

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. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2021070110

LIU Yue, CHOU Jiandong, CHEN Yuezhang, 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. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2021070110

· 专题综述 ·

小麦胚芽的营养功能成分及综合利用研究进展

刘月^{1,2}, 丑建栋³, 陈玥璋³, 曾辉³, 张柏林², 宋昊^{3,*}
(1.北京一轻控股有限责任公司博士后工作站, 北京 100022;
2.北京林业大学生物科学与技术学院, 北京 100083;
3.北京一轻研究院有限公司, 北京 101111)

摘要: 小麦胚芽是制粉产业的重要副产物, 含有丰富的基本氨基酸、脂肪酸、矿物质、维生素以及生理活性物质。但由于其内源酶活性高、不饱和脂肪酸含量丰富, 小麦胚芽快速酸败变质的特性极大的限制了其深加工产业的发展。因此, 本文介绍了几种小麦胚芽的稳定化技术, 并总结了小麦胚芽的综合利用现状。同时, 对小麦胚芽营养成分及功能活性研究存在的局限性, 综合利用率低等问题进行了分析和探讨, 并展望了进一步研究方向与潜在的应用前景, 旨在为小麦胚芽资源的合理利用提供参考。

关键词: 小麦胚芽, 营养成分, 稳定技术, 综合利用

中图分类号: TS213

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2022)12-0457-11

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2021070110



本文网刊:

Advances on Nutritional Functional Components and Comprehensive Utilization of Wheat Germ

LIU Yue^{1,2}, CHOU Jiandong³, CHEN Yuezhang³, ZENG Hui³, ZHANG Bolin², SONG Hao^{3,*}

(1. Postdoctoral Workstation, Beijing Yiqing Holding Co., Ltd., Beijing 100022, China;

2. College of Biological Sciences and Biotechnology, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;

3. Beijing Industrial Technology Research Institute Ltd., Beijing 101111, China)

Abstract: Wheat germ is a precious by-product deriving from the milling industry, as it is a natural concentrated source of essential amino and fatty acids, minerals, vitamins, and functional active components. However, due to its high endogenous enzyme activity and rich content of unsaturated fatty acids, it tends to get acidificated and deteriorated rapidly, which seriously limits its development in deep processing industry. Therefore, the paper presents several separation and stabilization techniques that wheat germ went through, and summarizes the comprehensive utilization of wheat germ. Besides, the limitations and low comprehensive utilization rate of nutrition are being analyzed and discussed, and their further research and potential application prospect are prospected, aiming to provide a reference for reasonable utilization of wheat germ resources.

Key words: wheat germ; nutrition components; stabilization techniques; comprehensive utilization

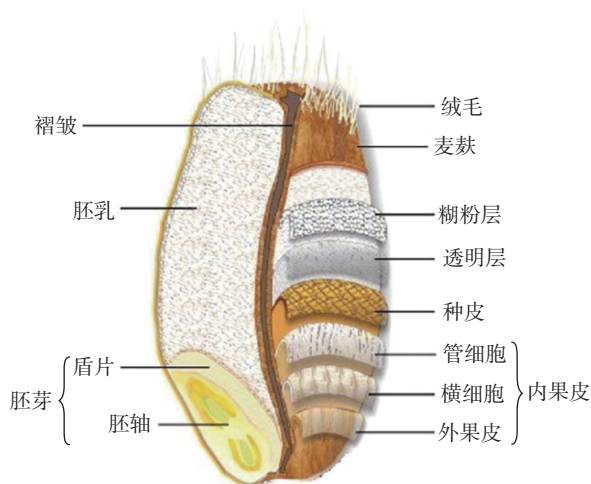
小麦是最重要的粮食作物之一, 一般通过碾磨生产面粉和其他产品。如图 1 所示, 为小麦籽粒的纵切面和横切面, 清晰的显示了小麦的基本结构以及

小麦胚芽在小麦籽粒中的具体位置。其中, 小麦胚芽约占全麦的 2.5%~3.5%, 主要由胚轴和盾片两部分组成, 是小麦制粉加工业中主要的营养副产品^[1]。

收稿日期: 2021-07-09

作者简介: 刘月 (1992-), 女, 博士, 研究方向: 饮料研发, E-mail: 839320887@qq.com。

* 通信作者: 宋昊 (1979-), 女, 博士, 高级工程师, 研究方向: 食品发酵, E-mail: songhao@bitri.cn。

图1 小麦籽粒的纵切面及横切面^[2]Fig.1 Longitudinal section and cross section of wheat grain^[2]

小麦胚芽有“天然营养宝库”之称,含有丰富的蛋白质、不饱和脂肪酸、维生素、矿物质和膳食纤维,以及一般谷物产品中缺乏的赖氨酸和苏氨酸等。此外,还含有谷胱甘肽、凝集素、二十八烷醇和黄酮等多种对人体具有特殊生理功能的营养成分,极大的提高了小麦胚芽的附加值。作为“功能性食品”的代表,小麦胚芽被证实具有抗氧化、降胆固醇、降高血压和抗癌等功效^[3]。每年世界上产生的小麦胚芽大部分用作饲料,人类在使用小麦胚芽的广度上明显受限,因此,小麦胚芽的用途亟待挖掘。本文将从营养成分、稳定化技术和综合利用方面对小麦胚芽的研究现状进行总结,为今后合理开展小麦胚芽资源的利用提供参考。

1 营养成分

小麦胚芽的基本营养成分包括蛋白质、脂类、碳水化合物、膳食纤维、维生素和矿物质,其含量如表1所示。

表1 小麦胚芽每100g中的基本营养成分含量(数据来源于中国食物成分表)

Table 1 Basic nutrient composition in wheat germ per 100 g (data comes from the China Food Composition)

营养成分	含量	营养成分	含量
能量(kcal)	403	钙(mg)	85
蛋白质(g)	36.4	磷(mg)	1168
脂肪(g)	10.1	钾(mg)	1523
碳水化合物(g)	44.5	钠(mg)	4.6
不溶性膳食纤维(g)	5.6	镁(mg)	198
灰分(g)	4.7	铁(mg)	0.6
维生素B ₁ (mg)	3.5	锌(mg)	23.4
维生素B ₂ (mg)	0.79	硒(μg)	65.2
烟酸(mg)	3.7	铜(mg)	0.83
维生素E(mg)	23.2	锰(mg)	17.3

1.1 蛋白质

小麦胚芽蛋白质占26.0%~31.5%,是一种完全蛋白。其中,含有人体必需的8种氨基酸,占总氨基酸

的34.7%,而且各类氨基酸的构成比例与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。通过ARSHAD等^[4]的鉴定,小麦胚芽包含的基本氨基酸有异亮氨酸、亮氨酸、赖氨酸、甲硫氨酸、苯丙氨酸、苏氨酸、色氨酸和缬氨酸,其中亮氨酸和赖氨酸为主要氨基酸。作为人类的第一限制性氨基酸—赖氨酸的含量高达1.85%,明显比大米、面粉蛋白中的赖氨酸含量要高,在营养学上具有重要的意义。研究表明,通过酶水解作用,可以进一步提升小麦胚芽蛋白的功能特性。KARAMI等^[5]通过分析小麦胚芽蛋白质酶解液,鉴定得到2种具有抗氧化活性的肽和5种具有血管紧张素转化酶抑制活性的肽。MATSUI等^[6]则通过分离酶解小麦胚芽蛋白产生的肽,得到序列为Ile-Val-Tyr的血管紧张素转化酶抑制肽。同时,将蛋白酶解产物进行体外试验,还表现出抗氧化和抗炎的功效^[7-8]。不仅如此,其蛋白质水解形成的多肽片段(分子质量<2000 Da)也呈现极强的钙和锌结合能力,可作为营养强化剂提高矿物质的利用率,在食品研发领域具有广阔的应用前景^[9-10]。

