

植物中脂肪酸类化学成分及其药理作用研究进展

周丽新, 王 玮, 梁柳婵, 何 新*, 纪瑞锋*

广东药科大学, 广东 广州 510006

摘要: 脂肪酸作为一类重要的有机化合物, 根据其在植物体内存在状态分为结合型与游离型 2 种形式。它们广泛分布于植物的种子与果实中, 其中结合型脂肪酸主要以三酰甘油的形式存在, 属于人体必需的三大营养素之一, 不仅提供能量, 还供应必需的脂肪酸和脂溶性维生素。游离型脂肪酸, 由长链烷基基团与羧基相连, 根据碳链的长短和饱和度的不同, 可进一步细分为多种类型。因不饱和脂肪酸在维持生理功能中起到了关键作用, 故其受到广泛关注。对植物源脂肪酸的化学成分进行系统的分类与总结, 并对其药理作用进行了全面的梳理, 特别强调了多不饱和脂肪酸在调节血脂、心脏保护、神经保护和抗肿瘤作用方面的研究进展, 旨在为脂肪酸类植物资源的深入开发和新药研发提供理论依据和参考。

关键词: 脂肪酸; 多不饱和脂肪酸; 调血脂; 心脏保护; 神经保护; 抗肿瘤

中图分类号: R285.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-6376(2025)01-0231-12

DOI: 10.7501/j.issn.1674-6376.2025.01.022

Research progress on fatty acid chemical constituents in plants and their pharmacological effects

ZHOU Lixin, WANG Wei, LIANG Liuchan, HE Xin, JI Ruifeng

Guangdong Pharmaceutical University, Guangzhou 510006, China

Abstract: Fatty acids, as a category of vital organic compounds, can be classified into bound and free forms based on their presence within plants. They are extensively distributed in the seeds and fruits of plants, with bound fatty acids predominantly existing in the form of triglycerides, constituting one of the three essential nutrients required by the human body. These not only supply energy but also provide essential fatty acids and fat-soluble vitamins. Free fatty acids, linked by a long-chain alkane group to a carboxylic acid, can be further differentiated into various types based on the length and saturation of the carbon chain. Particularly, unsaturated fatty acids play a pivotal role in sustaining physiological functions and are the focal point of this study. This paper systematically categorizes and summarizes the chemical constituents of plant-derived fatty acids and comprehensively reviews their pharmacological effects. Special emphasis is placed on the research progress of polyunsaturated fatty acids in regulating blood lipids, cardiac protection, neuroprotection, and antitumor activity. The aim of this study is to provide a theoretical basis and reference for the in-depth development of fatty acid plant resources and the creation of new drugs.

Key words: fatty acids; polyun-saturated fatty acids; lowering blood lipids; cardiac protection; neuroprotection; anti-tumor

脂肪酸作为一类长链烷烃与羧基相连的有机化合物, 在植物界中分布广泛, 尤其在种子和果实中含量丰富。天然存在的脂肪酸主要分为游离型与结合型 2 种形式, 其中绝大多数为结合型脂肪酸以三酰甘油的形式存在, 是三大营养素之一的油脂。

中国是世界上食用油脂植物最早的国家之一, 对于自然界中油脂的应用最早可追溯至新石器时代河南郑州郊区大何村遗址出土的大麻籽 *Cannabis sativa*^[1]。中国含脂肪酸成分的植物种类丰富, 含油量(指果实、果仁、种子或种仁)在 20%以上的近

收稿日期: 2024-07-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(82174209); 云浮市 2022 年中医药(南药)产业创新团队项目(云科函[2022] 71 号); 2022 年度普通高等院校认定类科研项目(2022KQNCX033); 广东省教育厅青年创新人才项目(2022KQNCX033)

作者简介: 周丽新(1999—), 女, 硕士研究生, 从事中药分析及药效物质基础研究。E-mail: 861214630@qq.com

*通信作者: 何 新, 博士生导师, 教授, 主要从事中药药理和中药药理学研究。E-mail: hexintn@gdpu.edu.cn

纪瑞锋, 博士, 讲师, 从事中药物质基础与质量控制研究。E-mail: jiruifeng@gdpu.edu.cn

400 多种, 已有研究总结了种子植物 108 科 397 属 974 种的种子油, 以及个别的果肉油和块茎油中 38 种常见脂肪酸在植物科、属中的分布^[2]。游离型脂肪酸在维持机体细胞正常生理功能方面发挥着重要作用, 近年来在临床与预防保健领域得到广泛应用, 并展现出显著的治疗效果。不饱和脂肪酸, 作为脂肪酸类化合物的重要组成部分, 对人体健康具有极其重要的作用, 是当前研究的热点, 也是本文的重点阐述对象。

本文在对脂肪酸类化学成分进行系统梳理的基础上, 对其在调血脂、心脏保护、神经保护、抗肿瘤等方面的药理作用进行归纳总结, 以期更好地开发和利用自然界中的含脂肪酸成分的植物资源, 为其在中医药和食品保健行业中的合理应用提供科学依据和参考。结合型脂肪酸作为能量储存的主要形式, 在代谢过程中提供的能量高于糖类和蛋白质。而游离型脂肪酸, 尤其是不饱和脂肪酸, 对维持机体正常生理功能具有重要作用, 已成为药理作用研究的重点。本文强调了不饱和脂肪酸在促进心血管健康、改善神经功能、调节血脂水平等方面的重要作用, 并指出了其在预防和治疗相关疾病中的潜在价值。

1 植物中脂肪酸类化学成分

脂肪酸通常是脂肪链与羧基连接组成的一类化合物, 主要在动植物油脂中以甘油三酯的形式分布。天然油脂中含有 800 种以上的脂肪酸, 绝大多数为偶碳直链, 极少部分为奇数碳链或具有支链^[3]。脂肪酸有多种分类方式, 其中按碳链长度可分为短链脂肪酸 (SCFA)、中链脂肪酸 (MCFA) 及长链脂肪酸 (LCFA); 按碳链中双键数量又可分为饱和脂肪酸 (化合物 1~9, 表 1)、单不饱和脂肪酸 (化合物 10~20, 表 1) 与多不饱和脂肪酸 (PUFAs) (化合物 21~48, 表 1); 根据双键位置可分为 ω -3 系、 ω -6 系、 ω -9 系等不饱和脂肪酸; 根据双键的顺反异构又分为顺式脂肪酸与反式脂肪酸; 按分布情况可分为大量脂肪酸、少量脂肪酸、异常脂肪酸。脂肪酸在同种植物中的种类及含量受遗传因子的控制而相对稳定, 存在于不同的部位、不同的外界条件和地理分布的脂肪酸种类及含量会具有一定差异, 可依此建立脂肪酸谱模型来鉴定高价值油脂资源植物的地理产地^[4]。某些植物类群具有较为明显的脂肪酸特征, 如芥酸常分布于十字花科和槭树科。

SCFA 碳链数 4~6, 多具有挥发性, 也称为挥

发性脂肪酸; MCFA 碳链数 6~12, 主要为辛酸、癸酸; LCFA 碳链数大于 12。饱和脂肪酸分子中的碳链不含双键; 单不饱和脂肪酸碳链中只含有 1 个不饱和双键; PUFAs 碳链中含有 2 个或更多双键。《中国药典》2020 年版中, 对 36 种脂肪酸的检测进行规定, 其中包括 13 种饱和脂肪酸、19 种单不饱和脂肪酸及 4 种 PUFAs^[5]。 ω -3 PUFAs 是第 1 个不饱和双键在碳链甲基端第 3 位碳原子上的 PUFAs, 主要有 α -亚麻酸 (ALA)、二十二碳六烯酸 (DHA) 和二十碳五烯酸 (EPA) 等; 常见的 ω -6 PUFAs 主要有亚油酸 (LA)、 γ -亚麻酸 (GLA) 和花生四烯酸 (AA) 等; 常见的 ω -9 PUFAs 主要有油酸 (OA)、芥酸 (EA) 等。常见的反式脂肪酸有异油酸、反式油酸等。大量脂肪酸指含量高、分布广的脂肪酸, 共有 7 种 (图 1-A): 月桂酸、肉豆蔻酸、棕榈酸、硬脂酸、油酸、亚油酸、 α -亚麻酸; 少量脂肪酸指含量较少或分布相对有限, 不如大量脂肪酸广泛存在的脂肪酸, 常见的 10 多种: 己酸、辛酸、癸酸、十七烷酸、花生酸、山嵛酸、二十四烷酸、棕榈油酸、芥酸、 γ -亚麻酸、花生四烯酸、十六碳三烯酸、十八碳四烯酸、二十二碳六烯酸; 异常脂肪酸通常在部分科属中分布或为某个科属植物特有, 具有植物分类学意义 (图 1-B), 如秋葵及锦葵科种子油中含有的环氧油酸、香苻婆种子油中的苻婆酸、大风子种子油中的大风子酸、大风子油酸等^[6]。植物中常见脂肪酸类化学成分及其来源如表 1^[6]、图 1 所示。

