

植物油中生物活性物质及其营养特性概述

景璐璐, 马传国, 闫亚鹏

(河南工业大学 粮油食品学院, 郑州 450052)

摘要:植物油是维系人体生命活动能量的重要来源,富含磷脂、植物甾醇、维生素 E、角鲨烯等多种生物活性物质。为进一步了解植物油的营养特性及潜在利用价值,对 8 种大宗油料油脂及 7 种特色油料油脂的生物活性物质(植物甾醇、维生素 E、角鲨烯、 β -胡萝卜素)含量及其营养特性进行了概述,明确了不同植物油中生物活性物质组成差异,为消费者合理选择食用油提供一定的理论支撑和借鉴。

关键词:植物油;植物甾醇;角鲨烯;维生素 E; β -胡萝卜素;营养特性

中图分类号:TS225.1;TQ646.4 **文献标识码:**A **文章编号:**1003-7969(2021)12-0056-06

Overview on bioactive substances in vegetable oil and their nutritional characteristics

JING Lulu, MA Chuanguo, YAN Yapeng

(College of Food Science and Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou 450052, China)

Abstract: Vegetable oil, rich in phospholipids, phytosterol, vitamin E, squalene and other bioactive substances, is an important source of energy to human life. To further understand the nutritional characteristics and potential utilization value of vegetable oils, the research status of bioactive substances (phytosterol, vitamin E, squalene and β -carotene) contents and their nutritional characteristics of eight kinds of bulk oils and seven kinds of special oils were summarized, and the composition difference of bioactive substances in different vegetable oils was clarified so as to provide a theoretical support and reference for consumers to choose edible oils rationally.

Key words: vegetable oil; phytosterol; squalene; vitamin E; β -carotene; nutritional characteristic

植物油是可食用脂质的主要来源,世界脂质消耗总量的 75% 以上来源于植物油^[1]。国家粮油信息中心数据显示,2019/2020 年度我国食用植物油消费量达 4 071 万 t,同比增长 2.3%。

植物油含有植物甾醇、角鲨烯、类胡萝卜素等多种生物活性物质。随着社会经济的发展,关于植物油在人体健康与疾病预防方面作用的研究呈上升趋势。例如:橄榄油富含多酚类、油酸等物质,可有效调节肠道菌群健康水平,从而降低慢性炎症对生长速度的抑制作用^[2];沙棘果油因富含植物甾醇、多

种不饱和脂肪酸、酚类化合物等,对人体健康表现出多种功能特性,尤其对心血管疾病有积极作用^[3];玉米油中适当的维生素 E、植物甾醇及多不饱和脂肪酸比例,可阻止血脂升高及循环促炎细胞的增加,从而延长寿命^[4]。但目前尚未有研究表明某种植物油因其营养特性优于其他植物油^[5]。

近年来,市场上涌现出一批新型植物油,如亚麻籽油、红花籽油、米糠油、核桃油等。不同植物油中生物活性物质组成差异性较大,营养特性也有所不同。为使人们在众多植物油中选择适合自身的植物油,同时提升其营养健康水平,本文对 8 种大宗油料油脂和 7 种特色油料油脂(按照油料在全球的产量划分)的部分生物活性物质(植物甾醇、维生素 E、角鲨烯、 β -胡萝卜素)组成含量及营养特性进行了概述。

1 植物甾醇及其营养特性

植物甾醇是由 27~30 个碳环结构和羟基组成的一种重要的甾体类化合物,可降低胆固醇、抗癌、

收稿日期:2021-05-06;修回日期:2021-07-30

基金项目:国家自然科学基金面上项目(31972110);“十三五”国家重点研发计划子课题(2018YFD0401102)

作者简介:景璐璐(1995),女,硕士研究生,研究方向为油脂化学与工艺学(E-mail:jinglulu2013@163.com)

通信作者:马传国,教授,博士生导师(E-mail)mcg@haut.edu.cn。

保护胃黏膜等。目前,在各种植物和海洋生物中已经鉴定出 250 多种植物甾醇,且已被广泛应用于食品、药品、化妆品等领域^[6]。但植物甾醇不能在人体中合成,只可从饮食中摄入后由肠道吸收利用,食

用油是一种较为重要的来源。植物油中含量较多的植物甾醇主要有菜油甾醇、豆甾醇和谷甾醇,本文对 8 种大宗油料油脂和 7 种特色油料油脂中这几种植物甾醇含量进行汇总,结果分别见表 1、表 2。

