

DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20241231005

引用格式: 欧朝接, 林莹. 不同加工方式对小麦胚芽品质的影响研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(8): 253–260.

OU CJ, LIN Y. Study on the effects of different processing methods on the quality of *Triticum aestivum* L. germ [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(8): 253–260. (in Chinese with English abstract).

# 不同加工方式对小麦胚芽品质的影响研究

欧朝接<sup>1,2</sup>, 林莹<sup>1\*</sup>

(1. 广西大学轻工与食品工程学院, 南宁 530004; 2. 广西壮族自治区分析测试研究中心, 南宁 530022)

**摘要: 目的** 探究 3 种不同热加工方式对小麦胚芽品质的影响。**方法** 以新鲜小麦胚芽为实验材料, 采用干热法、微波法和湿热法对小麦胚芽进行处理, 分析不同热加工方式对小麦胚芽营养品质及油脂品质的影响。

**结果** 3 种热加工方式对脂肪酸组成均无显著性差异( $P>0.05$ ), 以干基计的灰分、脂肪、蛋白质和矿物质含量基本不变。与新鲜麦胚相比, 干热法和微波法含水量、维生素 E 含量(以干基计)和氨基酸含量(以干基计)下降; 湿热法含水量上升, 维生素 E 含量(以干基计)下降, 氨基酸含量(以干基计)含量无显著性差异( $P>0.05$ )。干热法酸价、游离脂肪酸含量上升, 过氧化值含量降低; 微波法和湿热法的酸价和游离脂肪酸含量显著降低( $P<0.05$ ), 过氧化值含量显著上升( $P<0.05$ )。**结论** 湿热法有助于保护小麦品质, 可以更好地提高小麦胚芽贮藏稳定性, 为小麦胚芽进一步的高值化加工利用和功能性成分的开发提供依据。

**关键词:** 小麦; 胚芽; 加工方式; 成分分析

## Study on the effects of different processing methods on the quality of *Triticum aestivum* L. germ

OU Chao-Jie<sup>1,2</sup>, LIN Ying<sup>1\*</sup>

(1. School of Light Industry and Food Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, China;  
2. Guangxi Zhuang Autonomous Reion Center for Analysis and Test Research, Nanning 530022, China)

**ABSTRACT: Objective** To investigate the effects of 3 kinds of different thermal processing methods on the quality of *Triticum aestivum* L. germ. **Methods** Fresh *Triticum aestivum* L. germ was used as the test material, and dry heat, microwave and moist heat methods were used to treat *Triticum aestivum* L. germ to analyze the effects of different thermal processing methods on the nutritional quality and oil quality of *Triticum aestivum* L. germ. **Results** There were no significant differences ( $P>0.05$ ) in fatty acid composition among 3 kinds of thermal processing methods, and ash, fat, protein and mineral contents on a dry basis were essentially unchanged. Compared with fresh *Triticum aestivum* L. germ, dry heat and microwave methods decreased water content, vitamin E content (dry basis) and amino acid content (dry basis); moist heat method increased in water content, decreased in vitamin E content (dry basis) and no significant difference ( $P>0.05$ ) in amino acid content (dry basis) content. Acid value and free fatty acid content

收稿日期: 2024-12-31

基金项目: 2024 广西农产品精深加工产业科技先锋队项目(202400235); 广西壮族自治区直属公益性科研院所基本科研业务费项目(2022ACZ05)

第一作者: 欧朝接(1992—), 男, 硕士研究生, 工程师, 主要研究方向为食品加工与安全。E-mail: 651181903@qq.com

\*通信作者: 林莹(1971—), 女, 博士, 教授, 主要研究方向为食品加工。E-mail: 1044552906@qq.com

increased and peroxide content decreased in the dry heat method; the acid value and free fatty acid content of microwave method and moist heat method were significantly reduced ( $P < 0.05$ ), the content of peroxide value significantly increased ( $P < 0.05$ ). **Conclusion** Moist heat method helps to protect the quality of *Triticum aestivum* L., can better improve the storage stability of *Triticum aestivum* L. germ, and provides a basis for further high-value processing and utilization of *Triticum aestivum* L. germ and the development of functional components.

**KEY WORDS:** *Triticum aestivum* L.; germ; processing methods; compositional analysis

## 0 引言

小麦是大自然给予人类健康生存的生命之源,被称为五谷之贵。小麦胚芽富含小麦籽粒大部分的营养成分,主要包括 10%~15%的脂质<sup>[1]</sup>、26%~35%的蛋白质<sup>[2]</sup>、42.0%~47.0%的碳水化合物<sup>[3]</sup>、10%~14%的膳食纤维<sup>[4]</sup>及 4.0%~4.5%的矿物质<sup>[5]</sup>,被誉为“天然营养宝库”<sup>[6]</sup>。小麦胚芽含有 70%以上不饱和脂肪酸<sup>[7]</sup>,是一种优质的植物脂肪。此外,小麦胚芽中还含有二十八烷醇、半胱氨酸、 $\gamma$ -氨基丁酸、谷胱甘肽、凝集素、植物甾醇等生物活性物质<sup>[8-12]</sup>。

热加工技术在食品加工中具有广泛的应用,它通过适当升高食品的温度可以达到杀菌、去除异味、改善食品品质等效果。近年来,国内外学者采用各种热加工技术处理谷物,提高其储存稳定性,以期延缓谷物的酸败、延长产品保质期。如 JOHN 等<sup>[13]</sup>应用热风干燥技术处理玉米籽粒,干燥至 11.6%湿度、在 40 °C 条件下保存 47 d 的过氧化物值仅为未干谷物对照组的 53%; CORINA 等<sup>[14]</sup>研究表明,高温烘烤后,豆类中维生素和矿物质水平低于推荐的每日摄入量,多酚和抗氧化能力显著下降; MERILES 等<sup>[15]</sup>研究发现经微波和热风处理后,小麦胚芽油的过氧化物值、酸度和脂肪酸保持不变。经热风处理后, $\alpha$ -生育酚含量有所下降;张楠等<sup>[16]</sup>比较了微波、过热蒸汽、热风干燥 3 种热加工技术对小麦胚芽进行酶钝化效果,其中过热蒸汽技术灭活脂肪酶效果最佳。热加工作为食品工业常见的加工方式,由于不同的热加工方式会引起食品成分的差异,从而影响食品的理化性质和营养价值。但目前关于不同热加工方式对小麦胚芽品质的影响研究不够系统、详尽。

基于此,本研究以小麦胚芽为实验材料,采用干热法(100 °C 处理 30 min)、微波法(640 W 处理 3 min)和湿热法(常压蒸汽处理 20 min)对新鲜小麦胚芽进行处理,旨在探究不同热加工方式对新鲜小麦胚芽基本组分、矿物质、维生素 E、氨基酸、酸价、过氧化物值、游离脂肪酸、脂肪酸组成的影响,为小麦胚芽加工生产提供理论指导。

