

亚麻籽油组分的功能活性研究进展

廖振林^{1,2*}, 李倩滢¹, 陈俊杰¹, 杜李宇¹, 王洁¹, 方祥¹

(1. 华南农业大学食品学院, 广东广州 510642)

(2. 喀什大学生命与地理科学学院, 新疆帕米尔高原生物资源与生态重点实验室, 新疆喀什 844000)

摘要: 亚麻籽油是一种天然的保健植物功能性油脂, 含有大量的不饱和脂肪酸, 含量最大的分别是 α -亚麻酸和亚油酸, 这两种多不饱和脂肪酸在机体代谢、生长发育中发挥着不可或缺的作用, 此外亚麻籽油中还含有多种生物活性物质, 如: 其他不饱和脂肪酸: 二十二碳六烯酸 (DHA)、二十碳五烯酸 (EPA) 和前列腺素 (PG) 等; 亚麻籽环肽、维生素 E、亚麻木酚素和油酸、黄酮类等, 也在机体中起着积极作用。本文主要论述了亚麻籽油对于人体具有的多种功能, 如: α -亚麻酸和维生素 E 自身对机体的抗氧化效果、 α -亚麻酸在体液和基因水平上的降血脂作用、协调胰岛素的降血糖作用; 还有亚麻木酚素和亚麻籽环肽在免疫协调中的抗炎抗癌作用; 多不饱和脂肪酸在防治心血管疾病、抗衰老和抗氧化、调节肠道菌群、增强视力和抗菌等方面发挥作用等。

关键词: 亚麻籽油; α -亚麻酸; 亚油酸; n-3 多不饱和脂肪酸; n-6 多不饱和脂肪酸; 亚麻木酚素

文章编号: 1673-9078(2021)11-379-389

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2021.11.0005

Research Progress on the Functional Activity of Flaxseed Oil Components

LIAO Zhenlin^{1,2*}, LI Qianying¹, CHEN Junjie¹, DU Liyu¹, WANG Jie¹, FANG Xiang¹

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

(2. College of Life and Geographic Sciences, Key Laboratory of Biological Resources and Ecology of Pamirs Plateau in Xinjiang Uygur Autonomous Region, Kashi University, Kashi 844000, China)

Abstract: Flaxseed oil is a kind of natural health-promoting plant functional oil, containing large amounts of unsaturated fatty acids, with α -linolenic acid and linoleic acid having the highest contents. These two kinds of polyunsaturated fatty acids played an indispensable role in the metabolism, growth and development of the body. In addition, flaxseed oil also contained a variety of bioactive substances, for example, other unsaturated fatty acids (docosahexaenoic acid (DHA), eicosapentaenoic acid (EPA) and prostaglandin (PG)), flaxseed cyclolinopeptides, vitamin E, secoisolariciresinol diglucoside, oleic acid and flavonoids also play active roles in the body. This article mainly discusses the various functions of linseed oil for the human body, such as the antioxidant effect of α -linolenic acid and vitamin E on the body, the hypolipidemic effect of α -linolenic acid on the body fluid and at the gene level, and hypoglycemic effect of α -linolenic acid through coordinating insulin. In addition, secoisolariciresinol diglucoside and cyclolinopeptide of flaxseed exhibited anti-inflammatory and anti-cancer effects. Polyunsaturated fatty acids play a role in preventing and treating cardiovascular diseases, anti-aging and anti-oxidation, regulating intestinal flora, enhancing eyesight and antibacterial actions.

Key words: flaxseed oil; α -linolenic acid; linoleic acid; n-3 unsaturated fatty acids; n-6 unsaturated fatty acids; secoisolariciresinol diglucoside

引文格式:

廖振林, 李倩滢, 陈俊杰, 等. 亚麻籽油组分的功能活性研究进展[J]. 现代食品科技, 2021, 37(11): 379-389, +337

LIAO Zhenlin, LI Qianying, CHEN Junjie, et al. Research progress on the functional activity of flaxseed oil components [J]. Modern Food Science and Technology, 2021, 37(11): 379-389, +337

亚麻籽油由亚麻籽制取而成, 而亚麻籽是亚麻的籽实, 属亚麻科, 亚麻是一年生草本植物, 可分类
收稿日期: 2021-01-03

基金项目: 广东省重点领域研发计划资助项目 (2020B020226008; 2018B020206001); 国家自然科学基金项目 (31171673)

作者简介: 廖振林 (1968-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 益生菌、菌群与健康, E-mail: 602581821@qq.com

为纤维用亚麻、油用亚麻和油纤兼用亚麻 3 种类型。其中亚麻籽油是从油用型亚麻中提炼出来的。亚麻籽中含有大量不饱和脂肪酸、膳食纤维、亚麻木酚素、黄酮、蛋白质、氨基酸、矿物元素、维生素 E 等营养成分^[1], 其中备受关注的是不饱和脂肪酸, 主要包括亚油酸和 α -亚麻酸 (α -Linolenic acid, ALA), α -亚麻酸含量高达 45.0%~60.0%^[2], 属于机体必须但自身无

法合成的 n-3 多不饱和脂肪酸 (n-3 PUFAs), 可通过机体代谢途径, 合成其他不饱和脂肪酸, 例如二十二碳六烯酸 (docosahexaenoic acid, DHA)、二十碳五烯酸 (eicosapentaenoic acid, EPA) 和前列腺素 (prostaglandin, PG) 等; 此外亚油酸也是人体必需的一种 n-6 多不饱和脂肪酸 (n-6 PUFAs), 有研究表明亚油酸可有效促进肠道对亲脂性营养物质的吸收, 所以亚麻籽油因其含有的不饱和脂肪酸特性, 现今作为活性物质 (如具有强疏水性的类胡萝卜素) 的运输载体有着潜在应用前景^[3]。加之 α -亚麻酸本身也有较强的抗氧化力, 可直接作用于机体, 起着抗氧化、抗衰老作用, 在机体免疫、细胞凋亡等方面都有积极影响。此外许多研究也表明 α -亚麻酸在防治心血管疾病、调节肠道菌群组成比例和抑菌方面都有着一定的影响。而人们通常是通过摄取 α -亚麻酸来获取 n-3 PUFAs, 所以亚麻籽油在食品保健方面应用前景较大。

在讨论亚麻籽油这种新型保健油脂制品对机体的积极作用前, 应先了解两种 PUFA, α -亚麻酸和亚油酸在人体机体内所起到的作用。首先, α -亚麻酸和亚油酸都是人体无法合成的必需脂肪酸, 另外 α -亚麻酸作为 EPA、DHA 的合成前体, 调节机体多种生理过程^[4,5]; α -亚麻酸是构成人体脑细胞和组织细胞的重要成分, 是人类必需的营养物质, 与视力、脑发育和行为发育密切相关; 此外亚麻酸在降血脂血糖、抗氧化、抗菌消炎、抗癌、防治心血管疾病、抗糖尿病和脑部、视网膜发育等都起着关键作用; 而亚油酸也在降低血液胆固醇、预防动脉粥样硬化中起着关键积极作用^[6]。

