

小麦胚芽组成和小麦胚芽油理化性质及营养成分分析

陈明霞¹, 陈瑶², 郑海杰², 孟伟³, 白若璇¹, 李飞扬¹, 陈竞男¹

(1. 河南工业大学粮油食品学院, 郑州 450001; 2. 山东香驰粮油有限公司, 山东滨州 251499; 3. 河南金苑粮油有限公司, 郑州 450000)

摘要:旨在为小麦胚芽资源的有效开发与利用提供参考,以小麦胚芽为原料,对其组成进行分析,并采用溶剂法提取小麦胚芽油,测定了小麦胚芽油的基本理化指标,甘油酯、脂肪酸组成,以及营养物质(甾醇、生育酚)含量。结果表明:小麦胚芽碳水化合物含量为(40.87±0.10)%,蛋白质含量为(29.76±0.05)%,水分含量为(13.95±0.01)%,粗脂肪含量为(10.95±0.02)%,灰分含量为(4.47±0.00)%;小麦胚芽蛋白含有人体所需的8种必需氨基酸,且谷物中第一限制性氨基酸赖氨酸的含量达5.57 g/100 g;小麦胚芽油酸值(KOH)为(5.17±0.06)mg/g,过氧化值为(0.21±0.00)mmol/kg,不皂化物含量为(3.96±0.00)%,皂化值(KOH)为(183.71±0.02)mg/g,磷脂含量为(1.49±0.03)%,碘值为(133.78±0.07)g/100 g,甘油三酯含量为(86.94±1.04)%,甘油二酯含量为(5.95±0.50)%,甘油一酯含量为(4.08±0.10)%;小麦胚芽油的主要脂肪酸组成及含量为亚油酸(58.47±0.10)%、棕榈酸(16.33±0.08)%、油酸(13.67±0.10)%、亚麻酸(6.28±0.08)%等,其中不饱和脂肪酸含量为79.97%,亚油酸主要分布在sn-2位;小麦胚芽油甾醇含量为(3554.55±53.20)mg/100 g,主要为β-谷甾醇、菜油甾醇和豆甾醇,其中甾醇酯含量占总甾醇的63.52%;小麦胚芽油生育酚含量为(304.13±10.25)mg/100 g,包含α-、β-、γ-生育酚3种单体,α-生育酚含量最高,占比65.26%。综上,小麦胚芽营养价值高,在开发功能性食品和新资源食品方面具有巨大的潜力。

关键词:小麦胚芽;组成;小麦胚芽油;理化指标;营养成分

中图分类号:TS201.4;TS209 文献标识码:A 文章编号:1003-7969(2025)08-0123-07

Analysis of composition of wheat germ and physicochemical properties and nutritional components of its oil

CHEN Mingxia¹, CHEN Yao², ZHENG Haijie², MENG Wei³,
BAI Ruoxuan¹, LI Feiyang¹, CHEN Jingnan¹

(1. College of Food Science and Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China;
2. Shandong Xiangchi Grain and Oil Co., Ltd., Binzhou 251499, Shandong, China;
3. Henan Jinyuan Grain and Oil Co., Ltd., Zhengzhou 450000, China)

Abstract: Aiming to provide reference for the effective development and utilization of wheat germ resources, wheat germ was used as raw material and its composition was analyzed, wheat germ oil was extracted by solvent method, and the basic physicochemical indexes, glycerides composition, fatty acid composition and nutrient (sterol, tocopherol) content of wheat germ oil were determined. The results showed that the carbohydrate content in wheat germ was (40.87±0.10)%, the protein content was (29.76±0.05)%, the moisture content was (13.95±0.01)%, the crude fat content was (10.95±

收稿日期:2024-05-28;修回日期:2025-04-07

基金项目:河南省科技研发计划联合基金项目(232103810067)

作者简介:陈明霞(2000),女,硕士研究生,研究方向为脂质化学(E-mail)2372624832@qq.com。

通信作者:陈竞男,副教授(E-mail)chenjingnan813@126.com。

0.02)%, and the ash content was (4.47±0.00)%. Wheat germ protein contained 8 essential amino acids required by the human body, and lysine, the first limiting amino acid in cereals, amounted to 5.57 g/100 g. Wheat germ

oil had a acid value of (5.17 ± 0.06) mgKOH/g, peroxide value of (0.21 ± 0.00) mmol/kg, unsaponifiable matters content of $(3.96 \pm 0.00)\%$, saponification value of (183.71 ± 0.02) mgKOH/g, phospholipids content of $(1.49 \pm 0.03)\%$, and iodine value of (133.78 ± 0.07) g/100 g. The contents of triglyceride, diglyceride and monoglyceride in wheat germ oil were $(86.94 \pm 1.04)\%$, $(5.95 \pm 0.50)\%$ and $(4.08 \pm 0.10)\%$, respectively. The main fatty acid composition and content of wheat germ oil were linoleic acid $(58.47 \pm 0.10)\%$, palmitic acid $(16.33 \pm 0.08)\%$, oleic acid $(13.67 \pm 0.10)\%$, linolenic acid $(6.28 \pm 0.08)\%$, etc., the unsaturated fatty acid content was 79.97%, and the main distribution of linoleic acid was in the sn-2 position. The content of sterols in wheat germ oil was (3554.55 ± 53.20) mg/100 g, mainly including β -sitosterol, campesterol and stigmasterol, among which sterol ester accounted for 63.52% of total sterols. The content of tocopherol in wheat germ oil was (304.13 ± 10.25) mg/100 g, including α -, β -tocopherol and γ -tocopherol, and the content of α -tocopherol was the highest, accounting for 65.26%. In summary, wheat germ is of high nutritional value and has great potential in the development of functional foods and new resource foods.

