

小麦胚芽油化学组成与功能特性研究进展

徐亦驰¹, 方梦雪¹, 汪雪芳¹, 喻理¹, 马飞¹, 张良晓^{1,2*}, 李培武^{1,2}

- [1. 中国农业科学院油料作物研究所, 农业农村部油料作物生物学与遗传育种重点实验室, 农业农村部油料及制品质量监督检验测试中心, 农业农村部油料产品质量安全风险评估实验室(武汉), 武汉 430062;
2. 湖北省洪山实验室, 武汉 430070]

摘要: 小麦胚芽油是经小麦胚芽加工得到的食用油, 其多不饱和脂肪酸含量 60%左右, 生育酚含量高达 2573.69 mg/kg, 远高于其他植物油, 总植物甾醇含量为 8512.06 mg/kg, 其中 β -谷甾醇高达 5812.76 mg/kg。小麦胚芽油因具有丰富的营养价值以及抗氧化、抗疲劳等功能特性而被广泛应用于医疗保健、美容等领域。因此, 本文主要对小麦胚芽油理化性质、营养特性进行总结, 同时对比分析不同的制备工艺小麦胚芽油品质, 旨在为小麦胚芽油及其副产物的开发利用提供参考。

关键词: 小麦胚芽油; 化学组成; 营养功能; 生育酚; 甾醇

Advances in chemical composition and functional characteristics of wheat germ oil

XU Yi-Chi¹, FANG Meng-Xue¹, WANG Xue-Fang¹, YU Li¹,
MA Fei¹, ZHANG Liang-Xiao^{1,2*}, LI Pei-Wu^{1,2}

(1. Oil Crops Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences; Key Laboratory of Biology and Genetic Improvement of Oil Crops, Ministry of Agriculture and Rural Affairs; Quality Inspection and Test Center for Oilseed Products, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Wuhan 430062, China; 2. Hubei Hongshan Laboratory, Wuhan 430070, China)

ABSTRACT: Wheat germ oil is a edible oil obtained from wheat germ processing. The content of polyunsaturated fatty acids is about 60%, the content of tocopherol is as high as 2573.69 mg/kg, which is much higher than those of other vegetable oils. The total phytosterol content is 8512.06 mg/kg, among which β -sitosterol is as high as 5812.76 mg/kg. Wheat germ oil is widely used in medical care, beauty and other fields because of its high nutritional value, antioxidant, anti-fatigue and other functional properties. Therefore, this paper mainly summarized the physical and chemical properties and functional characteristics of wheat germ oil, analyzed and compared the different preparation processes of wheat germ oil, and provided references for the rational utilization of wheat germ oil resources, aiming to provide a reference for the subsequent development and utilization of wheat germ oil and its by-products.

KEY WORDS: wheat germ oil; chemical composition; nutrition functions; tocopherol; phytosterol

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFD1600101)、财政部和农业农村部: 国家现代农业产业技术体系项目(CARS-12、CARS-13)

Fund: Supported by the National Key Research and Development Program of China (2021YFD1600101), and the Ministry of Finance and Ministry of Agriculture and Rural Affairs: National Modern Agricultural Industrial Technology System (CARS-12, CARS-13)

*通信作者: 张良晓, 博士, 研究员, 主要研究方向为油料产品特异品质检测技术研究。E-mail: zhanglx@caas.cn

*Corresponding author: ZHANG Liang-Xiao, Ph.D, Professor, Oil Crops Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Wuhan 430062, China. E-mail: zhanglx@caas.cn

0 引言

小麦是人类主要的粮食作物,在世界各地广泛种植。中国是小麦种植大国,种植面积和总产量仅次于水稻,是第二大粮食作物。2021 年我国小麦种植面积高达 23586.4 千公顷,总产量为 13694.6 万 t,占谷物总产量 20.1%^[1-2]。小麦胚芽是小麦加工时产生的副产物,其含量占小麦籽粒的 3%左右^[3],我国每年可利用的小麦胚芽资源高达 300 万 t。小麦胚芽富含碳水化合物(占比为 42%~47%),主要成分是蔗糖和戊聚糖,淀粉含量较少,较其他碳水化合物更具营养性^[4];蛋白质含量 30%左右,其中麦胚蛋白是优质全价蛋白质营养源;不饱和脂肪酸含量约为 84%,其中亚油酸含量约为 52.31%^[5],亚油酸是必需脂肪酸,人体自身无法合成,只能通过食物摄取。小麦胚芽因其营养特性广泛运用于保健食品中,有“人类天然营养宝库”的美称^[6]。

小麦胚芽油由小麦胚芽制取而得,含有丰富的多不饱和脂肪酸、生育酚、植物甾醇等营养物质,具有抗氧化、抗疲劳等作用,在国外作为一种高端食用油被广泛应用于医疗保健领域。而我国由于对小麦胚芽油研究起步较晚,大量小麦胚芽资源遭到浪费,因此,开展小麦胚芽油理化成分、营养价值、制备工艺等方面的研究具有重要意义。本文主要论述了小麦胚芽油的理化性质、营养特性,并分析了制备技术对理化性质的影响,为小麦胚芽油资源高效利用提供参考。