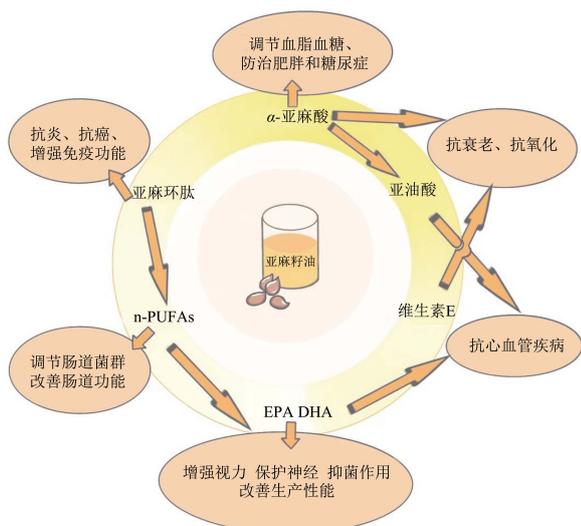


图1 亚麻籽油基本功能

Fig.1 Basic functions of flaxseed oil

注: n- PUFAs: n-多不饱和脂肪酸; EPA: 二十碳五烯酸; DHA: 二十二碳六烯酸。

基于以上亚麻籽油中活性物质的功能分析, 本文

将论述亚麻籽油及其活性物质的功能和调节机理。活性物质及其基本功能如图1所示。

1 亚麻籽油的功能应用

1.1 调节血脂血糖、防治肥胖和糖尿病

n-3 PUFAs 主要功能是有有效稳定机体内的血糖血脂及在改善代谢紊乱上发挥着间接作用^[7]。许多研究都阐述了以上论点, 萧闵^[8]的研究证明给予脂代谢紊乱大鼠亚麻籽油后其血清甘油三酯 (triglyceride, TG) 和血清瘦素含量显著降低 ($p < 0.05$)、高密度脂蛋白胆固醇 (high density lipoprotein cholesterol, HDL-C) 含量显著提高 ($p < 0.05$); 在武继彪等^[9]也证明亚麻籽油具有降低血脂、瘦素的作用。类似血糖血脂实验指标还有血清胆固醇 (total cholesterol, TC)、低密度脂蛋白胆固醇 (low density lipoprotein cholesterol, LDL-C) 和致动脉粥样硬化指数 (atherogenic index, AI) 的变化^[10,11], 如 Sembratowicz 等^[12]研究了马摄入亚麻籽油后其血浆血糖、TC、LDL-C 和 TG 水平比摄入大豆油低。刘彩霞等^[13]还研究了亚麻籽油的可替代性, 研究用不同配比的亚麻籽油与大豆油混合油全部替代鱼油后对杂交鲟生长性能、肌肉脂肪酸组成及血清肝功能和抗氧化指标的影响, 发现亚麻籽油大豆油混合油投喂的杂交鲟血清-LDH、ALT 和 AST (肝脏受损程度的重要指标) 与鱼油投喂组相比无显著性差异, 证明了亚麻籽油的降血脂能力。此外低比例 n-6/n-3 PUFA 对脂质代谢和血管内皮功能具有良好的作用, 如 Griffin 等^[14]证明了降低 n-6/n-3 PUFA 比例可以降低禁食和餐后 TG 和 LDL-C 的浓度; Li 等^[15]也证明了低比例 n-6/n-3 PUFA 可显著降低 TG 和 HDL-C 浓度, 其中 α -亚麻酸对降低 TC 和 LDL-C 浓度的影响更为明显, 而 EPA 和 DHA 对降低 TG 和增加 HDL-C 浓度的影响更大。

除动物模型, 部分临床医学实验也证明了亚麻籽可调节血脂血糖, 如妊娠期糖尿病患者直接食用亚麻籽粉, 发现服用后可有效调节妊娠期糖尿病患者的血糖、血脂^[16]; Sumanto 等^[17]也证明了给与高胆固醇血症临界患者 (LDL-C 水平偏高) 服用精制米糠混合亚麻籽后 TC、LDL-C 和血糖水平都有所下降了。

基于基因调节水平的研究, 徐子娴等^[18]利用实时荧光定量 PCR 检测方法发现相比油茶籽油和菜籽油, 亚麻籽油对乳脂合成的相关基因基本没有促进作用, 但抑制过氧化物酶体增殖物激活受体 γ (PPAR γ) 基因的表达, 此基因在启动和维持脂肪沉积方面起着重要作用^[19]。即亚麻籽油可通过调节基因表达水平来调节血脂。

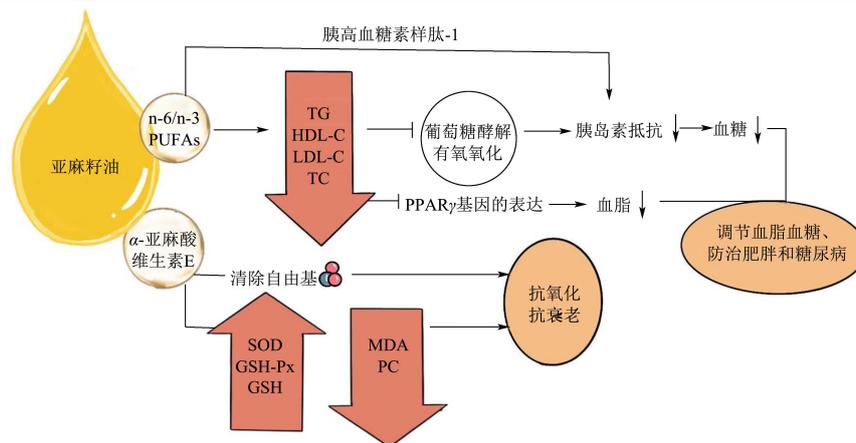


图2 亚麻籽油调节血糖血脂和抗氧化、衰老的作用机理

Fig.2 The mechanism of flaxseed oil in regulating blood glucose and lipid, antioxidation and anti-aging

注: TG: 血清甘油三酯; HDL-C: 高密度脂蛋白胆固醇; LDL-C: 低密度脂蛋白胆固醇; TC: 血清胆固醇; SOD: 超氧化物歧化酶; GSH-Px: 谷胱甘肽-过氧化物酶; GSH: 谷胱甘肽; MDA: 丙二醛; PC: 蛋白质羧基。

此外梁媛等^[20]证明在较高 α -亚麻酸浓度下(6.00×10^{-5} mol/L)对细胞有明显毒性作用;而亚麻油酸能显著抑制脂肪干细胞活力,且脂肪干细胞成脂分化的促进作用更强。证明摄入一定浓度n-3或n-6 PUFAs对肥胖起促进作用,应适当摄入。

除了高血脂人群,我国糖尿病患者数逐年增长,其诊断标准是以血糖值作为前期判断标准。饮食运动治疗结合糖尿病药物治疗是糖尿病一大治疗方案。而亚麻籽油的n-3 PUFAs含量高,因此可利用其作为辅助保健油脂,增加外周细胞对胰岛素的敏感性或直接提高其分泌量,以达到防治糖尿病等疾病的目的^[21],其机理可能是促进肠道分泌胰高血糖素样肽-1(主要作为2型糖尿病药物作用的靶点,协助药物发挥效力)生成^[22];降低TG水平而减少对葡萄糖糖酵解及有氧氧化的抑制以减轻胰岛素抵抗^[23],直接或间接对胰岛素具有增敏作用。

在Ibrahim等^[22]的研究中,以上多不饱和脂肪酸对于胰岛素敏感性的改变有着不一样的结论,发现 α -亚麻酸和亚油酸在增强外周胰岛素的敏感性上呈现不同的作用效果,其研究表明,通过增加饮食中n-3多不饱和脂肪酸和减少n-6不饱和脂肪酸的摄入量,可增加外周细胞胰岛素的敏感性。说明 α -亚麻酸和亚油酸在依靠改变胰岛素敏感性来控制血糖水平的作用是相反的。

以上说明亚麻籽油、适当比例的n-6/n-3 PUFA或单 α -亚麻酸可通过直接控制血液中TC、LDL-C、HDL-C和TG等的水平,或者间接调节基因表达(如PPAR γ 基因)水平以此达到降血脂作用,并且有浓度依耐性;此外,控制n-3 PUFAs和n-6 PUFAs摄入比例能够影响外周细胞对外周胰岛素的敏感性,从而控制血糖水平(图2)。

1.2 抗衰老和抗氧化作用

许多研究表明心脏病、癌症、心血管疾病等疾病发作的原因是体内产生的自由基破坏生物大分子使机体衰老所导致的^[23]。所以及时清除体内自由基是非常有必要的。

亚麻籽油具有较强的抗氧化力,其中的 α -亚麻酸能够直接在抗自由基损失中起到抗氧化和抗衰老作用;加之其中含有的活性物质维生素E的含量在很大程度上决定了功能性油脂的抗自由基能力,并与其他多酚具有协同作用^[24]。所以单从亚麻籽油的单一成分即可证明食用亚麻籽油可起到抗氧化和抗衰老作用。