## 1 材料与方 法

### 1.1 材料与试剂

新鲜小麦胚芽:由某企业赠送提供,用自封袋封装,置于 4 °C 冰箱储藏,于 24 h 内加工备用。

硫代硫酸钠标准滴定液(浓度 0.09994 mol/L,深圳市博林达科技有限公司);氢氧化钠标准溶液(浓度 0.5010 mol/L)、37 种脂肪酸甲酯混合标准溶液(质量浓度 10 mg/mL)(上海安谱瑾世标准技术服务有限公司);混合氨基酸标准溶液(浓度 2.50  $\mu$ mol/L,日本和光纯药工业株式会社); $\alpha$ -生育酚、 $\beta$ -生育酚、 $\gamma$ -生育酚、 $\delta$ -生育酚标准品(纯度 98%,上海阿拉丁生化科技股份有限公司);30~60 °C 石油醚、硫酸铜、硫酸钾、氢氧化钠、柠檬酸钠、碘化钾、可溶性淀粉、乙醚、硼酸、硫酸、盐酸、异丙醇、无水乙醇(分析纯,国药集团化学试剂有限公司);硝酸(分析纯,德国默克公司);冰乙酸、无水硫酸钠(分析纯,广东光华科技股份有限公司);三氯甲烷(分析纯,成都市科隆化学品有限公司)。

### 1.2 仪器与设备

ZW1-GF3V 微波炉(广东格兰仕微波生活电器制造有限公司);DHG 9240A 电热恒温鼓风干燥箱、SX2-5-12TP 马弗炉(上海一恒科学仪器有限公司);AB204 电子天平(精度 0.0001 g,瑞士梅特勒托利多公司);Kjeltec8400 全自动凯氏定氮仪(瑞典福斯公司);iCAP7400 电感耦合等离子体发射光谱仪(德国赛默飞世尔科技公司);LA8080 型超高速全自动氨基酸分析仪(日本日立高新技术公司);Waters 2695 高效液相色谱仪(配 2475 FLR 多波长荧光检测器,美国沃特世公司);6890N 气相色谱仪(美国安捷伦科技有限公司)。

### 1.3 实验方法

#### 1.3.1 加工方式

(1)干热法处理。新鲜小麦胚芽放入 100 °C 干燥箱内加热处理 30 min,取出冷却,装入聚乙烯保鲜袋中待用。

(2)微波法处理。新鲜小麦胚芽放入微波炉内,640 W 处理 3 min 后,取出冷却,装入聚乙烯保鲜袋中待用。

(3)湿热法处理。新鲜小麦胚芽放入蒸锅内,常压蒸汽处理 20 min 后,取出冷却,装入聚乙烯保鲜袋中待用。

#### 1.3.2 营养品质指标的测定

(1)水分、灰分、脂肪、蛋白质的测定

水分含量采用 GB 5009.3—2016《食品安全国家标准 食品中水分的测定》中的直接干燥法测定;灰分含量采用 GB 5009.4—2016《食品安全国家标准 食品中灰分的测定》

测定; 脂肪含量采用 GB 5009.6—2016《食品安全国家标准 食品中脂肪的测定》索氏抽提法测定; 蛋白质含量采用 GB 5009.5—2016《食品安全国家标准 食品中蛋白质的测定》凯氏定氮法测定。

#### (2) 氨基酸测定

氨基酸含量采用 GB 5009.124—2016《食品安全国家标准 食品中氨基酸的测定》测定。

#### (3) 矿物质测定

磷、钾、钙、镁、铜、铁、锰、锌、镉的含量采用 GB 5009.268—2016《食品安全国家标准 食品中多元素的测定》中电感耦合等离子体发射光谱法(inductively coupled plasma-optical emission spectrometer, ICP-OES)测定。

#### (4) 维生素 E 测定

维生素 E 的含量采用 GB 5009.82—2016《食品安全国家标准 食品中维生素 A、D、E 的测定》中反相高效液相色谱法测定。维生素 E 的测定结果用  $\alpha$ -生育酚当量(alpha-tocopherol equivalent,  $\alpha$ -TE)表示, 维生素 E (mg  $\alpha$ -TE/100 g)= $\alpha$ -生育酚+ $\beta$ -生育酚 $\times 0.5$ + $\gamma$ -生育酚 $\times 0.1$ + $\delta$ -生育酚 $\times 0.01$ 。

### 1.3.3 油脂品质指标的测定

#### (1) 酸价、过氧化值、游离脂肪酸的测定

酸价采用 GB 5009.229—2016《食品安全国家标准 食品中酸价的测定》中冷溶剂指示剂滴定法测定; 过氧化值采用 GB 5009.227—2023《食品安全国家标准 食品中过氧化值的测定》中指示剂滴定法测定过氧化值; 游离脂肪酸参照 GB/T 5530—2005《动植物油脂 酸值和酸度测定》中冷溶剂法测定, 以油酸表示, 结果用质量分数表示。

#### (2) 脂肪酸组成测定

脂肪酸的分析参照李波<sup>[17]</sup>的方法略作更改, 称取小麦胚芽油脂 0.03 g 进行测定分析。

## 1.4 数据处理

每个实验重复 3 次, 实验结果均以平均值 $\pm$ 标准偏差的方式表示, 并采用 SPSS 26.0 软件进行分析处理, 采用单因素方差分析结合 Duncan 多种检验比较多样本间的显著性差异, 置信度为 95%, 图中和表中不同字母代表有显著性差异( $P < 0.05$ ), 作图采用 Origin 9.1 软件。

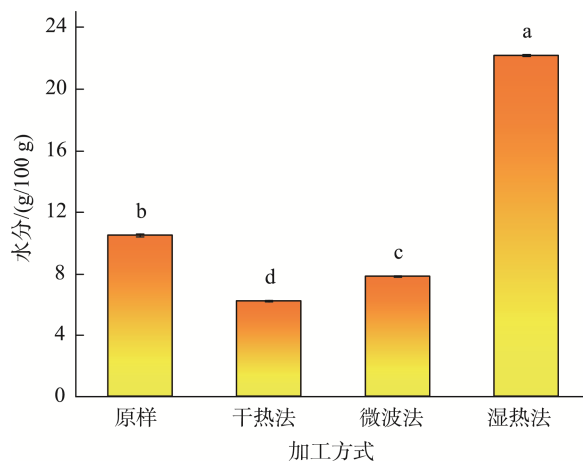
## 2 结果与分析

### 2.1 不同加工方式对小麦胚芽营养品质的影响

#### 2.1.1 不同加工方式对小麦胚芽基本组成成分的影响

水分对食品的结构、外观、味道以及对变质的敏感性有着很大的影响, 含水量直接影响到食品的贮藏性能和消费者的接受程度。由图 1 可知, 3 种热加工方式对小麦胚芽的含水率均存在显著性差异( $P < 0.05$ ), 湿热法在处理过程中吸收大量水蒸气导致其水分含量上升, 与新鲜

麦胚(原样)比较增加了 111%。干热法和微波法处理后的麦胚含水量均低于新鲜麦胚。干热法高温处理削弱氢键和水的相互作用, 从而加速水的蒸发。微波处理时水分子产生强烈振动, 分子间相互挤压、碰撞、摩擦生热导致水分汽化蒸发。