1 小麦胚芽油的理化性质和化学成分

1.1 理化性质

小麦胚芽油主要理化参数见表 1^[7]。小麦胚芽油品质的指标如酸价、过氧化值等受提取技术、精炼工艺以及储存条件影响较大。新鲜胚芽油的游离脂肪酸含量为 6.0%~7.5%,MEGAHED^[8]研究发现小麦胚芽油在周期性储存期间酸价从 14.88 mg/g 升至 23.46 mg/g,在 70℃时脂肪酶活性被抑制,酸价从 14.88 mg/g 降低至 12.02 mg/g,表明可通过控制温度抑制脂肪酶活性从而使酸价达到合适值。JHA 等^[9]研究表明可通过辐射使脂肪酶失活从而降低酸价,达到延长小麦胚芽油货架期的目的。此外,小麦胚芽油的精炼过程中,碱炼脱酸工序可通过烧碱溶液与毛油中游离脂肪酸结合从而降低油脂的酸价^[10]。

表 2 小麦胚芽油中脂肪酸组成与含量分析

Table 2 Fatty acid composition and content analysis of wheat germ oil

序号	棕榈酸/% C16:0	硬脂酸/% C18:0	油酸/% C18:1	亚油酸/% C18:2	亚麻酸/% C18:3	多不饱和脂肪酸 总量/%	参考 文献
1	16.7~17.7	0.590~0.740	16.6~20.4	53.9~57.6	5.70~7.15	59.6~64.1	[11]
2	15.9	0.750	15.5	54.9	7.34	62.2	[12]
3	20.3	0.600	17.6	54.0	7.20	65.7	[13]
4	13.6	0.920	14.1	54.6	8.34	62.9	[14]
5	14.6	0.680	16.0	60.4	5.77	66.2	[15]

表 1 小麦胚芽油理化特性^[7]

Table 1 Physicochemical properties of wheat germ oil^[7]

指标或成分	小麦胚芽油
折光指数(20℃)	1.47~1.48
碘值(I ₂)/(g/100 g)	120~130
皂化值(KOH)/(mg/g)	184~185
不皂化物含量/%	1.5~7.8
比重(20℃/40℃)	0.90~0.93

1.2 脂肪酸

小麦胚芽油多不饱和脂肪酸含量高达 60%,高于菜籽油、花生油等大宗食物油。不同国内外学者对小麦胚芽油脂肪酸组成和含量如表 2 所示。小麦胚芽油脂肪酸组成与小麦品种、提取方法等因素有关。GUVEN 等^[11]对面包小麦和硬粒小麦两个常见栽培品种的主要脂肪酸进行比对,发现面包小麦中主要脂肪酸是亚油酸,而硬粒小麦以油酸和棕榈酸为主。PARCZEWSKA-PLESNAR 等^[16]研究发现超临界 CO₂ 法提取的多不饱和脂肪酸含量为 63.4%~71.3%,与用正己烷萃取的小麦胚芽油相似(66.2%~67.0%);而冷榨法得到的小麦胚芽油多不饱和脂肪酸含量为 60.2%,明显低于正己烷萃取。

小麦胚芽油富含的亚麻酸和亚油酸是人体必需脂肪酸,是除大脑和视网膜外绝大多数组织的主要构成脂肪酸,具有降血压血脂、保护心脑血管、预防动脉粥样硬化等功效^[17]。此外,小麦胚芽油中还含有 ω -3 脂肪酸亚麻酸,具有降低血脂、抗炎、预防心血管疾病等功效^[18-19]。因此,小麦胚芽油具有重要的开发利用价值。

1.3 生育酚

生育酚是食用油中主要的脂溶性维生素,是主要的抗氧化剂之一,具有 8 种同分异构体(α 、 β 、 γ 、 δ 等生育酚以及相应生育三烯酚),主要根据侧链上有无双键以及环状结构上甲基取代物所在的位置和数量来划分。生育酚具有抗氧化、抗癌症以及降低胆固醇、预防动脉粥样硬化的作用,其中 α -生育酚抗氧化活性最高,其次是 β 、 γ -生育酚, δ -生育酚活性最低^[20]。由表 3 可以看出,小麦胚芽油中

表 3 小麦胚芽油中生育酚的含量与其他植物油的比较(mg/kg)^[15]
Table 3 Comparison of the content of tocopherol between wheat germ oil and other vegetable oils (mg/kg)^[15]

	小麦胚芽油	大豆油	菜籽油	花生油	葵花籽油	玉米油	稻米油	橄榄油	芝麻油
α -生育酚	1695.7	114.9	198.7	175.0	626.3	218.0	414.6	173.4	14.5
β -生育酚	692.8	11.6	117.7	7.2	24.0	15.0	63.3	-	-
γ -生育酚	167.7	718.9	496.0	190.4	29.5	690.0	77.1	32.4	496.5
δ -生育酚	10.9	176.4	13.1	-	6.7	51.2	30.3	-	-
总生育酚	2573.7	1021.7	825.4	372.7	686.4	974.1	585.2	205.8	510.6