1.2 脂肪

小麦胚芽的脂肪含量为9.5%~13.5%,其中84%是对人体健康有益的不饱和脂肪酸。对小麦胚芽油的脂肪酸组成进行检测,共检测到14种脂肪酸,其中亚油酸(53.88%~57.55%),油酸(16.56%~20.38%)和棕榈酸(16.66%~17.70%)为主要脂肪酸^[11]。利用CO₂超临界流体萃取小麦胚芽油,发现脂肪酸的组成主要为多不饱和脂肪酸,包括亚油酸(C_{18:2})、亚麻酸(C_{18:3})、二十碳二烯酸(C_{20:2})和庚二烯酸(C_{17:2}),以及单不饱和脂肪酸包括油酸(C_{18:1})、二十碳烯酸(C_{20:1})、棕榈油酸(C_{16:1})和芥酸(C_{22:1})等^[12]。现代医学认为胆固醇水平升高与动脉粥样硬化的发生发展最为密切。高密度脂蛋白可作为胆固醇的接受体,通过与受体相互作用介导胆固醇从动脉壁内膜流出并转运之到肝脏进行代谢,从而减低血浆中的胆固醇含量,预防动脉粥样硬化的发生,而亚油酸作为一种生物调节剂,可促进体内高密度脂蛋白的代谢、降低胆固醇的含量^[13]。因此,小麦胚芽油是一种理想的营养油脂补充剂,具有抗动脉粥样硬化作用。

1.3 碳水化合物

碳水化合物是小麦胚芽各种营养成分中含量最高的组分,为42.0%~47.0%,其中,半纤维素15.3%、纤维素16.9%、淀粉31.5%、糖36.3%(蔗糖55.9%、鼠李糖38.1%、果糖2.8%、葡萄糖2.1%、蜜二糖1.1%)。小麦胚芽中含有的2%~3%的膳食纤维,具有降低血中胆固醇含量、促进肠道蠕动、预防胃肠癌发生的作用,而且可以缓解泌尿系统疾病和外围动脉疾病的发生等^[3]。

通过热处理方式对小麦胚芽的粗多糖进行提取,提取率达18.72%,进一步提取水溶性多糖,产率

为 3.84%。分析同质多糖的组分,平均分子量约为 3.34×10^6 Da, 主要含有阿拉伯糖、木糖、半乳糖和葡萄糖^[14]。通过层析柱分离小麦胚芽多糖,其平均分子量为 4.89×10^6 Da, 主要含有阿拉伯糖、木糖、半乳糖和葡萄糖,与 HU 等^[14]的研究结果一致。通过体外分析试验,发现小麦胚芽多糖可上调淋巴细胞释放促炎症因子肿瘤坏死因子- α (TNF- α)和白细胞介素-6(IL-6),参与各种炎症反应,修复体内的炎症状态^[15]。同样, YUN 等^[16]对小麦胚芽多糖进行提取,其主要成分不仅包括阿拉伯糖,木糖,半乳糖和葡萄糖,还包含鼠李糖和甘露糖, HepG2 细胞模型试验显示该多糖能提高过氧化物歧化酶和谷胱甘肽过氧化酶的表达量,从而增强抗氧化能力。不仅如此,小麦胚芽多糖还能有效提高小鼠肠道菌群的多样性和免疫功能,改善免疫过敏紊乱和相关肠道疾病,为今后食品开发提供新的思路^[17]。

1.4 维生素和矿物质

小麦胚芽中含有多种维生素,大致可以分为 V_E 和 V_B 两大类,其中 V_E 居各种植物性食品资源之首,且是含有八种结构的全价 V_E 。MARHALL 等^[18]发现小麦胚芽中含量最高的维生素为烟酸(7.4 mg/100 g),其次为维生素 B_1 (2 mg/100 g)和维生素 B_2 (0.22 mg/100 g)。与低水平维生素 E 的基础饮食相比,向小鼠饲喂 20% 的小麦胚芽能显著性增加血浆和肝脏中维生素 E 的水平,从而为心脏和肝脏脂质提供有效的抗氧化保护作用^[19]。此外,通过分别对小鼠喂食小麦胚芽和维生素 E,发现两组处理均能减轻庆大霉素对小鼠肝脏的毒害效应,并且小麦胚芽表现出来的抗氧化效果优于维生素 E^[20]。

此外,小麦胚芽中含有丰富的镁、磷、钾、锌、铁、锰等人体所必需的矿物质,尤其是必需微量元素硒的含量远高于其他食物^[21]。BILGI 等^[22]发现小麦胚芽中含量最高的矿物质是钾(1365.1 mg/100 g),其次是磷(775.2 mg/100 g),钙(365.1 mg/100 g)和镁(310.3 mg/100 g)(以干基计算)。AKTAŞ 等^[23]则发现小麦胚芽中的锌、铁、镁、钾、磷和钙含量分别为 41.71、2.50、2、750.11、769.75 和 12.50 mg/100 g(以干基计算)。同时,将小麦胚芽作为营养补充剂添加到食品中,可

显著提高产品的镁,钾,锌和锰的含量^[24]。这些矿物质对于维持人体健康,特别是对促进儿童的生长发育具有重要的作用。

1.5 生物活性物质

小麦胚芽不仅含有丰富的基本营养物质,还含有多种生物活性物质,例如多酚类化合物、二十八烷醇、小麦胚芽凝集素、谷胱甘肽等,其一般结构、含量及功效见表 2。

1.5.1 多酚类 脱脂小麦胚芽的多酚含量范围在 13.98~16.75 mg GAE/g 之间^[25]。NEMANJA 等^[36]对小麦胚芽多酚提取物的 DPPH 自由基清除能力进行测定,含量范围在 6.11~18.00 $\mu\text{mol/L}$ Trolox/g 之间。ZOU 等^[37]测定了小麦胚芽的多酚组成,共检测到 3 种主要的酚酸,即阿魏酸,绿原酸和咖啡酸,以及 4 种主要的类黄酮物质,即沙夫木昔及其异构体,芥子酸及其加合物,且随着小麦胚芽烘烤程度的增强,其抗氧化活性也得到增强,除阿魏酸外,其它酚酸均呈现下降的趋势。KOH 等^[38]对小麦胚芽中阿魏酸盐的抗氧化应激机理进行了探究,结果表明,阿魏酸盐可以调节蛋白酪氨酸激酶/蛋白酪氨酸磷酸酶的平衡,从而影响促炎核因子-B 的活性,防止由氧化压力引起的蛋白酪氨酸激酶和丝氨酸/苏氨酸蛋白磷酸酶 2A 的失活。

小麦胚芽的黄酮类物质主要是四种黄酮的衍生物:芹菜素、木犀草素、甲氧基木犀草素和麦黄酮。麦黄酮衍生物仅以 O-糖苷形式存在,而芹菜素和木犀草素以 C-糖苷形式存在^[39]。ZHENG 等^[40]通过发酵方式,可以将小麦胚芽的黄酮类物质含量提高了 13.34%。同时,小麦胚芽中糖基化黄酮类化合物在酵母或乳酸菌发酵过程中转化为相应的甙元,表现出更强的生物活性^[41]。研究表明,小麦胚芽中的黄酮类物质具有明显抑制人乳腺髓样癌细胞株 Bcap-37 的生长、克隆的形成和 DNA 合成能力^[27]。

1.5.2 小麦胚芽凝集素 小麦胚芽凝集素是指能与专一性糖结合,并促进细胞凝集和沉淀单糖或多糖复合物非免疫来源的非酶蛋白质,属于植物凝集素。小麦胚芽凝集素结构中的 N-乙酰氨基葡萄糖能特异性结合真菌细胞壁,并破坏细胞的结构完整性,表现出

表 2 小麦胚芽中生物活性物质的组成及功能活性

Table 2 Compositions and functional properties of bioactive components in wheat germ

活性物质	组成结构	含量	功效
多酚	阿魏酸,绿原酸和咖啡酸	13.98~16.75 mg/g	抗氧化 ^[25]
黄酮	芹菜素、木犀草素、甲氧基木犀草素和麦黄酮	220 $\mu\text{g/g}$	抗氧化 ^[26] 抗癌 ^[27] 抗菌 ^[28] 抗肿瘤 ^[29]
小麦胚芽凝集素	由三个同型混合物组成,均为 36.0 kDa,是由 18.0 kDa 多肽链组成的同源二聚体	0.3~0.61 mg/g	治疗白血病的潜力 ^[30] 生物医学治疗应用 ^[31]
二十八烷醇	由 8% 的六十二烷醇、67% 的二十八烷醇、12% 的三十烷醇和 13% 的其他长链醇组成	10 $\mu\text{g/g}$	降胆固醇和血脂 ^[32-33]
谷胱甘肽	由谷氨酸、半胱氨酸和甘氨酸经肽键缩合而成的含硫活性三肽	100 mg/g	抗氧化 ^[34-35]