耿娜等^[25]体外实验证明了亚麻籽油具有明显的抗氧化作用,而且亚麻籽油的抗氧化能力有显著的浓度依赖性。而体内实验也证明亚麻籽油可直接增强机体的抗氧化防御机制^[12],朱保忠等^[26]还证明了 α -亚麻酸与维生素E联用更具备抗自由基作用,以此证明食用亚麻籽油和维生素E这一复合保健品,比单服用 α -亚麻酸或维生素E更具备抗自由基作用。且还有实验证明了亚麻籽油可提高寡孢根霉-植物乳杆菌(*Rhizopus oligosporus-Lactobacillus plantarum*)共发酵作物的抗氧化性能^[27]。

此外,依据其抗氧化性质,可将其应用在生物保鲜中,如Wrona等^[28]测试了七种植物油脂制备的LDPE薄膜的抗氧化能力。发现由亚麻籽油制备而成的薄膜能够将新鲜肉类的保质期延长22%,但该包装材料的稳定性决定其也具有一定的应用局限性。

因此,亚麻籽油主要是通过其中有着抗氧化作用的活性物质(如 α -亚麻酸、维生素E)来清除自由基,以此达到抗衰老和抗氧化作用(图2)。

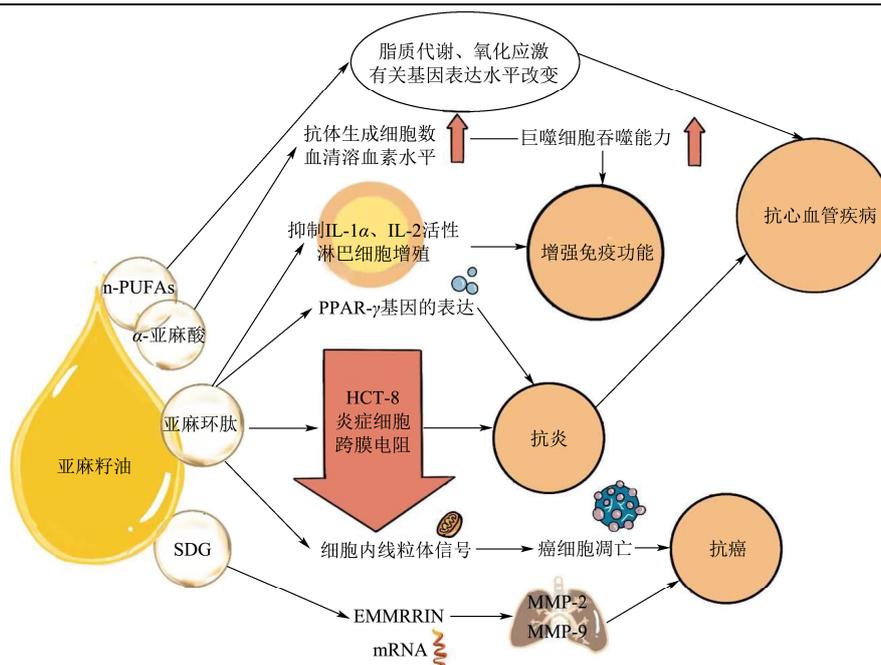


图3 亚麻籽油在机体免疫中与抗心血管疾病的作用机理

Fig.3 Mechanism of flaxseed oil in immunity and anti-cardiovascular disease

注: SDG: 亚麻木酚素; PPAR-γ 基因: 过氧化物酶体增殖物激活受体 γ 基因; MMP-2: 基质金属蛋白酶-2; MMP-9: 基质金属蛋白酶-9。

1.3 对机体免疫的影响

亚麻籽油中存在一种微量物质亚麻环肽, 有研究发现许多亚麻环肽都有很强还原性, 其中新鲜的亚麻籽和亚麻籽油含有较高的还原型蛋氨酸亚麻环肽^[29], 其除了具有抗氧化能力外, 还具有免疫抑制作用、抗疟疾作用、抗炎作用和抗癌作用, 但其作用效果也与亚麻环肽结构的不同而不同; 此外还存在着一种植物激素, 亚麻木酚素 (Secoisolaricresinol diglucoside, SDG) 可通过调节基因的表达水平以达到抗肿瘤效果 (图3)。

1.3.1 抗炎

在 Almousa 等^[30]的体外细胞研究中, 亚麻环肽 [1-9-NαC]-linusorb B3 和 [1-8-NαC], [1-MetO₂]-linusorb B1 均可降低 HCT-8 炎症细胞的跨膜电阻; 在利用实时荧光定量 PCR 方法测定 PPAR-γ mRNA 表达量发现, 在有环肽 [1-8-NαC], [1-MetO₂]-linusorb B1 的干预下增加了两倍 PPAR-γ mRNA 表达量, 表明了环肽 [1-8-NαC], [1-MetO₂]-linusorb B1 可通过显著增加了 PPAR-γ 基因和蛋白表达水平以此达到抗炎效果。

此外有研究表明慢性炎症疾病与 n-6 和 n-3 PUFAs 的消耗率成正比, 所以在摄入不饱和脂肪酸时可选择多种功能性油脂复配, 即摄入一定配比亚麻籽油与其他功能性油脂 (例如含有大量 n-6 PUFAs 的红花籽油) 比单一摄入亚麻籽油对机体更有利^[31]。

1.3.2 抗癌

亚麻环肽所具备的抗癌作用已被许多研究证明。Reaney 比较了三种亚麻环肽对于肺癌患者模型的抗肿瘤效果, 发现都具有一定效果, 但会因结构的不同, 抗癌作用效果会不一样^[29]; Okinyo-Owiti 等^[32]发现 4 种亚麻环肽在人乳腺癌中都具有抗肿瘤效果; Keykhasalar 等^[33]也发现亚麻籽精油对人卵巢癌细胞系 A2780 具有剂量依赖细胞毒性。

邹仙果^[29]发现相比环肽 [1-9-NαC]-linusorb B2, 环肽 [1-9-NαC]-linusorb B3 可显著引起细胞线粒体膜电势降低, 即表明了此环肽是通过诱导细胞中的线粒体信号途径来使癌细胞凋亡。也说明了不同结构的环肽抗肿瘤作用效果、方式及分子机制存在较大差异。

除了在亚麻籽油中, 亚麻籽中含有的亚麻木酚素也是一种植物型的抗癌候选新药, 具有抗肿瘤、抗病毒、降血糖的功效^[21]。其中发现它可通过调节有关基因表达水平来实现抗肿瘤作用, 郑书国等^[34]发现亚麻木酚素介导小鼠肺癌模型后可明显抑制肿瘤的生长及肺转移, 减轻肺组织中的病变, 其机理是它的介入可抑制 EMMPRIN mRNA 的表达, 进而抑制肺组织中基质金属蛋白酶-2 (matrix metalloproteinase 2, MMP-2)、基质金属蛋白酶-9 (matrix metalloproteinase 9, MMP-9) 蛋白的表达。

1.3.3 增强免疫功能

增强免疫功能主要从免疫细胞和免疫因子 2 个方

面探讨。

在免疫细胞方面, Wiesenborn 等^[29]发现一种亚麻环肽[1-9-N α C]-linusorb B3 在免疫反应时可抑制淋巴细胞增殖, 同时引起小鼠免疫应答反应和延迟型超敏反应, 还可减缓皮肤移植引起的排它反应和溶血性贫血。

在免疫因子方面, Górski 等^[35]的研究发现亚麻环肽[1-9-N α C]-linusorb B3 可通过抑制白细胞介素 1 α 和 2 (IL-1 α 和 IL-2) 的活性和生成来达到机体免疫抑制的作用, 这作用效果机理与免疫抑制剂环孢霉素 A 类似。

除了亚麻环肽外, 相似地, α -亚麻酸也可从免疫细胞和免疫因子方面增强机体的免疫力, 如姚思宇等^[36]的研究发现 α -亚麻酸能提高小鼠的抗体生成细胞数和血清溶血素水平, 促进小鼠的单核-巨噬细胞的碳廓清和腹腔巨噬细胞的吞噬能力, 促进小鼠的迟发型变态反应, 提高小鼠 NK 细胞的活性, 以此达到免疫作用。

