

DOI: 10.12161/j.issn.1005-6521.2025.03.027

# 小麦麸皮综合利用存在的问题及品质提升方法

王璧莹, 张宝翼, 黄卫娟\*

(华南农业大学 食品学院, 广东 广州 510642)

**摘要:** 我国是世界上最大的小麦生产国, 麸皮为小麦制粉的主要副产物, 富含多种营养素, 在诸多领域具有良好利用价值和开发前景。该文总结麸皮的营养组成及其在各领域的利用现状, 综述小麦麸皮在应用中存在的问题, 进而提出可提升小麦麸皮可食用性的方法, 以期为我国麸皮的深度开发与高价值化利用提供理论依据和新的思路, 推动小麦麸皮的开发利用。

**关键词:** 小麦麸皮; 营养成分; 应用; 现状; 改性

## Challenges in Comprehensive Utilization of Wheat Bran and Its Quality Enhance Methods

WANG Biying, ZHANG Baoyi, HUANG Weijuan\*

(College of Food Science, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, Guangdong, China)

**Abstract:** China is the largest wheat producer in the world. Bran is the main by-product of wheat flour, rich in various nutrients and having good utilization value and development prospects in many fields. This paper summarized the nutritional composition of bran and its utilization in various fields, reviewed the existing problems in the application of bran, and proposed methods to improve wheat bran's edibility. This paper aimed to provide a theoretical basis and new ideas for the in-depth development and high-value utilization of bran in China and promote the development and utilization of wheat bran.

**Key words:** wheat bran; nutritional composition; application; current situation; modification

引文格式:

王璧莹, 张宝翼, 黄卫娟. 小麦麸皮综合利用存在的问题及品质提升方法[J]. 食品研究与开发, 2025, 46(3): 211-217.

WANG Biying, ZHANG Baoyi, HUANG Weijuan. Challenges in Comprehensive Utilization of Wheat Bran and Its Quality Enhance Methods[J]. Food Research and Development, 2025, 46(3): 211-217.

小麦是我国第三大粮食作物, 2023 年我国小麦产量为 1.37 亿 t<sup>[1]</sup>, 在全国粮食生产中占有重要地位。食用小麦在应用中通常先制成面粉, 后以面粉为主要原料加工成各类食品, 小麦在制粉过程中, 约有 23%~27% 成分以副产物形式存在, 其中小麦麸皮为主要副产物, 在副产物中占比约为 20%<sup>[2]</sup>。小麦麸皮具有重要的营养学特性, 含有纤维素、半纤维素、低聚糖等碳水化合物, 以及蛋白质、脂肪、矿物质等营养组分, 此外小麦麸皮中还存在植酸酶、 $\alpha$ -淀粉酶、 $\beta$ -淀粉酶等酶制剂, 具有维持健康体重, 降低心血管、2 型糖尿病、某些癌症的患病风险, 有益于肠道健康等功能<sup>[3]</sup>。目前我

国超过 80% 的成年居民全谷物摄入量严重不足, 大量食用精制谷物不仅不利于公众健康, 还会造成很大的食物损失和浪费<sup>[4]</sup>。我国小麦麸皮因其食用品质较差, 目前主要添加于动物饲料中, 存在深加工利用率低, 营养价值无法得到充分开发利用等困境, 且由于粗纤维含量较高, 使得其在食品工业领域中的应用较精白面更具局限性。科学合理的利用小麦麸皮并且充分发挥其营养价值, 不仅可以避免优质资源浪费, 同时对谷物加工行业具有重要意义。本文介绍小麦麸皮的组成及其作用, 讨论其高价值化综合利用及存在的问题, 进而提出改善小麦麸皮品质的方法, 以期小麦麸皮的

作者简介: 王璧莹(2003—), 女(汉), 本科在读, 研究方向: 食品科学与工程。

\*通信作者: 黄卫娟(1989—), 女, 首聘副教授, 博士, 研究方向: 食品大分子化学与材料。

开发利用提供思路。

## 1 麦麸结构

麦麸是一种传统的人类食品和动物饲料,是小麦原料在加工小麦粉过程中产生的除胚乳、胚芽以外的副产物,其含量占小麦籽粒质量的14%~15%<sup>[2]</sup>。由于小麦品种、脱皮程度以及面粉出粉率不同,麸皮出率及组成不同。麸皮结构主要由糊粉层(与种皮层紧密结合)、珍珠层表皮(透明层)、种皮、果皮(外果皮、中果皮和内果皮层)组成<sup>[5]</sup>,它包裹着胚芽和胚乳起到保护层作用。糊粉层、被皮层和果皮分别占籽粒质量的6%~9%、1%和4%~5%<sup>[2]</sup>。糊粉层是一个单层厚壁的涂层六角形细胞与壁叶结构<sup>[6]</sup>,由65%的阿拉伯木聚糖和29%的 $\beta$ -(1,3)和 $\beta$ -(1,4)葡聚糖组成。在糊粉层外层为种皮或被皮,它的厚度为5~8  $\mu\text{m}$ ,由外角质层(色素层)和内角质层组成。在被皮的侧面是7  $\mu\text{m}$ 厚的无色层,与种皮和两侧的糊粉层紧密结合,称为珍珠层(透明层)<sup>[7]</sup>。最外层的果皮,约占籽核体积的5%,具有中等厚度(15~30  $\mu\text{m}$ )<sup>[8]</sup>。果皮细胞壁中含有丰富的阿魏酸和阿魏酸二聚体,它们在多糖和蛋白质之间形成交联,使细胞壁具有刚性<sup>[9]</sup>。