注: 不同字母表示组间具有显著性差异,  $P < 0.05$ , 下同。

图 1 不同加工方式对含水量的影响

Fig.1 Effects of different processing methods on water content

由图 2 可知, 不同加工方式对麦胚灰分、脂肪和蛋白质含量具有显著差异( $P < 0.05$ )。新鲜麦胚中灰分、脂肪、蛋白质分别为 4.79、10.11 和 28.83 g/100 g。干热法及微波法处理后麦胚灰分、脂肪和蛋白质含量略有上升, 可能与其含水量降低有关。结果与傅苏芳<sup>[18]</sup>的研究结果相似。湿热法处理后样品灰分、脂肪和蛋白质含量有所降低。湿热法脂肪含量降低的原因可能是一些油脂在高温下从游离态转变为复合态<sup>[19]</sup>。

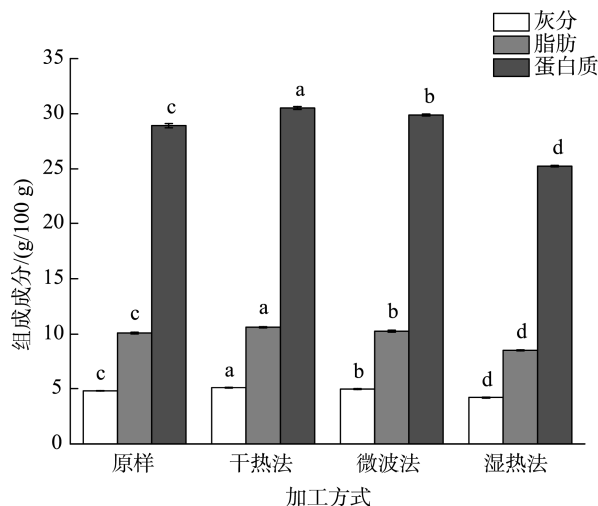


图 2 不同加工方式对灰分、脂肪、蛋白质的影响

Fig.2 Effects of different processing methods on ash, fat, protein

### 2.1.2 不同加工方式对小麦胚芽氨基酸的影响

小麦胚芽含有人体必需的 8 种氨基酸, 必需氨基酸的构成比例与联合国粮食及农业组织和世界卫生组织联合机构 (Food and Agriculture Organization of the United Nations/World Health Organization, FAO/WHO) 推荐的模式值以及大豆、牛肉、鸡蛋的氨基酸构成比例非常接近, 优于大米、面粉等谷物蛋白质中必需氨基酸的构成比例<sup>[20]</sup>。氨基酸结果如表 1 所示, 小麦胚芽(原样)包含的基本氨基酸有谷氨酸、天门冬氨酸、精氨酸、赖氨酸、亮氨酸、丙氨酸、甘氨酸、缬氨酸等, 其中谷氨酸、天门冬氨酸、精氨酸、赖氨酸为主要氨基酸。赖氨酸作为谷类蛋白质的第一限制性氨基酸, 其含量高达 1.83 g/100 g; 苏氨酸的含量为 1.09 g/100 g, 是谷类蛋白质的第二限制性氨基酸。干热法处理后麦胚中 16 种氨基酸含量和氨基酸总量无显著性差异( $P>0.05$ ), 微波法及湿热法处理后样品中 16 种氨基酸含量和氨基酸总量均比原样降低, 具有显著性差异( $P<0.05$ )。叶明星<sup>[21]</sup>报道了不同稳定化处理对麦胚品质的影响, 热干燥、微波、常压蒸汽、挤压膨化处理对麦胚赖氨酸的损失分别为: 0.5%、0.3%、0.3%、0.4%。微波处理使物料之间产生非热效应, 导致蛋白质次级结构断裂, 可能引起氨基酸含量降低。蒸汽处理使麦胚水分含量的提高, 氨基酸可能会发生更多的化学反应, 导致小麦胚芽中氨基酸含量下降。

表 1 不同加工方式对氨基酸的影响(g/100 g)

氨基酸	生胚(原样)	干热法	微波法	湿热法
天门冬氨酸	2.33±0.02 <sup>a</sup>	2.31±0.04 <sup>a</sup>	2.04±0.02 <sup>b</sup>	1.99±0.04 <sup>b</sup>
苏氨酸	1.09±0.02 <sup>a</sup>	1.08±0.02 <sup>a</sup>	0.96±0.02 <sup>b</sup>	0.93±0.02 <sup>b</sup>
丝氨酸	1.11±0.03 <sup>a</sup>	1.07±0.03 <sup>a</sup>	0.98±0.02 <sup>b</sup>	0.93±0.03 <sup>b</sup>
谷氨酸	3.60±0.04 <sup>a</sup>	3.55±0.03 <sup>a</sup>	3.21±0.02 <sup>b</sup>	3.08±0.04 <sup>c</sup>
脯氨酸	1.26±0.05 <sup>a</sup>	1.22±0.05 <sup>a</sup>	1.09±0.05 <sup>b</sup>	1.10±0.03 <sup>b</sup>
甘氨酸	1.55±0.04 <sup>a</sup>	1.55±0.03 <sup>a</sup>	1.37±0.02 <sup>b</sup>	1.34±0.04 <sup>b</sup>
丙氨酸	1.69±0.03 <sup>a</sup>	1.65±0.02 <sup>a</sup>	1.47±0.03 <sup>b</sup>	1.45±0.04 <sup>b</sup>
缬氨酸	1.33±0.04 <sup>a</sup>	1.32±0.01 <sup>a</sup>	1.16±0.03 <sup>b</sup>	1.16±0.04 <sup>b</sup>
蛋氨酸	0.32±0.01 <sup>a</sup>	0.30±0.02 <sup>ab</sup>	0.28±0.02 <sup>b</sup>	0.29±0.02 <sup>b</sup>
异亮氨酸	0.89±0.02 <sup>a</sup>	0.87±0.02 <sup>a</sup>	0.77±0.02 <sup>b</sup>	0.78±0.01 <sup>b</sup>
亮氨酸	1.72±0.03 <sup>a</sup>	1.71±0.03 <sup>a</sup>	1.50±0.02 <sup>b</sup>	1.46±0.02 <sup>b</sup>
酪氨酸	0.69±0.02 <sup>a</sup>	0.68±0.01 <sup>a</sup>	0.63±0.02 <sup>b</sup>	0.57±0.02 <sup>c</sup>
苯丙氨酸	1.04±0.04 <sup>a</sup>	1.01±0.03 <sup>a</sup>	0.88±0.02 <sup>b</sup>	0.88±0.02 <sup>b</sup>
赖氨酸	1.83±0.04 <sup>a</sup>	1.82±0.02 <sup>a</sup>	1.57±0.03 <sup>b</sup>	1.61±0.03 <sup>b</sup>
组氨酸	0.70±0.02 <sup>a</sup>	0.68±0.01 <sup>a</sup>	0.61±0.02 <sup>b</sup>	0.60±0.02 <sup>b</sup>
精氨酸	2.11±0.03 <sup>a</sup>	2.06±0.04 <sup>a</sup>	1.85±0.03 <sup>b</sup>	1.77±0.04 <sup>c</sup>
氨基酸总量	23.26±0.38 <sup>a</sup>	22.89±0.13 <sup>a</sup>	20.36±0.22 <sup>b</sup>	19.95±0.31 <sup>b</sup>