抗菌特性^[28]。小麦胚芽凝集素还与肿瘤细胞的分化和细胞迁移有关,在抗肿瘤方面表现出一定的生物学活性^[29]。此外,低剂量的小麦胚芽的凝集素在体内和体外试验中均表现出对急性髓性白血病细胞的最大毒性,具有治疗白血病的潜力^[30]。不仅如此,小麦胚芽凝集素已被证明是各种生物医学和治疗应用的可行解决方案,例如化学疗法、靶向药物传递、抗生素抗性细菌的监测和去除^[31]。例如,在模拟肠上皮细胞中,小麦胚芽凝集素作为口服药物的载体不仅不会引起细胞的死亡,还能增强细胞的穿透性^[42]。

1.5.3 二十八烷醇 二十八烷醇是天然存在的高级醇,主要存在于蔗蜡、糠蜡、小麦胚油及蜂蜡等天然产物中,但尤以小麦胚油内含量较高,为 100 mg/kg 左右^[43]。在小麦胚芽油中,二十八烷醇主要与脂肪酸结合,以酯的形式存在。采用石油醚、氯仿、正己烷和乙醇结合不同的温度提取小麦胚芽中的二十八烷醇,发现乙醇试剂的提取效率最高^[44]。据报道,二十八烷醇具有增强耐力、精力和体力,提高反应灵敏性和应激能力,降低收缩期血压,优化肠道及消化细胞的生理形态,增强免疫细胞的免疫活性等功效^[43]。然而,近期几项研究表明,来自小麦胚芽的二十八烷醇对降低血浆低密度脂蛋白(LDL)和胆固醇并没有显著性影响^[33],其生物活性还有待进一步探究。

1.5.4 谷胱甘肽 谷胱甘肽是一种由谷氨酸、半胱氨酸和甘氨酸经肽键缩合而成的含硫活性三肽,在小麦胚芽中的含量约为 0.456%。SULLIVAN 等^[45]通过提取和沉淀等步骤得到谷胱甘肽纯化物,JI 等^[34]则通过高灵敏度和选择性的荧光探针在小麦胚芽的细胞中识别到谷胱甘肽的存在。研究表明,谷胱甘肽直接或间接参与渗透胁迫下小麦幼苗叶片的许多功

能活动,包括植物细胞中药物和激素的代谢以及 DNA、RNA 和蛋白质的生物合成,作为一种重要的内源性抗氧化剂,谷胱甘肽可以保护植物细胞免受氧化损伤^[46]。此外,小麦胚芽中的谷胱甘肽在食品中的应用,一方面提高了产品的抗氧化能力^[35],另一方面降低了面团的流变性和可加工性^[47]。

2 加工技术

2.1 小麦胚芽的分离

小麦制粉工艺是将胚乳与麦麸和胚芽分离,最后转化成面粉的过程。其中,小麦胚芽在麦粒中作为一个独立体包含在胚乳中,为了更好的从胚乳中分离小麦胚芽并避免细胞壁的破裂,在制粉阶段必须调整机器参数,循序渐进的进行小麦胚芽的分离。近年来分离流程不断改进,下面将按照时间线列出分离流程的进化图。

最原始的小麦加工方式是单一的石磨法,即通过两块厚重的石磨将小麦碾碎,而无需经过除去麸皮程序,是包含了麸皮和胚芽的整粒小麦磨成的粉,即为全麦面粉(图 2a)^[48]。

其次是传统的方法,为多重研磨-筛分系统,即将麦粒破碎、剥刮并研磨成粉的过程。通过研磨设备将胚乳与皮层分离,并根据平均粒径的大小进行筛分,得到的中间产品继续逐道研磨筛分直至胚乳研磨成粉。然而,这种方式仍然不能实现小麦胚芽的完全分离,因为一些残留的小麦胚芽附着于胚乳或麸皮(图 2b)^[49]。

小麦的现代加工方式依据的是皮磨-心磨系统,包括 4 个关键步骤:皮磨系统、渣磨系统、心磨系统和尾磨系统(图 2c)。前期通过水分调节适当水合包裹着胚乳和胚芽的多层麸皮,从而在多道研磨过程中

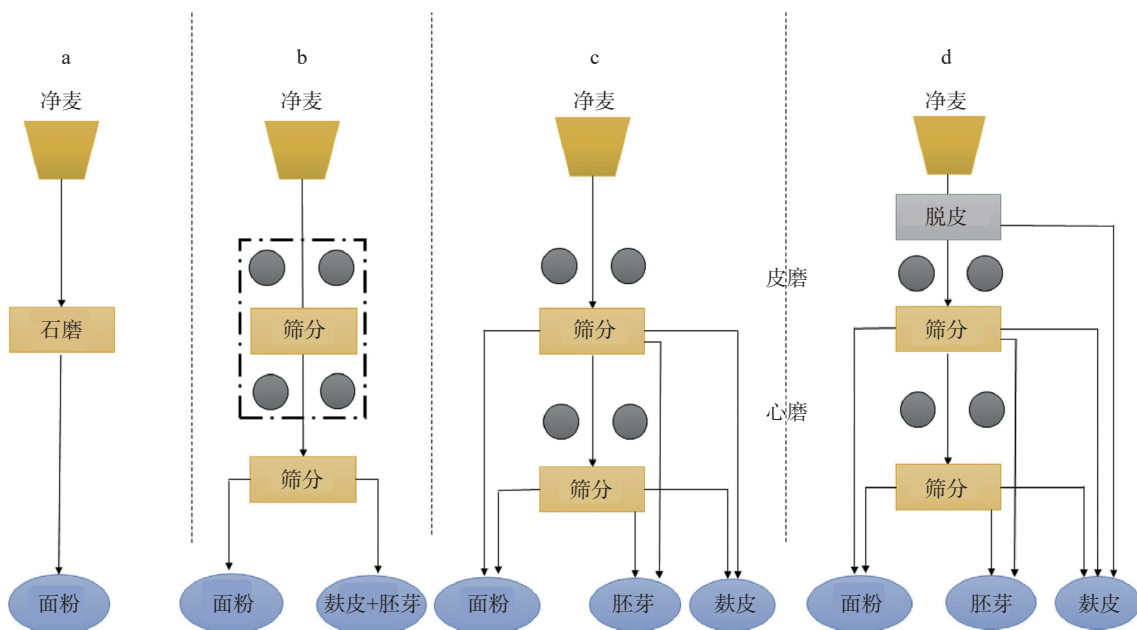


图 2 分离小麦胚芽的图解演变图^[48]

Fig.2 Graphical evolution diagram of wheat germ separation^[48]

有利于外皮层与胚乳的分离。皮磨系统包括几个连续的研磨通道。主要由两个系列的磨辊组成,第一套磨辊采用高速研磨的方式有效的将大粒径的胚乳进行研磨,而后降低研磨速度以防止胚芽发生脂肪氧化而变质,这一步主要是剥开小麦,逐道刮净皮层上的胚乳。第二套磨辊是从谷物末端剪下片状的胚芽,在加工过程中作为另一部分完成收集。渣磨系统是根据麦粒不同结构形状上的差异性,将大片的胚乳与小片的胚芽和麸皮分离开来,由于胚芽呈片状,麸皮形成低密度的小片,最终导致胚芽和麸皮的分离,并除去附着的胚乳^[50]。心磨系统是一套磨辊,可以将胚乳研磨成白面粉。尾磨系统是一套净化器,可以对前系统回收的胚乳进行净化,保证麸皮小颗粒的去除,从而生产无麸质,无胚芽的面粉^[48]。

小麦的另一种加工方式是脱皮工艺,即可以在不破碎麦粒的情况下脱去外皮,使麦粒磨碎后含有更少的麸皮,为分离胚芽提供便利,因此,前处理可以增加胚芽的回收率,但有可能会破坏胚芽的结构(图 2d)^[51]。然而,如果在研磨阶段,研磨机器设置参数没有达到最佳,可能导致脱皮制粉阶段一些胚芽被完全除去。同时,脱皮制粉工艺不适合软质小麦制粉,这会造成大量淀粉胚乳的损失^[52]。因此,胚乳的分离取决于谷物的形状、形式、研磨和筛分通道的数量以及研磨机的设置参数。