1.4 抗心血管疾病

流行病学和临床研究已经证实, 亚油酸、亚麻酸、EPA 和 DHA 共同保护心血管健康。所以 n-3 和 n-6 PUFAs 之间的平衡对心血管健康有着重要影响。关于 n-3、n-6 PUFAs 的摄入比例 n-6/n-3 值, 中国营养学会 2000 年所指定的推荐标准如下: 0~6 个月的婴儿为 4:1, 其余均为 (4~6) :1, 世界卫生组织推荐标准为小于 6:1^[37] (图 3)。

1.4.1 抗动脉粥样硬化 (atherosclerosis, AS)

研究表明 n-3 PUFAs 能降低心血管疾病的发生和调节动脉粥样硬化的形成和发展, 包括对炎症反应、血小板功能、血压、甘油三酯水平及动脉粥样斑块稳定性的调节作用^[38]。另外缺乏亚油酸, 胆固醇会与一些饱和脂肪酸结合, 发生代谢障碍, 在血管壁上沉积

下来, 逐步形成动脉粥样硬化, 引发心脑血管疾病。即表明了摄取适量亚麻籽油可防治动脉粥样硬化。

韩浩^[39]证明了 α -亚麻酸可通过降血脂和抗炎作用以减少心血管疾病的发生。其中动脉粥样硬化情况与脂质代谢 (PPAR、HMGCR 和 SREBP)、炎症 (IL-6、TNF、MCP-1 和 vcam-1) 和氧化应激 (NADPH oxidase) 等基因表达水平的改变有关。这说明了通过摄取亚麻籽油使机体达到上述所说的降血脂、抗炎作用与改善动脉粥样硬化息息相关。

1.4.2 抗血栓

有学者研究了亚麻籽油或者多不饱和脂肪酸对于血栓形成的抑制作用, 如 Caroprese 等^[40]的研究中, 以奶牛为研究对象, 研究不同脂肪酸组成对心血管疾病的防治作用, 发现补充了亚麻籽油或鱼油后, 奶牛的动脉粥样硬化和血栓形成指数大幅度减小。以上所述的多不饱和脂肪酸对于心血管疾病的防治作用, 其中的作用机制牵扯的是许多代谢途径, 与上述提到的免疫作用、降血脂血糖和抗氧化等是相互影响的^[41]。而亚麻籽油中含有丰富的不饱和脂肪酸及其他活性物质在机体各个代谢途径中都起着积极作用, 所以才在摄入亚麻籽油后呈现出一个协调平衡的机体。

1.5 调节肠道菌群及改善肠道功能

最近, 肠道菌群已被证明能通过其代谢产物 (如脂多糖 (LPS), 短链脂肪酸 (SCFA) 和三甲胺 (TMA)) 来调节 AS 过程^[42]。而结合上述讨论亚麻籽油也能防治 AS 和血栓等心血管疾病。证明了在心血管疾病、肠道菌群及富含不饱和脂肪酸的亚麻籽油三者存在着密切关系。以下的许多研究中都从侧面证明了它们的关系 (图 4)。

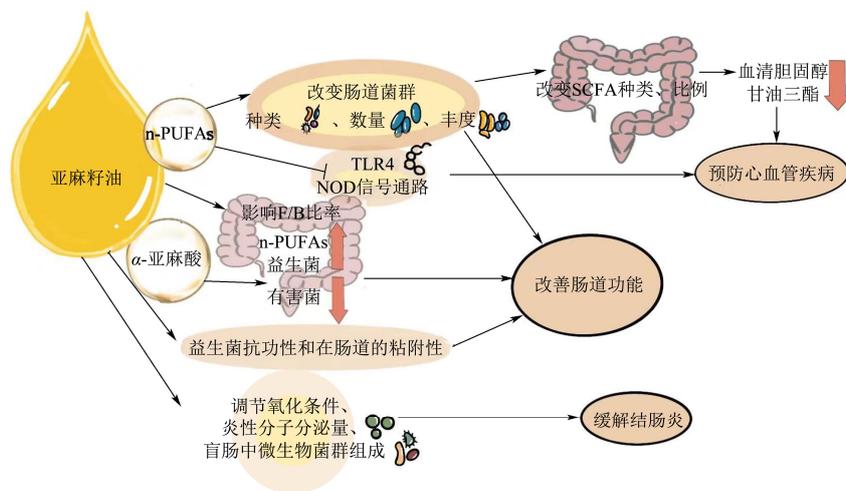


图 4 亚麻籽油调节肠道菌群和改善肠道功能的作用机理

Fig.4 Mechanism of flaxseed oil in regulating gut microbiota and improving intestinal function

注: TLR4: Toll 样受体 4; NOD: 核苷酸结合寡聚域受体; F/B 比率: 厚壁菌门和拟杆菌门的比值。

1.5.1 直接增加肠道中的不饱和脂肪酸

目前对于 n-3 PUFAs 与肠道菌群关系的研究越来越多, 首先是直接通过摄取 n-3 PUFAs 来增加肠道不饱和脂肪酸含量以此调节肠道菌群和保护肠道。徐露^[43]发现给予小鼠亚麻籽油和磷虾油 30 d 后, 结肠内容物湿度及短链脂肪酸含量增加, 其肠道微生物结构也发生了明显变化。说明这两种油脂都积极改变了菌群的种类、数量和丰度; 并发现可能是肠道菌群的代谢活性的积极变化, 从而改变肠道短链脂肪酸的种类和比例, 降低血清胆固醇、甘油三酯浓度, 以此达到预防心血管疾病的作用, 与上述的 1.4 中论述一致。

此外, 还有研究表明亚麻油可通过控制肠道中 n-3 PUFAs 的含量来保护损伤的肠道。王海波^[44]发现亚麻油提高了肠道 n-PUFA 的含量, 抑制了 TLR4 和 NOD 信号通路的过度激活, 对肠道消化功能具有轻微的保护作用。

摄入亚麻籽油后除了可以改变肠道不饱和脂肪酸外, 还可以改变鸡蛋蛋黄的脂肪酸含量, 以此完善其营养成分组成及延长保质期^[45,46]。

1.5.2 改变肠道微生物组成及丰度

徐露^[43]证明肠道短链脂肪酸的改变可能是肠道菌群的种类、数量和丰度所导致的, 能够降低血清胆固醇和甘油三酯浓度, 以此达到防动脉粥样硬化等心血管疾病的作用。与此相似的研究还验证了亚麻籽油和 α -亚麻酸也能促进肠道益生菌生长, 抑制肠道有害菌增殖, 并可提高肠道菌群发酵液中的短链脂肪酸含量; 并且增强了肠道益生菌与结肠上皮细胞的粘附性^[47]。其中可能的机理在 Millman 等^[48]的研究中有涉及到可能是亚麻籽油的摄入可以提高抗菌肽的 mRNA 水平。

与以上实验相似的有, Alzueta 等^[49]证明了在家禽饮食中添加亚麻籽可显著提高回肠消化液的粘度, 并且在微生物活性没有受到很大的影响下, 增加了乳酸菌的数量。Elaine 等^[50]还研究了多种功能性油脂对肠道微生物菌群丰度的影响, 喂养高脂或低脂-高碳水化合物日粮的小鼠分别服用橄榄油、棕榈油、亚麻籽油/鱼油、红花籽油 16 周后, 检测小鼠肠道中的微生物菌群及丰度, 发现 (1) 摄入亚麻籽油/鱼油可显著提高小鼠体内的 EPA、DPA 和 DHA 的浓度, 证明亚麻籽油/鱼油具有穿越血脑屏障的能力; (2) 与低脂-高碳水化合物日粮相比, 只有亚麻籽油/鱼油组能显著增加盲肠中双歧杆菌科水平和属水平, 可能是由于其增强了双歧杆菌对肠壁的粘附能力; (3) 在低脂-高碳水化合物组中, 喂养亚麻籽油/鱼油组 *Erysipelaceae* (丹毒丝菌科) 丰度较大, 且随着饱和度从更高的棕榈油