注: 同行不同小写字母表示组间具有显著性差异( $P<0.05$ ), 表 2 同。

### 2.1.3 不同加工方式对小麦胚芽维生素 E 的影响

维生素 E 是一种脂溶性维生素, 它可以通过改变自动氧化的自由基链抑制油脂的氧化, 是不饱和脂质过氧化过程中重要的潜在抗氧化剂。维生素 E 具有 8 种同分异构体( $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ 、 $\delta$  等生育酚以及相应生育三烯酚), 其中  $\alpha$ -生育酚抗氧化活性最高, 其次是  $\beta$ 、 $\gamma$ -生育酚,  $\delta$ -生育酚活性最低<sup>[22]</sup>。

如图 3 所示, 小麦胚芽中维生素 E 主要以  $\alpha$ -生育酚和  $\beta$ -生育酚的形式存在, 而  $\delta$ -生育酚和  $\gamma$ -生育酚未检出。其中  $\alpha$ -生育酚含量高于  $\beta$ -生育酚。小麦胚芽(原样)维生素 E 含量为 19.32 mg/100 g, 包含 16.20 mg/100 g 的  $\alpha$ -生育酚和 6.24 mg/100 g 的  $\beta$ -生育酚。结果表明, 从维生素 E 总量及  $\alpha$ -生育酚含量来看, 干热法处理后麦胚与原样比较无显著性差异( $P>0.05$ ), 微波法和湿热法具有显著性差异( $P<0.05$ ), 微波法处理后麦胚  $\alpha$ -生育酚保留率可达 90.94%, 湿热法处理后麦胚  $\alpha$ -生育酚保留率仅为 71.23%。研究结果与徐斌等<sup>[23]</sup>及 ARSLAN 等<sup>[24]</sup>报道的一致, 研究中利用连续式微波稳定麦胚, 处理后麦胚的  $\alpha$ -生育酚保留率可达 94.71%。从  $\beta$ -生育酚含量来看, 3 种加工方式与原样比较均具有显著性差异( $P<0.05$ ), 含量均有所降低。因此, 加工方式是影响维生素 E 含量改变的重要因素。

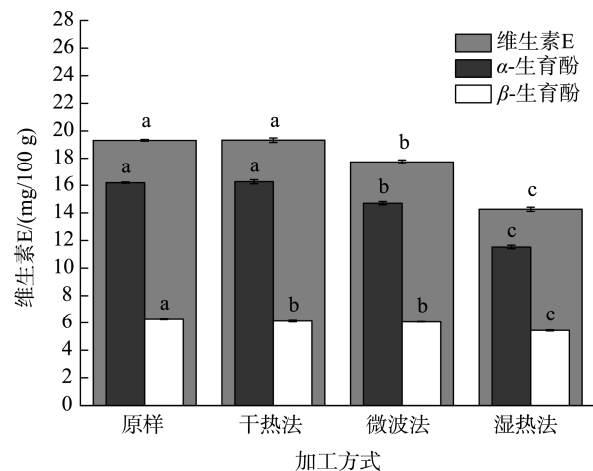


图 3 不同加工方式对维生素 E 的影响

Fig.3 Effects of different processing methods on vitamin E

### 2.1.4 不同加工方式对小麦胚芽矿物质的影响

小麦胚芽中富含磷、钙、镁、钾、锌、铁、锰等人体所必需的矿物质, 实验结果表明, 不同热加工方式对小麦胚芽矿物质含量(钙、铁、锰、锌)具有显著性差异( $P<0.05$ )。与其他谷物相比, 小麦胚芽钙、镁、钾和锌含量较高, 镁、钾和锌含量分别为 3260、12830 和 138.50 mg/kg, 这与严斌等<sup>[25]</sup>研究结果吻合。钙含量为 554.66 mg/kg, 与 Danish Food Composition Databank<sup>[26]</sup>结果存在一定的差异, 这可能与小麦品种、产地、贮藏条件差异有关。

## 2.2 不同加工方式对小麦胚芽油脂品质的影响

### 2.2.1 不同加工方式对小麦胚芽油酸价的影响

酸价是衡量植物油品质的重要指标, 是反映油脂酸败程度的重要参数。小麦胚芽在加工时, 油脂会在氧气、水分和微生物等作用下产生大量的游离脂肪酸, 使小麦胚芽酸败变质。如图 4 所示, 不同热加工方式对小麦胚芽油脂的酸价含量具有显著性差异( $P<0.05$ ), 其中干热法处理后麦胚提取的油脂酸价略有上升, 可能是高温促进了不饱和脂肪酸的氧化, 产生了一定量的有机酸。微波法和湿热法处理后麦胚提取的油脂酸价含量有所降低, 与辛颖等<sup>[27]</sup>在玉米胚芽中的研究结果一致。蒸汽处理使小麦胚芽中的酶活降低, 有效地抑制了酶促氧化的进程。微波处理可能加速了脂肪氧化的进程, 游离脂肪酸进一步氧化为氢过氧化物。

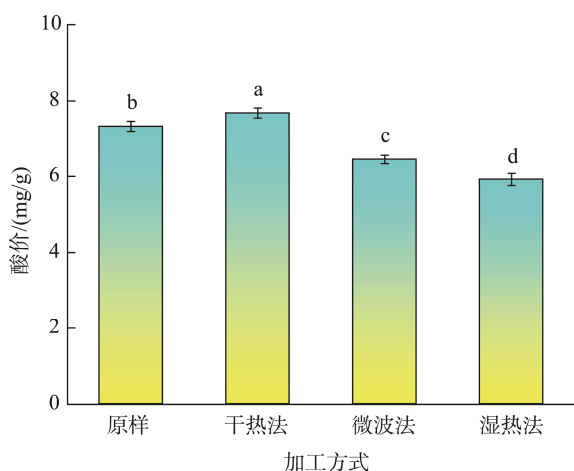


图 4 不同加工方式对酸价的影响

Fig.4 Effects of different processing methods on acid value

### 2.2.2 不同加工方式对小麦胚芽油过氧化值的影响

过氧化值是反映油脂氧化程度的参数, 油脂中不饱和脂肪酸中的双键会与空气中的氧气发生反应, 产生大量氢过氧化物, 使小麦胚芽酸败。如图 5 所示, 不同热加工方式对小麦胚芽油脂的过氧化值含量具有显著性差异( $P<0.05$ )。干热法处理后麦胚提取的油脂过氧化值降低, 含量为 0.18 g/100 g。微波法和湿热法处理后麦胚提取的油脂过氧化值含量上升, 其中微波法处理后麦胚油过氧化值为原样的 1.45 倍, 超过植物油国家标准(GB 2716—2018《食品安全国家标准 植物油》)限值( $\leq 0.25$  g/100 g), 湿热法处理后麦胚油为原样的 1.09 倍。这可能是由于在微波处理过程中, 水分子的强烈摩擦和碰撞导致物料温度迅速升高, 从而促使基质中的油脂在短时间内发生热氧化。微波法处理时微波作用产生的射线能够加速自由基的产生, 从而加速油脂中氧化基质的氧化, 这与黄颖等<sup>[28]</sup>的研究结果一致。