2.2 小麦胚芽的稳定化技术

小麦胚芽水分含量高,各种酶活力旺盛,特别是脂肪酶和脂肪氧化酶。当小麦胚芽从制粉过程中分离后,脂肪酶迅速将脂肪分解成脂肪酸和甘油;脂肪氧化酶作用于小麦胚芽中的不饱和脂肪酸,产生过氧化物,过氧化物进一步分解为醛、酮类物质,造成小麦胚芽变质而难以贮藏,严重制约了小麦胚芽的开发利用^[48]。因此,小麦胚芽稳定化技术需要达到几点要求: a.抑制脂肪酶和脂肪氧化酶活性,提高其贮藏稳定性; b.降低其水分活度,抑制微生物的生长; c.提取小麦胚芽油,降低不饱和脂肪酸的含量,防止小麦胚芽的酸败。如图 3,根据小麦胚芽稳定化的机理不

同,一般将其稳定化方法分为化学法、物理法和生物法。

2.2.1 化学法 脂肪酶的最适 pH 范围为 7.0~8.0,脂肪氧化酶的最适 pH 范围为 4.0~10.0,增加或降低 pH 均降低酶的活性。钝化酶的活性包括酸化(盐酸、醋酸、氢氧化钙)或者碱化(在 pH10 的条件下脂肪酶的活性基本上不受影响,而 pH12 的条件下其活性降低 93%)^[53]。此外,采用焦碳酸二乙酯、苯基甲基磺酰氟和 1-(3-二甲基氨基丙基)-3-乙基碳二亚胺对组氨酸、丝氨酸和天冬氨酸/谷氨酸残基羧基进行化学修饰,从而使小麦胚芽脂肪酶失活,结果表明 30 mmol/L 的苯基甲基磺酰氟能使酶的大部分活性丧失^[54]。然而,采用的化学试剂残留在小麦胚芽中会对产品与动物造成一定程度的危害,因此,这种方法的推广受到限制。另外,采用环保溶剂和超临界 CO₂ 对小麦胚芽油进行半间歇流动提取,通过测定酸值,过氧化值,游离脂肪酸含量,硫氰酸盐法、DPPH 自由基清除作用和氧化稳定试验对小麦胚芽油的稳定性进行表征,发现 40 °C 的提取条件获得小麦胚芽油最稳定^[55]。同时,CO₂ 还具有无毒、不易燃、不易腐蚀、便宜和可回收的优点。

2.2.2 物理法 物理法包括热处理(烘干法、蒸煮法、流化床和喷动床),辐射介导处理(微波法、红外辐射、伽马辐射),热/机械结合法(挤压熟化法)和冷冻法。

热处理法旨在灭活脂肪酶和脂肪氧化酶,同时保存小麦胚芽的营养特性。烘干法通过降低小麦胚芽水分达到抑制酶活的目的。目前,已有专用的小麦胚芽烘干机,可将小麦胚芽烘干至不同的水分,最低水分可降至 4%。蒸煮法一般在密闭系统中进行,首先通入热蒸汽使原料水分含量增加,再干燥最后冷却。由于水良好的传热介质,水分越高,酶的耐热性越差。GILI 等^[56] 研究发现,通过蒸煮法处理后的小麦胚芽,经 30 d 的储藏,其质量指数(脂肪酸和氧化值)低于法规限量。流化床和喷动床都是通过流体对小麦胚芽加热,从而降低水分含量和酶活性,从而

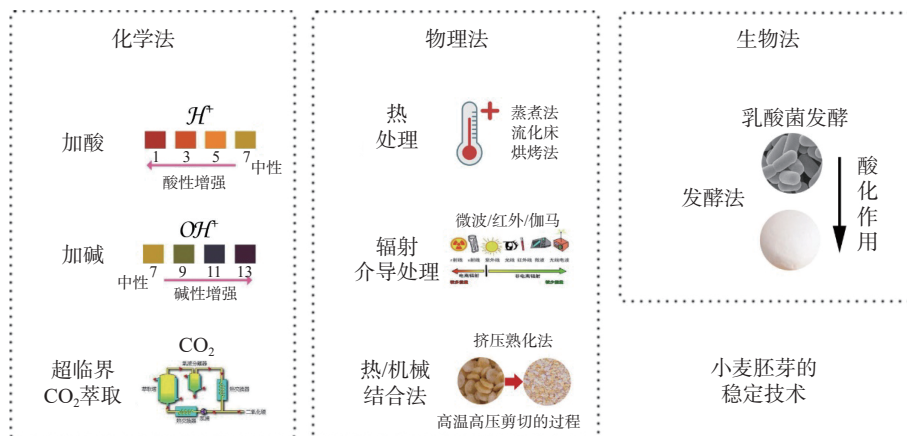


图 3 小麦胚芽的稳定化技术

Fig.3 Wheat germ stabilization strategies

有效的稳定小麦胚芽。CHAN 等^[57] 则开发出一种低温干燥流化床的加工方式,该加工方式相对于高温处理,可有效减少小麦胚芽的营养,颜色和风味损失。然而,流化床和喷动床均需要大量的资金投资设备,从而限制了工业化应用。

微波加热具有穿透力强,加热均匀,速度快,时间短,对营养物质损失少的优点,通过微波加热可以达到灭酶、灭菌和干燥产品的功效,CHEN 等^[58] 的研究发现,微波灭活小麦胚芽脂肪酶是基于热效应,而不是非热效应,该方法如今已经成为了加工小麦胚芽的主要方法。研究表明,类似于微波热处理的射频技术也可有效的灭活小麦胚芽中的脂肪酶、过氧化物酶、多酚氧化酶和脂肪氧化酶,辅以热空气可改善加热的均匀性和酶灭活的效率^[59]。同理,红外射线和伽马辐射均能够达到灭活脂肪酶的效果。其中,红外射线处理(90 °C/20 min)能保留 96.43% 的维生素 E,同时使脂肪酶和脂肪氧化酶的活性分别降低至 18.02% 和 19.21%^[60];通过伽马辐射可钝化 31.2% 的脂肪酶活性,但对小麦胚芽的营养成分(水分,灰分,粗脂肪,游离脂肪酸和蛋白质)却无显著性的影响^[61]。

挤压熟化法是一个高温高压的剪切过程,通过挤压机能产生足够的摩擦热以杀死脂肪酶、细菌和其他微生物,防止污染,以达到稳定小麦胚芽,延长保质期的目的。吴琼等^[62] 通过挤压法生产稳定化的小麦胚芽,经挤压处理后,小麦胚芽的脂肪酶和脂肪氧化酶的灭活率分别达到 90% 和 86%,灭菌率达 92%,其营养成分损失少,室温下贮藏 3 个月后仍可安全食用。

冷冻法是将加工回收的小麦胚芽立即冷冻保

藏,从而保证小麦胚芽的新鲜并防止进一步酸败。采用冷冻法处理小麦胚芽提取物胶囊,结果显示,产品的 DPPH 自由基清除能力高达 5%,而脂肪酶活性仅为 0.12 μmol 对硝基苯酚/min^[63]。然而,该方法的冷藏设备需要耗费很高的成本,因此,使用这种方法的人并不多^[64]。

2.2.3 生物法 生物稳定的方法指通过乳酸菌发酵引起酸化,从而抑制脂肪酶和脂肪氧化酶的活性,提高小麦胚芽的稳定性。通过发酵小麦胚芽,其脂肪氧化酶的活性降低了 2.6 倍,来自脂肪氧化的香气化合物也发生显著性的下降。同时,游离氨基酸的浓度增加了 50%,蛋白质的体外效化能力,总酚含量、植酸和抗氧化活性也得到增强^[65]。

3 综合应用

以小麦胚芽为辅料生产加工的产品包括馒头、面包、面条/通心粉、焙烤食品、饮料,豆制品和保健品等,不但可以增强产品的营养价值,还能改善产品的外观、口感和风味。以小麦胚芽为主料生产加工的产品包括饮料、小麦胚芽片等休闲食品,这些产品的营养价值极高,可满足消费者的健康需求(图 4)。