## 2 麦麸成分及健康作用

麦麸作为膳食纤维的重要来源,在组织学和化学上具有异质性,主要包括膳食纤维(55%~60%)、淀粉(14%~25%)、蛋白质(13%~18%)、木质素(5%~6%)、矿物质(3%~8%)和脂肪(3%~4%)<sup>[10]</sup>。其中生物活性化合物包括膳食纤维、戊聚糖和酚类物质等。非淀粉多糖(麸皮细胞壁多糖)为麸皮主要多糖类物质,包括阿拉伯木聚糖(10.9%~26.0%)和 $\beta$ -葡聚糖(2.1%~2.5%)等,这些非淀粉多糖对小麦的品质与营养具有重要影响<sup>[11]</sup>。小麦麸皮中还含有约8%的植酸钙镁、酚酸、木酚素、类黄酮等特殊生理活性物质和核黄素、硫胺素、烟酸等物质<sup>[12]</sup>。

### 2.1 膳食纤维

膳食纤维是一种功能性成分,被称为“第七大营养素”,可分为可溶性膳食纤维和不可溶性膳食纤维,麦麸膳食纤维由阿拉伯糖和木糖附着在蛋白质上,形成戊聚糖聚合物、纤维素和半纤维素。麦麸不溶性膳食纤维主要由纤维素、木质素和高度取代的不溶性阿拉伯木聚糖组成,这些物质维持小麦籽粒外层结构<sup>[5]</sup>。麦麸中的纤维素占总膳食纤维的32.1%,由于结构中 $\beta$ -D-葡萄糖分子与1,4位连接,因此其线性聚合物形式几乎难以消化。半纤维素分布于麸皮各组织层,果皮35%~47%,中间层36%~40%,糊粉层18%~28%,占小麦籽粒膳食纤维近乎85%<sup>[13]</sup>。膳食纤维在人体小肠内虽不能被消化吸收,但却为人体健康所必需,是平衡

膳食结构的必需成分,具有多种功能活性。Liu等<sup>[14]</sup>的研究表明,来自小麦麸皮的阿拉伯木聚糖(arabinoxylan, AX)可以抑制淀粉的消化。Tong等<sup>[15]</sup>发现麸皮AX通过促进粪便脂质的排泄来降低血浆总胆固醇和低密度脂蛋白胆固醇浓度。Hartvigsen等<sup>[16]</sup>将AX添加到面包里有利于血糖控制。

### 2.2 淀粉

淀粉是麸皮可利用主要成分之一,是葡萄糖的高聚体,麸皮淀粉可以通过淀粉酶水解成糊精、葡萄糖、麦芽糖,可以作为酒精制备的原料。小麦麸皮淀粉相比小麦淀粉,在抗性淀粉含量、结晶度、膨胀势、糊化值等指标方面均优于小麦淀粉,是一种优质淀粉<sup>[17]</sup>。小麦麸皮淀粉中支链淀粉与直链淀粉之比为4.69,破损淀粉含量为1.78%。淀粉麸皮颗粒呈椭球形,平均粒径为15.86  $\mu\text{m}$ ,具有径向结晶结构,为A型结晶<sup>[18]</sup>。麸皮淀粉的直链淀粉含量、支链淀粉含量差异与小麦品种、加工方式、提取方法有关,因此其理化性质及加工特性存在差异。

### 2.3 蛋白质

麦麸蛋白质含量丰富,含量约为14%,其中包括醇溶蛋白、球蛋白、清蛋白和谷蛋白。糊粉层、被皮层和果皮层的蛋白质含量分别为22.9%、5.7%和5.1%。麸皮蛋白质被包裹在细胞壁多糖中,不利于消化吸收,且提取困难,从而限制和降低了麸皮的利用价值。麸皮蛋白质中含有人体所需的18种氨基酸,以谷氨酸、天冬氨酸、精氨酸、甘氨酸和亮氨酸等居多。这些氨基酸使其在生理和营养方面优于小麦面粉蛋白<sup>[19]</sup>。据报道,蛋氨酸和胱氨酸这两种必需氨基酸主要存在于小麦的麸皮部分<sup>[20]</sup>,小麦精加工中麸皮的大量剔除,导致精制面粉中必需氨基酸(赖氨酸、苏氨酸和蛋氨酸)的数量减少。小麦麸皮可制备抗冻蛋白,可以有效地防止冷冻贮藏食品中冰晶的形成,提高冷冻食品品质。麸皮蛋白具有良好的乳化和起泡能力,可以用于面包、蛋糕等产品加工中<sup>[21]</sup>。

### 2.4 酚类化合物

酚类化合物是芳烃的含羟基衍生物,是小麦麸皮中具有广泛生物活性的植物次生代谢物。麦麸中两种重要的酚类化合物是酚酸和黄酮类化合物。麦麸中的酚酸是羟基苯甲酸(香草酸、水杨酸和没食子酸)和羟基肉桂酸的衍生物<sup>[22]</sup>,且结合形式的多酚多数附着在细胞壁上,导致其生物可及性极低。在各种麦麸酚酸中,阿魏酸最为丰富,占麸皮总酚酸的64%~84%。与酚酸类似,大多数黄酮类化合物也以结合的形式存在,附着在小麦颗粒的外细胞壁上。软麦和硬麦麦麸总黄酮含量分别为213、259 mg CE/kg(儿茶素当量)<sup>[23]</sup>。麸皮黄酮类化合物属于类黄酮,是一种具有清除自由基、防止低密度脂蛋白氧化和防癌等生物活性的植物雌激