(SFA, Saturated fatty acids, 饱和脂肪酸) 转变为亚麻籽油/鱼油组 (n-3 PUFAs, Polyunsaturated fatty acids, 多不饱和脂肪酸), 丹毒丝菌科的菌群丰度呈稳定上升趋势, 有研究报道高脂饮食会使大鼠体内隶属厚壁菌门的丹毒丝菌科数目增加, 所以丹毒丝菌科丰度减少有利于机体的健康^[51]; (4) 但是随着饱和度从更高的棕榈油转变为亚麻籽油/鱼油组, *Lachnospiraceae* (毛螺菌科, 属于厚壁菌门) 的菌群丰度呈稳定下降趋势。另外与低脂-高碳水化合物日粮对照组相比, 红花籽油的毛螺菌科的菌群丰度降低了, 但是在高脂-高碳水化合物日粮组中得到了相反结果。其中有研究证明在炎症性肠病患者的肠道组织样本中毛螺菌科含量可降至正常含量的 1/300, 也有研究证明某些产丁酸盐的细菌 (如毛螺菌科) 丰度下降, 导致丁酸盐诱导凋亡和分化、抑制增生及血管形成等功能下降, 也可能间接促进了肿瘤的进展^[51]; (5) 由以上两点也证明了脂肪的饱和度或质量也可以改变肠道菌群丰度, 即证明了与 SFA 相比, 摄入 MUFA (Monounsaturated fatty acids, 单不饱和脂肪酸, 如橄榄油) 或 PUFA (如亚麻籽油/鱼油) 较健康; (6) 与橄榄油组相比, 摄入亚麻籽油/鱼油的肠道菌群多样性是最大的。以上都证明了在高脂饮食中添加亚麻籽油/鱼油对宿主肠道微生物生态系统有积极影响。

此外, 还有研究表明同时摄入不同类型的含 n-3 PUFAs 功能性油脂 (如亚麻籽油和海藻类油脂) 能增加肠道微生物群落多样性^[52]。详细的肠道菌群的变化, 如 Shuaihua 等^[53]发现相比正常体重或超重实验对象, 摄入五种混合油脂后, 肥胖实验对象厚壁菌门和拟杆菌门的比例 (F/B Ratio) 较高; 摄入富含 MUFA 的日粮后可增加 *Parabacteroides* (丙酸杆菌属)、*Prevotella* (普雷沃菌属)、*Turicibacter* (图利杆菌属) 和 *Enterobacteriaceae* (肠杆菌科) 的丰度; 而摄入富含 PUFA 的日粮后 *Isobaculum* 菌属 (隶属厚壁菌门) 丰度增加。证明这五种不饱和脂肪酸饮食显著改变了肠道菌群属的丰度及组成, 而不能改变其菌门组成。

由上述的多个研究发现, 功能性油脂对机体肠道菌群的影响多体现在 F/B 比率、放线菌门和变形菌门变化上, 而这四个门也是构成人类肠道菌群的最大四个门, 而厚壁菌门与拟杆菌门是摄入 PUFAs 后肠道中的主要门^[52]。此前许多研究表明 F/B 比率与许多病理疾病相关, 如肥胖人群中 F/B 比率普遍会增加, 此比例还会随着体重的减少而趋于正常水平, 但是也有地区差异性^[54]; 加之许多研究中都表明了亚麻籽油会增加肠道菌群中厚壁菌门中某些微生物的丰度 (Elaine 发现亚麻籽油/鱼油组中丹毒丝菌科菌群丰度较大) 和降

低拟杆菌门的丰度(如 Danneskiold 的研究);但其中也有研究发现摄入亚麻籽油后可降低厚壁菌门中某些微生物的丰度(Elaine 发现亚麻籽油中毛螺菌科的菌群丰度较其他油脂组低)。所以在研究亚麻籽油对肠道菌群 F/B 比率的影响从而讨论其对机体影响时,不能够得出一致的研究结论,其对肠道菌群丰度的影响可能也与其研究对象、复配营养成分及研究方法等有关。

因瘤胃的强大降解纤维物质能力与其中的微生物菌群组成丰度、关系密切相关,所以能够更直观观察研究功能性油脂干预后瘤胃的微生物菌群的变化。所以除了利用小鼠模型进行功能性油脂对肠道微生物的影响作用外,还有研究是利用牛的瘤胃作为研究对象。如 Shaopu 等^[55]研究了补充功能性油脂后瘤胃中真菌、古生菌、原生动物和细菌对甲烷的抑制作用的变化影响,其中甲烷主要是有以上几类微生物代谢产生的,而此研究是为了从饮食入手来应对由甲烷而造成的全球变暖。此研究证明了亚油酸等功能性油脂介入后都能抑制瘤胃中甲烷的产生。为研究其中机理,在体外利用古生菌单缺陷(-A)、真菌单缺陷(-F)、原生动物单缺陷(-P)和单细菌(-AFP)微生物菌群组成,功能性油脂介入后瘤胃液中分解和产生有机物的区别,发现在亚油酸的介入下,-A 和-AFP 组的瘤胃液中甲烷抑制率大大升高,表明亚油酸可能通过对古生菌、真菌或原生动物具有毒性作用以此减少了甲烷的产生,也说明亚油酸等功能性油脂与瘤胃微生物群的相互作用对油料的抗甲烷作用具有重要意义,但是此研究结果若想应用在体内需要进一步的研究。此外摄入亚麻籽油还可提高反刍动物乳液中的 n-3 PUFAs 含量^[56]。

也有许多研究表明 PUFA、肠道菌群与炎症反应三者有着密不可分的关系。Edmond 等^[57]研究了饮食中脂肪含量与种类对肠道菌群的影响以及对肠系膜和外周脂肪细胞的脂肪细胞因子及其中炎症反应的影响。发现(1)摄入猪油或 PUFA 的小鼠,其肠系膜脂肪中 MCP-1 和 CD192(脂肪组织炎症的 2 种标志物质)的基因表达水平显著升高。且摄入 PUFA 后小鼠肠系膜脂肪的抵抗素表达水平也有所上升了,从侧面反映了炎症因子的表达上升了;(2)多不饱和脂肪酸和乳脂喂养的小鼠肠道菌群组成类似,其中在门水平上微生物丰度较相似,且这两组高脂饮食组较其他组软壁菌门丰度变小和变形菌门丰度变大,有研究表明在炎症反应中软壁菌门丰度会减少。此外还发现有一种变形菌门微生物在肠道炎症反应中发挥着重要作用,但是由于此测序方法的局限性,没能确定此细菌种属。

所以由上述研究表明了在功能性油脂,如本研究中的亚麻籽油和其他多不饱和脂肪酸干预饮食后,对其机体肠道菌群组成及丰度有着积极的影响,而由于肠道菌群的变化从而影响了机体的代谢、免疫功能,与之前 2.1 和 2.4 的结论及研究结果一致。证明了摄入亚麻籽油其他多不饱和脂肪酸后,除了其中的多不饱和脂肪酸和亚麻木酚素外,其中有着强还原性的亚麻环肽可直接抑制炎症细胞的跨膜和抑制淋巴细胞增殖以及可增加 PPAR 基因和蛋白表达水平来达到抗炎效果^[58]等;还可以通过影响肠道菌群组成来间接改变机体代谢途径及其产物和炎症反应。

1.5.3 作为辅助剂与益生菌协同作用

此外,亚麻籽油也可作为一种益生元与益生菌共同作用于肠道。如 Strojny 等^[59]发现服用益生菌 *Lactobacillus plantarum* LS/07 与亚麻籽油复合物后大鼠结肠中大肠菌群总数显著减少,其中的机理可能是因为亚麻籽油的协同作用下,明显增强了肠道中益生菌的抗菌性能,此外,可能因为改变了植物乳杆菌对空肠和回肠粘膜的粘附性;还发现,服用此复合物干扰 1.2-DMH 大鼠模型后,能够降低 β -葡萄糖醛酸苷酶和 β -葡萄糖苷酶的酶活性和细胞因子 TNF- α 的分泌,以及控制了肠道上皮细胞中杯状细胞的分化,证明了此亚麻籽油复合物对癌变中的结肠癌模型有着积极的干预作用。