Key words: wheat germ; composition; wheat germ oil; physicochemical indexes; nutritional component

我国是小麦种植大国,国家统计局数据显示,2023年小麦总产量高达13659.0万t,占全国谷物总产量的21.3%^[1]。小麦胚芽是小麦制粉时产生的一种副产物,占小麦总质量的2.5%~3.8%^[2],其富含蛋白质、脂肪、维生素、微量元素等多种营养成分,对人体的生长发育、新陈代谢等方面具有重要作用,是一种天然食品营养资源。小麦胚芽油是从小麦胚芽中提取的一种谷物胚芽油,其维生素E含量丰富,可作为天然维生素E的重要来源^[3]。此外,小麦胚芽油还含有不饱和脂肪酸、植物甾醇、磷脂等多种生物活性成分,有“万灵药”之美称^[4]。

目前,我国对小麦胚芽的开发利用程度不高,利用率不足2%^[5],多数小麦胚芽返掺入麸皮作为廉价饲料出售,甚至直接丢弃,造成极大的资源浪费。尽管现有研究已关注小麦胚芽中油脂、谷胱甘肽、天然维生素E、麦胚凝集素等营养成分的提取^[6],但对其整体组成、理化性质及营养成分尚未深入分析,这在一定程度上制约了小麦胚芽的开发与高效利用。小麦胚芽的组成和小麦胚芽油品质对小麦胚芽资源的有效开发利用具有至关重要的影响。鉴于此,本研究对小麦胚芽组成和小麦胚芽油的理化性质(酸值、过氧化值、不皂化物、皂化值、脂肪酸组成等)和营养组分(甾醇、生育酚等)进行系统分析,以为小麦胚芽资源的有效开发与利用提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 实验材料

1.1.1 原料与试剂

小麦胚芽,由郑州金苑面业有限公司提供,为从生产线取下的新鲜胚芽,用聚氯乙烯密封袋密封,于

-20℃冰柜中保存。

乙醚、石油醚(30~60℃)、冰乙酸、三氯甲烷、盐酸、氢氧化钾、硫酸联氨、钼酸钠,分析纯,天津市恒兴化学试剂有限公司;三氟化硼乙醚,国药集团化学试剂有限公司;正己烷、异丙醇,色谱纯,北京迈瑞达科技有限公司;豆甾醇(纯度 $\geq 95\%$),西安康崇生物科技有限公司;5 α -胆甾烷醇(纯度 $\geq 98\%$),阿拉丁试剂(上海)有限公司; α -生育酚(纯度99.16%)、 β -生育酚(纯度99.24%)、 γ -生育酚(纯度99.38%),北京三区生物技术有限公司。

1.1.2 仪器与设备

GC-7890气相色谱仪,安捷伦科技有限公司;RV8IKA型旋转蒸发器,艾卡(广州)仪器设备有限公司;FW-100高速万能粉碎机,北京市永明医疗仪器有限公司;2695高效液相色谱仪,美国Waters公司;TU-1810紫外分光光度计,北京普析通用仪器有限责任公司。

1.2 实验方法

1.2.1 小麦胚芽预处理

将小麦胚芽从冰柜中取出解冻,使用高速万能粉碎机将其粉碎后,过0.425mm(40目)筛,得到小麦胚芽粉,于4℃下储存备用。

1.2.2 小麦胚芽油的制备

参考王成忠等^[7]的方法,取约200g小麦胚芽粉于2L烧杯中,以料液比1:5加入正己烷,于磁力搅拌器上40℃浸提2h,离心(10000r/min,10min)取上清液,采用旋转蒸发器除去正己烷,90℃真空条件下干燥30min,得小麦胚芽油,于4℃冰箱中保存。

1.2.3 小麦胚芽基本成分测定

水分含量的测定参考 GB/T 14489.1—2008;蛋白质含量的测定参考 GB 5009.5—2016;粗脂肪含量的测定参考 GB 5009.6—2016;灰分含量的测定参考 GB 5009.4—2016;碳水化合物含量以1减去蛋白质、粗脂肪、水分和灰分含量计算。

1.2.4 小麦胚芽氨基酸测定

组氨酸、异亮氨酸、亮氨酸等17种氨基酸的测定参考 GB 5009.124—2016;色氨酸的测定参考 NY/T 57—1987。各氨基酸含量以每100 g小麦胚芽蛋白计。