表 1 8 种大宗油料油脂中植物甾醇含量

植物油	含量/(mg/kg)				参考文献
	菜油甾醇	豆甾醇	谷甾醇	总量	
大豆油	284.4 ~ 1 089.0	268.2 ~ 859.5	564.8 ~ 2 700.0	1 239.0 ~ 4 500.0	[7-12]
棕榈油	94.0 ~ 174.9	56.3 ~ 109.1	237.8 ~ 407.6	409.2 ~ 654.4	[7,9-12]
葵花籽油	156.0 ~ 650.0	144.0 ~ 650.0	1 200.0 ~ 3 500.0	1 813.4 ~ 5 000.0	[7,10,12]
菜籽油	1 111.5 ~ 4 361.8	nd ~ 113.0	2 095.5 ~ 6 542.7	4 500.0 ~ 11 300.0	[7,10,12-13]
花生油	199.3 ~ 362.7	120.0 ~ 190.0	855.7 ~ 1 389.7	1 183.9 ~ 1 594.6	[7,10]
橄榄油	38.4 ~ 79.3	nd ~ 73.2	57.9 ~ 1 144.1	343.0 ~ 1 522.8	[7,9-11,14]
椰子油	7.5 ~ 102.2	11.4 ~ 161.4	42.0 ~ 544.4	470.0 ~ 1 150.7	[9-11,15]
棉籽油	172.8 ~ 1 542.4	50.0 ~ 435.2	2 052.0 ~ 5 574.4	2 700.0 ~ 6 400.0	[10,12]

注:“nd”表示未检出。下同

表 2 7 种特色油料油脂中植物甾醇含量

植物油	含量/(mg/kg)				参考文献
	菜油甾醇	豆甾醇	谷甾醇	总量	
玉米油	1 120.0 ~ 5 326.1	301.0 ~ 1 768.0	3 836.0 ~ 14 718.6	6 332.1 ~ 22 100.0	[7,10,12-13]
米糠油	174.9 ~ 2 887.2	1 243.8 ~ 1 313.5	3 959.2 ~ 4 953.5	10 751.1 ~ 12 002.2	[9,11]
芝麻油	18.6 ~ 3 800.3	6.7 ~ 2 280.0	61.4 ~ 1 761.0	521.3 ~ 19 000	[12-13,16]
核桃油	5.0 ~ 88.0	nd ~ 5.8	974.1 ~ 1 494.5	1 144.0 ~ 1 679.0	[13,17]
亚麻籽油	102.2 ~ 1 318.0	nd ~ 210.2	544.2 ~ 2 083.0	1 253.9 ~ 6 437.0	[9,13,18]
红花籽油	113.0 ~ 282.0	nd ~ 148.0	538.0 ~ 1 270.0	1 920.0 ~ 3 773.0	[10,16]
油茶籽油	17.8 ~ 25.6	13.3 ~ 19.9	109.8 ~ 305.7	748.3 ~ 1 506.6	[19]

由表 1、表 2 可知:植物油中谷甾醇含量比菜油甾醇、豆甾醇含量高;芝麻油、米糠油、玉米油、菜籽油植物甾醇总量较高,是饮食中获取植物甾醇的理想来源。

植物甾醇可降低胆固醇含量。研究表明,当对野生型和 LXR $\alpha\beta$ 缺陷小鼠进行植物甾醇喂养时,可有效降低肠道对胆固醇的吸收(降低约 40% 左右),且促进胆固醇衍生化合物的排泄,减少胆固醇在体内的蓄积^[20]。这与王轶菲^[21]在仓鼠膳食中添加植物甾醇(玉米油)研究结果相一致。在一项基于他汀类和非他汀类药物人体试验中,当受试者使用植物甾醇/富含植物甾醇的人造奶油时,其血清胆固醇含量降低了 4%^[22]。米糠油中的植物甾醇通过抑制小鼠餐后葡萄糖依赖性促胰岛素多肽的释放,可有效降低饮食性肥胖率的上升^[23]。此外, Vundru 等^[24]指出 β -谷甾醇对 MDA-MB-231 乳腺癌细胞有显著的抗增殖、促凋亡作用。但相对于乳腺癌细胞来说,植物甾醇对肺癌细胞和皮肤癌细胞作用影响较小。植物甾醇的抗炎作用在动物及人体试验中都得到了有效验证,当定期摄入植物甾醇用于降低低密度脂蛋白胆固醇时,会有一定的剂量