还有许多研究都表明服用益生菌(如干酪乳杆菌、嗜酸乳杆菌、罗伊氏乳杆菌^[60])与 PUFA 复合物后,可增加益生菌在肠道中的黏附性并利于大肠上皮细胞的生长,以此增加乳酸菌在肠道中的定值,抑制病原菌的生长(如 Enterotoxigenic *E. coli* O149:F4),这些结论与 1.5.2 中研究的 PUFA 干预肠道后使肠道有害菌与有益菌比例下降的结论一致。

1.5.4 缓解结肠炎症和防治结肠癌

近年来,许多研究表明肠道微生态异常改变与肠癌的相关性密切相关,并证明了在富含不饱和脂肪酸的亚麻籽油的干扰下,对肠癌与肠道微生态都有着积极影响。

Strojny 等^[59]也讨论了服用益生菌复合亚麻籽油后,能够显著减少肠道中大肠杆菌的数量和控制杯状细胞的分化。

还有 Zhou 等^[61]发现一定剂量亚麻籽油干预后可缓解溃疡性结肠炎大鼠的细胞氧化状况,减少结肠炎症,并部分恢复肠道微生物菌群。还提出了亚麻籽油可能是通过调节氧化条件,炎症因子分泌量和盲肠中微生物菌群组成来以此预防溃疡性结肠炎。这一结果与 Strojny 等^[59]的研究结果一致。

所以由以上多个研究文献表明, 亚麻籽油在用于治疗溃疡性结肠炎的辅助剂或其药物载上有着巨大的前景。

1.6 其他功能

除上述所说亚麻籽油具备的常见降血糖血脂、抗氧化、抗衰老、抗炎抗癌、防治心血管疾病和调节肠道菌群功能外, 还具备许多不常被关注的功能, 如(1)增强视力: 作为 DHA 与 EPA 的前体物质, α -亚麻酸被很多学者都证明了能缓解眼睛疲劳及促进视网膜生成^[62]; (2)神经保护作用: 主要机理是提高脑细胞中的不饱和脂肪酸含量来维持增强神经细胞膜的完整性和流动性, 和抵抗神经系统的自由基以此保护机体的神经系统^[7] (3)抑菌作用: 由 2.5 所述的亚麻籽油能促进有益菌和有害菌的比例可知亚麻籽油作为选择性抑菌剂的应用前景, 加之许多研究都证明亚麻籽环肽具备体外抑菌作用^[63,64]; (4)改善生产性能: 畜牧业中, 有研究表明添加亚麻籽油的日粮可使猪精液中谷胱甘肽过氧化物酶 (GPx)、总抗氧化能力 (TAC)、过氧化氢酶 (CAT) 水平显著升高, 且改变了脂肪酸的组成, 以此提高生产率^[65]。

2 应用缺陷

亚麻籽的榨油预处理方式多为烘烤, 但是该方法会大大影响其蛋白含量、脂肪酸组成等成分(如类胡萝卜素、总酚含量)及抗自由基能力, 并阻碍其后续应用, 所以控制其预处理烘烤功率、温度和时间至关重要^[66,67]。

此外, 亚麻籽油中的 α -亚麻酸是 n-3 PUFAs 家族中的短链脂肪酸, 其链长决定了其应用的局限性, 也在一定程度上说明短链 n-3 PUFA 在机体代谢上起着间接作用。若机体对更长链 n-3 PUFA (如 DPA 和 DHA) 的需求更大时, 摄入 α -亚麻酸后还需机体经过一系列反应才可将其应用于生长代谢, 所以此时摄入动物功能油脂(如鱼油、磷虾油)更有经济效益, 且长链 n-3 PUFA 的富集能力较植物功能性油脂更大^[68,69]。

3 总结

3.1 综合以上对亚麻籽油功能的阐述, 我们发现无论是从亚麻籽油单一活性成分(如 α -亚麻酸和亚油酸、亚麻籽环肽、维生素 E、亚麻木酚素和油酸、黄酮类物质), 还是直接利用亚麻籽油或复合油脂, 都证明了这种功能性油脂在抗氧化、抗衰老、降血糖降血脂、抗炎抗癌、防治心血管疾病、调节肠道菌群、增强视力和抗菌等方面都发挥着作用。而且亚麻籽油还可作

为辅助剂协调其他药物食品更好的发挥作用, 比如作为抗氧化保护剂以延长保质期。

3.2 根据上述亚麻籽油功能分析, 说明这种功能性油脂在食品业、医药学、畜牧业等方面都具有很大的开发与利用前景。

参考文献

- [1] 李恒勇, 李大伟, 潘明, 等. 亚麻籽的活性成分和功能应用研究进展[J]. 食品安全导刊, 2014, 20: 65-67
LI Hengyong, LI Dawei, PAN Ming, et al. Research progress on active components and functional application of flaxseed China [J]. Food Safety Magazine, 2014, 20: 65-67
- [2] 万分龙. 亚麻籽油的研究现状及其展望[J]. 轻工科技, 2019, 35(8): 17-19
WAN Fenlong. Research status and prospect of flaxseed oil light [J]. Industry Science and Technology, 2019, 35(8): 17-19
- [3] Xia Z, Han Y, Du H, et al. Exploring the effects of carrier oil type on in vitro bioavailability of β -carotene: a cell culture study of carotenoid-enriched nanoemulsions [J]. LWT, 2020, 134: 110224
- [4] 吕培霖, 李成义, 王俊丽. 红花籽油的研究进展[J]. 中国现代中药, 2016, 18(3): 133-135
LYU Peilin, LI Chengyi, WANG Junli. Review of safflower seed oil [J]. Mod Chin Med, 2016, 18(3): 133-135
- [5] 李殿鑫, 陈银基, 周光宏, 等. n-3 多不饱和脂肪酸分类、来源与疾病防治功能[J]. 中国食物与营养, 2006, (6): 52-54
LI Dianxin, CHEN Yinji, ZHOU Guanghong, et al. Classification, source and disease prevention function of n-3 polyunsaturated fatty acids [J]. Food and Nutrition in China, 2006, (6): 52-54
- [6] 韩荣, 吴桂荣, 张彤, 等. 配伍红花籽油对大鼠嗜铬细胞瘤细胞抗氧化损伤的保护作用[J]. 西北药学杂志, 2009, 24(4): 276-278
HAN Rong, WU Guirong, ZHANG Tong, et al. Protective effect of safflower seed oil on antioxidant damage of pheochromocytoma cells in rats [J]. Northwest Pharmaceutical Journal, 2009, 24(4): 276-278
- [7] A Ort, B Am, C Er, et al. Effects of flaxseed oil supplementation on biomarkers of inflammation and oxidative stress in patients with metabolic syndrome and related disorders: a systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials-Science Direct [J]. Clinical Nutrition ESPEN, 2020, 40: 27-33
- [8] 萧闵. 亚麻籽油对脂代谢紊乱大鼠血脂及瘦素的影响[J]. 中国中医药科技, 2013, 2: 55-56