注: -代表未检出,下同。

生育酚含量远高于其他食用植物油,并且以 α -生育酚为主,占总生育酚含量 65%左右。HASSANIEN 等^[21]对不同植物油进行氧化稳定性实验,发现小麦胚芽油的诱导时间高达 40.1 h,远高于其他植物油,表明小麦胚芽油拥有较强的氧化稳定性,推测与小麦胚芽油中 α 、 β -生育酚含量高有关。

高含量的生育酚是小麦胚芽油抗氧化的物质基础。不同的前处理及制备工艺会影响生育酚含量^[22]。ZOU 等^[23]将小麦胚芽于 180°C 分别烘焙 0、5、10、20 min, 得到小麦胚芽油中生育酚含量分别为 2306、2240、2197、2140 mg/kg, 总酚含量依次为 3310、3196、3119、3017 mg/kg, 表明高温烘焙时间越长, 损失的生育酚越多。OZCAN 等^[12]分别对用超临界 CO₂ 萃取法和冷榨法得到的小麦胚芽油进行了生育酚含量测定, 前者 α -生育酚含量为 1.27 mg/g, 后者含量为 0.79 mg/g, 表明超临界 CO₂ 萃取技术获得的总生育酚含量远高于冷榨法。在精炼工艺过程中, 脱臭会导致生育酚含量显著降低, 因此在精炼中应根据营养需求适度加工^[10]。

1.4 植物甾醇

植物甾醇是小麦胚芽油中的天然活性物质, 同时也是皂化物的的重要组成部分, 具有抗炎、抗癌、抗氧化、降低胆固醇、预防心血管疾病和非酒精性脂肪性肝病的功能^[24-25]。张喜金等^[26]用气相色谱法测得小麦胚芽油总甾醇含量为 8512.06 mg/kg, 植物甾醇含量最高的是 β -谷甾醇 5812.76 mg/kg, 占总甾醇含量 68%左右, 其次是菜油甾醇含量为 2446.78 mg/kg, 占 28%左右, 豆甾醇含量最低, 为 252.52 mg/kg。小麦胚芽油中甾醇含量与其他植物油的比较见表 4。可以看出小麦胚芽油甾醇含量远大于其他食用

油脂。研究表明, 植物甾醇还可以增强油脂的抗氧化能力。黄滢璋等^[27]在高温加速氧化的植物油中加入植物甾醇与其他抗氧化剂, 通过酸价和过氧化值评价抗氧化能力, 发现植物甾醇的抗氧化效果优于丁基化羟基甲苯与 L-抗坏血酸。张莉莎^[28]研究表明在脱除伴随物稻米油中, γ -谷维素与植物甾醇复配后在抗氧化过程中有一定的协同作用。

2 小麦胚芽油的制备方法

小麦胚芽油主要提取技术包括冷榨法、溶剂浸提法、超临界萃取法、水酶法等。冷榨法是一种在植物油生产较为常用的制油技术, 原理是借助机械外力将油料于室温至 65°C 进行压榨。但由于冷榨法无法较好破坏细胞壁, 且小麦胚芽自身脂肪含量低, 导致冷榨法出油率仅为 30%~50%, 无法得到广泛应用。

马娇等^[29]比较了索式提取法、超声波辅助萃取法、冷榨法以及水酶法 4 种提取方法对小麦胚芽油提油率和油脂品质的影响。结果显示, 冷榨法提油率(42.51%)远低于索式提取法(99.12%)、超声波辅助萃取法(98.50%)以及水酶法(74.13%)。油脂感官品质分析中, 水酶法提取的油脂透明度及色泽最差, 而过氧化值低于其他 3 种提取方法, 并且水酶法得到的生育酚含量(137 mg/100 g)高于索式提取法(111 mg/100 g)、超声波辅助萃取法(122 mg/100 g)以及冷榨法(116 mg/100 g)。综上水酶法综合理化指标及营养品质优于其他方法, 且具有绿色无污染的优点。但酶的价格高、用量大、原料研磨处理困难等缺点也成为水酶法工业化生产推广的难题。

表 4 小麦胚芽油中生育酚的含量与其他植物油的比较(mg/kg)^[15]
Table 4 Comparison of the content of phytosterols between wheat germ oil and other vegetable oils (mg/kg)^[15]

	小麦胚芽油	橄榄油	大豆油	玉米油	菜籽油	花生油
菜油甾醇	2419.97	38.87	246.04	871.10	1923.83	337.55
豆甾醇	75.62	11.66	248.42	238.71	30.21	181.58
谷甾醇	5779.88	480.08	764.24	2766.72	2769.71	1240.11
菜籽甾醇	-	-	-	-	640.63	-

溶剂浸提法是油脂最常用提取方法,也是目前企业常用于生产小麦胚芽油的方法。李鹤等^[30]研究了亚临界丁烷萃取法、超临界 CO₂ 萃取法以及有机溶剂萃取法 3 种常见萃取方法对小麦胚芽油品质的影响。结果显示亚临界丁烷萃取法萃取效率最高;同时得到的小麦胚芽油酸价、过氧化值最低,表明油脂品质较好,并且生育酚含量也是 3 种方法里最高。以上表明亚临界萃取技术具有一定的优势,目前已有公司用该法进行实际生产,但也存在溶剂残留的隐患。超临界流体萃取法是一种以超临界状态下的 CO₂ 流体作为萃取剂的新兴技术,具有提取效率高、无溶剂残留等优点,目前在多个国家已发展到工业化生产阶段。而我国超临界 CO₂ 萃取法研究起步较晚,目前仍未处于实验室研究阶段,需要进一步研究为其工业化提供技术支撑。