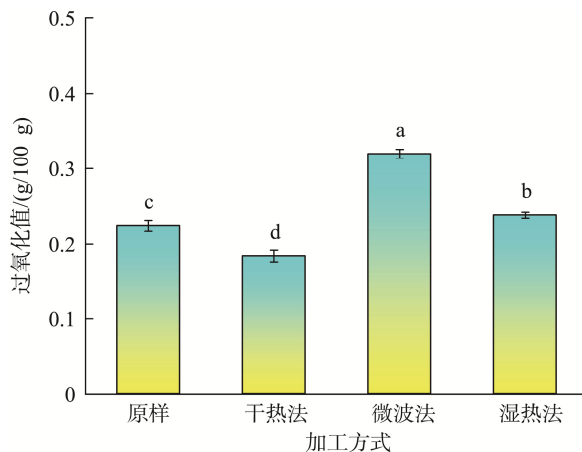


图 5 不同加工方式对过氧化值的影响

Fig.5 Effects of different processing methods on peroxide value

### 2.2.3 不同加工方式对小麦胚芽油游离脂肪酸的影响

游离脂肪酸是反映脂肪水解生成游离脂肪酸的含量, 以百分数表示, 是表征油脂水解程度的经典指标。WANG 等<sup>[29]</sup>发现麦胚毛油游离脂肪酸含量可达 5%~25%, 麦胚的游离脂肪酸含量可能与制胚工艺、贮藏条件和萃取工艺有关。由图 6 可知, 不同热加工方式对小麦胚芽油脂的游离脂肪酸含量具有显著性差异( $P<0.05$ ), 从不同热加工处理的麦胚中提取的油脂游离脂肪酸在 2.98%~3.86%之间。

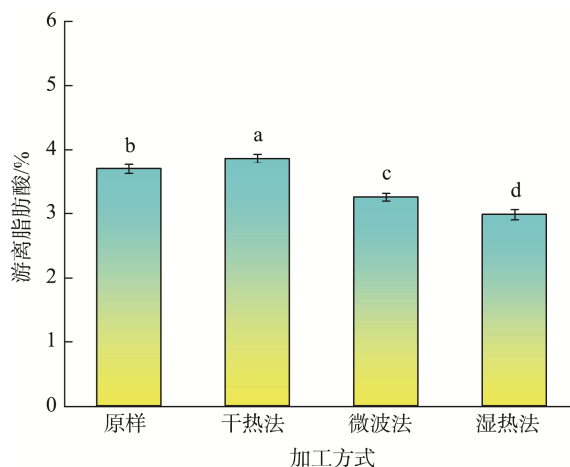


图 6 不同加工方式对游离脂肪酸的影响

Fig.6 Effects of different processing methods on free fatty acids

### 2.2.4 不同加工方式对小麦胚芽油脂肪酸组成的影响

脂肪酸组成对油脂的营养价值、理化性质具有决定性作用。对不同热加工处理的小麦胚芽油脂进行脂肪酸组成分析, 结果表明, 小麦胚芽油主要脂肪酸有亚油酸(C18:2), 占总脂肪酸的 56.99%~57.54%, 其次是棕榈酸(C16:0), 占比为 17.71%~17.97%; 油酸(C18:1), 占比为 14.77%~14.84%; 亚麻酸(C18:3), 占比为 5.75%~6.07%; 花生一烯酸(C20:1), 占比为 1.46%~1.49%; 硬脂酸(C18:0), 占比为 0.67%~

0.70%。不饱和脂肪酸占比接近 80%，具有重要的营养价值。小麦胚芽油脂肪酸组成在不同热加工下均无显著性差异( $P>0.05$ )，这与 OZCAN 等<sup>[30]</sup>研究结果吻合，其研究热风干燥对麦胚的脂肪酸含量无显著影响。李进伟等<sup>[31]</sup>也报道了微波加热处理对麦胚脂肪酸含量无显著影响。

### 2.3 含水量对小麦胚芽品质的影响

#### 2.3.1 含水量对小麦胚芽营养指标的影响

将不同热加工下小麦胚芽灰分、脂肪、蛋白质、维生素 E、氨基酸、矿物质含量以干基计算，并与原样比较，结果如图 7~10 以及表 2~3 所示。加工方式对折干基后的小麦胚芽灰分、蛋白质、矿物质含量无显著性差异( $P>0.05$ )，脂肪含量与原样相差不大，说明加工方式对新鲜小麦胚芽中灰分、脂肪、蛋白质、矿物质含量(Mg 除外)的影响是由于水分变化引起的。3 种热加工方式的维生素 E 含量具有显著性差异( $P<0.05$ )，含量均有所降低，原因可能是维生素 E 热稳定性差，在高温条件下，生育酚的稳定性会显著下降造成一

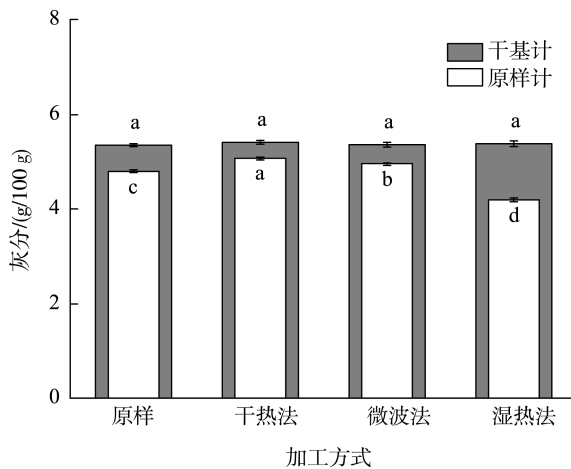


图 7 不同加工方式处理后灰分含量的变化  
Fig.7 Changes of ash content after different processing methods

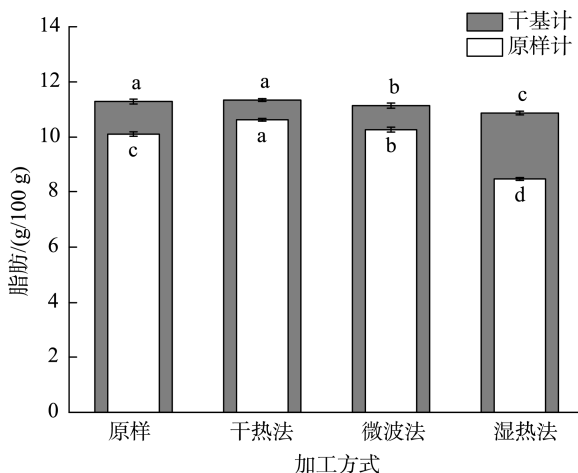


图 8 不同加工方式处理后脂肪含量的变化  
Fig.8 Changes of fat content after different processing methods