1.2.5 小麦胚芽油基本理化指标测定

酸值的测定参考 GB 5009.229—2016;过氧化值的测定参考 GB 5009.227—2023;不皂化物的测定参考 GB/T 5535.2—2008;磷脂含量的测定参考 GB/T 5537—2008;碘值的测定参考 GB/T 5532—2022;皂化值的测定参考 GB/T 5534—2008。

1.2.6 小麦胚芽油甘油酯组成测定

参考陈名扬^[8]的方法测定,以峰面积归一化法计算甘油酯中甘油一酯、甘油二酯和甘油三酯相对含量。

1.2.7 小麦胚芽油脂肪酸组成及相对含量测定

1.2.7.1 总脂肪酸组成

参考 GB 5009.168—2016 对小麦胚芽油进行甲酯化处理,然后采用气相色谱(GC)法测定脂肪酸组成。

GC条件:BPX-70色谱柱(30 m × 250 μm × 0.25 μm);进样口温度、火焰离子化检测器(FID)温度250℃;柱箱初始温度170℃,以2℃/min上升到230℃,保持20 min;氮气(N₂)流速1.0 mL/min;分流比20:1;进样量1.0 μL。

1.2.7.2 甘油三酯脂肪酸组成

参考陈帅等^[9]的方法并稍作修改,取2~3滴小麦胚芽油溶于1 mL正己烷,点样于薄层硅胶板上,以正己烷-乙醚-冰乙酸(体积比70:30:1)为展开剂,大豆油作为标样展开。展开结束后使用碘粉显色,刮下甘油三酯色谱带,使用乙醚萃取3次并合并上清液,N₂吹干,得甘油三酯,按照1.2.7.1方法分析其脂肪酸组成。

1.2.7.3 甘油三酯 sn-1,3位、sn-2位脂肪酸组成

参考 GB/T 24894—2010 测定小麦胚芽油甘油三酯上 sn-2 位脂肪酸组成。将按照1.2.7.2的方法得到的甘油三酯使用猪胰脂肪酶于40℃水解(冬天90 s,夏天40 s)后离心(3 000 r/min,5 min),取

上清液点至硅胶薄层板上,以正己烷-乙醚-甲酸(体积比70:30:1)为展开剂展开;展开结束后使用碘粉显色,刮下甘油一酯色谱带,按1.2.7.1方法分析 sn-2 位脂肪酸组成。sn-1,3 位脂肪酸含量以3倍甘油三酯脂肪酸含量与 sn-2 位脂肪酸含量差值的1/2计算。

1.2.8 小麦胚芽油甾醇组成及含量测定

参考陈帅等^[9]的方法并稍作修改,采用GC法测定小麦胚芽油甾醇含量。

称取0.1 g(精确至0.000 1 g)小麦胚芽油,用适量的正己烷溶解并加入一定量的5α-胆甾醇溶液作为内标,点样于薄层硅胶板上,选择甾醇及胆甾醇硬脂酸酯为参照,以正己烷-乙醚-乙酸(体积比80:20:2)为展开剂展开,展开结束后使用碘粉显色,得到甾醇和甾醇酯色谱带并分别刮下。

游离甾醇含量:将甾醇色谱带用乙醚萃取3次并合并上清液,N₂吹干;加入200 μL 硅烷化试剂和200 μL 吡啶,60℃水浴1 h,冷却后N₂吹干;加入3 mL 色谱级正己烷复溶,用适量无水硫酸钠干燥,过0.45 μm 滤膜后进行GC分析。

甾醇酯含量:向甾醇酯色谱带加入适量的5α-胆甾醇溶液(内标),使用乙醚萃取并除去溶剂,加入25 mL 1 mol/L KOH-乙醇溶液进行皂化(80℃,1.5 h),使用正己烷萃取并除去溶剂后,按上述条件进行薄层硅胶板展开,得到甾醇酯上的甾醇色谱带,后续方法同游离甾醇含量测定。

甾醇总量:甾醇总量为游离甾醇含量和甾醇酯含量之和。

GC条件:HP-5色谱柱(30 m × 320 μm × 0.25 μm);载气为N₂,流速1.5 mL/min;柱温285℃,保持20 min;进样口温度300℃;检测器温度360℃;分流比7.5:1;进样量1 μL。

1.2.9 小麦胚芽油生育酚含量测定

参考 AOCS Official Method Ce 8-89,采用高效液相色谱(HPLC)法测定生育酚含量。称取0.5 g小麦胚芽油至5 mL 棕色容量瓶中,用色谱级正己烷溶解并定容,经0.45 μm 滤膜过滤后,待HPLC分析。以α-、β-、γ-生育酚标准溶液绘制标准溶液质量浓度(X)与峰面积(Y)标准曲线,得α-、β-、γ-生育酚回归方程分别为 $Y = 6\,899.2X + 17\,405.0$ ($R^2 = 0.999\,3$), $Y = 7\,525.2X + 35\,927.0$ ($R^2 = 0.999\,1$), $Y = 10\,366.3X + 813.0$ ($R^2 = 0.999\,9$),基于此计算小麦胚芽油中的生育酚含量。