- XIAO Min. Effects of flaxseed oil on blood lipid and leptin in rats with dyslipidemia [J]. Chinese Journal of Traditional Medical Science and Technology, 2013, 2: 55-56
- [9] 武继彪,于树玲,张若英,等.红花籽油对高脂血症大鼠卵磷脂胆固醇酰基转移酶活性的影响[J].时珍国医国药,1997,3:231
WU Jibiao, YU Shuling, ZHANG Ruoying, et al. Effect of safflower oil on LCAT activity in hyperlipemic rats [J]. Lishizhen Medicine and Materia Medica Research, 1997, 3: 231
- [10] 夏勇,傅剑云,郑云燕,等.西红花籽油对大鼠脂质代谢的影响[J].现代预防医学,2005,5:46-47
XIA Yong, FU Jianyun, ZHENG Yunyan, et al. Effect of crocus seed oil on lipid metabolism in rats with hyperlipemia [J]. Modern Preventive Medicine, 2005, 5: 46-47
- [11] Komal F, Khan M K, Imran M, et al. Impact of different omega-3 fatty acid sources on lipid, hormonal, blood glucose, weight gain and histopathological damages profile in PCOS rat model [J]. Journal of Translational Medicine, 2020, 18(1): 349
- [12] Sembratowicz I, Zięba G, Cholewinska E, et al. Effect of dietary flaxseed oil supplementation on the redox status, haematological and biochemical parameters of horses' blood [J]. Animals, 2020, 10(12): 2244
- [13] 刘彩霞,邢薇,刘洋,等.不同配比的亚麻籽油与大豆油混合油全部替代鱼油对杂交鲟生长的影响[J].动物营养学报,2017, 29(12):4386-4397
LIU Caixia, XING Wei, LIU Yang, et al. Effects of total replacement of fish oil by mixed oils with different ratios of linseed oil and soybean oil on growth of hybrid sturgeon [J]. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2017, 29(12): 4386-4397
- [14] Griffin M D, Sanders T A, Davies I G, et al. Effects of altering the ratio of dietary n-6 to n-3 fatty acids on insulin sensitivity, lipoprotein size, and postprandial lipemia in men and postmenopausal women aged 45-70 y: the OPTILIP study [J]. American Journal of Clinical Nutrition, 2006, 84(6): 1290-1298
- [15] Li N, Jia M, Deng Q, et al. Effect of low-ratio n-6/n-3 PUFA on blood lipid level: a meta-analysis [J]. Hormones, 2020
- [16] 鲜瑶,张雷,廖侠,等.亚麻籽粉调节妊娠期糖尿病患者血糖血脂的临床研究[J].中国妇幼健康研究,2018,29(6):721-726
XIAN Yao, ZHANG Lei, LIAO Xia, et al. Clinical research about regulating blood glucose and blood lipids by flaxseed powder in patients with gestational diabetes mellitus [J]. Chinese Journal of Woman and Child Health Research, 2018, 29(6): 721-726
- [17] Haldar S, Wong L H, Tay S L, et al. Two blends of refined rice bran, flaxseed, and sesame seed oils affect the blood lipid profile of Chinese adults with borderline hypercholesterolemia to a similar extent as refined olive oil [J]. The Journal of Nutrition, 2020, 150(12): 3141-3151
- [18] 徐子娴,张涛,雷志良,等.不同功能性油脂对乳腺上皮细胞乳脂合成基因表达的影响[J].中国兽医学报,2017,5:949-954
XU Zixian, ZHANG Tao, LEI Zhiliang, et al. Effects of different functional oils on the synthesis of milk fat in mammary epithelial cells [J]. Chinese Journal of Veterinary Science, 2017, 5: 949-954
- [19] 蒋金航.牛 PPAR γ 基因调控脂肪细胞增殖和分化的机制研究[D].郑州:河南农业大学牧医工程学院,2014
JIANG Jinhang. Studies on regulatory mechanisms of cattle PPAR γ in adiposity proliferation and differentiation [D]. Zhengzhou: College of animal husbandry and medical engineering, Henan Agricultural University, 2014
- [20] 梁媛,赵馨怡,张靖伟,等.亚油酸和 α -亚麻酸对脂肪干细胞活力及成脂分化的影响[J].大连工业大学学报,2017,36(5):323-327
LIANG Yuan, ZHAO Xinyi, ZHANG Jingwei, et al. Effect of linoleic acid and alpha-linolenic acid on cell viability and adipogenic differentiation in adipose tissue-derived stromal cells [J]. Journal of Dalian Polytechnic University, 2017, 36(5): 323-327
- [21] J A A, Pires, And, et al. Effects of abomasal infusion of linseed oil on responses to glucose and insulin in Holstein cows [J]. Journal of Dairy Science, 2008, 91(4): 1378-1390
- [22] Ibrahim, A, Natarajan. Substituting dietary linoleic acid with α -linolenic acid improves insulin sensitivity in sucrose fed rats [J]. Biochimica Et Biophysica Acta, 2005, 1733(1): 0-75
- [23] 杨野全.亚麻籽油抗氧化及降血糖功效的研究[D].长春:吉林大学公共卫生学院,2016
YANG Yetong. Study on the effect of antioxidation and reducing blood sugar of flax seed oil [D]. Changchun: School of Public Health, Jilin University, 2016
- [24] Grajzer M, Szmalczel K, Ukasz Kumiński, et al. Characteristics and antioxidant potential of cold-pressed oils-possible strategies to improve oil stability [J]. Foods, 2020, 9(1630): 1-18
- [25] 耿娜,梁哲,李茱,等.不同食用油对番茄红素抗氧化活性的影响[J].食品工业科技,2018,39(4):49-53
GENG Na, LIANG Zhe, LI Mo, et al. Effects of different edible oils on antioxidant activity of lycopene [J]. Science and Technology of Food Industry, 2018, 39(4): 49-53
- [26] 朱保忠,李琳. α -亚麻酸与抗氧化剂联用对果蝇寿命及小鼠