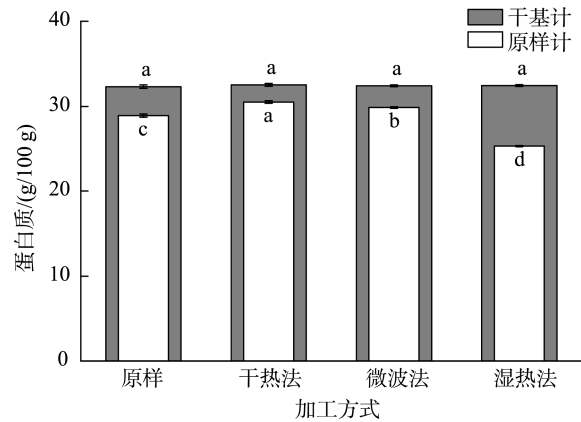


图 9 不同加工方式处理后蛋白质含量的变化  
Fig.9 Changes of protein content after different processing methods

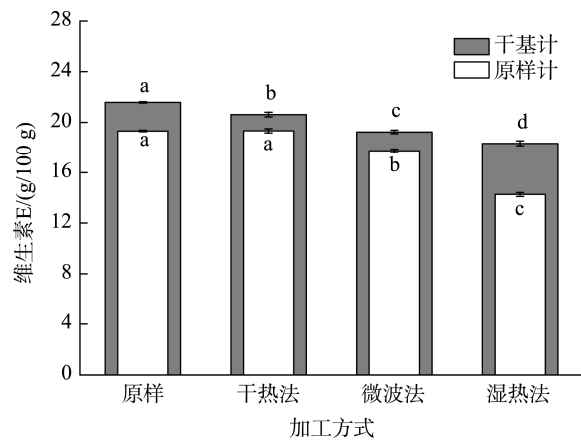


图 10 不同加工方式处理后维生素 E 含量的变化  
Fig.10 Changes of vitamin E content after different processing methods

表 2 不同加工方式对氨基酸的影响(g/100 g, 以干基计)

Table 2 Effects of different processing methods on amino acids (g/100 g, dry basis)

氨基酸	生胚(原样)	干热法	微波法	湿热法
天门冬氨	2.61±0.02 <sup>a</sup>	2.46±0.04 <sup>b</sup>	2.22±0.02 <sup>c</sup>	2.56±0.05 <sup>a</sup>
苏氨酸	1.22±0.02 <sup>a</sup>	1.15±0.02 <sup>b</sup>	1.04±0.02 <sup>c</sup>	1.20±0.02 <sup>a</sup>
丝氨酸	1.24±0.03 <sup>a</sup>	1.14±0.03 <sup>b</sup>	1.06±0.03 <sup>c</sup>	1.19±0.03 <sup>ab</sup>
谷氨酸	4.03±0.04 <sup>a</sup>	3.79±0.03 <sup>b</sup>	3.48±0.03 <sup>c</sup>	3.96±0.05 <sup>a</sup>
脯氨酸	1.41±0.06 <sup>a</sup>	1.30±0.05 <sup>b</sup>	1.18±0.05 <sup>c</sup>	1.41±0.03 <sup>a</sup>
甘氨酸	1.73±0.04 <sup>a</sup>	1.65±0.04 <sup>b</sup>	1.49±0.02 <sup>c</sup>	1.73±0.05 <sup>a</sup>
丙氨酸	1.88±0.04 <sup>a</sup>	1.76±0.02 <sup>b</sup>	1.60±0.03 <sup>c</sup>	1.87±0.05 <sup>a</sup>
缬氨酸	1.48±0.04 <sup>a</sup>	1.41±0.01 <sup>b</sup>	1.26±0.03 <sup>c</sup>	1.49±0.05 <sup>a</sup>
蛋氨酸	0.36±0.01 <sup>a</sup>	0.32±0.02 <sup>b</sup>	0.31±0.02 <sup>b</sup>	0.37±0.03 <sup>a</sup>
异亮氨酸	0.99±0.03 <sup>a</sup>	0.93±0.02 <sup>b</sup>	0.83±0.02 <sup>c</sup>	1.00±0.02 <sup>a</sup>
亮氨酸	1.92±0.03 <sup>a</sup>	1.83±0.04 <sup>b</sup>	1.63±0.02 <sup>c</sup>	1.88±0.03 <sup>ab</sup>
酪氨酸	0.77±0.02 <sup>a</sup>	0.73±0.02 <sup>b</sup>	0.68±0.03 <sup>c</sup>	0.74±0.02 <sup>ab</sup>
苯丙氨酸	1.17±0.04 <sup>a</sup>	1.08±0.03 <sup>b</sup>	0.95±0.05 <sup>c</sup>	1.14±0.02 <sup>a</sup>
赖氨酸	2.05±0.05 <sup>a</sup>	1.94±0.02 <sup>b</sup>	1.70±0.03 <sup>c</sup>	2.07±0.04 <sup>a</sup>
组氨酸	0.78±0.02 <sup>a</sup>	0.73±0.02 <sup>b</sup>	0.66±0.02 <sup>c</sup>	0.77±0.03 <sup>a</sup>
精氨酸	2.35±0.03 <sup>a</sup>	2.20±0.04 <sup>b</sup>	2.01±0.03 <sup>c</sup>	2.28±0.06 <sup>a</sup>
氨基酸总	25.99±0.42 <sup>a</sup>	24.41±0.15 <sup>b</sup>	22.10±0.24 <sup>c</sup>	25.64±0.41 <sup>a</sup>

定程度的损失。与原样相比, 干热法和微波法对折干基后氨基酸含量具有显著性差异( $P<0.05$ ), 湿热法对折干基后氨基酸含量无显著性差异( $P>0.05$ )。

### 2.3.2 含水量与小麦胚芽基本组分的相关分析

水分是谷物胚芽贮藏稳定性和营养品质的一个重要影响因素。含水量与小麦胚芽基本组分的相关分析如表

4 所示, 水分含量与灰分、脂肪、蛋白质、维生素 E、酸价、游离脂肪酸含量呈极显著负相关, 与氨基酸总量呈显著负相关, 与过氧化值含量不相关。说明通过不同加工方式处理新鲜小麦胚芽后, 水分上升会使得灰分、脂肪、蛋白质、维生素 E、氨基酸总量、酸价、游离脂肪酸含量显著降低。

表 3 不同加工方式对矿物质的影响(以干基计)

Table 3 Effects of different processing methods on minerals (dry basis)