萃取得到的小麦胚芽油存在杂质多、易酸败等问题,需要进一步精炼,而精炼工艺中添加的化学品以及高温等条件会造成油脂品质降低。杨颖等^[31]对比了化学物理精炼方法对小麦胚芽油品质劣变的影响,发现化学精炼得到的小麦胚芽油酸价、反式脂肪酸含量以及损失的生育酚含量远低于物理精炼,表明化学精炼对小麦胚芽油品质劣变影响小于物理精炼。精炼过程中不同的精炼工序会导致小麦胚芽油油脂品质、以及营养成分的变化。胡新娟等^[10]研究了脱酸、脱色、脱臭等 4 个精炼工艺对小麦胚芽油品质的影响,并确立了最优精炼工艺参数,研究结果表明精炼对脂肪酸组成及含量影响较小,而精炼工艺中脱酸脱臭工序分别导致生育酚损失 16.1%和 22.58%。因此,应根据产品的营养需求进行适度加工。

3 小麦胚芽油的营养特性

3.1 抗氧化

小麦胚芽油富含多种生物活性及营养价值,其抗氧化能力也受到国内外学者越来越多的关注。小麦胚芽油在较低浓度时即可对 1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl, DPPH)自由基有着良好的清除率^[32]。且小麦胚芽油胶囊可以明显降低小鼠肝匀浆中丙二醛含量,并且能增强超氧化物歧化酶以及谷胱甘肽过氧化物酶的活性^[33]。

以上表明小麦胚芽油是一种具有较高抗氧化活性的天然植物油,这与小麦胚芽油中高含量的维生素 E 密切相关。维生素 E 是一种天然的抗氧化剂,可以对自由基引起的氧化应激通路下脂质过氧化链式反应起到阻断作用并终止氧化过程^[34]。维生素 E 的抗氧化作用与染色环上甲基的数量成正比,在维生素 E 同分异构体中, α -生育酚的抗氧化活性最强^[35]。 α -生育酚在小麦胚芽油中占比高达 65%,远高于葵花籽油等其他植物油中 α -生育酚的含量。因此,小麦胚芽油具备较强的体内外抗氧化功能,可应用于保健、

美容领域。

3.1.1 缓解疲劳

小麦胚芽油具有延缓疲劳、恢复体力的功效。研究发现小麦胚芽白蛋白能显著延长小鼠游泳时间,降低乳酸脱氢酶、血尿素氮和肌酸激酶的积累,增加肝糖原在肝脏中的储存^[36]。同样的功效在小麦胚芽油天然维生素 E 胶囊也得到了验证。刘华等^[37]测定食用了不同剂量小麦胚芽油维生素 E 软胶囊的小鼠载重游泳延长的时间、血乳酸、血清尿素、肝糖原等体力指标,结果显示高剂量组[1.1 g/(kg·bw)]小鼠负载游泳时间明显增加,血清尿素水平降低,肝糖原储备量明显增加,表明小麦胚芽油天然维生素 E 软胶囊可缓解小鼠疲劳。

疲劳会导致一系列生理和心理问题,如注意力分散难以集中、嗜睡等。运动性疲劳主要由能量物质如肝糖原、肌糖原等过度消耗,以及内环境酸碱平衡失调引起。小麦胚芽油中的多不饱和脂肪酸具有提高机体应激能力、调节代谢的功能,同时维生素 E 有抗氧化、清除自由基的能力,可以保护细胞膜免受自由基的攻击,减轻运动疲劳引起的脂质过氧化损伤。目前小麦胚芽油维生素 E 软胶囊是小麦胚芽油相关保健品的主要产品之一,可进一步研究提取、精炼方法实现高效生产利用。

3.1.2 护肤

小麦胚芽油因其丰富的营养成分被广泛用于化妆品领域,对于修复受损皮肤、防晒和护肤都有一定的功效。小麦胚芽油富含维生素 E 以及诸多黄酮类化合物等多种营养成分,这些成分有助于提高皮肤的抗氧化能力、刺激胶原蛋白的生成,促进皮肤细胞的再生和修复。研究发现,连续 3 周使用掺入 20%小麦胚芽油的药膏可以使大鼠伤口直径缩小 90%,伤口恢复 50%^[38]。此外,小麦胚芽油还具有一定的防晒作用。张婉萍等^[39]对 4 种高亚油酸型油脂的安全性、紫外线吸收性和抗氧化性进行实验,结果表明小麦胚芽油安全性高,不会对光受损肌肤造成刺激,且其羟基自由基清除率在 4 种油中最高。紫外线通过产生自由基发生一系列反应,对皮肤造成一定的光损伤,如皮肤晒伤、黑化、老化等^[40-41]。小麦胚芽油中富含多种有机物,如多不饱和脂肪酸、甾醇和维生素 E 等,这些有机物可以吸收紫外线,并且联合各类化合物共同对自由基链式反应进行阻断,达到抗氧化和防晒的效果,有助于减轻外界环境对皮肤的损伤。