2 脂肪酸类化学成分的药理作用

脂肪酸的药理活性研究多聚焦于 PUFAs 及其衍生物。 ω -3 PUFAs、 ω -6 PUFAs 均有较好的心血管系统保护作用, 对稳定细胞膜功能、平衡脂蛋白、抑制缺血性心血管疾病、降低血脂血糖、调节脉管阻塞等有重要作用。 ω -3 PUFAs 及其代谢物可舒张血管、抑制血小板聚集, 有助于预防动脉粥样硬化、斑块破裂等心血管疾病。 ω -6 PUFAs 中的 LA 在体内转化成 GLA 和 AA, 然后再合成前列腺素^[7], 其中前列腺素 E₂ (PGE₂) 是抗血栓、治疗周围血管疾病、预防心肌梗死的有效成分^[8]。LA 与 ALA, 人体缺乏从头合成二者的酶, 只能通过食物摄取, 故又名必需脂肪酸, 是青少年正常发育不可缺少的营养素^[9]。同时其代谢产物及衍生物如 GLA、DHA、PGE₂ 等具有广泛生物活性, 在降血压、降胆固醇、降低心脑血管疾病风险、促进婴幼儿的神经大脑发育、神经保护、抗肿瘤、抗氧化、抗炎等方面发挥

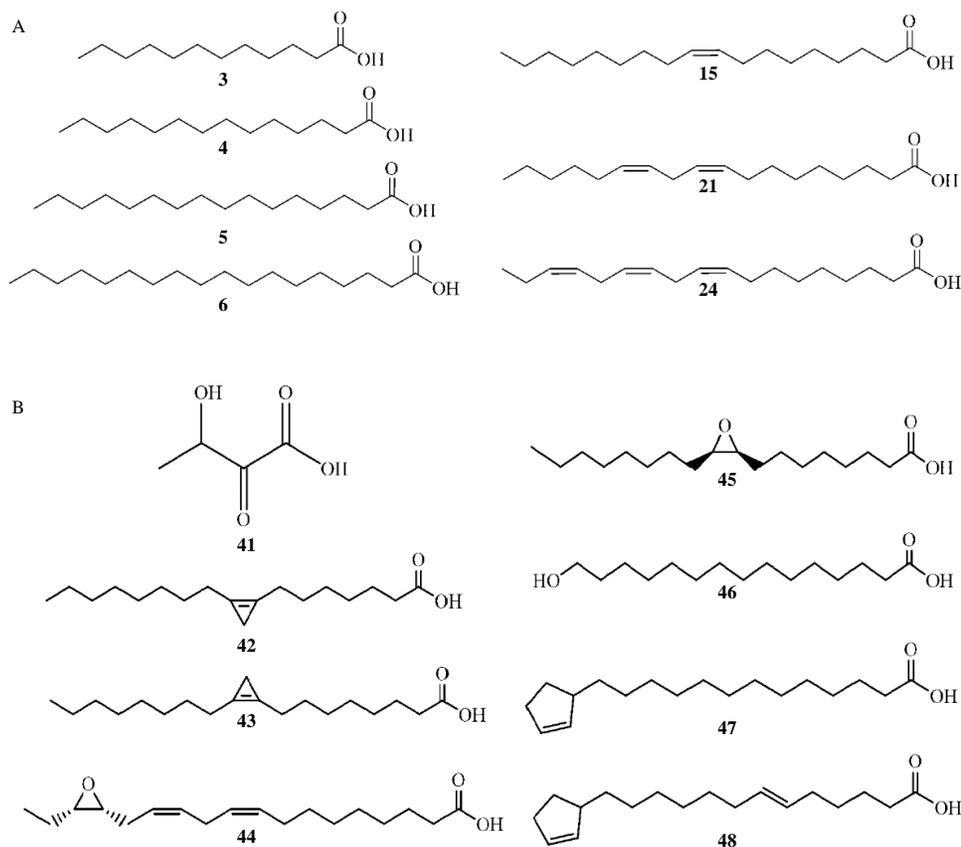


图 1 植物中大量脂肪酸 (A) 和异常脂肪酸 (B) 类化合物

Fig. 1 Chemical structure of a large number of fatty acid compounds (A) and representative abnormal fatty acid compounds (B) in plants

表 1 植物中代表性脂肪酸类化合物

Table 1 Representative fatty acid compounds in plants

序号	系统命名	俗名	英文	速记表示	代表性药材
1	辛酸	亚羊脂酸	noctanoic acid/caprylic acid	8:0	桃仁、冬瓜仁
2	癸酸	羊脂酸	<i>n</i> -decanoic acid/capric acid	10:0	白鲜皮、大吴风草 (全草)
3	十二烷酸	月桂酸	<i>n</i> -dodecanoic acid/lauric acid	12:0	桃仁、大吴风草 (全草)
4	十四烷酸	肉豆蔻酸	<i>n</i> -tetradecanoic acid/myristic acid	14:0	坪山柚 (果实)、肉豆蔻
5	十六烷酸	棕榈酸	<i>n</i> -hexadecanoic acid/palmitic acid	16:0	乌柏 (整株)、椒目
6	十八烷酸	硬脂酸	<i>n</i> -octadecanoic acid/stearic acid	18:0	油茶籽、可可豆
7	二十烷酸	花生酸	<i>n</i> -eicosanoic acid/arachidic acid	20:0	桃仁、花生
8	二十二烷酸	山嵛酸	docosanoic acid/behenic acid	22:0	石榴籽、橄榄 (果实)
9	二十四烷酸	木焦油酸	tetra cosanoic acid/lignoceria acid	24:0	大豆、酸枣仁
10	顺-4-十碳一烯酸	十碳酸	dec-4c-enoic acid	4c~10:1	大叶钓樟 (种子)
11	顺-4-十二碳一烯酸	林德酸	<i>cis</i> -4-dodecenoic acid/linderic acid	4c~12:1	大叶钓樟 (种子)
12	顺-9-十四碳一烯酸	肉豆蔻酸	tetradecanoic acid/myristoleic acid	9c~14:1	桃仁
13	顺-9-十六碳一烯酸	棕榈油酸	<i>n</i> -hexadec-9-enoic acid/palmitoleic acid	9c~16:1	油橄榄果、大豆
14	顺-6-十八碳一烯酸	岩芹酸	octadec-6c-enoic acid/petroselinic acid	6c~18:1	茺葇 (全草)
15	顺-9-十八碳一烯酸	油酸	octadec-9c-enoic acid/oleic acid	9c~18:1	葵花籽、芝麻
16	顺-11-二十碳一烯酸	花生烯酸	eicosenoic acid	11c~20:1	石榴籽
17	顺-11-二十二碳一烯酸	鲸蜡烯酸	docosenoic acid	11c~22:1	葵花籽、红花 (花)

表 1 (续)