素<sup>[20]</sup>。烷基间苯二酚(alkylresorcinols, ARS)是一类特殊的酚类类脂,有两亲性,在小麦麸皮中含量 89~1 429  $\mu\text{g/g}$ <sup>[24]</sup>,是一类防止低密度脂蛋白氧化的抗氧化剂,还可以作为食用全麦食品的生物标记,测定血浆 ARS 成分可以用来鉴别全麦食品。

### 2.5 风味物质

分析麸皮中特有的风味物质对提高麦麸制品品质和加工特性有重要意义,王小平<sup>[21]</sup>研究了粒径大小对麸皮的风味成分含量的影响,揭示了麸皮中醛类(正己醛)和酮类(丙酮)是其主要的风味物质,也是麸皮苦涩味形成的主导物质,且粒径对风味无影响。孙浩然<sup>[25]</sup>利用气相色谱-质谱(gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS)研究麸皮的风味成分发现小麦麸皮 26 种风味物质构成了麸皮特有的风味特性,夹杂着酯类物质(正己酸乙酯)特殊水果香、醛类物质(正己醛)特殊青草味、柠檬烯类物质特殊柑橘香和苯酚类物质特殊臭味。

## 3 麦麸利用现状

国内外研究显示小麦麸皮含有丰富的特殊营养成分和生物活性物质,包括大量纤维类物质,可作为一种理想的制备膳食纤维的原料。小麦麸皮具有较高的经济效益和社会效益,开发利用前景良好。近年来随着饮食结构的改变,麦麸类食品的开发成为小麦麸皮在食品研究的热点领域。

### 3.1 主食

目前小麦麸皮开发的产品有很多,如麸皮面包、麸皮馒头、麸皮面条等,面制品中麸皮的添加可提高膳食纤维食物营养价值。刘丽娅<sup>[26]</sup>研究麸皮粒径对馒头品质的影响,结果表明对比空白全麦馒头,中等粒径麸皮有利于提升面制品特性;大粒径粗麸添加可降低面团延展性,不利于塑型;小粒径麸皮会减弱面团稳定时间及弱化度,导致馒头的黏弹性和韧性显著降低。郭翎菲<sup>[27]</sup>研究了添加不同改性的小麦麸皮的面团及馒头品质的变化,发现挤压处理的麦麸馒头弹性、韧性等质构特性显著提升,形成了特殊的风味物质。Khalid 等<sup>[28]</sup>发现在制作面包过程中添加适当麦麸可产生大量纤维,提高面包的风味及营养价值,同时减少麦麸中植酸的负面影响。陈建省等<sup>[29]</sup>研究了不同粒径的麦麸添加量的面条品质变化,发现小于 10% 细麦麸和少于 5% 中等粒度麦麸的添加能够提升面条的口感,且使干面条富含膳食纤维,扩大了膳食纤维的应用范围。

### 3.2 休闲食品

将麸皮作为面粉替代配料添加到食品中,可增加膳食纤维的摄入,提高产品的营养品质和功能。Filipcev 等<sup>[30]</sup>发现饼干中麦麸的添加不仅可以增加其功能活性,而且有利于提高饼干中蛋白质、膳食纤维、维生

素和矿物质的含量。汤葆莎等<sup>[31]</sup>分析了麦麸膳食纤维咀嚼片的功能特性,发现麦麸咀嚼片可有效抑制脂质过氧化反应和清除羟自由基( $\cdot\text{OH}$ ),且产品成形性好和硬度适中。曹新志等<sup>[32]</sup>通过乳酸发酵技术,利用小麦麸皮膳食纤维和优质复原乳制备酸奶,结果表明添加麦麸膳食纤维后,酸奶的脱水率、黏稠率得到提升,而且显著提高了酸奶中钙和必需氨基酸的含量。菅田田等<sup>[33]</sup>利用乳酸菌发酵小麦麸皮,发现发酵的小麦麸皮可提高饮料产品口感,增加饮品营养价值和抗氧化活性。张俊杰等<sup>[34]</sup>将小麦麸皮应用于茶饮料领域,麦麸和茶叶混配制备出风味独特的麸香茶饮料,具有良好抗氧化、调节血糖浓度和降低血脂水平等功效。

### 3.3 肉制品

肉类中含有丰富的营养,能为人们提供优质蛋白质,多种矿物质以及维生素。但肉制品中脂肪和胆固醇含量高且纤维含量较低,在肉制品中添加小麦麸皮可有效提高肉制品膳食纤维含量,改善膳食纤维粗糙的口感,改善其感官特性。在鸡肉香肠中加入 3% 的麦麸可以改善膳食纤维摄入量并降低胆固醇水平<sup>[35]</sup>。王海滨等<sup>[36]</sup>研制出了新型麦麸膳食纤维复合火腿肠,改善了火腿肠的功能特性,并降低了火腿肠热量。高晓光等<sup>[37]</sup>在乳化香肠中添加质量分数为 6% 的麦麸,提升了其感官特性和营养特性。相关研究也用麸皮作为脂肪替代品,制成麸皮猪肉丸<sup>[38]</sup>、麸皮牛肉汉堡<sup>[39]</sup>,大大降低了猪肉丸中的饱和脂肪酸含量,减低热量,实现低脂肉制品开发。