HPLC条件:荧光检测器,SunFire Silica Prep 色谱柱(4.6 mm × 250 mm,5 μm),流速0.8 mL/min,

柱温 30 ℃, 激发波长 290 nm, 发射波长 330 nm, 进样量 10 μL。

1.2.10 数据分析

每个实验均进行 3 次平行实验, 结果以“平均值 ± 标准偏差”表示, 使用 Origin 2023 软件绘图。

2 结果与讨论

2.1 小麦胚芽基本成分

小麦胚芽的基本成分如表 1 所示。

表 1 小麦胚芽的基本成分

基本成分	含量/%
水分	13.95 ± 0.01
灰分	4.47 ± 0.00
粗脂肪	10.95 ± 0.02
蛋白质	29.76 ± 0.05
碳水化合物	40.87 ± 0.10

由表 1 可看出, 小麦胚芽的蛋白质含量较高, 为 (29.76 ± 0.05)%, 高于稻米胚芽 (28.04%) 和玉米胚芽 (15.00% ~ 17.00%) 的^[10], 是一种很好的天然植物蛋白源。小麦胚芽的粗脂肪含量为 (10.95 ± 0.02)%, 显著低于玉米胚芽的 (30.70%)^[11], 但与大豆胚芽的 (10.98%)^[12] 相差不大。小麦胚芽的灰分含量为 (4.47 ± 0.00)%, 明显高于小麦胚乳的 (0.35% ~ 0.55%)^[13]。小麦胚芽的水分含量为 (13.95 ± 0.01)%, 相对较高, 易于微生物生长繁殖, 导致小麦胚芽变质^[14], 因此控制水分含量对于保证小麦胚芽的储藏稳定性和延长保质期至关重要。

2.2 小麦胚芽的氨基酸组成

小麦胚芽的氨基酸组成见表 2。

由表 2 可看出, 小麦胚芽含有 18 种氨基酸, 包括人体所需的 8 种必需氨基酸, 说明小麦胚芽蛋白是一种全价蛋白, 具有较高的利用价值。小麦胚芽中异亮氨酸、赖氨酸、苯丙氨酸 + 酪氨酸、苏氨酸、缬氨酸含量均高于 FAO/WHO 推荐模式。FAO/WHO 指出, 高质量蛋白质 E/T 应达 40% 左右, E/N 应在 60% 以上^[15]。由表 2 可知, 小麦胚芽 E/T 为 36.46%, E/N 为 57.37%, 这表明小麦胚芽蛋白也可作为一种较理想的高质量蛋白质。谷物食品中第一限制性氨基酸——赖氨酸在小麦胚芽中的含量达 5.57 g/100 g, 高于 FAO/WHO 推荐模式中的学龄前儿童、学生以及成人的赖氨酸需求, 因此小麦胚芽具有补充和强化谷物食品中赖氨酸的潜力。谷胱甘肽是小麦胚芽中一种具有生物活性的天然多肽, 具有抗氧化、延缓衰老等功能^[16], 是由半胱氨酸、谷氨酸

和甘氨酸构成的三肽。小麦胚芽中胱氨酸、谷氨酸和甘氨酸的含量分别为 0.16、16.59 g/100 g 和 5.55 g/100 g, 其中谷氨酸是小麦胚芽中含量最高的氨基酸。综上所述, 小麦胚芽氨基酸种类丰富且组成合理, 有很好的平衡氨基酸作用, 可作为优质的植物蛋白营养源和潜在的营养食品补充剂。

表 2 小麦胚芽的氨基酸组成

Table 2 Amino acid composition of wheat germ

氨基酸	小麦胚芽	FAO/WHO 推荐模式 ^[15]		
		学龄前儿童 (1~2 岁)	学生 (3~10 岁)	成人
异亮氨酸 (Ile) *	3.25 ± 0.03	3.10	3.10	3.00
亮氨酸 (Leu) *	5.95 ± 0.14	6.30	6.10	5.90
赖氨酸 (Lys) *	5.57 ± 0.06	5.20	4.80	4.50
蛋氨酸 (Met) *	1.36 ± 0.02			
蛋氨酸 + 胱氨酸 (Met + Cys)	1.52 ± 0.08	2.60	2.40	2.20
苯丙氨酸 (Phe) *	3.42 ± 0.07			
苯丙氨酸 + 酪氨酸 (Phe + Tyr)	5.64 ± 0.05	4.60	4.10	3.80
苏氨酸 (Thr) *	3.60 ± 0.10	2.70	2.50	2.30
色氨酸 (Trp) *	0.42 ± 0.01	0.74	0.66	0.60
缬氨酸 (Val) *	4.78 ± 0.10	4.20	4.00	3.90
组氨酸 (His)	3.23 ± 0.05	1.80	1.60	
天冬氨酸 (Asp)	7.91 ± 0.20			
谷氨酸 (Glu)	16.59 ± 0.26			
丝氨酸 (Ser)	4.14 ± 0.09			
甘氨酸 (Gly)	5.55 ± 0.07			
精氨酸 (Arg)	6.83 ± 0.05			
丙氨酸 (Ala)	5.84 ± 0.02			
酪氨酸 (Tyr)	2.22 ± 0.06			
胱氨酸 (Cys)	0.16 ± 0.02			
脯氨酸 (Pro)	3.47 ± 0.04			
必需氨基酸 (EAA)	30.73 ± 0.54			
非必需氨基酸 (NEAA)	53.56 ± 0.24			
总氨基酸 (TAA)	84.29 ± 0.31			
EAA/TAA (E/T)/%	36.46 ± 0.08			
EAA/NEAA (E/N)/%	57.37 ± 0.12			