3.2 缓解胃溃疡

最近研究发现,小麦胚芽油可以有效缓解因酒精引起的胃溃疡。小麦胚芽油可促进核细胞相关因子 2 (nuclear factor erythroid2-related factor 2, Nrf2)、血红素氧化酶-1 (heme oxygenase-1, HO-1)、抗凋亡胃基因 *Bcl2* 等相关因子表达来抑制氧化应激反应,同时减少白细胞介素-1 β (interleukin-1 β , IL-1 β)、肿瘤坏死因子 α (tumor necrosis

factor alpha, TNF- α)等因子以表现抗炎作用^[42]。酒精性胃溃疡是一种消化性疾病,严重威胁人类健康。酒精进入胃黏膜后会释放氧自由基、活性氧化代谢物并附着在血管内皮细胞上,引发炎症、造成血管堵塞和黏膜损伤^[43]。目前主流治疗药物质子泵抑制剂有导致出现阳痿、心律失常等副作用。小麦胚芽油是一种天然安全的植物油,含有天然的抗氧化物质维生素 E,能够抵御自由基的攻击、降低炎症反应并促进组织修复,因此具有成为自然疗法缓解胃溃疡的潜力。尽管已经有研究支持小麦胚芽油缓解胃溃疡的作用,但若想将其作为治疗胃溃疡的药物仍需要更多的研究来验证其有效性。

3.3 保护心血管

研究表明小麦胚芽油有效预防高脂血症、高胆固醇血症和动脉粥样硬化,从而达到降低患心血管疾病的风险^[44-47]。受试者连续 60 d 每日摄入 3.5 g 小麦胚芽油或含有 3.5 g 小麦胚芽油的油饼,血浆中总胆固醇、总甘油三酯、低密度脂蛋白胆固醇含量分别下降 6%~8%、14%~24%、4%~21%,高密度脂蛋白胆固醇含量增加 3%~24%,动脉粥样硬化因子值校正 10%~25%^[48]。这些有益作用主要归因于小麦胚芽中的丰富的 *n*-3 多不饱和脂肪酸(*omega*-3 polyunsaturated fatty acids, *n*-3 PUFA), *n*-3 PUFA 被广泛认为可以有效降低血脂和血压,预防心血管疾病的发生^[49-50]。动脉粥样硬化是心脑血管疾病的病理基础,氧化应激是其形成的重要原因。CD40L 是一种黏附分子,可以促进 T 细胞的激活,并导致炎症反应和促进氧化应激的形成,从而参与动脉粥样硬化的形成^[51-53]。小麦胚芽油中的 *n*-3 PUFA 能够抑制 CD40L 的表达和释放,并进一步减少细胞因子的分泌(如 TNF- α 、IL-6 等)减少炎症反应和致密斑块的形成^[54-55],从而使富含 *n*-3 PUFA 的小麦胚芽油在改善心血管健康方面发挥积极作用。

4 总 结

我国是小麦种植生产大国,每年可供开发利用的小麦胚芽量高达 300 万 t,国外对小麦胚芽的综合利用程度较高,而国内对小麦胚芽研究起步较晚,长期将其用作饲料、肥料甚至废弃 对优质资源造成了很大浪费,不仅导致了大量的经济损失,更增添了环境压力。小麦胚芽的利用一定程度上可缓解我国油料资源紧缺的问题,对保障我国食用油自给率有重要的战略意义。小麦胚芽油富含多不饱和脂肪酸以及 α -生育酚等多种生理活性成分,是其发挥抗氧化、改善心血管疾病和胃溃疡等功效的物质基础。小麦胚芽油中生物活性成分含量受品种、萃取方式、精炼工艺影响较大。目前我国小麦胚芽油工业化生产主要采取冷榨法和溶剂浸提法,存在着提油率低、杂质多等问题,而国外已投入生产的超临界流体萃取法在我国仍处于实验室发

展阶段,并且小麦胚芽油生产相关的国家标准和行业标准尚未建立。为了促进小麦胚芽油的深度开发利用和市场推广,后续的研究应围绕以下方面展开:(1)加强小麦胚芽油提取工艺研究并建立相关国家标准与行业标准,进一步发展超临界流体萃取法,并优化工艺参数,减少制备过程中造成的生物活性成分损失;(2)深入研究小麦胚芽油药效功能及机制。未来可通过细胞实验及动物实验开展生物学功能研究,锁定关键活性成分,为打造关键功能性食用油提供靶标。