序号	系统命名	俗名	英文	速记表示	代表性药材
18	顺-13-二十二碳一烯酸	芥酸	<i>n</i> -docos-12-enoic acid/eracic acid	13c~22:1	白芥子、黄芥子
19	顺-15-二十四碳一烯酸	鲨油酸	tetracos-15c-enoic acid/selacholeic acid	15c~24:1	蒜头果
20	顺-17-二十六碳一烯酸	山梅酸、西 门木酸	<i>n</i> -hexacos-17c-enoic acid/ximenic acid	17c~26:1	旱金莲(花)
21	顺-9,顺-12-十八碳 二烯酸	亚油酸	octadeca-9c-12c-dienoic acid/linoleic acid	9c,12c~18:2	桔梗(根)、 油橄榄果
22	顺-5,顺-9,顺-12-十八碳 三烯酸	松油酸	octadeca-5,9,12-trienoic acid	5c,9c,12c~18:3	红松(整株)
23	顺-6,顺-9,顺-12-十八碳 三烯酸	γ -亚麻酸	octadeca-6,9,12-trienoic acid	6c,9c,12c~18:3	火麻仁
24	顺-9,顺-12,顺-15-十八碳 三烯酸	α -亚麻酸	octadeca-9c,12,15c-trienoic acid/ α -linolenic acid	9c,12c,15c~18:3	大吴风草(全株)、 椒目
25	顺-9,反-11,反-13-十八碳 三烯酸	α -桐酸	octadeca-9c,11t,13t-trienoic acid/elaostearic acid	9c,11t,13t~18:3	油桐(整株)
26	反-9,反-11,反-13-十八碳 三烯酸	β -桐酸	<i>n</i> -octadeca-9t,11t,13t-trienoic acid	9t,11t,13t~18:3	油桐(整株)
27	反-8,反-10,顺-12-十八碳 三烯酸	α -金盏菊酸	<i>n</i> -ocradeca-8t,10t,12c-trienoic acid/calendic acid	8t,10t,12c~18:3	金盏菊(花)
28	反-9,反-11,顺-13-十八碳 三烯酸	梓树酸	<i>n</i> -octadeca-9t,11t,13c-trienoic acid	9t,11t,13c~18:3	梓树(整株)
29	顺-9,反-11,顺-13-十八碳 三烯酸	栝楼酸、 石榴酸、 瓜蒌酸	octadeca-9c,11t,13c-trienoic acid/punicic acid/trichosanin acid	9c,11t,13c~18:3	石榴籽
30	顺-8,顺-11,顺-14-二十 三烯酸	二高- γ - 亚麻酸	dihomo- γ -linolenic acid	8c,11c,14c~20:3	水蒜芥、反叶拟垂 枝藓(整株)
31	顺-5,顺-8,顺-11,顺-14- 二十碳四烯酸	花生四烯酸	<i>n</i> -eicos-5,8,11,14-tetraenoic acid/arachidonic acid	5c,8c,11c,14c~20:4	葵花籽、橄榄(果)
32	顺-6,顺-9,顺-12,顺-15- 十八碳四烯酸	亚麻油酸、 松柏油酸	<i>n</i> -octadeca-6c,9c,12c,15c-tetraenoic acid	6c,9c,12c,15c~18:4	车前叶蓝蓟籽
33	(11E)-11-十八碳烯-9- 炔酸	山梅炔酸、 西门木炔酸	octadec-trans-11-en-9-ynoic acid/santalbic acid/ximenynic acid	9a,11t~18:2	檀树(整株)
34	顺-5,顺-8,顺-11,顺-14,顺- 17-二十碳五烯酸	二十碳五烯 酸、EPA	eicosapentaenoic acid	5c,8c,11c,14c,17c~20:5	亚麻籽
35	顺-4,顺-7,顺-10,顺-13,顺- 16,顺-19-二十碳六烯酸	二十二碳六 烯酸、DHA	docosahexaenoic acid	4c,7c,10c,13c,16c,19c~20:6	裂壶藻、亚麻籽
36	11-羟基-十四烷酸	旋花籽酸	11-hydroxy myristic acid	11h~14:0	旋花籽
37	12-羟基十八碳-9-烯酸	蓖麻酸	12-hydroxy-octadeca-9c-enoic acid	9c,12h~18:1	蓖麻籽
38	3-羟基十八碳-9,11- 二烯酸	马桑酸	13-hydroxyoctadeca-9c,11t-dienoic acid	9c,11t,13h~18:2	马桑(叶)
39	18-羟基十八碳-9,11,13- 三烯酸	粗糠柴酸	18-hydroxyoctadeca-9c,11t/13t-trienoic acid	9c,11t,13t,18h~18:3	粗糠柴(根)

表 1 (续)

序号	系统命名	俗名	英文	速记表示	代表性药材
40	α -酮基-3-羟基丁酸	α -酮基-3-羟基丁酸	α -keto-3-hydroxybutyric acid	—	杜鹃花、马醉木(根)
41	8,9-亚甲基-8Z-十七碳烯酸	锦葵酸	malvalic acid	—	猴面包(果实)、棉籽
42	9,10-环丙烯基-十八碳一烯酸	苜蓿酸	sterculic acid	—	梧桐(整株)
43	顺-15,16-环氧-十八碳二烯-9c,12c-酸	环氧亚油酸	octadec-9c,12c-cis-15,16-n-enoxy-dienoic acid/epoxylinoleic acid	—	油菜、荠菜
44	顺-12,13-环氧-十八碳烯-9c-酸	环氧油酸	epoxyoleic acid	—	波娑罗树(整株)、斑鸠菊(花)
45	15-羟基十五碳酸	羟基十五碳酸	15-hydroxy-pentadecanoic acid	—	拟南芥(种子)、欧白芷(根)
46	13-环戊烯十三碳酸	晁模酸、大风子酸	trideconic acid-13-cyclopent-2-eny-n/chaulmoogric acid	—	大风子草(全草)
47	13-环戊烯-6-十三碳一烯酸	大风子油酸	13-cyclopentene-6-triadecaenoic acid	—	大风子草(全草)

重要作用。DHA 和 EPA 是细胞膜磷脂的主要成分，为 ALA 的代谢产物，在机体中能够起到调控脂质代谢及消除炎症的作用。

2.1 调血脂作用

谢敏等^[10]采用多种分离手段从党参的茎叶中分离得到了甾体、不饱和脂肪酸及其衍生物，以奥利司他为对照药，基于体外实验证实 LA、3- α -亚麻酸甘油酯 1-O-[α -D-半乳糖基-(1 \rightarrow 6)-O- β -D-半乳糖苷]、3- α -亚麻酸甘油酯 1-O- β -D-半乳糖苷和 3-(7,10,13-十六碳三烯酸)甘油酯 1-O- β -D-半乳糖苷混合物对胰脂肪酶活性具有抑制作用，从而达到调血脂作用。Gurumallu 等^[11]研究了亚麻籽油(FSO, 250、350 mg·kg⁻¹)、芝麻籽油(SSO, 516、700 mg·kg⁻¹)、FSO 和 SSO 联合处理[(43+292)、(86+584) mg·kg⁻¹]对链脲佐菌素(STZ)诱导的 Wistar 糖尿病大鼠多种生化指标的影响，结果表明随着剂量的增加，FSO 和 SSO 显著提高了胰腺和肝脏中抗氧化酶的活性，抗糖尿病和调血脂活性更佳。同时该治疗方法还降低了糖尿病大鼠血清肌酐、尿素、天冬氨酸转氨酶(AST)、三酰甘油(TG)、总胆固醇(TC)、高密度脂蛋白(HDL)等生化及脂质参数。该研究表明 FSO 和 SSO 中的 ω -3 和 ω -6 脂肪酸具有协同的抗糖尿病和抗血脂异常的潜力，这些效应主要是通过存在于各自种子油中的 ω -3 和 ω -6 脂肪酸介导的。吴聪等^[12]通过高脂饮食建立肥胖动物实验模型，发现 ω -3 PUFAs 能够调节血液中外泌体内脂肪酸代谢通路以及内吞通路关键位置 miRNA 的 22 个相关靶基因的表达，有效降低小鼠体质量。