注: * 为 EAA; 为与 FAO/WHO 推荐模式保持一致, EAA 含量计算时将蛋氨酸与胱氨酸、苯丙氨酸与酪氨酸视为一个整体, NEAA 含量计算时不再将胱氨酸、酪氨酸计入

Note: *. EAA. In order to be consistent with the FAO/WHO recommended model, Met and Cys, Phe and Tyr are considered as a whole in the calculation of EAA content, and Cys and Tyr are no longer counted in the calculation of NEAA content

2.3 小麦胚芽油的理化指标和甘油酯组成

小麦胚芽油的理化指标和甘油酯组成见表 3。

表3 小麦胚芽油的理化指标和甘油酯组成
Table 3 Physicochemical indexes and glyceride composition of wheat germ oil

项目	指标
酸值(KOH)/(mg/g)	5.17 ± 0.06
过氧化值/(mmol/kg)	0.21 ± 0.00
不皂化物/%	3.96 ± 0.00
皂化值(KOH)/(mg/g)	183.71 ± 0.02
磷脂/%	1.49 ± 0.03
碘值/(g/100 g)	133.78 ± 0.07
甘油酯	
甘油一酯/%	4.08 ± 0.10
甘油二酯/%	5.95 ± 0.50
甘油三酯/%	86.94 ± 1.04

由表3可看出,小麦胚芽油的酸值(KOH)为(5.17 ± 0.06) mg/g,高于王青等^[17]采用正己烷萃取的小麦胚芽油的[(3.34 ± 0.21) mg/g],这可能与使用的小麦胚芽原料品质不同有关。小麦胚芽油的过氧化值较低,为(0.21 ± 0.00) mmol/kg。此外,小

表4 小麦胚芽油总脂肪酸,甘油三酯及其sn-2、sn-1,3位脂肪酸组成及相对含量

Table 4 Composition and relative content of total fatty acids, triglycerides and their sn-2, sn-1,3 fatty acids in wheat germ oil

脂肪酸	总脂肪酸	甘油三酯	sn-2位	sn-1,3位	%
棕榈酸(C16:0)	16.33 ± 0.08	18.49 ± 0.12	3.87 ± 0.08	25.80 ± 0.08	
棕榈油酸(C16:1)	0.21 ± 0.00	0.20 ± 0.01	0.15 ± 0.00	0.23 ± 0.00	
硬脂酸(C18:0)	0.61 ± 0.01	1.60 ± 0.19	2.63 ± 0.13	1.08 ± 0.05	
油酸(C18:1)	13.67 ± 0.10	14.83 ± 0.53	15.43 ± 0.19	14.52 ± 0.06	
亚油酸(C18:2)	58.47 ± 0.10	55.07 ± 0.67	71.71 ± 0.08	46.76 ± 0.19	
亚麻酸(C18:3)	6.28 ± 0.08	5.32 ± 0.10	4.52 ± 0.12	5.72 ± 0.05	
花生一烯酸(C20:1)	1.35 ± 0.01	1.50 ± 0.10	-	2.25 ± 0.10	
其他	3.09 ± 0.22	2.99 ± 0.02	1.69 ± 0.08	3.64 ± 0.09	
SFA	16.94 ± 0.09	20.09 ± 0.62	6.50 ± 0.07	26.88 ± 0.03	
MUFA	15.23 ± 0.12	16.53 ± 0.97	15.58 ± 0.19	17.00 ± 0.08	
PUFA	64.74 ± 0.02	60.39 ± 1.54	76.23 ± 0.21	52.48 ± 0.13	

注:SFA. 饱和脂肪酸;MUFA. 单不饱和脂肪酸;PUFA. 多不饱和脂肪酸;-表示未检出

Note: SFA. Saturated fatty acids; MUFA. Monounsaturated fatty acids; PUFA. Polyunsaturated fatty acids; -. Not detected