参考文献

- [1] 国家统计局. 国家统计局关于 2021 年粮食产量数据的公告[EB/OL]. [2021-12-06]. http://www.stats.gov.cn/xxgk/sjfb/zxfb2020/202112/t20211206_1825071.html [2022-07-26].
National Bureau of Statistics. National Bureau of Statistics announcement on 2021 grain output data [EB/OL]. [2021-12-06]. http://www.stats.gov.cn/xxgk/sjfb/zxfb2020/202112/t20211206_1825071.html [2022-07-26].
- [2] 张守梅, 王兴亚, 张娜娜, 等. 储粮方式对小麦产后减损与质量安全的影响[J]. 食品安全质量检测学报, 2021, 12(15): 5940-5947.
ZHANG SM, WANG XY, ZHANG NN, *et al.* Effects of storage methods on postharvest losses and quality safety of wheat during storage [J]. *J Food Saf Qual*, 2021, 12(15): 5940-5947.
- [3] MARZOCCHI S, CABONI MF, GRECO MM, *et al.* Wheat germ and lipid oxidation: An open issue [J]. *Foods*, 2022, 11(7): 1032.
- [4] 刘月, 丑建栋, 陈玥璋, 等. 小麦胚芽的营养功能成分及综合利用研究进展[J]. 食品工业科技, 2022, 43(12): 457-467.
LIU Y, CHOU JD, CHEN YZ, *et al.* Advances on nutritional functional components and comprehensive utilization of wheat germ [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2022, 43(12): 457-467.
- [5] 吴琼. 小麦胚稳定化研究及小麦胚产品的开发[D]. 武汉: 武汉工业学院, 2008.
WU Q. Studies on the stabilization of wheat germ and the exploitation of wheat germ products [D]. Wuhan: Wuhan Polytechnic University, 2008.
- [6] GE Y, SUN A, NI Y, *et al.* Some nutritional and functional properties of de-fatted wheat germ protein [J]. *J Agric Food Chem*, 2000, 48(12): 6215-6218.
- [7] 卢敏, 宋玉卿, 张春艳, 等. 小麦胚芽油的营养价值及应用[J]. 吉林粮食高等专科学校学报, 1999, 14(1): 1-3.
LU M, SONG YQ, ZHANG CY, *et al.* Nutritional value and application of wheat germ oil [J]. *J Jilin Grain College*, 1999, 14(1): 1-3.
- [8] MEGAHED MG. Study on stability of wheat germ oil and lipase activity of wheat germ during periodical storage [J]. *Agric Biol J North Am*, 2011, 2(1): 163-168.
- [9] JHA PK, KUDACHIKAR VB, KUMAR S. Lipase inactivation in wheat germ by gamma irradiation [J]. *Radiat Phys Chem*, 2013, 86: 136-139.
- [10] 胡新娟, 张正茂, 邢沁浚, 等. 小麦胚芽油精炼工艺优化及其品质的影响[J]. 中国油脂, 2016, 41(9): 7-12.
HU XJ, ZHANG ZM, XING QH, *et al.* Optimization of refining process and its effect on quality of wheat germ oil [J]. *China Oils Fats*, 2016, 41(9): 7-12.
- [11] GUVEN M, KARA HH. Some chemical and physical properties, fatty acid