2.2 心脏保护作用

Sakamoto 等^[13]将 EPA (50 μ mol·L⁻¹) 应用于棕榈酸(PAL, 400 μ mol·L⁻¹) 诱导的 H9c2 大鼠心肌

细胞模型，并表现出线粒体功能障碍等脂毒性特征，实验中使用 5-氨基咪唑-4-羧酰胺核苷酸(AICAR)作为 AMP-活化蛋白激酶(AMPK)的生理激活剂，结果表明，EPA 能够激活 AMPK 使其磷酸化，有助于缓解脂毒性诱导的细胞凋亡、线粒体断裂，并降低动力相关蛋白 1(Drp1)的表达，改善心肌能量状态及代谢从而降低脂毒性。脂肪酸 β -氧化速率和低血糖氧化速率加快是糖尿病心肌病心脏功能障碍和不良重塑的主要原因，这些代谢变化会加重心肌缺血/再灌注损伤。EPA 可通过抑制线粒体脂肪酸 β -氧化、提高丙二酰辅酶 A 水平(抑制线粒体脂肪酸类摄取)来起到心脏保护作用^[14]。高血压动物模型每天给予 ω -3 PUFAs 200 mg·kg⁻¹(包括 460 mg EPA, 380 mg DHA)持续 2 个月后，取其心肌细胞进行原代培养。在高血压所致心肌缺血导致的受损细胞中， ω -3 PUFAs 可以通过抑制肾上腺素受体 β 1-AA 的产生和降低基质金属蛋白酶(MMP)-2 活性，保护心肌细胞膜的完整性，维持 Cx43 的正确定位和功能，以及调节 PKC 信号通路，从而在高血压大鼠终发挥抗心律失常作用^[15]。Tamás 等^[16]通过对家兔、犬、大鼠等动物模型使用传统微电极测量心室乳突肌制备物的心室动作电位发现， ω -3 PUFAs 与线粒体质子泄漏呈正相关，通过脂质运输或饮食干预增加线粒体 DHA 含量，可增强质子运动，通过快速钠电流、超快速激活延迟外向钾电流、快速激活延迟整流外向钾电流和 L 型钙电流等多种方面对离子电流有抑制作用，抑制异常放电而起到心脏保护作用。同时 ω -3 PUFAs (EPA、DHA)对常见心律失常、房颤有一定预防效果，其机制与通过抑制丝裂原激活的蛋白激酶激活、减少 MMP 活性和连接蛋白再分布逆转房颤介导的心房

结构变化、抑制房颤的快速局灶性异位放电相关^[17]。

2.3 神经保护作用

C57BL/6 小鼠脑内注射 β 淀粉样蛋白 1-42 片段 ($A\beta_{1-42}$, 每只 2 μg) 诱导阿尔茨海默病模型, 并实施 EPA 干预(喂饲含 0.8% EPA 饲料)。结果表明 EPA 可抑制 M1 型小胶质细胞过度激活, 限制小胶质细胞活化失衡介导的神经炎症效应, 进而削弱内质网应激, 从而发挥神经保护效应, 最终对阿尔茨海默病具有明

显改善作用^[18]。天麻中的琥珀酸具有抗癫痫、解热镇痛活性^[19]。EPA、DHA 作为神经细胞磷脂的重要组成成分可直接发挥神经保护作用外, 其各种衍生物如前列腺素 (PG)、白三烯 (LT)、消退素 (Rv)、神经保护素 (NPD) 等多种炎症介质通过减少促炎细胞因子的产生、调节免疫细胞活性、促进神经细胞再生及修复来发挥其调节效应。脂肪酸中对神经系统的保护作用多与 SCFA、PUFAs 有关, 具体机制见表 2。

表 2 脂肪酸类化学成分的神经保护作用及机制

Table 2 Neuroprotective effects and mechanisms of fatty acid chemical components

成分	模型	作用机制
SCFA ^[20]	THP-1细胞	最高总浓度 (500 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$) 的SCFA混合物 (包括: 醋酸、丙酸、丁酸、甲酸和戊酸) 对THP-1细胞分泌白细胞介素 (IL) -1 β 、单核细胞趋化蛋白 (MCP) -1、肿瘤坏死因子 (TNF) - α 和细胞毒素有显著抑制作用; 较低浓度 (5~250 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$) 的SCFA通过免疫刺激THP-1细胞而减少IL-1、单核细胞趋化蛋白1、TNF- α 和细胞毒素的分泌, 继而减轻炎症反应
SCFA ^[21]	人神经干细胞 (hNSCs)	在乙酸浓度为30~300 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 、丁酸浓度为0.2、2、20、200 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 和丙酸浓度为0.1、1、10、100 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, SCFA影响B淋巴细胞瘤-2基因 (Bcl-2)、BH3相互作用域死亡激动剂 (BID)、Fas细胞表面死亡受体 (FAS)、Necdin (NDN) 及血管内皮生长因子A (VEGFA) 的表达, 促进人神经干细胞生长和胚胎干细胞向神经元分化
丁酸钠 ^[22]	Wistar大鼠 (PND 7) 脑缺血造模	丁酸钠 (300 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 抑制组蛋白去乙酰化酶, 促进新生缺氧缺血大鼠脑室下区神经发生, 还可增加损伤半球TrkB受体的表达和转录因子环磷腺苷效应元件结合蛋白 (CREB) 磷酸化, 并通过BDNF-TrkB信号通路促进同侧半球神经元的发生、增加突触的可塑性, 最终改善新生缺氧缺血大鼠神经功能
SCFA ^[23]	人肾皮质上皮细胞	醋酸盐、丙酸盐、丁酸盐 10 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 降低了趋化因子MCP-1 9%的表达水平, 25 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 降低了16%, 100 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 降低了 11%; 激活GPR41和GPR43并抑制MAPK磷酸化, 减少促炎因子的分泌和表达
癸酸 ^[24]	成年SD大鼠	与AMPA受体 (α -氨基-3-羟基-5-甲基-4-异恶唑丙酸受体: 介导中枢神经系统快速兴奋性突触传递) 结合, 可减少 AMPA 受体的表达; 抑制海马切片的兴奋性神经传递, 进而减少或阻止癫痫的发作
棕榈酸 ^[25]	斑马鱼	1.0、10.0 $\text{mg}\cdot\text{mL}^{-1}$ 天麻提取物能够显著抑制斑马鱼幼鱼的癫痫样抽搐; 天麻素、天麻醚苷、棕榈酸等成分作用于CALM1受体, 以及胆汁酸、胆汁酸盐的合成和循环、 γ -氨基丁酸受体的激活、门冬氨酸受体的释放、细胞内受体的泛素化修饰、核受体传导、琥珀酸半醛脱氢等通路, 从而发挥抗癫痫作用
EPA和 α -亚麻酸 ^[26]	断奶雄性SD大鼠	EPA和 α -亚麻酸可以通过蛋白激酶 C 和酪氨酸激酶途径增强内皮细胞 Occludin mRNA 的表达来调节血脑屏障的功能
ω -3 PUFA ^[27]	17 d Long-Evans大鼠	ω -3 PUFA (2.01 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ EPA, 1.34 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ DHA) 可通过降低MMP-9的表达从而减轻血脑屏障的功能障碍
ω -3 PUFA ^[28]	SH-SY5Y细胞、帕金森病模型小鼠	ω -3 PUFA[二十二碳六烯酸 (DHA) 及其羟基化衍生物DHAH]诱导SH-SY5Y细胞内Nrf2及HO-1的表达, 8 h的预处理可以使Nrf2的表达达到最高水平, 同时减少6-羟基多巴胺 (6-OHDA) 所致的SH-SY5Y细胞死亡, 减轻细胞的凋亡和降低细胞内ROS水平, LPS所致BV2细胞炎症反应。 ω -3 PUFA (2、4 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) 在小鼠模型中诱导Nrf2表达, 并可显著改善黑质纹状体通路多巴胺能神经元的损伤, 减轻6-OHDA所致神经炎症, 改善小鼠的运动缺陷

2.4 抗肿瘤作用

2.4.1 抗胃癌 与广泛应用的化疗药物顺铂 (CDDP) 相比, DHA 具有改变癌细胞膜构成的独特作用, 对胃癌细胞具有更强的选择性抗增殖作用, 而对正常体细胞很少或没有毒性。 ω -3 PUFAs (DHA、EPA) 诱导人胃癌 BGC823 细胞凋亡和阻滞细胞在 G_0/G_1 期, 细胞增殖受到抑制, DHA 与 CDDP 联用进一步增强 CDDP 在胃癌细胞中的抗肿瘤活性^[29]。Dai 等^[30]向胃癌细胞 (MGC 和 SGC) 与正常胃细胞系 (GES1) 中加入 EPA、DHA 与 LA、ALA, 它们对 GES-1 细胞的影响很小, 但对胃粘液腺癌细胞生长具有抑制作用。DHA 是破囊壶菌微生物油中最重要的 PUFAs。Shakeri 等^[31]评价 12 种破囊壶菌油对胃癌 AGS 细胞的细胞毒性, 只有富含 DHA 的油脂 (DHA $1.26 \text{ mg}\cdot\text{mL}^{-1}$) 对 AGS 细胞表现出抑制作用, 表明破囊壶菌油中对胃癌细胞起到抑制作用主要成分之一为 DHA。