由表4可知,小麦胚芽油主要由亚油酸、棕榈酸、油酸、亚麻酸、花生一烯酸、硬脂酸和棕榈油酸7种脂肪酸组成,其中亚油酸含量最高。小麦胚芽油中不饱和脂肪酸含量为79.97%,多不饱和脂肪酸含量在60%以上,主要为亚油酸和亚麻酸,二者均为人体必需脂肪酸,亚油酸具有抑制炎症、降低血压和血脂以及预防心血管疾病等多种健康益处^[22-23],亚麻酸具有减肥、降血压、抗氧化和抗衰老等功能^[24]。小麦胚芽油甘油三酯上脂肪酸组成与总脂肪酸一致,总不饱和脂肪酸含量略低,其中单不饱和

脂肪酸含量为(16.53 ± 0.97)%,多不饱和脂肪酸含量为(60.39 ± 1.54)%。小麦胚芽油的磷脂含量丰富,达到(1.49 ± 0.03)%,高于玉米油(0.54%)^[18]和米糠油的(0.65%)^[19],可作为生产磷脂的优良原料。小麦胚芽油中不皂化物含量较高,为(3.96 ± 0.00)%。小麦胚芽油皂化值(KOH)为(183.71 ± 0.02) mg/g。小麦胚芽油碘值为(133.78 ± 0.07) g/100 g,表明其脂肪酸的不饱和程度高^[20]。小麦胚芽油中甘油三酯、甘油二酯和甘油一酯相对含量分别为(86.94 ± 1.04)%、(5.95 ± 0.50)%和(4.08 ± 0.10)%,甘油三酯含量在95%以下,这与小麦胚芽中含有大量解脂酶相关,小麦胚芽从小麦剥离后,解脂酶便显出极大的活性,迅速分解小麦胚芽中的油脂^[21]。解脂酶也是导致小麦胚芽稳定性差的重要因素之一,因此灭酶处理对于小麦胚芽深加工十分关键。

2.4 小麦胚芽油的脂肪酸组成

对小麦胚芽油的总脂肪酸,甘油三酯及其sn-2位、sn-1,3位脂肪酸组成及相对含量进行了分析,结果如表4所示。

脂肪酸含量为(16.53 ± 0.97)%,多不饱和脂肪酸含量为(60.39 ± 1.54)%。

由表4可看出,小麦胚芽油甘油三酯上sn-2位的脂肪酸主要是亚油酸,含量为(71.71 ± 0.08)%,其次是油酸、亚麻酸、棕榈酸、硬脂酸,还含有少量的棕榈油酸。小麦胚芽油甘油三酯上sn-1,3位的亚油酸含量比sn-2位的低得多,并且较长碳链的花生一烯酸主要分布在sn-1,3位。

2.5 小麦胚芽油的甾醇含量

小麦胚芽油的甾醇组成及含量如表5所示。

表5 小麦胚芽油中甾醇组成及含量

Table 5 Composition and contents of sterols in

甾醇	wheat germ oil		mg/100 g
	游离甾醇	甾醇酯	
菜油甾醇	348.55 ± 0.42	631.88 ± 15.91	980.43 ± 16.32
豆甾醇	10.32 ± 0.42	43.38 ± 2.52	53.70 ± 2.94
β -谷甾醇	937.68 ± 13.88	1 582.75 ± 25.94	2 520.43 ± 39.82
总量	1 296.55 ± 13.88	2 258.00 ± 39.33	3 554.55 ± 53.20

植物甾醇是一种重要的脂质营养伴随物,具有降低胆固醇、调节血脂、抗氧化及调节应激反应等多种功效^[25]。由表5可知,小麦胚芽油甾醇有 β -谷甾醇、菜油甾醇和豆甾醇3种,并以 β -谷甾醇为主。小麦胚芽油中总甾醇含量为(3 554.55 ± 53.20)mg/100 g,其中 β -谷甾醇含量达(2 520.43 ± 39.82)mg/100 g,占总甾醇的70.91%。小麦胚芽油中甾醇的含量显著高于米糠油(1 075.11 mg/100 g)、玉米胚芽油(1 032.07 mg/100 g)、大豆油(307.34 mg/100 g)和花生油(245.12 mg/100 g)等^[26-27]。小麦胚芽油中甾醇酯和游离甾醇的含量分别为(2 258.00 ± 39.33)mg/100 g和(1 296.55 ± 13.88)mg/100 g,甾醇酯含量占总甾醇的63.52%,是游离甾醇的1.74倍,表明小麦胚芽油甾醇主要以甾醇酯的形式存在。甾醇酯的生物利用率约是游离甾醇的6倍,具有更好的降血清、降胆固醇能力,更容易被人体吸收^[28]。

2.6 小麦胚芽油的生育酚含量

小麦胚芽油的生育酚组成及含量见表6。

表6 小麦胚芽油的生育酚组成及含量

Table 6 Composition and content of tocopherol in wheat germ oil

生育酚	含量/(mg/100 g)
α -生育酚	198.48 ± 7.11
β -生育酚	103.15 ± 3.01
γ -生育酚	2.51 ± 0.13
总量	304.13 ± 10.25