依赖性^[25-26]。

2 维生素 E 及其营养特性

维生素 E 是生育酚和生育三烯酚的统称。据报道,人类摄取的维生素 E 有 70% 来自植物油,且大多数关于维生素 E 的研究都围绕生育酚进行^[27],因此本文对 8 种大宗油料油脂和 7 种特色油料油脂中生育酚含量进行汇总,结果分别见表 3、表 4。

从表 3、表 4 可以看出,部分植物油中 α -生育酚含量较多,其中红花籽油、米糠油尤为突出。部分植物油中,如大豆油、芝麻油等,维生素 E 则多以 γ -生育酚的形式存在。

α -生育酚是一种存在于人体内常见的维生素 E 形式,被认为是细胞保护因子。在患有哮喘的小鼠模型中,进行 α -生育酚饮食喂养,可显著降低由屋尘螨导致的肺部炎症,但是在饮食中添加 γ -生育酚则会增加肺部炎症^[40]。同时另一项研究表明,对小鼠母体进行 γ -生育酚喂养后,其子宫内 CD11c + CD11b + 树突状细胞数量翻倍并促进新生儿变态反应性炎症^[41]。在动物试验中,维生素 E 通过增加蛋白磷酸酶、硫氧还蛋白 1 和硫氧还蛋白还原酶 1 的基因表达,使上游信号转导的凋亡信号调

节激酶 1 (ASK1) 失活, 阻碍 ASK1 - p38 MAPK 通路, 可调节人肝 RBL 细胞相关基因的表达, 发挥抗氧化作用, 而对肝脏起到保护作用^[42]。此外, 维生素 E 还作用并挽救因缺乏维生素 E 而导致的不孕^[36,43]。

表 3 8 种大宗油料油脂中生育酚含量

植物油	含量/(mg/kg)				参考文献
	α -生育酚	β -生育酚	γ -生育酚	δ -生育酚	
大豆油	67.9 ~ 148.5	nd ~ 73.7	229.5 ~ 757.4	22.0 ~ 267.1	[7-8,11,28-29]
棕榈油	98.6 ~ 245.4	nd ~ 9.86	nd ~ 132.6	nd	[7,9,11,29]
葵花籽油	182.5 ~ 513.1	7.8 ~ 18.5	nd ~ 131.0	nd ~ 15.9	[7,28,30]
菜籽油	90.5 ~ 364.0	0.6 ~ 78.7	170.0 ~ 662.0	nd ~ 48.8	[7,16,31-31]
花生油	73.2 ~ 159.7	nd	82.2 ~ 376.8	nd ~ 27.3	[7,12,30]
橄榄油	86.3 ~ 307.6	nd ~ 6.7	nd ~ 25.6	nd	[7,9,11,32]
椰子油	nd ~ 17.0	nd ~ 11.0	nd ~ 14.0	nd	[9,11,14,33]
棉籽油	164.5 ~ 634.0	nd	284.5 ~ 518.0	nd ~ 29.5	[29,34]

表 4 7 种特色油料油脂中生育酚含量

植物油	含量/(mg/kg)				参考文献
	α -生育酚	β -生育酚	γ -生育酚	δ -生育酚	
玉米油	82.1 ~ 274.3	nd ~ 28.2	229.5 ~ 716.5	nd ~ 193.8	[7,12,16]
米糠油	74.3 ~ 1 319.8	7.3 ~ 8.6	38.1 ~ 73.6	nd ~ 149.7	[9,11,35]
芝麻油	nd ~ 35.4	nd ~ 35.4	251.4 ~ 2 521.4	8.2 ~ 168.6	[12,16,36]
核桃油	nd ~ 12.9	nd ~ 3.2	81.4 ~ 359.0	16.8 ~ 57.0	[12,17,31]
亚麻籽油	9.5 ~ 32.5	nd ~ 13.6	153.4 ~ 593.5	4.1 ~ 14.0	[9,12,30]
红花籽油	420.8 ~ 1 437.7	10.3 ~ 38.1	5.0 ~ 31.3	1.0 ~ 27.4	[15,38]
油茶籽油	6.5 ~ 249.0	nd	nd ~ 1.2	nd	[37,39]