3.1 馒头

通过向面粉中添加小麦胚芽,可影响面团的流变特性。研究表明,添加小麦胚芽粉的面粉,其糊化温度增加,粘度降低^[66],同时还增加了储藏期面团的保水性^[67]。此外,添加烘烤的小麦胚芽能削弱面团的面筋网络结构,从而影响馒头面团的黏弹性能^[68]。不仅如此,面团的抗拉伸性和延展性也发生显著性下降,使面团在受到抵抗力的作用下容易发生断裂^[69]。

韩俊俊等^[70] 研究了小麦胚芽粉的添加量对终产

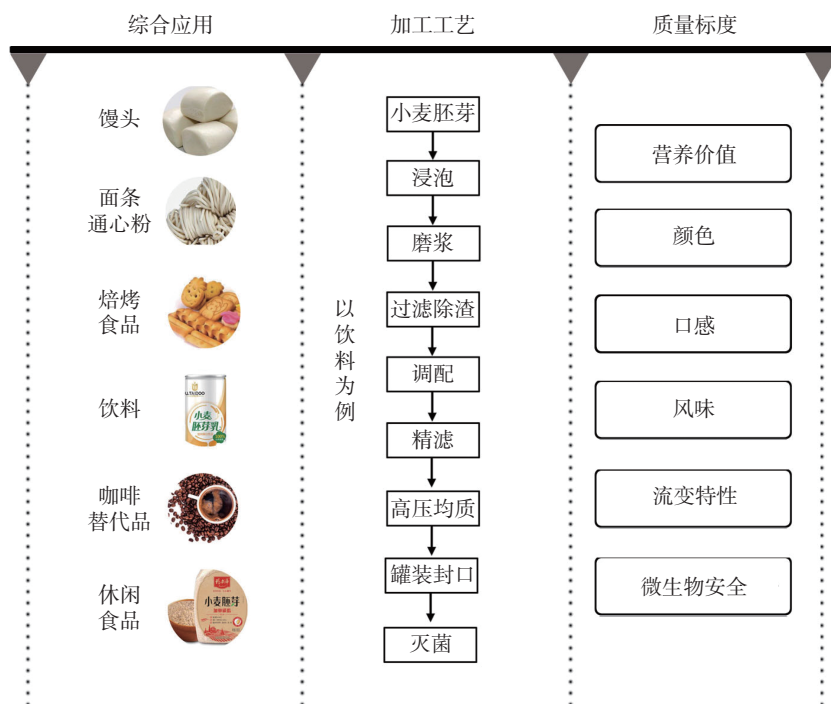


图 4 小麦胚芽的综合利用

Fig.4 Comprehensive utilization of wheat germ

品馒头品质的影响,结果表明,馒头的白度和比容均随着小麦胚芽粉含量的增加而呈下降趋势,馒头硬度呈现先平缓后上升的趋势,在加入量为 6% 时馒头的感官评分最高。MA 等^[71]的研究结果表明,添加小麦胚芽能降低馒头的亮度,增加黄色调,感官评价表明添加量低于 3% 时即能获得消费者可接受的质量属性。

3.2 通心粉和面条

通心粉和面条看起来相似,却有许多不同之处:
a.来源:通心粉来自欧洲,面条来自亚洲;
b.原材料:通心粉由硬质小麦粉制作,而面条由普通面粉制作;
c.加工方式:通心粉是挤压或者压片,而面条采用卷切的方式^[72]。

研究表明,添加小麦胚芽不仅能影响面条的营养特性(氨基酸组成,矿物质和维生素 B),还能影响面条的品质特性(吸水率、断条率、蒸煮损失率、硬度、咀嚼性和弹性等)^[73-74]。营养上,添加 20% 的小麦胚芽能显著性的提高面条的营养物质含量^[75]。外观上,添加小麦胚芽增加了面条(15% 脱脂小麦胚芽)和通心粉(10%~20% 小麦胚芽)的红色指数但降低了黄色指数。风味上,添加 10%~20% 的生小麦胚芽和微波处理的小麦胚芽,得到的通心粉与对照具有相似的质地,口感和整体感官分数;但是当添加量超过 20% 时,其风味的接受度降低^[76]。

从微生物角度分析,通心粉具有较低的水分活度,被认为是一种安全的产品。当添加 15% 的生小麦胚芽和微波处理的小麦胚芽,通心粉经过 1 年的储藏,其感官特性并没有发生显著性的变化^[77]。然而,TARZI 等^[76]发现,添加 10%~20% 的未处理的小麦胚芽时,通心粉的细菌量较对照组更高。当添加 15% 的热处理的小麦胚芽(110 °C, 35 min)时,储藏 6 个月,通心粉的细菌量与对照之间无显著性差别;储藏至 12 个月后,其真菌和酵母(100 CFU/g)高于对照组(50 CFU/g)。因此,向通心粉中添加烘烤的小麦胚芽,在 6 个月的储藏期内,仍能保证产品的安全。

3.3 焙烤食品

对于面包而言,添加小麦胚芽能影响产品的营养(植酸酶和抗氧化活性)、质地(比容、总面积、硬度、延展性、回弹性和易碎性)、发酵特性和风味特性^[69,78]。此外,添加小麦胚芽,还能增加饼干的蛋白质、脂肪、矿物质和膳食纤维的含量,增强蛋糕的矿物质(钙、铜、铁、锰、磷、钾和锌)含量,并且明显增强松饼的镁含量^[79]。

研究表明,小麦胚芽的粒度极大的影响面团的流变特性,当小麦胚芽的粒度从 280 μm 增加至 1195 μm,会引起面团稠度和密度的增加,但仍然保留加工性,其中,添加小粒度(280 μm)的小麦胚芽(添加量高至 20%)的饼干最受消费者的喜爱^[80]。PETROVIC 等^[81]发现饼干屑的黄色指数随着小麦胚芽添加量的增加而增加(5%~15%),但其外观颜色更加依赖于小

麦胚芽粒度的大小(150~2000 μm)而非添加量。

小麦胚芽的添加量对产品接受度的影响也有大量的研究。例如,当小麦胚芽的添加量超过 20% 时,面包的接受度降低^[82]。通过对酥饼进行风味分析,发现小麦胚芽的添加量在 0~10% 的范围内,产品的整体接受程度没有受到显著性的影响;当小麦胚芽的添加量更高时,产品的口感和质地属性的质量显著性下降。当小麦胚芽添加至饼干的含量高至 20% 时,产品的蛋白质和矿物质含量得到增加,脂肪和碳水化合物含量以及卡路里发生下降,同时产品的风味接受度也得到改善^[83]。

3.4 饮料

国内不少学者开展了酶法或非酶法制备小麦胚芽蛋白饮料及氨基酸营养液的研究,而国外还未见此方面的报道。唐云等^[84]研究了小麦胚芽酶解生产高营养天然小麦胚芽植物蛋白饮料。此外,小麦胚芽也可以与大豆、奶粉、玉米等混合制作复合饮料^[85-86]。在国外,以小麦胚芽为基底的发酵产品在功能饮料行业展现出广阔的市场前景,目前,国外市场上已经出现了几款添加小麦胚芽的益生饮料。

例如,在牛油牛奶和甜乳清中均加入新鲜的磨碎的小麦胚芽,当添加量为 2% 时,增加了产品的黄色指数、粘度和抗氧化活性,此时风味最佳^[87]。小麦胚芽还作为营养强化剂用于酸奶发酵,能增加发酵产品的粘度,还能增加产品的铁、钾、锌、磷、镁、不饱和脂肪酸和纤维的含量,通过提高增加草莓、香蕉、可可和巧克力风味提高消费者对产品的喜好度^[88]。此外,在冷冻乳制品甜点中添加不同水平的小麦胚芽(0~10%),可加深产品的颜色,增加硬度,粘结性和胶着性,但是降低了弹性;当添加量为 10% 时,产品的接受度降低,这可能与甜品出现的豆腥风味、不愉悦气味和硬质地的特性相关。因此,向冷冻乳制品甜点中添加不超过 5% 的小麦胚芽,可获得最佳的口感^[89]。

3.5 其他新兴的小麦胚芽应用

烘烤的小麦胚芽含有的香气物质也呈现在烘烤的咖啡中,例如 2-甲基丁醇、3-甲基丁醇、2-甲基呋喃和 2,3-丁二酮,且含量都很高^[90]。气味轮廓分析表明,咖啡替代品(添加小麦胚芽)和真正的咖啡具有相似的风味轮廓^[90]。此外,菊苣和小麦胚芽(1:1, w/w)的混合物经烘烤(0.5 h, 180 °C),挤压磨碎后,进行风味分析(感官性状与咖啡类似),结果鉴定出超 90 种香气化合物,这些物质也出现在真正的咖啡和咖啡替代品(添加小麦胚芽)中。