近年来, 新合成的 DHA 衍生物及其生物活性研究的报道不断出现, 某些 DHA 衍生物已被证实具有抑制癌细胞的活性^[32]。QC4 是 DHA 的衍生物, 同时也是松香的主要成分, 对胃癌细胞增殖的抑制作用呈剂量和时间相关性, 能够破坏胃癌细胞细胞膜的完整性, 激活钙蛋白酶-1 的自溶, 诱导胃癌凋亡蛋白裂解最终导致胃癌细胞凋亡^[33]。史浩等^[34]研究证实 ω -3 PUFAs (EPA) 及中间代谢产物和 COX-1 结合后, 生成的 PGE3 能够抑制胃癌细胞的侵袭能力, 起到抑制胃癌细胞扩散的作用。

2.4.2 抗肺癌 余蕾等以 5-氟尿嘧啶 (5-FU) 为阳性对照, 探究从甘遂块根中提取分离出的不饱和脂肪酸 (UFA) 对肺癌细胞 SHG-44 的影响。培养 48 h 后, UFA (0.2、0.4、0.8 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 组和 5-FU (10 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 组活细胞数比对照组减少, 5-FU 与 UFA 均可通过破坏细胞线粒体结构, 抑制细胞分裂, 诱导 P21 表达上调, 降低 P53、PKB/Akt 表达水平对 SHG-44 细胞增殖起到抑制作用^[35]。Zajdel 等^[36]发现 ω -6 PUFAs (AA, 最大浓度 $100 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$) 及 ω -3 PUFAs (EPA, DHA, 浓度依赖性) 可直接增强顺铂对肺癌细胞的杀伤作用同时, 还增加了肺癌细胞自噬泡的数量并诱导 caspase-3/7 活性, 促进肺癌细胞的自噬。 ω -3 PUFA (EPA、DHA) 能促进 T 淋巴细胞增殖, 促进 TNF- α 、IL-1 和 IL-6 的转录, 增强机体免疫系统对肺癌细胞的杀伤效应^[37]。Jiang 等^[38]将 DHA 作为肿瘤靶向配体, 发现 DHA-DTX (docosahexaenoic

acid-conjugated docetaxel) 聚合物通过影响肺癌细胞迁移来抑制肺癌向骨的转移, 且在体外表现出与 DTX 相似的抗肿瘤功效。紫杉醇脂肪酸缀合物 (DHA-紫杉醇) 的毒性低于紫杉醇, 进一步的动物移植瘤模型中发现 DHA 能使紫杉醇靶向肿瘤细胞, 增加肿瘤中药物浓度, 同时降低正常细胞中的药物浓度, 从而增加药物的疗效, 减轻毒副作用^[39]。

2.4.3 抗其他肿瘤 侯静^[40]通过将人喉表皮样癌细胞在不同浓度花椒种子油 (体积分数 0.01%、0.02%、0.03%、0.04%、0.05%、0.06%、0.08%、0.10%) 中培养, 结果显示其增殖能力受到抑制, 且随着花椒种子油浓度增加, 细胞活力显著降低, 其作用机制可能与抑制 PI3K/AKT/mTOR 通路有关。蒋佳敏等^[41]通过网络药理学预测蒺藜子脂肪酸抗肿瘤主要是通过 Wnt 信号通路和 Hedgehog 信号通路, 进一步推测蒺藜子脂肪酸可抑制肝细胞和结直肠癌的生长。癌症细胞线粒体在功能上与正常细胞不同, 可以作为开发新的实验疗法的靶点, 利用这一特点 Choucair 等^[42]研究出一类新型线粒体靶向药物原型芳基脲基脂肪酸 CTU16 ($\{[4\text{-chloro-3-(trifluoromethyl)phenyl]-carbonyl}\text{amino}\}$ hexadecanoic acid)。CTU 既能解偶联线粒体电子运输, 又能激活活性氧 (ROS) 的产生, 从而促进肿瘤细胞的死亡。陈怡等^[43]研究表明 DHA 与维生素 D (化疗药联用 $100 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ DHA、 $10 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 维生素 D3) 联用能够增强对乳腺癌 MCF-7 细胞增殖的抑制作用, 联合处理后显著促进乳腺癌细胞凋亡。Madhumathi 等^[44]研究发现, 短链脂肪酸通过激活驱动乳腺癌细胞同源受体 G 蛋白偶联受体 (GPCR) 的同源配体 FFAR2 和 FFAR3 达到抑制其向非侵袭性表型发展的作用。Gang 等^[45]证实 SCFAs (丁酸、丙酸及乙酸) 通过肠道微生物、糖酵解、SCFAs 转运蛋白治疗结直肠癌癌症 (CRC), 表明丁酸可调节结肠细胞与 CRC 细胞生长, 通过影响组蛋白去乙酰化酶来抑制肿瘤的形成。Rasoul 等^[46]总结发现短链脂肪酸 (特别是丁酸、丙酸和乙酸) 影响肿瘤细胞附着、免疫细胞迁移、细胞因子产生、趋化性和程序性细胞死亡, 在膀胱癌、结肠癌、乳腺癌、胃癌、肝癌、肺癌、胰腺癌和前列腺癌中均有较好的抗癌效果。

2.5 抗炎作用

AA、EPA 等多种脂肪酸是调节炎症的介质。椒目油富含大量脂肪酸, 对 LPS 诱导 BEAS-2B 细胞

炎症模型具有很强的抗炎活性，其作用机制可能与抑制 TLR4/MyD88/NF-κB 通路有关^[40]。刺五加籽精油对 RAW264.7 巨噬细胞、NIH3T3 细胞的抗炎活性显示与调节 NO 生成量、IL-2、IFN-γ 分泌量和 PGE₂ 分泌量相关，其中在 6.0 μg·mL⁻¹ 时，对 PGE₂ 分泌量与倍他米松阳性药物相当，大于 4.0 μg·mL⁻¹ 与阳性药物对两种细胞的 NO 生成量几乎无差别^[47]。南瓜子油抗炎效果显著，大多受炎症影响而被改变的参数如血浆多种酶的水平 and 活性，肝脏谷胱甘肽与脂质过氧化物的水平得到调

节^[48]。脂肪酸对于炎症的调节作用，与其发挥的神经保护、降血脂、降血压、抗动脉粥样硬化等药理作用密切相关。

2.6 抗菌作用

棕榈酸、硬脂酸、月桂酸等长链脂肪酸对金黄色葡萄球菌、铜绿假单胞菌和表皮葡萄球菌等多种类菌有较好的抗菌作用。脂肪酸主要通过不同机制影响细菌生物膜正常生理功能，进而导致细菌死亡，达到较好的抑菌效果。脂肪酸类化学成分的抗菌作用机制如表 3 所示。

表 3 脂肪酸类化学成分的抗菌作用及机制

Table 3 Antibacterial effects and mechanisms of fatty acid chemical components

成分	研究对象	机制
石蒜脂肪酸 ^[49]	金黄色葡萄球菌、铜绿假单胞菌、表皮葡萄球菌、乳酸杆菌	通过细菌裂解、抑制酶活性、损害营养吸收和产生致命氧化产物而导致细菌死亡
AA、DHA ^[50]	多重耐药鲍曼不动杆菌	AA、DHA 通过阻止由正向调控因子 A (PrfA) 介导的磷脂酶 C (plcB)、肌动蛋白聚合诱导蛋白 (hly) 和肌动蛋白聚合诱导蛋白 (ActA) 等毒力基因的激活，减弱细菌毒性、致病性
肉豆蔻酸和月桂酸 ^[51]	金黄色葡萄球菌、大肠杆菌、白色念球菌	抑制金黄色葡萄球菌中溶血素基因 (hla 和 hld)、大肠杆菌中几种生物膜相关基因 (csgAB、fimH 和 flhD) 以及大肠杆菌中菌丝细胞壁基因 HWP1 的表达。50 μg·mL ⁻¹ 浓度下，棕榈油对 4 种金黄色葡萄球菌起到显著抑制作用；在 20 μg·mL ⁻¹ 浓度下，其对 2 种白色念球菌的抑制作用达 85%；月桂酸和肉豆蔻酸在 20 μg·mL ⁻¹ 浓度下均能显著抑制金黄色葡萄球菌、大肠杆菌和白色念珠菌
LCFA ^[52]	幽门螺杆菌	250 μmol·L ⁻¹ 的 LCFA (棕榈酸、硬脂酸、油酸、亚油酸、α-亚麻酸) 可对幽门螺旋杆菌调控鞭毛蛋白、黏附素的毒力 T4SS 编码基因的表达产生显著抑制作用