3 角鲨烯及其营养特性

角鲨烯是一种具有 6 个双键的天然脱氢三萜碳氢化合物, 同时也是胆固醇和其他固醇类的前体物质。鲨鱼肝油是角鲨烯最丰富的来源, 随着对食用油研究的深入, 在植物油中也发现较高含量的角鲨烯。表 5、表 6 分别为 8 种大宗油料油脂及 7 种特色油料油脂的角鲨烯含量。

表 5 8 种大宗油料油脂中角鲨烯含量

植物油	含量/(mg/kg)	参考文献
大豆油	16.3 ~ 59.3	[7,12,44]
棕榈油	68.3 ~ 121.6	[7]
葵花籽油	53.1 ~ 179.0	[7,44-45]
菜籽油	9.85 ~ 124.5	[7,12,44]
花生油	52.8 ~ 1 343.0	[7,30,35,44]
橄榄油	1 086.0 ~ 5 999.0	[7,12,30,44-45]
椰子油	nd	[9,11]
棉籽油	30.0 ~ 150.0	[46]

表 6 7 种特色油料油脂中角鲨烯含量

植物油	含量/(mg/kg)	参考文献
玉米油	16.5 ~ 281.0	[7,12,44-45]
米糠油	107.2 ~ 3 189.0	[9,35]
芝麻油	14.9 ~ 607.0	[12,35,44]
核桃油	2.9 ~ 94.1	[12,29,44,47]
亚麻籽油	nd ~ 103.7	[9,12,30,45]
红花籽油	71.0 ~ 104.0	[48-49]
油茶籽油	55.7 ~ 145.0	[19,37]

由表 5、表 6 可知, 不同品种的同种植物油及不同种类植物油中角鲨烯含量均呈现较大差异, 如橄榄油, 最大值与最小值相差 4 913 mg/kg。除橄榄油外, 花生油及米糠油中角鲨烯含量较高, 大豆油、核桃油、棉籽油等植物油中角鲨烯含量较少。由于角鲨烯具有重要的医疗、美容等方面的作用, 近些年来, 角鲨烯以药物研发中潜在结合物而被广泛认知^[49-50]。

角鲨烯作为内源性胆固醇合成的重要中间体, 饮食中较高含量的角鲨烯可能会导致血液中胆固醇水平的升高, 从而增加心血管疾病的风险^[51]。但是, 有研究证明角鲨烯可降低血清胆固醇和甘油三酯水平从而对心血管疾病具有一定的调节作用^[52]。此外, Bindu 等^[53]研究表明, 0.05 ~ 0.75 mmol/L 的角鲨烯可降低病原菌的溶血能力, 且抑制金黄色葡萄球菌中葡萄素的合成, 同时提高了病原菌对氧化剂的敏感性(约 48%)。Kumar 等^[54]在小鼠(肥胖/糖尿病)饮食中加入 2% 角鲨烯和 5% 大豆油, 结果发现小鼠肝脏中 DHA 含量是对照组(7% 大豆油)的 6 倍。通过研究参与脂肪酸代谢 Δ^5 酶和 Δ^6 酶及其蛋白质基因的表达, 证明当饮食中存在 $n-3$ 脂肪酸前体时, 角鲨烯可对体内脂肪酸起到显著的调节作用。邱春媚等^[55]对小鼠连续灌胃不同剂量的角鲨烯 30 d, 发现在急性脑缺血缺氧的情况下, 与对照组相比,

高剂量(推荐剂量的30倍)角鲨烯处理的小鼠喘气时间延长,证明角鲨烯具有提高缺氧耐受力的作用。

4 β -胡萝卜素及其营养特性

β -胡萝卜素是一种天然存在于多种蔬菜、水果、植物和光合细菌中的色素,是类胡萝卜素在人类日常膳食中的常见存在形式,在人体健康中主要发挥抗氧化、调节基因表达、影响细胞生长等作用。与植物甾醇相似, β -胡萝卜素也是人体不能合成的物质,必须通过膳食补充。表7、表8分别为8种大宗油料油脂和7种特色油料油脂的 β -胡萝卜素含量。

表7 8种大宗油料油脂中 β -胡萝卜素含量

植物油	含量/(mg/kg)	参考文献
大豆油	nd~11.9	[9,12,30,56]
棕榈油	7.75~366.2	[9,57]
葵花籽油	nd~0.1	[30,58]
菜籽油	nd~5.4	[12,30-31,58]
花生油	nd~0.1	[12,30]
橄榄油	0.2~15.4	[9,12,30,56,59]
椰子油	nd	[9,60]
棉籽油	nd	[39,61]