生育酚是一种重要的抗氧化剂,具有抗癌、延缓衰老、预防流产、防止动脉粥样硬化和降低血脂等多种生理功能^[29]。由表6可看出,小麦胚芽油中生育酚含量为(304.13 ± 10.25)mg/100 g,远高于其他常见植物油,如大豆油(105.91 mg/100 g)、玉米油(88.65 mg/100 g)、菜籽油(69.37 mg/100 g)以及花生油(42.12 mg/100 g)等^[30]。小麦胚芽油的生育酚包括 α -、 β -、 γ -生育酚3种单体,其中: α -生育酚含量最高,达(198.48 ± 7.11)mg/100 g,占总生育酚的65.26%;其次是 β -生育酚,含量为

(103.15 ± 3.01)mg/100 g; γ -生育酚含量最低,为(2.51 ± 0.13)mg/100 g。

3 结论

小麦胚芽的主要成分为碳水化合物(40.87 ± 0.10)%、蛋白质(29.76 ± 0.05)%、粗脂肪(10.95 ± 0.02)%、水分(13.95 ± 0.01)%和灰分(4.47 ± 0.00)%。小麦胚芽蛋白的氨基酸组成丰富,含有18种氨基酸,包括人体所需的8种必需氨基酸,且谷物中第一限制性氨基酸赖氨酸的含量达5.57 g/100 g。小麦胚芽油酸值(KOH)为(5.17 ± 0.06)mg/g,过氧化值为(0.21 ± 0.00)mmol/kg,皂化物含量为(3.96 ± 0.00)% ,皂化值(KOH)为(183.71 ± 0.02)mg/g,磷脂含量为(1.49 ± 0.03)% ,碘值为(133.78 ± 0.07)g/100 g,甘油三酯含量为(86.94 ± 1.04)% ,甘油二酯含量为(5.95 ± 0.50)% ,甘油一酯含量为(4.08 ± 0.10)%。小麦胚芽油的主要脂肪酸组成及含量为亚油酸(58.47 ± 0.10)%、棕榈酸(16.33 ± 0.08)%、油酸(13.67 ± 0.10)%、亚麻酸(6.28 ± 0.08)%等,其中不饱和脂肪酸含量为79.97%,甘油三酯中亚油酸主要分布在sn-2位。小麦胚芽油中甾醇和生育酚含量分别为(3 554.55 ± 53.20)mg/100 g和(304.13 ± 10.25)mg/100 g,可以作为植物甾醇和天然维生素E的优质资源。小麦胚芽是一种营养价值极高的植物资源,在开发功能性食品和新资源食品方面具有巨大的潜力。

参考文献:

- [1] 国家统计局. 国家统计局关于2023年粮食产量数据的公告[EB/OL]. (2023-12-11) [2024-05-28]. https://www.stats.gov.cn/sj/zxfb/202312/t20231211_1945417.htm
- [2] BRANDOLINI A, HIDALGO A. Wheat germ: Not only a by-product[J]. Int J Food Sci Nutr, 2012, 63(Suppl 1): 71-74.
- [3] 桑乃华. 小麦胚芽的营养价值及开发应用[J]. 粮食与油脂, 1992, 5(1): 1-7.
- [4] SIRAJ N. Wheat germ oil: A comprehensive review[J]. Food Sci Technol, 2022, 42: e113721 [2024-05-28]. <https://doi.org/10.1590/fst.113721>.
- [5] 冯军伟, 刘世欣, 段兰兰, 等. 黑曲霉发酵脱脂麦胚过程中抗氧化活性变化研究[J]. 中国酿造, 2022, 41(1): 80-84.
- [6] 何金麟. 小麦胚芽的综合利用[J]. 现代食品, 2016, 22(18): 61-62.
- [7] 王成忠, 师景双, 赵乃峰. 溶剂法浸提小麦胚芽油的单因素试验研究[J]. 农产品加工, 2010(7): 76-80.
- [8] 陈名扬. 基于低场核磁共振技术同步检测煎炸过程中植物油理化指标的研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2023.
- [9] 陈帅, 毕艳兰, 汪学德, 等. GC-MS/FID法分析玉米