2.7 抗氧化作用

石浩等^[53]研究发现油茶籽油对过氧化氢诱导人永生表皮细胞(HaCaT)氧化损伤具有保护作用。以 HaCaT 细胞为模型给予油茶籽油(5~500 μg·mL⁻¹)，检测得细胞凋亡率降低 44.77%、超氧化物歧化酶(SOD)升高 46.68%、谷胱甘肽过氧化物酶(GSH-Px)升高 63.66%、活性氧(ROS)水平下降 37.66%，Nrf2 基因表达水平较模型组提高 101.78%，均较优于阳性对照维生素 C 处理组(50 μg·mL⁻¹)的效果。证明油茶籽油对 H₂O₂ 造成的氧化损伤具有一定的预保护作用。此外，刺五加籽精油、南瓜子油、苜蓿子油、紫苏油等均有较好的抗氧化活性^[47-48,54-55]。

2.8 其他作用

孙延平等^[56]发现牵牛子的脂肪油组分具有明显的利尿作用，能明显增加小鼠胃排空率和小

肠推进率。现代研究发现^[57]，牵牛子油对蛔虫和螨虫具有一定的驱除作用，其中亚油酸甲酯对朱砂叶螨体内谷胱甘肽 S 转移酶(GSTs)、乙酰胆碱酯酶(AChE)和单胺氧化酶(MAO)等几种酶作用显著，引起神经传递的阻断，从而导致螨体的死亡。反式脂肪酸可在体内长期积累，影响婴儿和儿童的生长发育，引起心脏病、血栓、II 型糖尿病、癌症等^[58]。饱和脂肪酸通过脂毒性和炎症等导致其他代谢组织(例如肝脏、骨骼肌、胰腺)的并发症^[59]。

3 结语与展望

脂肪酸在植物界分布极为广泛，主要存在于种子果实中为生物提供能量。中国油脂植物资源种类丰富，世界上大部分油脂资源植物均有种植，为医疗健康、化工等产业发展提供基础。本文综述了脂肪酸

的化学成分、分类,并深入探讨了脂肪酸的药理作用,揭示了脂肪酸在促进人类健康方面的巨大潜力。

依据脂肪酸的结构特点,本文主要概括了其分类方式:结合型脂肪酸主要以油脂形式存在,储存和供应热能,在代谢中提供的能量比糖类和蛋白质约高一倍。游离型脂肪酸的碳链长度、不饱和键位置和数量与其理化性质、药理作用密切相关。特别是多不饱和脂肪酸中的必需脂肪酸,由于人体自身无法合成需通过外界摄入。其中 ω -3 及 ω -6 PUFA 因其特殊的 3 位、6 位不饱和键位置,具有显著的生物活性,应用历史悠久,对维持机体生理功能、人体健康具有重要意义,是研究脂肪酸资源开发利用的热点化合物。

脂肪酸的药理作用研究主要集中在调血脂、心脏保护、神经保护、抗肿瘤、抗炎、抗菌、抗氧化等方面。饱和脂肪酸如棕榈酸、月桂酸、癸酸等具有抗炎、抗菌、保护心血管的作用。一些短链脂肪酸,如丁酸,可调节免疫应答、抑制肿瘤生长并通过多种机制起到保护神经的作用。多不饱和脂肪酸可以健脑强脑、调节血压、调血脂,通过抗炎、抗氧化发挥维护心脑血管功能^[60]。此外,PUFA 通过抑制胰脂肪酶活性、提高低密度脂蛋白和极低密度脂蛋白的清除率、调控脂肪代谢,发挥调血脂、降低血液黏度、改善血管功能等作用,对动脉粥样硬化和高血脂等疾病具有一定的预防和辅助治疗效果。同时,PUFA 还能使 AMPK 磷酸化,抑制心肌细胞肥大,降低心肌细胞凋亡,改善心功能损伤,起到心脏保护作用。除了常见的药理作用外,脂肪酸还具有调节免疫活性、调节肠道微生物结构、利尿、驱虫等功效。然而,大量研究也表明反式脂肪酸及饱和脂肪酸的过量摄入会增加低密度脂蛋白胆固醇的水平,降低高密度脂蛋白胆固醇水平,增加冠心病、动脉粥样硬化、糖尿病、结肠癌、乳腺癌发病率,提高心肌梗死发病风险。

植物中脂肪酸类化学成分应用的发展前景广阔,预计将会在中医药和食品保健行业中发挥重要作用。随着科学技术的不断进步,对中药中脂肪酸类化学成分的研究将会更加深入,为中药的现代化发展提供更多的可能性。脂肪酸类成分研究聚焦在 DHA、EPA 等热点成分,而对其他脂肪酸的应用及相关植物资源的深度开发利用较少。鉴于我国医疗健康、化工等产业的需求庞大,其他脂肪酸类化学成分的研究仍有很大的空间和潜力。未来,需继续

深化对脂肪酸类化学成分作用机制的研究、探索确认应用剂量,增加药效降低过量摄入所致健康风险,以应对不同的医疗需求。同时,结合中药多成分多靶点作用的复杂性,研究脂肪酸与其他活性成分协同作用机制,开发基于脂肪酸的新活性成分,以促进中药脂肪酸资源开发利用。

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突

参考文献

- [1] 高婷婷. 牡丹籽油成分分析及储藏条件研究 [D]. 北京: 北京林业大学, 2012.
Gao T T. Composition analysis and storage conditions of peony seed oil [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2012.
- [2] 贾良智, 周俊. 中国油脂植物 [M]. 北京: 科学出版社, 1987.
Jia L Z, Zhou J. *Oil Plants in China* [M]. Beijing: Science Press, 1987.
- [3] 王兴国, 金青哲. 油脂化学 [M]. 北京: 科学出版社, 2012.
Wang X G, Jin Q Z. *Oil Chemistry* [M]. Beijing: Science Press, 2012.
- [4] Dou X J, Wang X F, Ma F, et al. Geographical origin identification of Camellia oil based on fatty acid profiles combined with one-class classification [J]. *Food Chem*, 2024, 433: 137306.
- [5] 中国药典 [S]. 二部. 2020.
Pharmacopoeia of the People's Republic of China [S]. Volume II. 2020.
- [6] Rutz A, Sorokina M, Galgonek J, et al. The LOTUS initiative for open knowledge management in natural products research [J]. *eLife*, 2022, 11: e70780.
- [7] 谢曦, 陈碧翰, 罗俊锴, 等. 破囊壶菌属微生物中超长链多不饱和脂肪酸的生物合成及其代谢工程应用 [J]. *现代食品科技*, 2022, 38(6): 327-342.
Xie X, Chen B H, Luo J K, et al. Biosynthesis of very-long-chain polyunsaturated fatty acids in thraustochytrids and their applications in metabolic engineering [J]. *Mod Food Sci Technol*, 2022, 38(6): 327-342.
- [8] Srivastava A, Palaia T, Hall C, et al. Lipocalin-type prostaglandin D2 synthase appears to function as a novel adipokine preventing adipose dysfunction in response to a high fat diet [J]. *Prostaglandins Other Lipid Mediat*, 2021, 157: 106585.
- [9] 陈冲. Omega-3 多不饱和脂肪酸在化疗患者中疗效的 Meta 分析 [D]. 南昌: 南昌大学, 2023.
Chen C. Meta-analysis of therapeutic effect of Omega-3