此外,小麦胚芽还可用于制作麦胚豆腐、胚芽酱油、胚芽大豆粉、小麦胚芽豆奶等豆制品;小麦胚芽保健食品主要有小麦胚芽营养调和油胶丸、麦胚儿童保健食品、麦胚老年保健食品等;在欧美利用小麦胚芽烘烤成坚果(核桃、栗子)样的具有香味的各种小食品;各式各样的麦胚片也可作为休闲小食品

食用^[83,91]。

4 结论和展望

由于小麦胚芽富含营养物质,维生素E,维生素B,膳食纤维,多不饱和脂肪酸和矿物质等,在未来将呈现巨大的应用前景。目前,对小麦胚芽的化学成分和功能活性的研究已经取得较大进展,但依旧存在不足和局限性。对小麦胚芽的化学成分评价不够全面和透彻,主要集中在蛋白质、脂肪、碳水化合物、维生素等基本营养成分,多酚、黄酮等小分子活性成分尚未广泛定性。对功能活性的研究也多局限于蛋白多肽、多糖领域,未充分研究多酚、黄酮及其他小分子活性物质,以及脂多糖、谷胱甘肽、二十八烷醇等大分子的生理功能、提取纯化方法、结构解析和生物活性,这极大地限制了小麦胚芽的相关应用,未来小麦胚芽的生物活性物质的研究将是重点方向之一。

小麦胚芽的稳定性限制了其应用范围,目前,已发展了多种成熟的方法用于小麦胚芽的稳定,其中,物理加热法的效率最高,但高温和长时间的处理对小麦胚芽的营养价值产生一定的负面影响。同时,采用的设备往往存在成本高,占地大的问题,从而限制了工业化的应用。化学法无法满足消费者对产品自然健康无污染的要求,而生物法基本上能满足消费者的需求,但是存在效果不佳的问题。因此,未来应在加工设备的升级和提高生物发酵的效果上继续探索,以进一步提高小麦胚芽的稳定性并扩大其应用范围。

目前,小麦胚芽相关的创新食品主要集中在烘焙和面食制品,且以添加少量为宜,过量添加反而降低消费者的接受度。然而,小麦胚芽具有营养价值高,富含多种功能性成分的优势,符合目前消费者日益追求的健康消费理念,未来在功能性食品的开发领域具有巨大的应用潜力。因此,研究人员需要利用小麦胚芽资源优势,一方面,提取小麦胚芽的营养和功能性成分,用于开发营养性和功能性食品;另一方面,采用新的技术和手段改善小麦胚芽的风味,开发出完全以小麦胚芽为原料的食品,同时保证产品的营养风味和消费者接受度。这对进一步推动小麦胚芽的研究和健康行业的发展都具有非常重要的意义。

参考文献

[1] 林家永. 2018—2019年我国小麦加工科研概况与建议[J]. 粮油食品科技, 2020, 28(3): 61-68. [LIN J Y. The overview and recommendations of China's wheat processing research in 2018-2019[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2020, 28(3): 61-68.]

[2] GHAFOR K, ÖZCAN M M, AL-JUHAIMI F, et al. Nutritional composition, extraction, and utilization of wheat germ oil: A review[J]. European Journal of Lipid Science and Technology, 2017, 119(7): 1-12.

[3] 赵静, 韩加. 小麦胚芽的营养与健康保健功能最新研究进展[J]. 粮食与食品工业, 2021, 28(1): 24-32. [ZHAO J, HAN J. The latest research progress on nutrition and health care function of wheat germ[J]. Cereal and Food Industry, 2021, 28(1): 24-32.]

[4] ARSHAD M U, ANJUM F M, ZAHOR T. Nutritional assessment of cookies supplemented with defatted wheat germ[J]. Food Chemistry, 2007, 102(1): 123-128.

[5] KARAMI K, PEIGHAMBARDUST S H, HESARI J, et al. Identification and synthesis of multifunctional peptides from wheat germ hydrolysate fractions obtained by proteinase K digestion[J]. Journal of Food Biochemistry, 2019, 43(4): e12800.

[6] MATSUI T, LI C H, TANAKA T, et al. Depressor effect of wheat germ hydrolysate and its novel angiotensin I-converting enzyme inhibitory peptide, Ile-Val-Tyr, and the metabolism in rat and human plasma[J]. Biological & Pharmaceutical Bulletin, 2000, 4: 427-431.

[7] SUI H, WANG F, WENG Z, et al. A wheat germ-derived peptide YDWPGRN facilitates skin wound-healing processes[J]. Biochemical and Biophysical Research Communications, 2020, 524(4): 943-950.

[8] WANG F, WENG Z B, LYU Y, et al. Wheat germ-derived peptide ADWGGPLH abolishes high glucose-induced oxidative stress via modulation of the PKC ζ /AMPK/NOX4 pathway[J]. Food & Function, 2020, 11(8): 6843-6854.

[9] ZHU K X, WANG X P, GUO X N. Isolation and characterization of zinc-chelating peptides from wheat germ protein hydrolysates[J]. Journal of Functional Foods, 2015, 12: 1223-1232.

[10] LIU F R, WANG L, WANG R, et al. Calcium-binding capacity of wheat germ protein hydrolysate and characterization of peptide-calcium complex[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2013, 61(31): 7537-7544.

[11] ZCAN M M A, AL-JUHAIMI F B, GHAFOR K B, 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, 4: 517-520.

[12] PARCZEWSKA-PLESNAR B, BRZOZOWSKI R, GWARDIAK H, et al. Wheat germ oil extracted by supercritical carbon dioxide with ethanol: Fatty acid composition[J]. Grasas Y Aceites, 2016, 67(3): 1-8.

[13] DEN HARTIGH L J. Conjugated linoleic acid effects on cancer, obesity, and atherosclerosis: A review of pre-clinical and human trials with current perspectives[J]. Nutrients, 2019, 11(2): 370.

[14] HU L, LIU R, WU T, et al. Structural properties of homogeneous polysaccharide fraction released from wheat germ by hydrothermal treatment[J]. Carbohydrate Polymers, 2020, 240: 1-9.

[15] YUN L, WU T, LIU R, et al. Structural variation and microrheological properties of a homogeneous polysaccharide from wheat germ[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2018, 66(11): 2977-2987.

[16] YUN L, WU T, MAO Z, et al. A novel wheat germ polysaccharide: Structural characterization, potential antioxidant activities and mechanism[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 165: 1978-1987.

[17] YUN L, LI W, LIU Y, et al. Regulation of wheat germ polysaccharides in the immune response of mice from newborn to adulthood associated with intestinal microbiota[J]. Food & Function, 2020, 11(11): 9662-9674.