- composition and bioactive compounds of wheat germ oils extracted from different wheat cultivars [J]. *Tarim Bilim Derg*, 2016, 22(3): 433–443.
- [12] OZCAN MM, ROSA A, DESSI MA, *et al.* Quality of wheat germ oil obtained by cold pressing and supercritical carbon dioxide extraction [J]. *Czech J Food Sci*, 2013, 31(3): 236–240.
- [13] KUMAR GS, KRISHNA AGG. Studies on the nutraceuticals composition of wheat derived oils wheat bran oil and wheat germ oil [J]. *Food Sci Technol*, 2015, 52(2): 1145–1151.
- [14] 王青, 刘超, 王新坤, 等. 不同提取工艺对小麦胚芽油品质的影响[J]. *食品工业*, 2019, 40(12): 85–88.
- WANG Q, LIU C, WANG XK, *et al.* Effects of different extraction processes on the quality of wheat germ oil [J]. *Food Ind*, 2019, 40(12): 85–88.
- [15] 刘慧敏. 不同植物油微量成分与抗氧化能力的相关性研究[D]. 无锡: 江南大学, 2015.
- LIU HM. Study on the minor components in different vegetable oils and their relation with antioxidant capacity [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2015.
- [16] PARCZEWSKA-PLESNAR B, BRZOZOWSKI R, GWARDIAK H, *et al.* Wheat germ oil extracted by supercritical carbon dioxide with ethanol: Fatty acid composition [J]. *Grasas Aceites*, 2016, 67(3): e144.
- [17] HAMILTON JS, KLETT EL. Linoleic acid and the regulation of glucose homeostasis: A review of the evidence [J]. *Prostaglandins Leukot Essent Fatty Acids*, 2021, 175: 102366.
- [18] SALA-VILA A, FLEMING J, KRIS_ETHERTON P, *et al.* Impact of α -linolenic acid, the vegetable ω -3 fatty acid, on cardiovascular disease and cognition [J]. *Adv Nutr*, 2022, 13(5): 1584–1602.
- [19] NAGHSHI S, AUNE D, BEYENE J, *et al.* Dietary intake and biomarkers of alpha linolenic acid and risk of all cause, cardiovascular, and cancer mortality: Systematic review and dose-response meta-analysis of cohort studies [J]. *BMJ*, 2021, 375: n2213.
- [20] FANG B, ZHANG M, SHEN YM. Importance of the higher retention of tocopherols and sterols for the oxidative stability of soybean and rapeseed oils [J]. *Food Sci Technol*, 2017, 54(7): 1938–1944.
- [21] HASSANIEN MMM, ABDEL-RAZEK AG, RUDZINSKA M, *et al.* Phytochemical contents and oxidative stability of oils from non-traditional sources [J]. *Eur J Lipid Sci Technol*, 2014, 116(11): 1563–1571.
- [22] 张磊, 芮家鑫, 周晗雨, 等. 不同萃取方式对小麦胚芽油品质的影响[J]. *江苏大学学报(自然科学版)*, 2018, 39(6): 678–682.
- ZHANG L, RUI JX, ZHOU HY, *et al.* Effects of different extraction technologies on wheat germ oil quality [J]. *J Jiangsu Norm Univ (Nat Sci Ed)*, 2018, 39(6): 678–682.
- [23] ZOU Y, GAO Y, HE H, *et al.* Effect of roasting on physico-chemical properties, antioxidant capacity, and oxidative stability of wheat germ oil [J]. *LWT-Food Sci Technol*, 2018, 90: 246–253.
- [24] FRASINARIU O, SERBAN R, TRANDAFIR LM, *et al.* The role of phytosterols in nonalcoholic fatty liver disease [J]. *Nutrients*, 2022, 14(11): 2187.
- [25] SONG LH, LI YT, QU D, *et al.* The regulatory effects of phytosterol esters (PSEs) on gut flora and faecal metabolites in rats with NAFLD [J]. *Food Funct*, 2020, 11(1): 977–991.
- [26] 张喜金, 魏鲜娥, 苏昭仑, 等. 气相色谱法测定小麦胚芽油、大豆油和大蒜油中植物甾醇的组成和含量[J]. *食品安全质量检测学报*, 2016, 7(8): 3388–3392.
- ZHANG XJ, WEI XE, SU ZL, *et al.* Determination of the composition and content of phytosterols in wheat germ oil, soybean oil and garlic oil by gas chromatography [J]. *J Food Saf Qual*, 2016, 7(8): 3388–3392.
- [27] 黄滢璋, 赵雁武, 周振中. 植物甾醇对油脂的抗氧化作用研究[J]. *粮食科技与经济*, 2012, 37(3): 38–40.
- HUANG YZ, ZHAO YW, ZHOU ZZ. Antioxidant effect of phytosterol in edible oil [J]. *Grain Sci Technol Eco*, 2012, 37(3): 38–40.
- [28] 张莉莎. α -生育酚、植物甾醇和 γ -谷维素清除 DPPH 自由基相互作用研究[D]. 无锡: 江南大学, 2019.
- ZHANG LS. Effects of interaction between α -tocopherol, phytosterol and γ -oryzanol on the antiradical activity against DPPH radical [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2019.
- [29] 马娇, 杜方岭, 徐同成, 等. 不同提取方法对小麦胚芽油品质的影响[J]. *食品研究与开发*, 2015, 36(24): 56–58.
- MA J, DU FL, XU TC, *et al.* Study on quality of wheat germ oil by different extraction methods [J]. *Food Res Dev*, 2015, 36(24): 56–58.
- [30] 李进伟, 李进伟, 刘元法. 萃取方式对小麦胚芽油品质的影响研究[J]. *中国油脂*, 2015, 40(5): 50–53.
- QIAN LG, LI JW, LIU YF. Influence of extraction method on quality of wheat germ oil [J]. *China Oils Fats*, 2015, 40(5): 50–53.
- [31] 杨颖, 李桂华, 赵芳, 等. 化学和物理精炼方法对小麦胚芽油品质劣变的影响[J]. *现代食品科技*, 2014, 30(12): 106–112, 118.
- YANG Y, LI GH, ZHAO F, *et al.* Study on the effects of chemical and physical refining processes on the deterioration in the quality of wheat germ oil [J]. *Mod Food Sci Technol*, 2014, 30(12): 106–112, 118.
- [32] 成利娟, 苏涌, 杨翠, 等. 小麦胚芽油体内外抗氧化作用的研究[J]. *安徽医药*, 2013, 17(8): 1289–1291.
- CHENG LJ, SU Y, YANG C, *et al.* Antioxidation of wheat germ oil *in vitro* and *in vivo* [J]. *Anhui Med Pharm J*, 2013, 17(8): 1289–1291.
- [33] 宋玉卿, 王世让, 魏贞伟, 等. 小麦胚芽油胶囊抗氧化作用[J]. *食品科学*, 2010, 31(15): 257–259.
- SONG YQ, WANG SR, WEI ZW, *et al.* Antioxidant effect of wheat germ oil capsules in mice [J]. *Food Sci*, 2010, 31(15): 257–259.
- [34] 郭彤, 于凤芝, 胡平, 等. 维生素 E 调节抗氧化作用的研究进展[J]. *山东畜牧兽医*, 2021, 42(12): 42–49.
- GUO T, YU FZ, HU P, *et al.* Research progress of vitamin E regulating antioxidant effect [J]. *Shandong J Anim Sci Vet Med*, 2021, 42(12): 42–49.
- [35] TRABER MG, HEAD B. Vitamin E: How much is enough, too much and why! [J]. *Free Radic Biol Med*, 2021, 177: 212–225.
- [36] LI XX, LIAO AM, DONG YQ, *et al.* *In vitro* dynamic digestion and anti-fatigue effects of wheat embryo albumin [J]. *Food Funct*, 2022, 13(5): 2559–2569.
- [37] 刘华, 施婷婷. 小麦胚芽油天然维 E 软胶囊缓解小鼠体力疲劳的实验研究[J]. *广州化工*, 2016, 44(11): 76–77, 101.
- LIU H, SHI TT. Experimental Study on the wheat germ oil and natural vitamin E soft capsule on relieving fatigue of the mice [J]. *Guangzhou Chem Ind Technol*, 2016, 44(11): 76–77, 101.