- polyunsaturated fatty acids in chemotherapy patients [D]. Nanchang: Nanchang University, 2023.
- [10] 谢敏, 李秀壮, 刘景坤, 等. 党参地上部分降血脂活性成分的分离鉴定 [J]. 西北植物学报, 2017, 37(10): 2082-2086.
- Xie M, Li X Z, Liu J K, et al. Isolation and identification of antiobesity ingredients in aerial part of *Codonopsis pilosula* (franch.) nannf [J]. Acta Bot Boreali Occidentalia Sin, 2017, 37(10): 2082-2086.
- [11] Gurumallu S C, AlRamadneh T N, Sarjan H N, et al. Synergistic hypoglycemic and hypolipidemic effects of ω -3 and ω -6 fatty acids from Indian flax and sesame seed oils in streptozotocin-induced diabetic rats [J]. Phytomed Plus, 2022, 2(3): 100284.
- [12] 吴聪, 葛科立, 路宗博, 等. *n*-3 多不饱和脂肪酸对小鼠血液外泌体中 miRNA 的调节和抑制肥胖作用 [J]. 食品科学, 2021, 42(7): 176-184.
- Wu C, Ge K L, Lu Z B, et al. Effects of *n*-3 polyunsaturated fatty acids on the regulation of miRNA in blood exosomes and its antiobesity effect in mice [J]. Food Sci, 2021, 42(7): 176-184.
- [13] Sakamoto A, Saotome M, Hasan P, et al. Eicosapentaenoic acid ameliorates palmitate-induced lipotoxicity via the AMP kinase/dynammin-related protein-1 signaling pathway in differentiated H9c2 myocytes [J]. Exp Cell Res, 2017, 351(1): 109-120.
- [14] Karwi Q G, Sun Q Y, Lopaschuk G D. The contribution of cardiac fatty acid oxidation to diabetic cardiomyopathy severity [J]. Cells, 2021, 10(11): 3259.
- [15] Bacova B S, Radosinska J, Wallukat G, et al. Suppression of β 1-adrenoceptor autoantibodies is involved in the antiarrhythmic effects of omega-3 fatty acids in male and female hypertensive rats [J]. Int J Mol Sci, 2020, 21(2): 526.
- [16] Árpádfy-Lovas T, Mohammed A S A, Naveed M, et al. Species-dependent differences in the inhibition of various potassium currents and in their effects on repolarization in cardiac ventricular muscle [J]. Can J Physiol Pharmacol, 2022, 100(9): 880-889.
- [17] Driscoll D F, Welty F K, Bistrrian B R. Omega-3 fatty acids as antiarrhythmic drugs: Upstream target modulators affecting acute and long-term pathological alterations in cardiac structure and function [J]. Crit Care Explor, 2023, 5(10): e0977.
- [18] 张璐璐. 二十碳五烯酸改善小胶质细胞活化失衡缓解阿尔茨海默病的实验研究 [D]. 昆明: 云南大学, 2020.
- Zhang L L. Experimental study on eicosapentaenoic acid improving microglia activation imbalance and alleviating Alzheimer's disease [D]. Kunming: Yunnan University, 2020.
- [19] 李碧, 方雄, 褚福浩, 等. 琥珀酸半醛脱氢酶抑制剂筛选方法的建立及其在天麻成分筛选中的应用 [J]. 北京中医药大学学报, 2016, 39(8): 664-669.
- Li B, Fang X, Chu F H, et al. Screening succinate semialdehyde dehydrogenase inhibitors: An established model and its application in tall *Gastrodia Tuber* [J]. J Beijing Univ Tradit Chin Med, 2016, 39(8): 664-669.
- [20] Wenzel T J, Gates E J, Ranger A L, et al. Short-chain fatty acids (SCFAs) alone or in combination regulate select immune functions of microglia-like cells [J]. Mol Cell Neurosci, 2020, 105: 103493.
- [21] Yang L L, Millischer V, Rodin S, et al. Enteric short-chain fatty acids promote proliferation of human neural progenitor cells [J]. J Neurochem, 2020, 154(6): 635-646.
- [22] Jaworska J, Zalewska T, Sypecka J, et al. Effect of the HDAC inhibitor, sodium butyrate, on neurogenesis in a rat model of neonatal hypoxia-ischemia: Potential mechanism of action [J]. Mol Neurobiol, 2019, 56(9): 6341-6370.
- [23] Kobayashi M, Mikami D, Kimura H, et al. Short-chain fatty acids, GPR41 and GPR43 ligands, inhibit TNF- α -induced MCP-1 expression by modulating p38 and JNK signaling pathways in human renal cortical epithelial cells [J]. Biochem Biophys Res Commun, 2017, 486(2): 499-505.
- [24] Chang P, Augustin K, Boddum K, et al. Seizure control by decanoic acid through direct AMPA receptor inhibition [J]. Brain, 2016, 139(pt 2): 431-443.
- [25] 裴文强, 单毅, 张友刚, 等. 基于斑马鱼模型与中医药整合药理学平台研究天麻的抗癫痫作用及潜在机制 [J]. 中草药, 2021, 52(7): 2003-2010.
- Pei W Q, Shan Y, Zhang Y G, et al. Antiepileptic effect and potential mechanism of *Gastrodiae Rhizoma* based on zebrafish model and integrated pharmacology of traditional Chinese medicine [J]. Chin Tradit Herb Drugs, 2021, 52(7): 2003-2010.
- [26] Zúñiga J, Cancino M, Medina F, et al. N-3 PUFA supplementation triggers PPAR- α activation and PPAR- α /NF- κ B interaction: Anti-inflammatory implications in liver ischemia-reperfusion injury [J]. PLoS One, 2011, 6(12): e28502.
- [27] Russell K L, Berman N E, Gregg P R, et al. Fish oil improves motor function, limits blood-brain barrier disruption, and reduces Mmp9 gene expression in a rat model of juvenile traumatic brain injury [J]. Prostaglandins Leukot Essent Fatty Acids, 2014, 90(1): 5-11.