- [18] MARSHALL P A, VANDEPEER J M, JASMINE M, et al. The development and evaluation of secondary food reference materials for the determination of cholesterol, fatty acids and selected water-soluble vitamins in foods[J]. *Food Chemistry*, 1997, 58(3): 269–276.
- [19] LEENHARDT F, FARDET A, LYAN B, et al. Wheat germ supplementation of a low vitamin E diet in rats affords effective antioxidant protection in tissues[J]. *Journal of the American College of Nutrition*, 2008, 2: 222–228.
- [20] KANDEIL M A M, HASSANIN K M A, MOHAMMED E T, et al. Wheat germ and vitamin E decrease BAX/BCL-2 ratio in rat kidney treated with gentamicin[J]. *Beni-Suef University Journal of Basic and Applied Sciences*, 2018, 7(3): 257–262.
- [21] 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 L Y, ZHONG K, et al. Comparative analysis of mineral elements based on ICP-MS in wheat germ from different sources[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2016, 31(11): 7–12.]
- [22] BILGI L N, ELG N A, HERKEN E N, et al. Effect of wheat germ/bran addition on the chemical, nutritional and sensory quality of tarhana, a fermented wheat flour-yoghurt product[J]. *Journal of Food Engineering*, 2006, 77(3): 680–686.
- [23] AKTAŞ K, BILGIÇLI N, LEVENT H. Influence of wheat germ and β -glucan on some chemical and sensory properties of Turkish noodle[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2015, 52(9): 6055–6060.
- [24] YELIZ T, GÜLŞAH Ç K, EDIBE S E, et al. Determination of the effect of wheat germ on the mineral and fatty acid composition and aroma compounds of tarhana: A traditional fermented cereal food[J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2021, 45: e15144.
- [25] ZHU K X, LIAN C X, GUO X N, et al. Antioxidant activities and total phenolic contents of various extracts from defatted wheat germ[J]. *Food Chemistry*, 2011, 126(3): 1122–1126.
- [26] 罗松明, 张志清, 向建军, 等. 小麦胚芽中黄酮类物质的超临界 CO₂ 萃取及其抗氧化作用[J]. *食品工业科技*, 2012, 33(1): 272–274. [LUO S M, ZHANG Z Q, XIANG J J, et al. Research on the SFE CO₂ conditions for flavonoids from wheat germ and its anti-oxidation[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2012, 33(1): 272–274.]
- [27] JEONG H Y, CHOI Y S, LEE J K, et al. Anti-inflammatory activity of citric acid-treated wheat germ extract in lipopolysaccharide-stimulated macrophages[J]. *Nutrients*, 2017, 9(7): 730.
- [28] LIEDKE S C, MIRANDA D Z, GOMES K X, et al. Characterization of the antifungal functions of a WGA-Fc (IgG2a) fusion protein binding to cell wall chitin oligomers[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 12187.
- [29] VEDTOFTE P, DABELSTEEN E. Receptors for the lectins wheat germ[J]. *Acta Pathologica Microbiologica Scandinavica Section A Pathology*, 1981, 89: 439–449.
- [30] BRADLEY R, KEMAN Z, ABHISHEK A, et al. Wheat germ agglutinin as a potential therapeutic agent for leukemia[J]. *Frontiers in Oncology*, 2019, 9: 100.
- [31] BALČIŪNAITĖ-MURZIENĖ G, DZIKARAS M. Wheat germ agglutinin—from toxicity to biomedical applications[J]. *Applied Sciences*, 2021, 11(2): 884.
- [32] BRANDOLINI A, HIDALGO A. Wheat germ: Not only a by-product[J]. *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, 2012, 63(1): 71–74.
- [33] LIN Y A, RUDRUM M A, VAN DER WIELEN R P J A, et al. Wheat germ policosanol failed to lower plasma cholesterol in subjects with normal to mildly elevated cholesterol concentrations [J]. *Metabolism: Clinical and Experimental*, 2004, 10: 1309–1314.
- [34] JI X H, ZHANG D, LI L, et al. Efficient β -carboline alkaloid-based probe for highly sensitive imaging of endogenous glutathione in wheat germ tissues[J]. *International Journal of Analytical Chemistry*, 2020, 2020: 1–7.
- [35] TOMASZ P. Effect of ozone treatment on glutathione (GSH) status in selected berry fruit[J]. *Phytochemistry*, 2021, 187: 112767.
- [36] NEMANJA T, NEMANJA B, DUŠAN R, et al. Defatted wheat germ as source of polyphenols—optimization of microwave-assisted extraction by RSM and ANN approach[J]. *Chemical Engineering & Processing: Process Intensification*, 2019, 143: 107634.
- [37] ZOU Y, YANG M, ZHANG G, et al. Antioxidant activities and phenolic compositions of wheat germ as affected by the roasting process[J]. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 2015, 9: 1303–1312.
- [38] KOH E M, LEE E K, SONG C H, et al. Ferulate, an active component of wheat germ, ameliorates oxidative stress-induced PTK/PT imbalance and PP2A inactivation[J]. *Toxicology Research*, 2018, 34(4): 333–341.
- [39] GENG P, SUN J H, ZHANG M L, et al. Comprehensive characterization of C-glycosyl flavones in wheat (*Triticum aestivum* L.) germ using UPLC-PDA-ESI/HRMSⁿ and mass defect filtering [J]. *Journal of Mass Spectrometry*, 2016, 51(10): 914–930.
- [40] ZHENG Z Y, GUO X N, ZHU K X, et al. The optimization of the fermentation process of wheat germ for flavonoids and two benzoquinones using EKF-ANN and NSGA-II[J]. *RSC Advances*, 2016, 6(59): 53821–53829.
- [41] HUR S J, LEE S Y, KIM Y C, et al. Effect of fermentation on the antioxidant activity in plant-based foods[J]. *Food Chemistry*, 2014, 160: 346–356.
- [42] PELLEGRINA C D, RIZZI C, MOSCONI S, et al. Plant lectins as carriers for oral drugs: Is wheat germ agglutinin a suitable candidate?[J]. *Toxicology and Applied Pharmacology*, 2005, 2: 170–178.
- [43] 何伟忠, 于明, 何爽. 小麦胚芽的营养保健价值及加工利用途径[J]. *新疆农业科学*, 2010, 47(2): 388–391. [HE W Z, YU M, HE S. The nutrient functional value and the application path of wheat germ[J]. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2010, 47(2): 388–391.]
- [44] DUNFORD N T, IRMAK S, JONNALA R. Pressurised solvent extraction of policosanol from wheat straw, germ and bran[J]. *Food Chemistry*, 2010, 119(3): 1246–1249.
- [45] SULLIVAN B, HOWE M. The isolation of glutathione from