表8 7种特色油料油脂中 β -胡萝卜素含量

植物油	含量/(mg/kg)	参考文献
玉米油	nd	[12,58,62]
米糠油	nd~6.6	[7,39]
芝麻油	nd	[12,39,60]
核桃油	nd~0.62	[12,17]
亚麻籽油	nd~39.7	[9,12,18,30,58]
红花籽油	nd~1.9	[49,57-58]
油茶籽油	nd~10.3	[63-64]

由表7、表8可知,棕榈油中 β -胡萝卜素含量远高于其他品种植物油,是获取 β -胡萝卜素的较优植物油来源。相较于棕榈油,其他14种植物油 β -胡萝卜素含量均低于50 mg/kg,含量较少。

自然来源的 β -胡萝卜素生物利用率较低,是因为胡萝卜素-蛋白质复合物和植物细胞壁对消化和降解具有抵抗。与机械加工相比,热处理可有效提高 β -胡萝卜素的生物利用率,增强人体吸收^[65]。正常人体血浆中类胡萝卜素浓度比艾滋病患者偏高,这是因为患者体内类胡萝卜素遭到了破坏。研究表明,每天摄入60 mg β -胡萝卜素可显著增加艾滋病患者体内的CD4+和CD8+淋巴细胞数量,服用24~36个月可显著减轻其症状^[66]。缺氧诱导因子1 α 是肿瘤转移调节因子,而 β -胡萝卜素可显著降低缺氧诱导因子1 α 的表达并减弱恶性神经母细胞瘤的迁移和侵袭能力^[67]。与合成的 β -

胡萝卜素相比,天然 β -胡萝卜素对MDA-MB-231乳腺癌细胞有较高的致死率^[68]。另外, β -胡萝卜素和视黄醇结合蛋白的相互作用可有效降低丙型肝炎病毒^[69]。

5 结束语

除植物甾醇、维生素E、角鲨烯、 β -胡萝卜素外,植物油中还含有磷脂、维生素K、 γ -谷维素等生物活性物质。这些微量生物活性物质在植物油精炼过程中常被不同程度地去除,导致油中含量降低,且被去除的微量生物活性物质大部分未得到合理的利用。随着油脂工业的发展及人们营养健康意识的增强,降低油脂加工过程中植物油中生物活性物质的损失成为研究热点,如适度加工;同时可对精炼副产物中生物活性物质进行合理利用,以增加植物油的附加值。另外,开发米糠油、油茶籽油等小品种特色油脂,挖掘不同植物油营养特性优势,对于我国植物油市场发展至关重要。

参考文献:

- [1] MURPHY D J. Designer oil crops: breeding, processing and biotechnology[J]. New York: VCH Weinheim, 1994.
- [2] LIEHR M, MEREU A, PASTOR J J, et al. Olive oil bioactives protect pigs against experimentally - induced chronic inflammation independently of alterations in gut microbiota[J]. Food Chem Toxicol, 2017,12(3):1-23.
- [3] OLAS B. Sea buckthorn as a source of important bioactive compounds in cardiovascular diseases [J]. Food Chem Toxicol,2016,97:199-204.
- [4] SI H, ZHANG L, LIU S, et al. High corn oil dietary intake improves health and longevity of aging mice [J]. Exp Gerontol, 2014, 58:244-249.
- [5] FOSTER R, WILLIAMSON C S, LUNN J. Culinary oils and their health effects [J]. Nutr Bull, 2009, 34(1): 4-47.
- [6] HE W S, ZHU H, CHEN Z Y. Plant sterols: chemical and enzymatic structural modifications and effects on their cholesterol - lowering activity [J]. J Agric Food Chem, 2018,66: 3047-3062.
- [7] SHEN M, ZHAO S, ZHANG F, et al. Characterization and authentication of olive, camellia and other vegetable oils by combination of chromatographic and chemometric techniques: role of fatty acids, tocopherols, sterols and squalene [J]. Eur Food Res Technol, 2020, 247: 411-426.
- [8] XIE D, ZHOU H, JIANG X. Effect of chemical refining on the levels of bioactive components and hazardous substances in soybean oil [J]. J Food Meas Charact, 2019, 13:1423-1430.
- [9] 李晓静. 食用油脂中改善 HepG2 细胞脂质积累和氧化应激的关键组分研究[D]. 江苏 无锡:江南大学,2020.