加工方式	P/(g/kg)	Ca/(mg/kg)	K/(g/kg)	Mg/(g/kg)	Cu/(mg/kg)	Fe/(mg/kg)	Mn/(mg/kg)	Zn/(mg/kg)	Sr/(mg/kg)
生胚(原样)	12.83±0.06 <sup>a</sup>	619.70±4.41 <sup>a</sup>	14.33±0.15 <sup>a</sup>	3.64±0.02 <sup>ab</sup>	8.83±0.12 <sup>a</sup>	96.31±1.38 <sup>a</sup>	296.75±1.90 <sup>a</sup>	154.77±0.74 <sup>a</sup>	5.45±0.01 <sup>a</sup>
干热法	12.79±0.17 <sup>a</sup>	630.97±9.07 <sup>a</sup>	14.12±0.19 <sup>a</sup>	3.70±0.05 <sup>a</sup>	8.81±0.15 <sup>a</sup>	96.72±1.40 <sup>a</sup>	294.90±1.15 <sup>a</sup>	153.29±0.95 <sup>a</sup>	5.48±0.10 <sup>a</sup>
微波法	12.57±0.13 <sup>a</sup>	619.69±2.28 <sup>a</sup>	14.03±0.14 <sup>a</sup>	3.58±0.04 <sup>b</sup>	8.74±0.08 <sup>a</sup>	96.58±0.45 <sup>a</sup>	296.01±1.34 <sup>a</sup>	153.56±0.89 <sup>a</sup>	5.37±0.02 <sup>a</sup>
湿热法	12.59±0.13 <sup>a</sup>	621.78±6.52 <sup>a</sup>	13.99±0.12 <sup>a</sup>	3.56±0.05 <sup>b</sup>	8.86±0.10 <sup>a</sup>	96.88±1.78 <sup>a</sup>	294.56±1.00 <sup>a</sup>	154.00±1.37 <sup>a</sup>	5.44±0.07 <sup>a</sup>

注: 同列不同小写字母表示组间具有显著性差异( $P<0.05$ )。

表 4 含水量与小麦胚芽基本组分相关分析

Table 4 Correlation analysis between water content and basic fractions of *Triticum aestivum* L. germ

	水分	灰分	蛋白质	脂肪	维生素 E	氨基酸总量	酸价	过氧化值	游离脂肪酸
水分	1								
灰分	-0.994 <sup>**</sup>	1							
蛋白质	-0.998 <sup>**</sup>	0.997 <sup>**</sup>	1						
脂肪	-0.994 <sup>**</sup>	0.985 <sup>**</sup>	0.991 <sup>**</sup>	1					
维生素 E	-0.909 <sup>**</sup>	0.899 <sup>**</sup>	0.901 <sup>**</sup>	0.936 <sup>**</sup>	1				
氨基酸总量	-0.588 <sup>*</sup>	0.580 <sup>*</sup>	0.581 <sup>*</sup>	0.657 <sup>*</sup>	0.848 <sup>**</sup>	1			
酸价	-0.764 <sup>**</sup>	0.777 <sup>**</sup>	0.764 <sup>**</sup>	0.807 <sup>**</sup>	0.915 <sup>**</sup>	0.911 <sup>**</sup>	1		
过氧化值	-0.007	-0.020	-0.007	-0.072	-0.255	-0.659 <sup>*</sup>	-0.577 <sup>*</sup>	1	
游离脂肪酸	-0.763 <sup>**</sup>	0.776 <sup>**</sup>	0.762 <sup>**</sup>	0.806 <sup>**</sup>	0.914 <sup>**</sup>	0.910 <sup>**</sup>	1.000 <sup>**</sup>	-0.577 <sup>*</sup>	1

注: \*表示  $P<0.05$ , \*\*表示  $P<0.01$ 。

## 3 结论

本研究采用干热法(100 °C处理 30 min)、微波法(640 W 处理 3 min)和湿热法(常压蒸汽处理 20 min)对新鲜小麦胚芽进行处理, 并探究不同热加工方式对新鲜小麦胚芽品质的影响。结果表明, 3 种加工方式对游离脂肪酸组成均具有显著性差异( $P<0.05$ ), 以干基计的灰分、蛋白质和矿物质含量(Mg 除外)基本不变。与新鲜麦胚相比, 干热法和微波法含水量、维生素 E 含量(干基计)和氨基酸含量(干基计)下降, 烘烤和微波加工过程中, 麦胚中的水分会迅速蒸发, 导致麦胚表面温度升高, 麦胚的内部结构及性质可能发生变化, 从而影响麦胚中营养成分的保留。湿热法含水量上升, 维生素 E 含量(干基计)下降, 氨基酸含量(干基计)含量无显著性差异( $P>0.05$ )。干热法酸价、游离脂肪酸含量上升, 过氧化值含量降低; 微波法和湿热法的酸价和游离脂肪酸含量显著降低, 过氧化值含量显著上

升;。蒸汽处理时, 温度会迅速从物料表面传至内部, 而且温度与湿度能快速达到平衡, 使小麦胚中的脂肪酶活性迅速下降, 达到较好的钝化效果。基于以上研究结果, 表明湿热法有助于保护麦胚品质, 可以更好地保持小麦胚芽贮藏稳定性。

由于不同的加工方法对小麦胚芽水分含量及营养成分损失和保存期的影响不同, 在选择小麦胚芽的加工处理方法时, 应以特定的应用方向为前提, 综合考虑不同加工方法的优缺点和自身的实际情况, 达到提高其贮藏稳定性的同时有效保护其品质。因此, 当单一的加工技术不能保证最佳的小麦胚芽品质时, 可以探索两种或多种加工技术的组合应用, 不仅能尽量保持胚芽原有的营养组成和使用价值, 而且能够提高胚芽的贮藏稳定性。

## 参考文献

- [1] BRANDOLINI A, HIDALGO A. Wheat germ: Not only a by-product [J]. International Journal of Food Sciences and Nutrition, 2012, 63(Suppl.1):