### 3.4 饲料行业

小麦麸皮作为小麦加工过程中的副产品,丰富的营养价值也使其成为饲料中的重要成分。为了提高麦麸的生物利用率,用膨化改性的小麦麸皮加工饲料,可有效提升蛋白的吸收率,吸收率从未改性前的 30% 升高至 99%<sup>[21]</sup>;刘春雪等<sup>[40]</sup>将 5% 等量发酵过的麸皮替代猪饲料基础日粮中未发酵的麸皮,可以有效提高育肥猪生长性能,改善肉质。3% 麦麸添加可通过提高肠道免疫、改善肠屏障功能,并参与微生物菌群变化促进生长。添加 5%~10% 的发酵麸皮,可起到有效提高猪的生产性能、促进营养物质消化吸收、维持肠道菌群平衡等重要作用。

## 4 麦麸利用过程中存在的问题

麦麸生物结构质地坚韧不易粉碎,附带的细菌和所含的植酸酶经发酵会产生异味。食用口感坚韧且有涩味等因素导致其开发应用受到限制。麦麸含有较多不可溶性纤维,其消化吸收速度相对较慢;麦麸添加到食品中,特别是在较高浓度的情况下,会导致所开发产品的储存稳定性、适口性差和感官品质降低。李晓宁等<sup>[41]</sup>把原料麦麸与面粉混合制备馒头,观察到添加麦

麸会使馒头的色泽加深,比容减少,保质期缩短,可接受度降低。通过研究发现无论选择直接添加还是间接添加麦麸的方式,都会对馒头的品质造成不同程度的影响<sup>[42]</sup>。

麦麸含有多糖、蛋白质、多肽和多种维生素,具有改善新陈代谢,增强免疫力,保护细胞免受氧化损伤等活性。然而,因为麦麸细胞壁是由不同形式的木质素、纤维素和蛋白质组成,这种复杂的结构包裹了这些生物活性化合物,造成了麦麸的利用受限。麦麸复杂结构和成分组成也会阻碍面筋形成,从而影响面制品的质构、口感等<sup>[26-27]</sup>。麦麸作为饲料,自然态的麸皮组织结构紧密,含有高水平的抗营养因子,阻碍了畜禽胃肠道消化吸收率,从而阻滞了畜禽的生长发育。如何针对预期用途实现加工品质、营养价值和口感三者有机统一是研究者们需要解决的难题。

## 5 麦麸的品质和功能提升

小麦中抗营养因子植酸的含量较高,阻碍了矿物质以及蛋白质的吸收,且小麦麸皮中含有较多的不溶性膳食纤维,导致面制品可食用性大大降低。麦麸改性可以有效降低小麦加工副产物麦麸中的抗营养成分,充分利用其中对人体有益的营养成分,提高麦麸的食用价值。目前主要的改性方法有物理改性(超微粉碎<sup>[43]</sup>、挤压膨化<sup>[44]</sup>、超高压<sup>[45]</sup>、蒸汽爆破处理<sup>[46]</sup>、热处理<sup>[47]</sup>、高强度超声处理<sup>[48]</sup>等)、化学改性、生物酶改性<sup>[49-51]</sup>、微生物发酵改性及协同改性<sup>[52-61]</sup>等,相关改性方法见图1。由于化学改性对麦麸的膳食纤维结构破坏较大,且改性后的物质不符合食品安全的要求,故化学改性麦麸在食品加工中有一定的局限性。

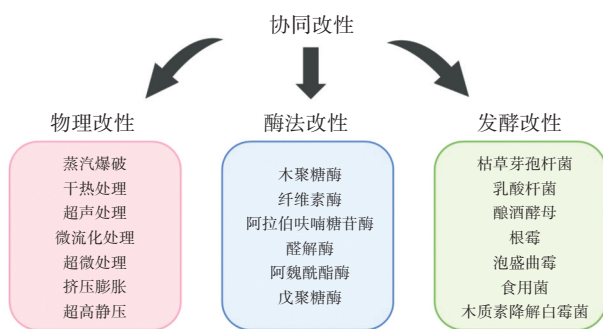


图1 麦麸改性方法

Fig.1 Wheat bran modification methods

### 5.1 物理改性

物理改性是通过力的作用断开不溶性膳食纤维间的连接键,提高其溶解性的一种改性方式,采用不同改性方法改变麸皮的物理化学特性包括风味、感官和产品品质等。常用物理改性方法包括蒸汽爆破、超微粉碎技术、挤压技术和瞬时高压技术等。孙心怡<sup>[46]</sup>利用蒸汽爆破协同酶解处理麸皮,研究改性麸皮对面包感