- 抗氧化能力的影响[J].中国组织工程研究与临床康复,2008,7:1264-1267
- ZHU Bao-zhong, LI Lin. Influence of alpha-linoleic acid plus anti-oxidant agent on drosophila life and mouse antioxidation ability [J]. Journal of Clinical Rehabilitative Tissue Engineering Research, 2008, 7: 1264-1267
- [27] Stodolak B, Starzyńska-Janiszewska A, Mika M, et al. *Rhizopus oligosporus* and *Lactobacillus plantarum* Co-fermentation as a tool for increasing the antioxidant potential of grass pea and flaxseed oil-cake tempe [J]. Molecules, 2020, 25(20): 4759
- [28] Wrona M, Silva F, Jesús Salafrañca, et al. Design of new natural antioxidant active packaging: screening flowsheet from pure essential oils and vegetable oils to *ex vivo* testing in meat samples [J]. Food Control, 2020: 107536
- [29] 邹仙果. 亚麻籽环肽组成、氧化结构变化及其体外抗肿瘤抗炎活性研究[D]. 南昌: 南昌大学食品学院, 2019
- ZOU Xianguo. The profiles, structural changes during oxidation and *in vitro* antitumor and anti-inflammatory activities of linusorbs in flaxseed [D]. Nanchang: Food College of Nanchang University, 2019
- [30] Almousa A A, François M, Krol E S, et al. Linoorbitides and enterolactone mitigate inflammation-induced oxidative stress and loss of intestinal epithelial barrier integrity [J]. International Immunopharmacology, 2018, 64: 42-51
- [31] Huang E Y, Leone V A, Devkota S, et al. Composition of dietary fat source shapes gut microbiota architecture and alters host inflammatory mediators in mouse adipose tissue [J]. Journal of Parenteral & Enteral Nutrition, 2013, 37(6): 746-754
- [32] Okinyo-Owiti D P, Dong Q, Ling B, et al. Evaluating the cytotoxicity of flaxseed orbitides for potential cancer treatment [J]. Toxicology Reports, 2015, 2(C): 1014-1018
- [33] Keykhasalar R, Tabrizi M H, Ardalan P, et al. The apoptotic, cytotoxic, and antiangiogenic impact of *Linum usitatissimum* seed essential oil nanoemulsions on the human ovarian cancer cell line A2780 [J]. Nutr Cancer, 2020(7): 1-9
- [34] 郑书国, 杨慧, 王宏婷, 等. 亚麻木酚素抑制 C₅₇BL/6 小鼠 Lewis 肺癌生长及肺转移[J]. 中国临床药理学与治疗学, 2015, 20(7): 745-749
- ZHENG Shuguo, YANG Hui, WANG Hongting, et al. Secoisolariciresinol diglucoside suppresses tumor growth and lung metastasis of Lewis lung carcinoma in C₅₇BL/6 mice [J]. Chinese Journal of Clinical Pharmacology and Therapeutics, 2015, 20(7): 745-749
- [35] Górski A, Kasprzycka M, Nowaczyk M, et al. Cyclolinopeptide: a novel immunosuppressive agent with potential anti-lipemic activity [J]. Transplantation Proceedings, 2001, 33(1-2): 553
- [36] 姚思宇, 赵鹏, 李彬, 等. α -亚麻酸对小鼠免疫功能影响的实验研究[J]. 中国热带医学, 2007, 3: 334-336, 349
- YAO Siyu, ZHAO Peng, LI Bin, et al. Experimental study on the effect of linolenic acid on enhancement of mice' s immune function [J]. China Tropical Medicine, 2007, 3: 334-336, 349
- [37] 蒋瑜, 熊文珂, 殷俊玲, 等. 膳食中 ω -3 和 ω -6 多不饱和脂肪酸摄入与心血管健康的研究进展[J]. 粮食与油脂, 2016, 29(11): 1-5
- JIANG Yu, XIONG Wenke, YIN Junling, et al. Research progress on dietary intake of ω -3 and ω -6 polyunsaturated fatty acid balance and cardiovascular health [J]. Cereals & Oils, 2016, 29(11): 1-5
- [38] 田光晶, 马丛丛, 陈萌, 等. 亚麻籽油抗动脉粥样硬化作用的研究进展[J]. 中国油脂, 2017, 42(10): 87-92
- TIAN Guangjing, MA Congcong, CHEN Meng, et al. Advance in anti-atherosclerotic effect of flaxseed oil [J]. China Oils and Fats, 2017, 42(10): 87-92
- [39] 韩浩. α -亚麻酸植物甾醇酯对动脉粥样硬化的保护作用及其机制研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2015
- HAN Hao. Protective effects and potential mechanisms of α -linolenic acid ester of plant sterol on atherosclerosis in apolipoprotein E knockout mice [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2015
- [40] Caroprese M, Marzano A, Marino R, et al. Flaxseed supplementation improves fatty acid profile of cow milk [J]. Journal of Dairy Science, 2010, 93(6): 2580-2588
- [41] Adkins Y, Kelley D S. Mechanisms underlying the cardioprotective effects of omega-3 polyunsaturated fatty acids [J]. Journal of Nutritional Biochemistry, 2010, 21(9): 781-792
- [42] He Z, Hao W, Kwek E, et al. Fish oil is more potent than flaxseed oil in modulating gut microbiota and reducing trimethylamine-N-oxide (TMAO)-exacerbated atherogenesis [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2019, 67(49): 13635-13647
- [43] 徐露. 亚麻籽油和磷虾油对小鼠肠道代谢活动及肠道菌群影响的研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2016
- XU Lu. α -Linolenic acid and krill oil altered the metabolic activity of microorganisms and microbiota in mouse colon [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2016
- [44] 王海波. 亚麻油对脂多糖诱导仔猪肠道和肝脏损伤的调控

- 作用[D].武汉:武汉轻工大学,2016
- WANG Hai-bo. Regulative effect of flaxseed oil on intestinal and liver injury of piglets after lipopolysaccharide challenge [D]. Wuhan: Wuhan Polytechnic University, 2016
- [45] Ngo Njembe M T, Dormal E, Gardin C, et al. Effect of the dietary combination of flaxseed and *Ricinodendron heudelotii* or *Punica granatum* seed oil on the fatty acid profile of eggs [J]. Food Chemistry, 2021, 344(15): 128668
- [46] Batkowska J, Drabik K, Brodacki A, et al. Fatty acids profile, cholesterol level and quality of table eggs from hens fed with the addition of linseed and soybean oil [J]. Food Chemistry, 2020, 334: 127612
- [47] 刘末. 亚麻籽油及其功能成分 α -亚麻酸对肠道菌群调节作用的研究[D].南京:南京财经大学, 2019
- LIU Mo. *In vitro* modulating effects of flaxseed oil and ALA on gut microbiota [D]. Nanjing: Nanjing University of Finance and Economics, 2019
- [48] Millman J, Okamoto S, Kimura A, et al. Metabolically and immunologically beneficial impact of extra virgin olive and flaxseed oils on composition of gut microbiota in mice [J]. European Journal of Nutrition, 2020, 59(6): 2411-2425
- [49] Alzueta C, Rodríguez M L, Cutuli M T, et al. Effect of whole and demucilaged linseed in broiler chicken diets on digesta viscosity, nutrient utilisation and intestinal microflora [J]. British Poultry Science, 2003, 44(1): 67-74
- [50] Elaine, Patterson, Robert M, et al. Impact of dietary fatty acids on metabolic activity and host intestinal microbiota composition in C57BL/6J mice [J]. The British Journal of Nutrition, 2014, 111(11): 1905-1917
- [51] 张静. 有氧运动与复合植物多糖对高脂膳食诱导肥胖大鼠肠道菌群的影响与机制研究[D].苏州:苏州大学,2016
- ZHANG Jing. Mechanism research on effects of aerobics and complex plant polysaccharides on intestinal flora of the fat mice induced by high fat diet [D]. Suzhou: Soochow University, 2016
- [52] Neijat M, Habtewold J, Li S, et al. Effect of dietary n-3 polyunsaturated fatty acids on the composition of cecal microbiome of Lohmann hens [J]. Prostaglandins, Leukotrienes and Essential Fatty Acids, 2020, 162: 102182
- [53] Shuaihua P, Hamidreza K, Jones P J, et al. Interactions between obesity status and dietary intake of monounsaturated and polyunsaturated oils on human gut microbiome profiles in the canola oil multicenter intervention trial (COMIT) [J]. Frontiers in Microbiology, 2016, 7: 1612
- [54] 刘洋,李敏.肠道菌群与肥胖的关联性研究现状[J].临床儿科杂志,2011,5:496-498
- LIU Yang, LI Min. Current status of intestinal flora and obesity [J]. Journal of Clinical Pediatrics, 2011, 5: 496-498
- [55] Shaopu W, Katrin G, Michael K, et al. Contribution of ruminal Fungi, Archaea, Protozoa, and Bacteria to the methane suppression caused by oilseed supplemented diets [J]. Frontiers in Microbiology, 2017, 8: 1864
- [56] Kim T, Lee J, Cho S, et al. *In vitro* and *in vivo* studies of rumen-protected microencapsulated supplement comprising linseed oil, vitamin E, rosemary extract, and hydrogenated palm oil on rumen fermentation, physiological profile, milk yield, and milk composition in dairy cows [J]. Animals, 2020, 10(9): 1631
- [57] Edmond, Y, Huang. Composition of dietary fat source shapes gut microbiota architecture and alters host inflammatory mediators in mouse adipose tissue [J]. Journal of Parenteral and Enteral Nutrition, 2013, 37(6): 746-754
- [58] 王仁媛.红花籽油抗炎作用的实验研究[J].河南中医,2008,2: 28-29
- WANG Renyuan. Huanongjiu's anti-free radical effects on chronic immuno-hepatic injury [J]. Henan Traditional Chinese Medicine, 2008, 2: 28-29
- [59] Strojny L, Štofilova J, Hijova E, et al. Effect of *Lactobacillus plantarum* LS/07 in combination with flaxseed oil on the microflora, enzymatic activity, and histological changes in the development of chemically induced precancerous growth in the rat colon [J]. Czech Journal of Animal Science, 2014, 59(6): 268-277
- [60] Andrejčáková Z, Sopková D, Vlčková R, et al. The application of *Lactobacillus reuteri* CCM 8617 and flaxseed positively improved the health of mice challenged with enterotoxigenic *E. coli* O149:F4 [J]. Probiotics and Antimicrobial Proteins, 2020, 12(3): 937-951
- [61] Zhou Q, Ma L, Zhao W Y, et al. Flaxseed oil alleviates dextran sulphate sodium-induced ulcerative colitis in rats [J]. Journal of Functional Foods, 2020, 64: 103602

(下转第 337 页)