- 71-74.
- [2] ZHANG ZH, CHENG WL, LI XD, *et al.* Extraction, bioactive function and application of wheat germ protein/peptides: A review [J]. *Current Research in Food Science*, 2023, 6: 100512.
- [3] 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]. *Science and Technology of Food Industry*, 2022, 43(12): 457-467.
- [4] MAJZOBI M, GHIASI F, ESKANDARI MH, *et al.* Roasted wheat germ: A natural plant product in development of nutritious milk pudding; physicochemical and nutritional properties [J]. *Foods*, 2022, 11(12): 1815.
- [5] ERIM KY. Degradation kinetic modeling of bioactive compounds and enzyme activity in wheat germ during stabilization [J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2022, 153: 112501.
- [6] 李欣, 米生权, 陈文, 等. 麦胚的营养和功能活性及发酵对其影响的研究进展[J]. *中国粮油学报*, 2021, 36(7): 195-202.  
LI X, MI SQ, CHEN W, *et al.* Research progress on nutrient composition, functional activity of wheat germ and the effects of fermentation on them [J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils*, 2021, 36(7): 195-202.
- [7] NIU RH, WANG JY, ZHOU JW, *et al.* Extrusion-controlled lipid retention and distribution of wheat germ and its application combining exogenous starch [J]. *Journal of Food Engineering*, 2024, 379: 112128.
- [8] 黄继红, 陈文静, 廖爱美, 等. 麦胚活性成分研究进展[J]. *河南工业大学学报(自然科学版)*, 2021, 42(1): 114-123.  
HUANG JH, CHEN WJ, LIAO AIM, *et al.* Review on active components of wheat-embryo [J]. *Journal of Henan University of Technology (Natural Science Edition)*, 2021, 42(1): 114-123.
- [9] MARINA C, SAHARA M, VALENTINA N, *et al.* Wheat germ agglutinin (WGA): Its nature, biological role, significance in human nutrition, and possibility to be used as marker of whole-grain status in wheat-based foods [J]. *Foods*, 2024, 13(18): 2990.
- [10] ZARGAR S, WANI TA, RIZWAN AS. An insight into wheat germ oil nutrition, identification of its bioactive constituents and computer-aided multidimensional data analysis of its potential anti-inflammatory effect via molecular connections [J]. *Life*, 2023, 13(2): 526.
- [11] DERAKHSHANDEH K, GHALAEI PM, ARYAEINEJAD S, *et al.* Wheat germ agglutinin conjugated chitosan nanoparticles for gemcitabine delivery in MCF-7 cells; synthesis, characterisation and *in vitro* cytotoxicity studies [J]. *Journal of Cancer Research and Therapeutics*, 2024, 20(1): 167-175.
- [12] 陈明霞, 陈瑶, 郑海杰, 等. 小麦胚芽组成成分及小麦胚芽油理化性质分析[J/OL]. *中国油脂*, 1-15. [2024-07-15]. <https://doi.org/10.19902/j.cnki.zgyz.1003-7969.240340>  
CHEN MX, CHEN Y, ZHENG HJ, *et al.* Analysis of wheat germ composition and physicochemical properties of wheat germ oil [J/OL]. *China Oils and Fats*, 1-15. [2024-07-15]. <https://doi.org/10.19902/j.cnki.zgyz.1003-7969.240340>
- [13] JOHN RNT, HENRIËTTE LDK, EDNA M, *et al.* Reduction in rancidity development in fortified whole-grain maize meal by hot-air drying of the grain [J]. *Cereal Chemistry*, 2024, 101(2): 323-333.
- [14] CORINA M, ANCA MB, IULIA CM, *et al.* Comparative analysis of vitamin, mineral content, and antioxidant capacity in cereals and legumes and influence of thermal process [J]. *Plants*, 2024, 13(7): 1037.
- [15] MERILES SP, PENCI MC, CURET S, *et al.* Effect of microwave and hot air treatment on enzyme activity, oil fraction quality and antioxidant activity of wheat germ [J]. *Food Chemistry*, 2022, 386: 132760.
- [16] 张楠, 石琳, 孟继坤, 等. 不同处理技术对小麦胚芽钝酶效果及贮藏稳定性的影响[J]. *食品与机械*, 2021, 37(8): 140-145.  
ZHANG N, SHI L, MENG JK, *et al.* Effects of different technologies on enzyme deactivation and storage stability of wheat germs [J]. *Food & Machinery*, 2021, 37(8): 140-145.
- [17] 李波. 小麦胚芽脂质快速酸败机制及稳定化研究[D]. 无锡: 江南大学, 2017.  
LI B. Study on mechanism of rapid rancidity of wheat germ lipids and its stabilization technology [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2017.
- [18] 傅苏芳. 小麦胚芽贮藏稳定性研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2008.  
FU SF. The study of stabilization in storage of wheat germ [D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2008.
- [19] 冯梦迪. 玉米胚芽储藏稳定性的研究及其调控[D]. 郑州: 河南工业大学, 2021.  
FENG MD. Study on storage stability and quality control of corn germ [D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2021.
- [20] 吴艳博. 小麦胚芽在线稳定化技术研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2008.  
WU YB. Studies on stabilization of wheat germ on-line [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2008.
- [21] 叶明星. 小麦胚提取工艺和稳定化处理对麦胚品质影响的研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2016.  
YE MX. Research on extraction technology of wheat germ and effects of stabilization treatment on quality of wheat germ [D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2016.
- [22] 徐亦驰, 方梦雪, 汪雪芳, 等. 小麦胚芽油化学组成与功能特性研究进展[J]. *食品安全质量检测学报*, 2023, 14(8): 265-274.  
XU YC, FANG MX, WANG XF, *et al.* Advances in chemical composition and functional characteristics of wheat germ oil [J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2023, 14(8): 265-274.
- [23] 徐斌, 董英, 吴艳博. 小麦胚芽的微波在线稳定化试验[J]. *农业机械学报*, 2009, 40(8): 134-138.  
XU B, DONG Y, WU YB. Study on technology of stabilized storage of wheat germ by on-line microwave processing [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machine*, 2009, 40(8): 134-138.
- [24] ARSLAN D, DEMIR MK, ACAR A, *et al.* Investigation of wheat germ and oil characteristics with regard to different stabilization techniques [J]. *Food Technology and Biotechnology*, 2020, 58(3): 348-355.
- [25] 严斌, 刘丽娅, 钟葵, 等. 基于 ICP-MS 的不同来源小麦胚芽矿物元素对比分析[J]. *中国粮油学报*, 2016, 31(11): 7-12.  
YAN B, LIU LY, ZHONG K, *et al.* Comparative analysis of mineral elements based on ICP-MS in wheat germ from different sources [J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2016, 31(11): 7-12.
- [26] Food Data, Version 5.1, National Food Institute. Technical university of Denmark [EB/OL]. (2023-03-19) [2024-12-25]. <https://frida.fooddata.dk>
- [27] 辛颖, 冯梦迪, 陈复生. 不同处理方式对玉米胚芽理化品质影响的研究[J]. *河南工业大学学报(自然科学版)*, 2020, 41(3): 6-11.  
XIN Y, FENG MD, CHEN FS. Effects of different stabilizing treatments on physicochemical properties of corn germ [J]. *Journal of Henan University of Technology (Natural Science Edition)*, 2020, 41(3): 6-11.
- [28] 黄颖, 郑畅, 刘昌盛, 等. 微波预处理紫苏籽对其油脂品质及抗氧化特性的影响[J]. *粮食与油脂*, 2019, 32(5): 48-50.  
HUANG Y, ZHENG C, LIU CS, *et al.* Effect of microwave pretreatment of *Perilla* seed on its oil quality and antioxidant properties [J]. *Cereals & Oils*, 2019, 32(5): 48-50.
- [29] WANG T, JOHNSON LA. Refining high-free fatty acid wheat germ oil [J]. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 2001, 78(1): 71-76.
- [30] OZCAN MM, AL-JUHAIMI F, GHAFOR K, *et al.* Effect of heating process on oil yield and fatty acid composition of wheat germ [J]. *Quality Assurance and Safety of Crops & Foods*, 2015, 7(4): 517-520.
- [31] 李进伟, 蹇李鸽, 刘元法. 小麦胚芽微波稳定化及其对小麦胚芽油品质的影响[J]. *中国油脂*, 2016, 41(5): 39-44.  
LI JW, QIAN LG, LIU YF. Microwave stabilization of wheat germ and its effects on quality of wheat germ oil [J]. *China Oils and Fats*, 2016, 41(5): 39-44.

(责任编辑: 于梦娇 蔡世佳)