官品质的影响,结果显示爆破后再酶解处理麸皮会增加面包的比容和弹性,降低面包的硬度,过热蒸汽处理使麦麸表现出明亮的颜色。Coda等<sup>[43]</sup>研究发现麸皮粒径为160 μm时小麦面包具有良好麦香风味及最大体积和保质期。Abdel-Haleem<sup>[47]</sup>研究发现干热处理麦麸(175 °C/20 min)可显著降低脂肪酶活性,有助于减轻其对面团流变性能负面影响。Hu等<sup>[48]</sup>通过400 W高强度超声持续处理麦麸15 min,结果表明高强度超声处理显著降低了麦麸的脂肪酶和过氧化物酶活性,达到延长其保质期的效果。郭嘉<sup>[62]</sup>利用超声辅助水洗协同齿辊碾磨技术降解麦麸糊粉层细胞内的植酸盐,降解效果显著,其中植酸的降解率高达62.98%,植酸盐的去除降低了麦麸的抗营养作用。Wang等<sup>[63]</sup>利用微流化处理麸皮,结果显示微流化会造成麸皮颗粒粒径微细化,容重降低,比表面积增加,水合能力和阳离子交换能力增强等;苗宇叶等<sup>[45]</sup>采用超高静压(high hydrostatic pressure, HHP)改性麦麸后发现, HHP造成了麦麸膳食纤维结构疏松、分子间共价键破坏,可溶性膳食纤维含量提高1.56倍,水合能力和胆固醇能力增强。Van Craeyveld等<sup>[64]</sup>利用球磨机制备小麦麸皮超微粉,与未处理麸皮相比,超微后麦麸膳食纤维中的水溶性阿拉伯木聚糖由4%增加到61%,可溶性成分的提高增加了麸皮的食用性和消化吸收。另外,研究表明对麦麸进行挤压处理后,麦麸可溶性膳食纤维含量提高1.16%,同时微波处理可降低麦麸平均粒度,提高膳食纤维水溶性和持油性<sup>[44]</sup>。

### 5.2 生物酶改性

生物酶改性是指通过搭配不同的酶制剂,增加膳食纤维的溶解性,进而提高小麦麸皮中纤维素的水解和利用率,改善麸皮的营养品质与加工性能。常用的酶制剂包括纤维素酶、半纤维素酶、木聚糖酶等。研究发现采用木聚糖酶和阿拉伯呋喃糖苷酶处理小麦麸皮后,馒头中可溶性木聚糖和酚酸含量增加,抗氧化能力和保水保油能力增加<sup>[49]</sup>。同时,麦麸经内切木聚糖酶处理后,麸皮细胞壁中的阿拉伯木聚糖可降解50%,使麸皮蛋白易于溶解,可以改善麦麸中酚类化合物释放能力。使用阿魏酰酯酶和戊聚糖酶对麦麸进行改性有助于促进麦麸中脂肪酸的释放,若用醛缩酶和季甲酰胺预处理,可进一步提升该效果<sup>[50]</sup>。崔西彬<sup>[51]</sup>研究表明,使用纤维素酶加工后的麦麸不溶性膳食纤维与可溶性膳食纤维之比降低了42%,将酶处理后的麦麸掺入饼干,可以提升饼干中可溶性膳食纤维含量,同时降低饼干硬度,改善饼干的食用口感。阿拉伯木聚糖是麦麸中主要的半纤维素成分,其分子量对面团感官品质和吸水量等都有较大影响,Liu等<sup>[41]</sup>采用超声、木聚糖酶和三氟乙酸分别对麦麸中的阿拉伯木聚糖进行修饰处理,发现3种方法均能明显降低AX的分子量和

黏度,其中超声和酶解处理的 AX 具有更好的溶解性和高度支化的结构特性,可以抑制面包的体外淀粉消化率。

### 5.3 发酵改性

发酵改性是指利用微生物发酵降解麸皮中的淀粉、蛋白质,从而产酸或产酶,通过酶解作用破坏麸皮的细胞壁骨架,将膳食纤维分解为可溶性小分子化合物,提高膳食纤维溶解性。除此之外,发酵酶解还可以降解抗营养因子,提高易吸收降解的菌体蛋白和酸溶性蛋白含量,进而提高副产品的营养价值。目前常用的发酵微生物包括酵母菌、枯草芽孢杆菌、乳酸菌等。Zhang 等<sup>[52]</sup>采用酿酒酵母、乳酸菌和枯草芽孢杆菌复合菌种发酵麦麸,发现3种菌发酵可增加发酵麸皮中的蛋白质、总酚和可溶性糖含量,降低粗纤维和植酸的含量,其中粗纤维含量降低29.55%,说明发酵可降解粗纤维;粗蛋白质含量提高了11.31%,说明发酵有利于蛋白质的释放。Bhanja 等<sup>[53]</sup>利用米根霉和泡盛曲霉双菌种固态发酵麦麸,显示发酵可促进麦麸酚类物质的溶出,提高发酵麦麸抗氧化能力。王园等<sup>[54]</sup>利用枯草芽孢杆菌和酿酒酵母复合发酵麸皮,麸皮多糖经过发酵后可改善断奶大鼠空肠形态结构和抗氧化能力,促进连接蛋白的表达水平,对肠道健康具有保护作用。Wang 等<sup>[55]</sup>采用饲料中发酵麸皮替代普通麸皮可以增加动物免疫球蛋白(immunoglobulins, Ig)的含量,改善仔猪肤色,调节相关抗炎因子的分泌,减少腹泻率,提高动物免疫防御水平。徐安民<sup>[56]</sup>采用白腐菌发酵降解麦麸木质纤维素,研究发酵麦麸对面条品质影响,发现与未发酵组相比,发酵组面条的水相发生变化,面条弹性增强,面条中蛋白质和淀粉等结合水升高,说明发酵后麸皮水合能力提高,发酵麸皮的增加可降低面条的蒸煮损失率。