- 胚芽油中的甾醇和甾醇酯[J]. 中国粮油学报, 2017, 32(5): 131-137.
- [10] 马梦恬, 王明辉, 鲁佩杰, 等. 谷物胚芽营养组分与加工技术研究进展[J]. 中国油脂, 2023, 48(6): 114-118, 147.
- [11] HARRABI S, ST-AMAND A, SAKOUHI F, et al. Phytosterols and phytosterols distributions in corn kernel [J]. Food Chem, 2008, 111(1): 115-120.
- [12] YU D, ELFALLEH W, HE S, et al. Physicochemical properties and minor lipid components of soybean germ [J]. J Am Oil Chem Soc, 2013, 90(10): 1551-1558.
- [13] 李树高. 面粉灰分含量对面制品的影响[J]. 粮食与食品工业, 2008, 15(5): 11, 18.
- [14] 袁超, 吴豪, 刘欣. 小麦胚芽稳定化和功能性成分提取[J]. 粮食与油脂, 2011, 24(5): 1-4.
- [15] Protein and amino acid requirements in human nutrition: Report of a joint FAO/WHO/UNU expert consultation [M]. Geneva, Switzerland: World Health Organization, 2007.
- [16] 陈圣杰. 牡蛎多肽体外药效学评价及含牡蛎多肽面膜的制备[D]. 南宁: 广西医科大学, 2021.
- [17] 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.
- [18] 郑立友, 胡晖, 段玉权, 等. 玉米油精炼过程中磷脂、生育酚及金属元素含量变化及其对返色的影响[J]. 中国油脂, 2016, 41(10): 15-18.
- [19] 王娟. 高酸值米糠油脱酸脱蜡新工艺的研究[D]. 武汉: 武汉轻工大学, 2015.
- [20] 王笃年. 关于有机物结构与性质的系列问题(6): 与油脂有关的几个问题[J]. 高中数理化, 2014(3): 45-46.
- [21] 张锐利, 张伟敏, 郑诗超. 小麦胚芽灭酶试验中微波的作用研究[J]. 粮食加工, 2005, 30(5): 45-46.
- [22] SHEN J, LIU Y, WANG X, et al. A comprehensive review of health-benefiting components in rapeseed oil [J/OL]. Nutrients, 2023, 15(4): 999 [2024-05-28]. <https://doi.org/10.3390/nu15040999>.
- [23] HAMILTON J S, KLETT E L. Linoleic acid and the regulation of glucose homeostasis: A review of the evidence [J/OL]. Prostaglandins Leukot Essent Fatty Acids, 2021, 175: 102366 [2024-05-28]. <https://doi.org/10.1016/j.plefa.2021.102366>.
- [24] ZHU P, FAN L, YAN X, et al. Advances of α -linolenic acid: Sources, extraction, biological activity and its carrier [J/OL]. Trends Food Sci Technol, 2024, 152: 104676 [2024-05-28]. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2024.104676>.
- [25] SURYAMAN I, SINDHU R, SINGH I. Phytosterols: Physiological functions and therapeutic applications [M]// Bioactive food components activity in mechanistic approach. Amsterdam; Elsevier, 2022: 223-238.
- [26] 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.
- [27] 韩军花, 杨月欣, 冯妹元, 等. 中国常见植物食物中植物甾醇的含量和居民摄入量初估[J]. 卫生研究, 2007, 36(3): 301-305.
- [28] 王舒舒, 张幸, 吴正章, 等. 植物甾醇酯合成研究进展[J]. 生物加工过程, 2023, 21(2): 210-219, 236.
- [29] GALLI F, AZZI A, BIRNINGER M, et al. Vitamin E: Emerging aspects and new directions [J]. Free Radic Biol Med, 2017, 102: 16-36.
- [30] 杨波涛, 陈凤香, 莫文莲, 等. 我国食用植物油维生素 E 含量研究[J]. 粮油加工, 2009(9): 52-55.

(上接第 103 页)

加工点不具备“三废”处理能力,而随着下游生物质燃料市场对 UCO 品质的要求越来越高,过滤、除杂等处理产生的“三废”处理难度越来越大,造成乱排乱放现象频发,持续引起执法部门关注。建议大规模 UCO 加工厂在建设过程中申请“资源回收企业认定”资质和“危废收集经营许可”资质,通过“反向开票”方式解决原料发票问题,保障企业享受“资源综合利用产品增值税即征即退 70%”的政策优惠。

6 展 望

目前我国废弃食用油脂规范化回收率远低于欧盟国家,亟需建立标准化、集中化的回收网络以提高原料供应的稳定性。在全球生物质燃料政策的驱动下,UCO 需求快速增长,但我国 UCO 利用仍以粗加工出口为主,亟需延伸产业链,发展高附加值产品(如 HVO、生物航煤等)。此外,我国急需完善 UCO 行业标准与监管机制,并加大财税支持,鼓励企业进

行技术升级,推动从 UCO 原料出口国向高附加值产品制造国转型。通过政策引导建设区域性 UCO 精炼中心,集成预处理、酯化/加氢等先进工艺,提升产品质量与经济性,同时配套数字化溯源体系保障原料合规性。

未来,随着碳中和进程加速,UCO 加工业有望成为循环经济的关键环节,需要政府、企业、科研机构多方协作,共同解决废弃食用油脂回收、加工技术、政策等方面的瓶颈问题,以实现行业的可持续发展。

参 考 文 献:

- [1] 郭晚,陈道勇. 废弃油脂的综合利用现状[J]. 石油化工应用, 2009, 28(5): 4-6.
- [2] 姜加群. 浅谈废弃食用油脂的危害与资源化利用[J]. 资源环境, 2015, 32(12): 231.
- [3] 赵檀,张丽,冯成江,等. 第二代生物柴油的研究现状与展望[J]. 现代化工, 2011, 31(5): 7-9.