- [10] PHILLIPS K M, RUGGIO D M, TOIVO J I, et al. Free and esterified sterol composition of edible oils and fats [J]. *J Food Compos Anal*, 2002, 15(2):123–142.
- [11] 唐娜. 不同油脂对高脂饮食小鼠糖脂代谢的影响[D]. 江苏 无锡:江南大学, 2019.
- [12] 熊秋芳, 张效明, 文静, 等. 菜籽油与不同食用植物油营养品质的比较——兼论油菜品质的遗传改良[J]. *中国粮油学报*, 2014, 29(6):122–128.
- [13] 彭祖茂, 朱丽, 邓梦雅, 等. 超高效液相色谱-串联质谱同时测定植物油 14 种营养成分[J]. *色谱*, 2018, 36(11):1140–1146.
- [14] ÖZDEMİR A S, DAĞ A Ç, ÖZİNANÇ G, et al. Quantification of sterols and fatty acids of extra virgin olive oils by FT-NIR spectroscopy and multivariate statistical analyses[J]. *LWT - Food Sci Technol*, 2018, 91: 125–132.
- [15] GUNSTONE F D. *Vegetable oils in food technology (composition, properties and uses)* [M]. New Jersey: John Wiley & Sons Inc., 2011:169–197.
- [16] CARSTENSEN B. *Schnellmethode zur Isolierung und Bestimmung von Minorbestandteilen in pflanzlichen Ölen und Fetten* [M]. Herzogenrath, Germany: Shaker Verlag GmbH, 2001.
- [17] ABDALLAH I B, TLILI N, MARTINEZ-FORCE E, et al. Content of carotenoids, tocopherols, sterols, triterpenic and aliphatic alcohols, and volatile compounds in six walnuts (*Juglans regia* L.) varieties [J]. *Food Chem*, 2015, 173:972–978.
- [18] SHADYRO O, SOSNOVSKAYA A, EDIMECHEVA I. Effect of biologically active substances on oxidative stability of flaxseed oil [J]. *J Food Sci Technol*, 2020, 57(1):243–252.
- [19] 董莹莹, 胡重怡, 叶航, 等. 精炼对油茶籽油三萜类化合物含量的影响[J]. *中国油脂*, 2020, 45(11):21–25.
- [20] CEDÓ L, SANTOS D, LUDWIG I A, et al. Phytosterol-mediated inhibition of intestinal cholesterol absorption in mice is independent of liver X receptor [J]. *Mol Nutr Food Res*, 2017, 61:86–116.
- [21] 王轶菲. 玉米油甾醇对高脂高胆固醇膳食小鼠胆固醇代谢调控及肠道菌群的影响[D]. 天津:天津科技大学, 2016.
- [22] EUSSEN S R B M, JONG N D, ROMPELBERG C J M, et al. Dose-dependent cholesterol-lowering effects of phytosterol/phytostanol-enriched margarine in statin users and statin non-users under free-living conditions [J]. *Public Health Nutr*, 2011, 14(10):1823–1832.
- [23] FUKUOKA D, OKAHARA F, HASHIZUME K, et al. Triterpene alcohols and sterols from rice bran lower postprandial glucose-dependent insulinotropic polypeptide release and prevent diet-induced obesity in mice [J]. *J Appl Physiol*, 2014, 117(11):1337–1348.