### 5.4 协同改性

多种单一改性方法集成处理麦麸效果优于单一的改性方法处理麦麸,有利于更深层次的开发麦麸的应用价值。Wang 等<sup>[57]</sup>报道微波协同木聚糖酶水解可有效增加麦麸中低聚木糖的产量,降低麸皮木聚糖抗营养成分,扩大功能性低聚木糖的应用范围;胡宏海等<sup>[58]</sup>将小麦糊粉层与浓度为2%~5%的柠檬酸水溶液混合均匀后进行高速均质处理,这种处理方法能增加可溶性膳食纤维的含量,提高小麦糊粉层中交联蛋白的含量,从而减弱糊粉层对于面筋网络形成的不利影响。张书静等<sup>[59]</sup>对麦麸进行挤压预处理后使用木聚糖酶酶解,这种协同的改性方法有助于木聚糖酶更有效地分解麸皮中不可溶性膳食纤维,处理后麸皮中可溶性膳食纤维含量达6.24%,与未处理麦麸可溶性膳食纤维含量(3.30%)相比提高了89.09%,改性麦麸添加到中筋粉制成的馒头有更好的咀嚼性,麦香味和焙烤香也

更浓。Wang 等<sup>[60]</sup>的研究表明,通过蒸汽爆破预处理,麦麸中不溶性膳食纤维被分解,再结合挤压处理后,可以得到粒径更小的麦麸颗粒,且可溶性膳食纤维含量和阿拉伯木聚糖分别为7.47%和13.95%,较未处理样品有显著提高,促进了麦麸的利用。El-Shishtawy 等<sup>[61]</sup>经碱金属预处理后对麦麸进行固态发酵生产羧甲基纤维素酶、果胶酶和木聚糖酶等水解酶,研究发现,经碱处理后的麦麸更适合糖化和生产水解酶。

## 6 结语

小麦麸皮是一种富含膳食纤维、蛋白质和低聚糖的食品资源,随着麸皮营养成分逐渐被发掘,小麦麸皮的利用价值将得到更广泛的认可。企业开发出满足消费者需求的产品,进一步挖掘小麦麸皮的潜在价值,改善麦麸的功能和开发基于麦麸的食品,已成为满足人类日常膳食纤维需求的潜在来源。为了增加麦麸的利用价值,已经推荐了一些改良处理,如超微、热处理、发酵、酶处理和其他新的处理手段,可以有效改善麸皮苦涩、口感粗糙等问题。对小麦副产物麸皮低值资源的高值化利用,不仅可以扩大小麦产业链,丰富食品市场,还可以保障人们的饮食健康,为企业创造更高的经济和社会效益。

## 参考文献:

- [1] 冯立坤. 2023年小麦市场回顾及2024年展望[J]. 中国粮食经济, 2024(3): 70-72.  
FENG Likun. Wheat market review in 2023 and prospect in 2024[J]. China Food Economy, 2024(3): 70-72.
- [2] PRÜCKLER M, SIEBENHANDL-EHN S, APPRICH S, et al. Wheat bran-based biorefinery 1: Composition of wheat bran and strategies of functionalization[J]. LWT-Food Science and Technology, 2014, 56(2): 211-221.
- [3] MANZOOR A, PANDEY V K, DAR A H, et al. Rice bran: Nutritional, phytochemical, and pharmacological profile and its contribution to human health promotion[J]. Food Chemistry Advances, 2023, 2: 100296.
- [4] 谭斌, 汪丽萍, 刘明, 等. 我国全谷物食品发展的现状、问题与思路[J]. 粮油食品科技, 2011, 19(3): 5-8, 18.  
TAN Bin, WANG Liping, LIU Ming, et al. Present situation, problems and ideas of whole grain food development in China[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2011, 19(3): 5-8, 18.
- [5] SAINI P, ISLAM M, DAS R, et al. Wheat bran as potential source of dietary fiber: Prospects and challenges[J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2023, 116: 105030.
- [6] BROUNS F, HEMERY Y, PRICE R, et al. Wheat aleurone: Separation, composition, health aspects, and potential food use[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2012, 52(6): 553-568.
- [7] SOLAH V A, FENTON H K, CROSBIE G B. Wheat: grain structure of wheat and wheat-based products[M]//Encyclopedia of Food and Health. Amsterdam: Elsevier, 2016: 470-477.
- [8] CHATEIGNER-BOUTIN A L, LAPIERRE C, ALVARADO C, et al. Ferulate and lignin cross-links increase in cell walls of wheat grain outer layers during late development[J]. Plant Science: an Interna-