- wheat germ[J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2002, 12: 2742–2743.
- [46] LI Z G, NIE Q, YANG C L, et al. Signaling molecule methylglyoxal ameliorates cadmium injury in wheat (*Triticum aestivum* L.) by a coordinated induction of glutathione pool and glyoxalase system[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2018, 149: 101–107.
- [47] ALESSANDRA M, LUISA T, MARIA C, et al. Wheat germ stabilization by heat-treatment or sourdough fermentation: Effects on dough rheology and bread properties[J]. *Lebensmittel-Wissenschaft und-Technologie*, 2014, 59(2): 1100–1106.
- [48] BOUKID F, FOLLONI S, RANIERI R, et al. A compendium of wheat germ: Separation, stabilization and food applications [J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2018, 78: 120–133.
- [49] SAKHARE S D, INAMDAR A A. The cumulative ash curve: A best tool to evaluate complete mill performance[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2014, 51(4): 795–799.
- [50] FISTES A A, TANOVIĆ G A, MASTILOVIĆ J B. Using the eight-roller mill on the front passages of the reduction system[J]. *Journal of Food Engineering*, 2008, 85(2): 296–302.
- [51] FISTES A, RAKIĆ D. Using the eight-roller mill in the purifier-less mill flow[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2014, 52(7): 4661–4668.
- [52] DE BRIER N, GOMAND S V, CELUS I, et al. Extractability and chromatographic characterization of wheat (*Triticum aestivum* L.) bran protein[J]. *Journal of Food Science*, 2015, 80(5): C967–C974.
- [53] SHARMA S, KAUR S, DAR B N, et al. Storage stability and quality assessment of processed cereal brans[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2014, 51(3): 583–588.
- [54] GOPALAKRISHNA K N, RAMESH K P, PRAKASH V. Chemical modification of catalytic site of lipase from wheat germ: Altered structure-activity profile[J]. *Indian Journal of Biochemistry & Biophysics*, 2002, 39(1): 28–34.
- [55] SIM J E, LEE J H, CHUN B S. Stability of wheat germ oil obtained by supercritical carbon dioxide associated with lipase ethanolysis[J]. *African Journal of Biotechnology*, 2013, 12(22): 3570–3575.
- [56] GILI R D, PENCI M C, RIBOTTA P D, et al. Physical characterization and fluidization design parameters of wheat germ[J]. *Journal of Food Engineering*, 2017, 212: 29–37.
- [57] CHAN D S, CHAN J S, KUO M I. Modelling condensation and simulation for wheat germ drying in fluidized bed dryer[J]. *Processes*, 2018, 6(6): 71.
- [58] CHEN Z W, LI Y L, WANG L K, et al. Evaluation of the possible non-thermal effect of microwave radiation on the inactivation of wheat germ lipase[J]. *Journal of Food Process Engineering*, 2017, 40(4): e12506.
- [59] LIAO M J, DAMAYANTI W, ZHAO Y Y, et al. Hot air-assisted radio frequency stabilizing treatment effects on physicochemical properties, enzyme activities and nutritional quality of wheat germ[J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2020, 13(5): 901–910.
- [60] LI B, ZHAO L, CHEN H, et al. Inactivation of lipase and lipoxigenase of wheat germ with temperature-controlled short wave infrared radiation and its effect on storage stability and quality of wheat germ oil[J]. *PLoS One*, 2016, 11(12): 1–13.
- [61] JHAA P K, KUDACHIKAR V B, KUMARC S. Lipase inactivation in wheat germ by gamma irradiation[J]. *Radiation Physics and Chemistry*, 2013, 86: 136–139.
- [62] 吴琼, 周国仪, 黄泽元. 小麦胚稳定化研究及小麦胚产品的开发[J]. *武汉工业学院学报*, 2007, 26(2): 27–31. [WU Q, ZHOU G Y, HUANG Z Y. A study on the stabilization of wheat germ and the development of wheat germ product[J]. *Journal of Wuhan Polytechnic University*, 2007, 26(2): 27–31.]
- [63] JAMDAR F, MORTAZAVI S A, ASL M R S, et al. Physicochemical properties and enzymatic activity of wheat germ extract microencapsulated with spray and freeze drying[J]. *Food Science & Nutrition*, 2021, 9(2): 1192–1201.
- [64] 肖亚玲. 小麦胚芽及其提取物营养价值分析及加工工艺研究进展[J]. *山东工业技术*, 2019, 7: 241. [XIAO Y L. Analysis of nutritional value of wheat germ and its extracts and research progress in processing technology[J]. *Shandong Industrial Technology*, 2019, 7: 241.]
- [65] CARLO G R, LUANA N, ROSSANA C, et al. Effect of sourdough fermentation on stabilisation, and chemical and nutritional characteristics of wheat germ[J]. *Food Chemistry*, 2010, 119(3): 1079–1089.
- [66] SUN R, ZHANG Z M, HU X J, et al. Effect of wheat germ flour addition on wheat flour, dough and Chinese steamed bread properties[J]. *Journal of Cereal Science*, 2015, 64: 153–158.
- [67] LIU X, DU X. Effect of wheat germ on moisture transfer and microstructure of steamed bread[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2018, 33(8): 1–6.
- [68] ZHAN J, MA S, XIAO X, et al. Effect of baked wheat germ on gluten protein network in steamed bread dough[J]. *International Journal of Food Science and Technology*, 2019, 54(10): 2839–2846.
- [69] MA S, ZHAN J, WANG Z, et al. Effect of baked wheat germ on the rheology and fermentation properties of steamed bread dough[J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2021, 45(6): e15546.
- [70] 韩俊俊, 刘长虹, 何学勇, 等. 小麦胚芽粉对馒头品质的影响[J]. *粮食与食品工业*, 2012, 19(6): 55–57. [HAN J J, LIU C H, HE X Y, et al. Influences of wheat germ on quality of steamed bread[J]. *Cereal and Food Industry*, 2012, 19(6): 55–57.]
- [71] MA S, WANG X X, ZHENG X L, et al. Improvement of the quality of steamed bread by supplementation of wheat germ from milling process[J]. *Journal of Cereal Science*, 2014, 60(3): 589–594.
- [72] FU B X. Asian noodles: History, classification, raw materials, and processing[J]. *Food Research International*, 2008, 41(9): 888–902.
- [73] CE Y G, SUN A D, NI Y Y, et al. Study and development of a defatted wheat germ nutritive noodle[J]. *European Food Research and Technology*, 2001, 212(3): 344–348.
- [74] 牛丽亚, 龙俊敏, 肖建辉, 等. 小麦胚芽添加量对面条品质

- 影响的研究[J]. 食品科技, 2016, 41(2): 181-184. [NIU L Y, LONG J M, XIAO J H, et al. Study on the effect of wheat germ addition on noodle quality[J]. Food Technology, 2016, 41(2): 181-184.]
- [75] KÜRSAT D M, BILGIÇLI N, TÜRKER S, et al. Enriched Turkish noodles (Erişte) with stabilized wheat germ: Chemical, nutritional and cooking properties[J]. LWT - Food Science and Technology, 2021, 149: 111819.
- [76] TARZI B G, SHAKERI V, GHAVAMI M. Quality evaluation of pasta enriched with heated and unheated wheat germ during storage[J]. Advances in Environmental Biology, 2012, 6(5): 1700-1707.
- [77] PINARLI I, IBANOĞLU Ş, ÖNER M D. Effect of storage on the selected properties of macaroni enriched with wheat germ[J]. Journal of Food Engineering, 2004, 64(2): 249-256.
- [78] RIZZELLO C G, NIONELLI L, CODA R, et al. Use of sourdough fermented wheat germ for enhancing the nutritional, texture and sensory characteristics of the white bread[J]. European Food Research and Technology, 2010, 230(4): 645-654.
- [79] YOUSSEF H M K E. Assessment of gross chemical composition, mineral composition, vitamin composition and amino acids composition of wheat biscuits and wheat germ fortified biscuits[J]. Food and Nutrition Sciences, 2015, 10: 845-853.
- [80] MAJZOBI M, DARABZADEH N, FARAHNAKY A. Effects of percentage and particle size of wheat germ on some properties of batter and cake[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2012, 14(4): 14827-836.
- [81] PETROVIĆ J A, RAKIĆ D A, FIŠTEŠ A A, et al. Defatted wheat germ application: Influence on cookies' properties with regard to its particle size and dough moisture content[J]. Food Science and Technology International, 2017, 23(7): 597-607.
- [82] AL-HOOTI S N, SIDHU J S, AL-SAQER J M, et al. Effect of raw wheat germ addition on the physical texture and objective color of a designer food (pan bread)[J]. Molecular Nutrition and Food Research, 2002, 46(2): 68-72.
- [83] KHALED M, AL-MARAZEEQ, MALAK M A. Chemical characteristic and sensory evaluation of biscuit enriched with wheat germ and the effect of storage time on the sensory properties for this product[J]. Food and Nutrition Sciences, 2017, 8(2): 189-195.
- [84] 唐云, 郭贯新. 小麦胚酶解生产高营养天然麦胚饮料[J]. 食品工业科技, 2002, 23(4): 51-53. [TANG Y, GUO G X. Enzymatic hydrolysis of wheat germ for the production of high-nutrition natural wheat germ beverage[J]. Science and Technology of Food Industry, 2002, 23(4): 51-53.]
- [85] 王滢颖, 周晨霞, 姚亚亚, 等. 小麦胚芽乳饮料配方及品质优化[J]. 河北农业科学, 2020, 24(2): 102-108. [WANG Y Y, ZHOU Z X, YAO Y Y, et al. Formula and quality optimization of wheat germ milk beverage[J]. Journal of Hebei Agricultural Sciences, 2020, 24(2): 102-108.]
- [86] 赵小艳, 孙笑雨. 玉米小麦胚芽汁饮料制作工艺的研究[J]. 现代养生, 2016, 41(3): 62-63. [ZHAO X Y, SUN X Y. Study on the production technology of corn and wheat germ juice beverage [J]. Modern Regimen, 2016, 41(3): 62-63.]
- [87] GAHRUIE H H, ESKANDARI M H, MESBAHI G, et al. Development of functional yogurt fortified with wheat germ and strawberry as functional ingredients[J]. Progress in Nutrition, 2019, 21: 388-398.
- [88] SELEET F L, ASSEM F M, ABD E G, et al. Development of a novel milk-based fermented product fortified with wheat germ[J]. International Journal of Dairy Technology, 2016, 69(2): 217-224.
- [89] MAJZOBI M, GHIASI F, FARAHNAKY A. Physicochemical assessment of fresh chilled dairy dessert supplemented with wheat germ[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2016, 51(1): 78-86.
- [90] FADEL H H M, ABDEL M M A, LOTFY S N. Quality and flavour stability of coffee substitute prepared by extrusion of wheat germ and chicory roots[J]. Amino Acids, 2008, 34(2): 307-314.
- [91] 李书国, 李雪梅, 陈辉, 等. 小麦胚芽保健食品研制与开发[J]. 粮食与油脂, 2002, 5: 10-11. [LI S G, LI X M, CHEN H, et al. Research and development of wheat germ health food[J]. Grains and Fats, 2002, 5: 10-11.]