- [24] VUNDRU S S, KALE R K, SINGH R P. β -sitosterol induces G1 arrest and causes depolarization of mitochondrial membrane potential in breast carcinoma MDA-MB-231 cells [J]. *BMC Complement Altern M*, 2013, 13:280–288.
- [25] CHEN W P, YU C, HU P F, et al. Stigmasterol blocks cartilage degradation in rabbit model of osteoarthritis [J]. *Acta Biochim Pol*, 2012, 59(4):537–541.
- [26] ROCHA V Z, RAS R T, GAGLIARDI A C, et al. Effects of phytosterols on markers of inflammation: a systematic review and meta-analysis [J]. *Atherosclerosis*, 2016, 248:76–83.
- [27] 顾强, 石晶, 袁大炜, 等. 常见植物油中 8 种生育酚和生育三烯酚含量分析 [J]. *食品工业*, 2007, 38(2):304–307.
- [28] MARÍA D J, OSAWA C C, MARÍA E A, et al. Degradation in soybean oil, sunflower oil and partially hydrogenated fats after food frying, monitored by conventional and unconventional methods [J]. *Food Control*, 2011, 22(12):1920–1927.
- [29] 吴晓华. 棉籽油煎炸性能的研究[D]. 郑州:河南工业大学, 2014.
- [30] TUBEROSO C, KOWALCZYK A A, SARRITZU E, et al. Determination of antioxidant compounds and antioxidant activity in commercial oilseeds for food use [J]. *Food Chem*, 2007, 103(4):1494–1501.
- [31] 张亮. 不同加工工艺的菜籽油品质及其生物学评价 [D]. 江苏 无锡:江南大学, 2016.
- [32] BORGES T H, LÓPEZ L C, PEREIRA J A, et al. Comparative analysis of minor bioactive constituents (CoQ10, tocopherols and phenolic compounds) in Arbequina extra virgin olive oils from Brazil and Spain [J]. *J Food Compos Anal*, 2017, 63:47–54.
- [33] 程敏, 塔巍, 刘睿杰, 等. 精炼工艺对椰子油品质的影响 [J]. *中国油脂*, 2018, 43(7):1–5.
- [34] 温运启, 刘玉兰, 王璐阳, 等. 不同食用植物油中维生素 E 组分及含量研究 [J]. *中国油脂*, 2017, 42(3):35–39.
- [35] POKKANTA P, SOOKWONG P, TANANG M, et al. Simultaneous determination of tocopherols, γ -oryzanol, phytosterols, squalene, cholecalciferol and phyloquinone in rice bran and vegetable oil samples [J]. *Food Chem*, 2019, 271:630–638.
- [36] 仓宝成, 宫瑾瑾, 王莉, 等. 维生素 E 在体内外具有抗氧化作用 [J]. *基础医学与临床*, 2016, 36:80–84.
- [37] 任传义, 张延平, 汤富彬, 等. 油茶籽油、橄榄油、核桃油、香榧油中主要化学成分分析 [J]. *食品安全质量检测学报*, 2015, 6(12):5011–5016.
- [38] CHAKRADHARI S, PERKONS I, MIINA I, et al. Profiling of the bioactive components of safflower seeds and seed oil: cultivated (*Carthamus tinctorius* L.) vs. wild (*Carthamus oxyacantha* M. Bieb.) [J]. *Eur Food Res Technol*, 2020, 246:449–459.