- tional Journal of Experimental Plant Biology, 2018, 276: 199-207.
- [9] MEZIANI S, NADAUD I, TASLEEM-TAHIR A, et al. Wheat aleurone layer: A site enriched with nutrients and bioactive molecules with potential nutritional opportunities for breeding[J]. Journal of Cereal Science, 2021, 100: 103225.
- [10] HELL J, KNEIFEL W, ROSENAU T, et al. Analytical techniques for the elucidation of wheat bran constituents and their structural features with emphasis on dietary fiber-A review[J]. Trends in Food Science & Technology, 2014, 35(2): 102-113.
- [11] 石松业, 温纪平, 刘远晓. 小麦麸皮多糖提取、结构及生物活性研究进展[J]. 食品工业科技, 2023, 44(13): 466-473.  
SHI Songye, WEN Jiping, LIU Yuanxiao. Recent advances in wheat bran polysaccharides: Extraction, structure and bioactivities[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(13): 466-473.
- [12] 龙志礼, 刘小郡, 李坚强, 等. 麦麸的营养组分及功能性成分的提取[J]. 粮食加工, 2021, 46(5): 28-32.  
LONG Zhili, LIU Xiaojun, LI Jianqiang, et al. Extraction of nutritional components and functional components from wheat bran[J]. Grain Processing, 2021, 46(5): 28-32.
- [13] WANG J, SMITS E, BOOM R M, et al. Arabinoxylans concentrates from wheat bran by electrostatic separation[J]. Journal of Food Engineering, 2015, 155: 29-36.
- [14] LIU Y, WANG S W, KANG J, et al. Arabinoxylan from wheat bran: Molecular degradation and functional investigation[J]. Food Hydrocolloids, 2020, 107: 105914.
- [15] TONG L T, ZHONG K, LIU L Y, et al. Effects of dietary wheat bran Arabinoxylans on cholesterol metabolism of hypercholesterolemic hamsters[J]. Carbohydrate Polymers, 2014, 112: 1-5.
- [16] HARTVIGSEN M L, JEPPESEN P B, LÆRKE H N, et al. Concentrated Arabinoxylan in wheat bread has beneficial effects as rye breads on glucose and changes in gene expressions in insulin-sensitive tissues of Zucker diabetic fatty (ZDF) rats[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2013, 61(21): 5054-5063.
- [17] KAHRAMAN K, AKTAS-AKYILDIZ E, OZTURK S, et al. Effect of different resistant starch sources and wheat bran on dietary fibre content and *in vitro* glycaemic index values of cookies[J]. Journal of Cereal Science, 2019, 90: 102851.
- [18] 李欣, 张洪微, 刘莹, 等. 小麦麸皮淀粉的提取及其结构分析[J]. 粮油食品科技, 2020, 28(5): 111-116.  
LI Xin, ZHANG Hongwei, LIU Ying, et al. Extraction and structure analysis of wheat bran starch[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2020, 28(5): 111-116.
- [19] BALANDRÁN - QUINTANA R R, MERCADO - RUIZ J N, MENDOZA - WILSON A M. Wheat bran proteins: A review of their uses and potential[J]. Food Reviews International, 2015, 31(3): 279-293.
- [20] SIDDIQI R A, SINGH T P, RANI M, et al. Diversity in grain, flour, amino acid composition, protein profiling, and proportion of total flour proteins of different wheat cultivars of North India[J]. Frontiers in Nutrition, 2020, 7: 141.
- [21] 王小平. 小麦麸皮特征性质及应用研究[D]. 成都: 西华大学, 2017.  
WANG Xiaoping. Study on characteristics and application of wheat bran[D]. Chengdu: Xihua University, 2017.
- [22] LADDOMADA B, CARETTO S, MITA G. Wheat bran phenolic acids: Bioavailability and stability in whole wheat - based foods[J]. Molecules, 2015, 20(9): 15666-15685.
- [23] ŽILIĆ S, SERPEN A, AKİLLİOĞLU G, et al. Distributions of phenolic compounds, yellow pigments and oxidative enzymes in wheat grains and their relation to antioxidant capacity of bran and debranned flour[J]. Journal of Cereal Science, 2012, 56(3): 652-658.
- [24] KRUK J, ABOUL-EENEIN B, BERNSTEIN J, et al. Dietary alkylresorcinols and cancer prevention: A systematic review[J]. European Food Research and Technology, 2017, 243(10): 1693-1710.
- [25] 刘浩然. 小麦麸皮香气成分研究及产品开发[D]. 天津: 天津科技大学, 2018.  
SUN Haoran. Study on aroma components of wheat bran and product development[D]. Tianjin: Tianjin University of Science & Technology, 2018.
- [26] 刘丽娅. 麸皮粒径对全麦面团流变特性和馒头品质的影响[J]. 现代面粉工业, 2019, 33(2): 55.  
LIU Liya. Effect of bran particle size on rheological characteristics of whole wheat dough and quality of steamed bun[J]. Modern Flour Milling Industry, 2019, 33(2): 55.
- [27] 郭翎菲. 改性方法对小麦麸皮面团及馒头品质的影响[J]. 粮食与油脂, 2023, 36(5): 54-57.  
GUO Lingfei. Effects of modification methods on the quality of wheat bran dough and steamed bread[J]. Cereals & Oils, 2023, 36(5): 54-57.
- [28] KHALID K H, OHM J B, SIMSEK S. Whole wheat bread: Effect of bran fractions on dough and end-product quality[J]. Journal of Cereal Science, 2017, 78: 48-56.
- [29] 陈建省, 郭启芳, 崔金龙, 等. 麦麸添加量和粒度对中国干面条质构特性的影响[J]. 食品科学, 2013, 34(7): 92-98.  
CHEN Jianxing, GUO Qifang, CUI Jinlong, et al. Effects of particle size and addition level of wheat bran on texture properties of dry white Chinese noodle[J]. Food Science, 2013, 34(7): 92-98.
- [30] FILIPCEV B, NEDELJKOVIC N, SIMURINA O, et al. Partial replacement of fat with wheat bran in formulation of biscuits enriched with herbal blend[J]. Hemijska Industrija, 2017, 71(1): 61-67.
- [31] 汤葆莎, 赖谱富, 吴俐, 等. 麦麸膳食纤维咀嚼片配方优化及其体外抗氧化能力[J]. 食品科学, 2017, 38(24): 171-176.  
TANG Baosha, LAI Pufu, WU Li, et al. Recipe optimization and *in vitro* antioxidant properties of wheat bran dietary fiber chewable tablets[J]. Food Science, 2017, 38(24): 171-176.
- [32] 曹新志, 熊俐, 孙立. 小麦麸皮膳食纤维酸奶初步研制[J]. 粮食与油脂, 2009, 22(5): 22-24.  
CAO Xinzhi, XIONG Li, SUN Li. Primary research on production of yogurt with wheat bran dietary fiber[J]. Cereals & Oils, 2009, 22(5): 22-24.
- [33] 菅田田, 屈磊, 马学明, 等. 麸皮高酸海棠果饮料的研制[J]. 食品与发酵工业, 2016, 42(12): 115-119.  
JIAN Tiantian, QU Lei, MA Xueming, et al. Preparation of heat bran and high acid crabapple fruit beverage[J]. Food and Fermentation Industries, 2016, 42(12): 115-119.
- [34] 张俊杰, 黄海燕, 阮有志, 等. 留麸香茶饮料的研制及功效研究[J]. 农业科技与装备, 2019(6): 49-50.  
ZHANG Junjie, HUANG Haiyan, RUAN Youzhi, et al. Research on the development and efficacy of fuxiang tea beverage[J]. Agricultural Science & Technology and Equipment, 2019(6): 49-50.
- [35] 杨阳, 曹晓锋, 邹书慧. 麦麸和胡萝卜渣对鸡肉香肠品质的影响[J]. 中国饲料, 2020(6): 41-45.  
YANG Yang, CAO Xiaofeng, ZOU Shuhui. Effect of supplementation of wheat bran and carrot pomace on meat quality of chicken sausage[J]. China Feed, 2020(6): 41-45.
- [36] 王海滨, 李庆龙, 张彦妮, 等. 麦麸膳食纤维火腿肠的研制与营养价值评价[J]. 肉类工业, 2009(8): 22-27.  
WANG Haibin, LI Qinglong, ZHANG Yanni, et al. Development and nutritional evaluation of sausages enriched with wheat bran dietary fiber[J]. Meat Industry, 2009(8): 22-27.
- [37] 高晓光, 冯随, 杨涛, 等. 麦麸膳食纤维对乳化型香肠品质的影响研究[J]. 食品工业科技, 2016, 37(6): 151-154, 159.  
GAO Xiaoguang, FENG Sui, YANG Tao, et al. Effect of wheat bran dietary fiber on the quality of emulsion type sausage[J]. Science and Technology of Food Industry, 2016, 37(6): 151-154, 159.