- [28] 韩民兴. *n*-3 不饱和脂肪酸通过激活 Nrf2-ARE 信号通路对 6-OHDA 及 α -synuclein 帕金森病模型小鼠的保护作用 [D]. 济南: 山东大学, 2017.
Han M X. Omega-3 polyunsaturated fatty acids protect against 6-OHDA and α -synuclein-induced dopaminergic neurodegeneration by activating Nrf2/ARE pathway [D]. Jinan: Shandong University, 2017.
- [29] Sheng H, Chen X H, Liu B Y, et al. Omega-3 polyunsaturated fatty acids enhance cisplatin efficacy in gastric cancer cells by inducing apoptosis via ADORA1 [J]. *Anticancer Agents Med Chem*, 2016, 16(9): 1085-1092.
- [30] Dai J F, Shen J H, Pan W S, et al. Effects of polyunsaturated fatty acids on the growth of gastric cancer cells in vitro [J]. *Lipids Health Dis*, 2013, 12: 71.
- [31] Shakeri S, Amoozyan N, Fekrat F, et al. Antigastric cancer bioactive Aurantiochytrium oil rich in docosahexaenoic acid: From media optimization to cancer cells cytotoxicity assessment [J]. *J Food Sci*, 2017, 82(11): 2706-2718.
- [32] Huang X C, Wang M, Wang H S, et al. Synthesis and antitumor activities of novel dipeptide derivatives derived from dehydroabiestic acid [J]. *Bioorg Med Chem Lett*, 2014, 24(6): 1511-1518.
- [33] Luo D J, Ni Q, Ji A L, et al. Dehydroabiestic acid derivative QC4 induces gastric cancer cell death via oncosis and apoptosis [J]. *Biomed Res Int*, 2016, 2016: 2581061.
- [34] 史浩, 马家驰, 陈泉, 等. 多不饱和脂肪酸 ω -3 和 ω -6 对胃癌侵袭影响的研究 [J]. *中华肿瘤防治杂志*, 2012, 19(22): 1700-1703, 1715.
Shi H, Ma J C, Chen Q, et al. Effect of polyunsaturated fatty acids on invasive potential in human gastric cancer [J]. *Chin J Cancer Prev Treat*, 2012, 19(22): 1700-1703, 1715.
- [35] 俞蕾, 谢明仁, 俞发荣. 植物不饱和脂肪酸对肺癌细胞毒性作用 [J]. *甘肃科技*, 2021, 37(24): 160-164.
Yu L, Xie M R, Yu F R. Cytotoxic effect of plant unsaturated fatty acid on the lung cancer cells [J]. *Gansu Sci Technol*, 2021, 37(24): 160-164.
- [36] Zajdel A, Wilczok A, Latocha M, et al. Polyunsaturated fatty acids potentiate cytotoxicity of cisplatin in A549 cells [J]. *Acta Pol Pharm*, 2014, 71(6): 1060-1065.
- [37] Gutiérrez S, Svahn S L, Johansson M E. Effects of omega-3 fatty acids on immune cells [J]. *Int J Mol Sci*, 2019, 20(20): 5028.
- [38] Jiang S G, Liu Z G, Wu L, et al. Tumor targeting with docosahexaenoic acid-conjugated docetaxel for inhibiting lung cancer metastasis to bone [J]. *Oncol Lett*, 2018, 16(3): 2911-2920.
- [39] 王深旭. 紫杉醇-二十二碳六烯酸-右旋糖酐偶联物的制备及抗肿瘤作用的研究 [D]. 济南: 山东大学, 2021.
Wang S X. Preparation of paclitaxel-docosahexaenoic acid-dextran conjugate and its antitumor effect [D]. Jinan: Shandong University, 2021.
- [40] 侯静. 椒目油抗炎、抗喉癌作用机制研究 [D]. 太原: 山西医科大学, 2021.
Hou J. Study on anti-inflammatory and anti-laryngeal cancer action mechanism of *Zanthoxylum bungeanum* seed oil [D]. Taiyuan: Shanxi Medical University, 2021.
- [41] 蒋佳敏, 陈荣玲, 牛圣皓, 等. 基于网络药理学和分子对接探讨薏苡子油脂抗肿瘤的生物学活性 [J]. *广东化工*, 2023, 50(9): 56-59.
Jiang J M, Chen R L, Niu S H, et al. Exploring the antitumor biological activity of dill oil based on network pharmacology [J]. *Guangdong Chem Ind*, 2023, 50(9): 56-59.
- [42] Choucair H, Rahman M K, Umashankar B, et al. The arylureido fatty acid CTU activates endoplasmic reticulum stress and PERK/NOXA-mediated apoptosis in tumor cells by a dual mitochondrial-targeting mechanism [J]. *Cancer Lett*, 2022, 526: 131-141.
- [43] 陈怡, 曹强, 杨佳员, 等. Omega-3 多不饱和脂肪酸和维生素 D 联合化疗对乳腺癌 MCF-7 细胞化疗增敏效果的作用 [J]. *中国肿瘤临床与康复*, 2022, 29(9): 1066-1069.
Chen Y, Cao Q, Yang J Y, et al. Effect of Omega-3 and vitamin D combined chemotherapy on chemosensitization of MCF-7 breast cancer cells [J]. *Chin J Clin Oncol Rehabil*, 2022, 29(9): 1066-1069.
- [44] Thirunavukkarasan M, Wang C, Rao A, et al. Short-chain fatty acid receptors inhibit invasive phenotypes in breast cancer cells [J]. *PLoS One*, 2017, 12(10): e0186334.
- [45] Wang G, Yu Y, Wang Y Z, et al. Role of SCFAs in gut microbiome and glycolysis for colorectal cancer therapy [J]. *J Cell Physiol*, 2019, 234(10): 17023-17049.
- [46] Mirzaei R, Afaghi A, Babakhani S, et al. Role of microbiota-derived short-chain fatty acids in cancer development and prevention [J]. *Biomedecine Pharmacother*, 2021, 139: 111619.
- [47] 王馨. 刺五加籽精油提取及脂肪酸分析和活性研究 [D]. 长春: 长春工业大学, 2023.
Wang X. Extraction of essential oil from *Acanthopanax senticosus* seeds and analysis of fatty acids and activity studies [D]. Changchun: Changchun University of Technology, 2023.
- [48] 陈田, 戴思慧, 沈鹏原, 等. 裸仁南瓜籽油活性成分分析及抗氧化能力评价 [J]. *食品与机械*, 2018, 34(10): 152-157.

- Chen T, Dai S H, Shen P Y, et al. Study on bioactive components and antioxidant activity of hull-less pumpkin seed oil [J]. Food Mach, 2018, 34(10): 152-157.
- [49] Ling Z, Gabriele R A F, Zunika A. Fatty acids composition and antimicrobial activities of *Litsea garciae* pulp and seed extracts [J]. Med Plants Int J Phytomedicines Relat Ind, 2022, 14(2): 301-311.
- [50] Eder A E, Munir S A, Hobby C R, et al. Exogenous polyunsaturated fatty acids (PUFAs) alter phospholipid composition, membrane permeability, biofilm formation and motility in *Acinetobacter baumannii* [J]. Microbiology, 2017, 163(11): 1626-1636.
- [51] Kim Y G, Lee J H, Park S, et al. Inhibition of polymicrobial biofilm formation by saw palmetto oil, lauric acid and myristic acid [J]. Microb Biotechnol, 2022, 15(2): 590-602.
- [52] Valdez-Salazar H A, Ares M A, Fernández F J, et al. Long-chain fatty acids alter transcription of *Helicobacter pylori* virulence and regulatory genes [J]. Peer J, 2021, 9: e12270.
- [53] 石浩, 丁仁惠, 黄谦, 等. 富硒油茶籽油对 H₂O₂ 诱导 HaCaT 细胞氧化损伤的保护作用研究 [J]. 中国油脂, 2019, 44(1): 61-66.
- Shi H, Ding R H, Huang Q, et al. Protective effect of selenium rich oil-tea *Camellia* seed oil on HaCaT cell injured by hydrogen peroxide [J]. China Oils Fats, 2019, 44(1): 61-66.
- [54] 梁旭, 王宪龄, 陈德壮, 等. 紫苏籽油的研究和应用现状 [J]. 中医学报, 2022, 37(3): 547-551.
- Liang X, Wang X L, Chen D Z, et al. The research and application status of *Perilla* seed oil [J]. Acta Chin Med, 2022, 37(3): 547-551.
- [55] 陈荣玲, 陈惠琴, 殷超, 等. 气相色谱-质谱联用分析蒺藜子中挥发油和油脂的化学成分及其抗氧化活性研究 [J]. 安徽医药, 2023, 27(6): 1112-1115.
- Chen R L, Chen H Q, Yin C, et al. GC-MS analysis of the chemical composition of volatile oil and lipids in dill seed and its antioxidant activity [J]. Anhui Med Pharm J, 2023, 27(6): 1112-1115.
- [56] 孙延平, 王艳宏, 杨炳友, 等. 牵牛子化学拆分组分的性味药理学评价及药味归属研究 [J]. 世界中医药, 2015, 10(12): 1837-1846, 1853.
- Sun Y P, Wang Y H, Yang B Y, et al. Evaluation on the property and flavor pharmacology of chemical split fractions from *Semen pharbitidis* and study on its flavor ascription [J]. World Chin Med, 2015, 10(12): 1837-1846, 1853.
- [57] 李亭亭. 牵牛子炒制前后化学成分变化及质量控制研究 [D]. 北京: 北京中医药大学, 2016.
- Li T T. Study on chemical composition changes and quality control of morning glory before and after frying [D]. Beijing: Beijing University of Chinese Medicine, 2016.
- [58] 罗凡, 费学谦, 李康雄, 等. 高温油茶籽油中苯并芘和反油酸产生规律研究 [J]. 中国粮油学报, 2016, 31(8): 44-47, 54.
- Luo F, Fei X Q, Li K X, et al. The research of the law of benzopyrene and reverse oleic acid in oil-tea *Camellia* seed oil during frying [J]. J Chin Cereals Oils Assoc, 2016, 31(8): 44-47, 54.
- [59] Ralston J C, Lyons C L, Kennedy E B, et al. Fatty acids and NLRP3 inflammasome-mediated inflammation in metabolic tissues [J]. Annu Rev Nutr, 2017, 37: 77-102.
- [60] Mao C Y, Xiao P, Tao X N, et al. Unsaturated bond recognition leads to biased signal in a fatty acid receptor [J]. Science, 2023, 380(6640): eadd6220.

[责任编辑 刘东博]