- [39] 白寿宁. 超临界 CO₂ 萃取枸杞油研究[J]. 包装与食品机械, 2000(1):18-22.
- [40] COOK - MILLS J, GEBRETSADIK T, ABDALA - VALENCIA H, et al. Interaction of vitamin E isoforms on asthma and allergic airway disease[J]. Thorax, 2016, 71(10):954-956.
- [41] SOVEG F, COOK - MILLS J M, ABDALA - VALENCIA H. γ - Tocopherol supplementation of allergic female mice augments development of CD11c + CD11b + dendritic cells in utero and allergic inflammation in neonates[J]. Am J Physiol Cell Mol Physiol, 2016, 310: 759-771.
- [42] HASHEM R M, HASSANIN K M, RASHED L A, et al. Effect of silibinin and vitamin E on the ASK1 - p38 MAPK pathway in D - galactosamine/lipopolysaccharide induced hepatotoxicity [J]. Exp Biol Med, 2016, 241(11):1250-1257.
- [43] 郎楠, 贺斌, 王丽丽, 等. 回补维生素 E 对维生素 E 缺乏不孕大鼠妊娠结局的影响[J]. 生殖医学杂志, 2016, 25(1):61-66.
- [44] 黎斌, 刘小羽, 俞璐萍, 等. 气相色谱 - 串联质谱法测定植物油中角鲨烯的含量[J]. 食品安全质量检测学报, 2020, 11(8):2385-2392.
- [45] 孙佳, 胡彦, 丁友芳, 等. 马鲁拉油与 6 种植物油理化性质、脂肪酸组成、营养物质比较[J]. 中国油脂, 2017, 42(2):38-41.
- [46] 毕艳兰. 油脂化学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
- [47] 高盼. 我国核桃油的组成特征及其抗氧化和降胆固醇功效评估[D]. 江苏 无锡: 江南大学, 2019.
- [48] IBRAHIM W, IVERSON J, FIRESTONE D. Safflower oil: physical and chemical properties, and fatty acid composition[J]. J Assoc Off Agric Chem, 1964, 47: 776-780.
- [49] IRBY D, DU C, LI F. Lipid - drug conjugate for enhancing drug delivery[J]. Mol Pharm, 2017, 14(5): 1325-1338.
- [50] KOTELEVETS L, CHASTRE E, CARON J, et al. A squalene - based nanomedicine for oral treatment of colon cancer[J]. Cancer Res, 2017, 77:2964-2975.
- [51] GÜNEŞ F E. Medical use of squalene as a natural antioxidant[J]. MÜSBED, 2013, 3: 220-228.
- [52] LIU Y, XU X, BI D, et al. Influence of squalene feeding on plasma leptin, testosterone & blood pressure in rats [J]. Indian J Med Res, 2009, 129(2):150-153.
- [53] BINDU B S C, MISHRA D P, NARAYAN B. Inhibition of virulence of *Staphylococcus aureus*—a food borne pathogen—by squalene, a functional lipid[J]. J Funct Foods, 2015, 18:224-234.
- [54] KUMAR S R, YAMAUCHI I, NARAYAN B, et al. Squalene modulates fatty acid metabolism; enhanced EPA/DHA in obese/diabetic mice (*KK - A'*) model[J]. Eur J Lipid Sci Technol, 2016, 118(12):1935-1941.
- [55] 邱春媚, 殷光玲. 角鲨烯软胶囊提高缺氧耐受力的研究[J]. 中国粮油学报, 2013, 28(2):52-54.
- [56] 王素君. 食用植物油微量营养成分同步检测及功能评价研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2016.
- [57] JOOD S. Blending of crude palm oil with other cooking oils as a source of β - carotene for combating vitamin A deficiency[J]. Indian J Nutr Diet, 2009, 46(9):378-385.
- [58] 肖潇, 王庆国, 李菁, 等. 新疆地产植物油中维生素 E 和 β - 胡萝卜素的含量检测[J]. 疾病预防控制通报, 2021, 36(1):70-73.
- [59] ZHANG L, WANG S, YANG R, et al. Simultaneous determination of tocopherols, carotenoids and phytosterols in edible vegetable oil by ultrasound - assisted saponification, LLE and LG - MS/MS[J]. Food Chem, 2019, 289:313-319.
- [60] REDONDO - CUEVASA L, CASTELLANO B G, TORRENS F, et al. Revealing the relationship between vegetable oil composition and oxidative stability: a multifactorial approach[J]. J Food Compos Anal, 2018, 66: 221-229.
- [61] DAVIS C, HUA J, HOWE J A, et al. *Beta* - cryptoxanthin from supplements or carotenoid - enhanced maize maintains liver vitamin A in *Mongolian gerbils* (*Meriones unguiculatus*) better than or equal to *beta* - carotene supplements [J]. Br J Nutr, 2008, 100(4): 786-793.
- [62] 杨亚, 刘启东, 孙百创, 等. 食用植物油脂精炼过程中色素的定量分析[J]. 中国油脂, 2021, 46(5):43-47.
- [63] 李志晓, 金青哲, 叶小飞, 等. 制油工艺对油茶籽油品质的影响[J]. 中国油脂, 2015, 40(4):47-51.
- [64] 李宁, 赵玉兰, 廖杰. HPLC 法测定茶籽、果壳、茶籽油中脂溶性维生素和 β - 胡萝卜素的含量[J]. 现代科学仪器, 2009(5):92-93, 100.
- [65] DONHOWE E G, KONG F. *Beta* - carotene: digestion, microencapsulation, and in vitro bioavailability[J]. Food Bioproc Technol, 2014, 7(2):338-354.
- [66] LAPA G B. Molecular - biological problems of drug design and mechanism of drug action[J]. Pharm Chem J, 2011, 44(6):651-653.
- [67] NIRANJANA R, GAYATHRI R, MOL S N, et al. Carotenoids modulate the hallmarks of cancer cells[J]. J Funct Foods, 2015, 18:968-985.
- [68] OLMOS J, GÓMEZ R, RUBIO V P. Apoptosis comparison effects between synthetic and natural β - carotene from *Dunaliella salina* on MDA - MB - 231 breast cancer cells [J]. J Microb Biochem Technol, 2015, 7(2):51-56.
- [69] KATARIA Y, DEATON R J, ENK E, et al. Retinoid and carotenoid status in serum and liver among patients at high - risk for liver cancer [J]. BMC Gastroenterol, 2016, 16:30-41.