.
- [5] Herchi W, Arráez-Román D, Trabelsi H, et al. Phenolic compounds in flaxseed: a review of their properties and analytical methods. an overview of the last decade [J]. J Oleo Sci, 2014, 63(1): 7-14.
- [6] Ramsay A, Fliniaux O, Quérou A, et al. Kinetics of the incorporation of the main phenolic compounds into the lignan macromolecule during flaxseed development [J]. Food Chem, 2017, 217: 1-8.
- [7] 丁进锋. 亚麻籽脱壳分离系统关键技术及设备研究[D]. 北京: 中国农业机械化科学研究院, 2016.
- [8] Attoumbré J, Bienaimé C, Dubois F, et al. Development of antibodies against secoisolariciresinol—Application to the immunolocalization of lignans in *Linum usitatissimum* seeds [J]. Phytochemistry, 2010, 71(17/18): 1979-1987.
- [9] Alu'Datt M H, Rababah T, Ereifej K, et al. Distribution, antioxidant and characterisation of phenolic compounds in soybeans, flaxseed and olives [J]. Food Chem, 2013, 139(1/2/3/4): 93-99.
- [10] Herchi W, Sawalha S, Arráez-Román 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.
- [11] Deng Q C, Yu X, Ma F L, et al. Comparative analysis of the *in-vitro* antioxidant activity and bioactive compounds of flaxseed in China according to variety and geographical origin [J]. Int J Food Prop, 2017, 20(sup3): S2708-S2722.
- [12] Johnsson P, Kamal-Eldin A, Lundgren L N, et al. HPLC method for analysis of secoisolariciresinol diglucoside in flaxseeds [J]. J Agric Food Chem, 2000, 48(11): 5216-5219.
- [13] Kraushofer T, Sontag G. Determination of some phenolic compounds in flax seed and nettle roots by HPLC with coulometric electrode array detection [J]. Eur Food Res Technol, 2002, 215(6): 529-533.
- [14] El-Beltagi H S, Salama Z A, El-Hariri D M. Evaluation of fatty acids profile and the content of some secondary metabolites in seeds of different flax cultivars (*Linum usitatissimum* L.) [J]. Bulg J Plant Physiol, 2007, 33: 187-202.
- [15] Herchi W, Bahashwan S, Trabelsi H, et al. Effect of seed maturation stages on physical properties and antioxidant activity in flaxseed (*Linum usitatissimum* L.) [J]. Food Sci Technol, 2015, 35(4): 598-604.
- [16] Fofana B, Ghose K, McCallum J, et al. UGT74S1 is the key player in controlling secoisolariciresinol diglucoside (SDG) formation in flax [J]. BMC Plant Biology, 2017, 17(1): 1-13.
- [17] Hosseinian F S, Muir A D, Westcott N D, et al. Antioxidant capacity of flaxseed lignans in two model systems [J]. J Amer Oil Chem Soc, 2006, 83(10): 835-840.
- [18] Slavova-Kazakova A, Karamać M, Kancheva V, et al. Antioxidant activity of flaxseed extracts in lipid systems [J]. Molecules, 2015, 21(1): E17.
- [19] Hano C, Corbin C, Drouet S, et al. The lignan (+)-secoisolariciresinol extracted from flax hulls is an effective protectant of linseed oil and its emulsion against oxidative damage [J]. Euro J Lipid Sci Technol, 2017, 119(8): 1600219.
- [20] Hu C, Yuan Y V, Kitts D D. Antioxidant activities of the flaxseed lignan secoisolariciresinol diglucoside, its aglycone secoisolariciresinol and the mammalian lignans enterodiol and enterolactone *in vitro* [J]. Food Chem Toxicol, 2007, 45(11): 2219-2227.
- [21] 魏晓珊. 亚麻籽营养品质特性的研究[D]. 大连: 大连海洋大学, 2015.
- [22] 黄国平. 萌发对粮食主要营养成分的影响及其断奶食品的工艺研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2001.
- [23] 王笑园, 庄聪雅, 王宇晓, 等. 萌发提升亚麻籽营养品质的研究[J]. 食品工业科技, 2018, 39(12): 316-319, 333.
- [24] Herchi W, Bahashwan S, Sebei K, et al. Effects of germination on chemical composition and antioxidant activity of flaxseed (*Linum usitatissimum* L.) oil [J]. Grasas Y Aceites, 2015, 66(1): e057.
- [25] Wang H, Wang J H, Guo X B, et al. Effect of germination on lignan biosynthesis, and antioxidant and antiproliferative activities in flaxseed (*Linum usitatissimum* L.) [J]. Food Chem, 2016, 205: 170-177.
- [26] Wang H, Qiu C S, Abbasi A M, et al. Effect of germination on vitamin C, phenolic compounds and antioxidant activity in flaxseed (*Linum usitatissimum* L.) [J]. Int J

- Food Sci Technol, 2015, 50(12): 2545-2553.
- [27] 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.
- [28] 方昭西. 加工及储存条件对亚麻油关键性风味物质及氧化稳定性影响的研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2015.
- [29] 易志. 亚麻籽油贮藏稳定性研究[D]. 广州: 华南农业大学, 2016.
- [30] Gerstenmeyer E, Reimer S, Berghofer E, et al. Effect of thermal heating on some lignans in flax seeds, sesame seeds and rye[J]. Food Chem, 2013, 138(2/3): 1847-1855.
- [31] 李媛媛, 吴雪辉, 段卓. 微波处理对亚麻籽油品质的影响[J]. 中国油脂, 2015, 40(1): 55-58.
- [32] 曹伟伟, 黄庆德, 田光晶, 等. 微波预处理亚麻籽对其压榨饼生氰糖苷含量及压榨油品质的影响[J]. 食品工业科技, 2016, 37(9): 134-138.
- [33] Kaushik P, Dowling K, Adhikari R, et al. Effect of extraction temperature on composition, structure and functional properties of flaxseed gum[J]. Food Chem, 2017, 215: 333-340.
- [34] 李小凤, 赵倩竹, 滕英来, 等. 亚麻籽胶微波辅助提取与热水浸提方法比较研究[J]. 中国粮油学报, 2016, 31(8): 55-61.
- [35] 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.

(责任编辑:郭学兰)