- [38] ZAKARIA R, MUSA R, FARAJ J, *et al.* Evaluation of the wheat germ oil topical formulations for wound healing activity in rats [J]. *Pak J Biol Sci*, 2021, 24(6): 706–715.
- [39] 张婉萍, 常清宁, 张倩洁, 等. 4 种高亚油酸型油脂的光防护效应研究[J]. *中国油脂*, 2022, 48(2): 138–146.
ZHANG WP, CHANG QN, ZHANG QJ, *et al.* Study on photoprotective effect of four kinds of high linoleic acid vegetable oils [J]. *China Oils Fats*, 2022, 48(2): 138–146.
- [40] NUNES AR, VIEIRA Í, QUEIROZ DB, *et al.* Use of flavonoids and cinnamates, the main photoprotectors with natural origin [J]. *Adv Pharmacol Sci*, 2018, 2018: 1–9.
- [41] FITSIOU E, PULIDO T, CAMPISI J, *et al.* Cellular senescence and the senescence-associated secretory phenotype as drivers of skin photoaging [J]. *J Invest Dermatol*, 2021, 141(4): 1119–1126.
- [42] EL-SHAFFEY RS, BALOZA SH, MOHAMMED LA, *et al.* The ameliorative impacts of wheat germ oil against ethanol-induced gastric ulcers: Involvement of anti-inflammatory, antiapoptotic, and antioxidant activities [J]. *Toxicol Res*, 2022, 11(2): 325–338.
- [43] WANG H, JIANG H, ZHAO J, *et al.* Acupuncture therapy for gastric ulcer: A protocol for systematic review and meta-analysis [J]. *Medicine (Baltimore)*, 2021, 100(43): e27656.
- [44] BUDHWAR S, CHAKRABORTY M, SETHI K, *et al.* Antidiabetic properties of rice and wheat bran-A review [J]. *J Food Biochem*, 2020, 44(10): e13424.
- [45] SIRAJ N. Wheat germ oil: A comprehensive review [J]. *Food Sci Technol*, 2022, 42: e113721.
- [46] LIAQAT H, JEONG E, KIM KJ, *et al.* Effect of wheat germ on metabolic markers: A systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials [J]. *Food Sci Biotechnol*, 2020, 29(6): 739–749.
- [47] MAZZOCCHI A, DE CV, RISEI P, *et al.* Bioactive compounds in edible oils and their role in oxidative stress and inflammation [J]. *Front Physiol*, 2021, 12: 659551.
- [48] RODIONOVA NS, ISAEV VA, VISHNYAKOY AB, *et al.* Investigation of the effect of oil and flour from wheat germ meal on lipid metabolism of students and teachers of the university [J]. *Vopr Pitan*, 2016, 85(6): 57–63.
- [49] MCDONNELL SL, FREENCH CB, BAGGERLY CA, *et al.* Cross-sectional study of the combined associations of dietary and supplemental eicosapentaenoic acid+docosahexaenoic acid on omega-3 index [J]. *Nutr Res*, 2019, 71: 43–55.
- [50] LIU Y, REN X, FAN C, *et al.* Health benefits, food applications, and sustainability of microalgae-derived n-3 PUFA. foods [J]. 2022, 11(13): 1883.
- [51] FAN J, WATANABE T. Atherosclerosis: Known and unknown [J]. *Pathol Int*, 2022, 72(3): 151–160.
- [52] BATTY M, BENNETT MR, YU E. The role of oxidative stress in atherosclerosis cells [J]. *Cells*, 2022, 11(23): 3843.
- [53] LANGER HF. Chronic inflammation in atherosclerosis-the CD40L/CD40 axis belongs to dendritic cells and T cells, not platelets [J]. *J Thromb Haemost*, 2022, 20(1): 3–5.
- [54] ALESSANDRI C, PIGNATELLI P, LOFFREDO L, *et al.* Alpha-linolenic acid-rich wheat germ oil decreases oxidative stress and CD40 ligand in patients with wild hypercholesterolemia [J]. *Arterioscl Throm Vas*, 2006, 26(11): 2577–2578.
- [55] KOBYLIAK N, ABENAVOLI L, FALALYEYEVA T, *et al.* Beneficial effects of probiotic combination with omega-3 fatty acids in NAFLD: A randomized clinical study [J]. *Minerva Med*, 2018, 109(6): 418–428.

(责任编辑: 张晓寒 于梦娇)

作者简介



徐亦驰, 硕士研究生, 主要研究方向为粮油质量安全。
E-mail: yichix827@163.com



张良晓, 博士, 研究员, 主要研究方向为油料产品特异品质检测技术研究。
E-mail: zhanglx@caas.cn