- [38] 叶丹, 雷激, 刘江, 等. 麸皮对猪肉丸品质的影响[J]. 食品工业科技, 2018, 39(13): 67-72, 104.  
YE Dan, LEI Ji, LIU Jiang, et al. Effect of wheat bran on quality of pork meatballs[J]. Science and Technology of Food Industry, 2018, 39(13): 67-72, 104.
- [39] CARVALHO L T, PIRES M A, BALDIN J C, et al. Partial replacement of meat and fat with hydrated wheat fiber in beef burgers decreases caloric value without reducing the feeling of satiety after consumption[J]. Meat Science, 2019, 147: 53-59.
- [40] 刘春雪, 张放, 张政, 等. 发酵麸皮对育肥猪生长性能、屠宰性能及肉品质的影响[J]. 中国畜牧杂志, 2017, 53(2): 70-73.  
LIU Chunxue, ZHANG Fang, ZHANG Zheng, et al. Effects of fermented wheat bran with fermentation on growth performance, slaughter performance and meat quality of finishing pigs[J]. Chinese Journal of Animal Science, 2017, 53(2): 70-73.
- [41] 李晓宁, 汪丽萍, 田晓红, 等. 麦麸膳食纤维及原料麦麸对馒头品质的影响[J]. 食品工业科技, 2023, 10(28): 1-11.  
LI Xiaoning, WANG Liping, TIAN Xiaohong, et al. Effect of wheat bran dietary fiber and raw wheat bran on the quality of steamed bread[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 10(28): 1-11.
- [42] ZHANG S J, JIA X W, XU L N, et al. Effect of extrusion and semi-solid enzymatic hydrolysis modifications on the quality of wheat bran and steamed bread containing bran[J]. Journal of Cereal Science, 2022, 108: 103577.
- [43] CODA R, RIZZELLO C G, CURIEL J A, et al. Effect of bioprocessing and particle size on the nutritional properties of wheat bran fractions[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2014, 25: 19-27.
- [44] 张倩芳, 李敏, 孟晶岩, 等. 小麦麸皮改性及在食品中的应用研究进展[J]. 农产品加工, 2021(2): 64-67.  
ZHANG Qianfang, LI Min, MENG Jingyan, et al. Research progress on wheat bran modification and its application in food[J]. Farm Products Processing, 2021(2): 64-67.
- [45] 苗宇叶, 姚亚亚, 刘阳星月, 等. 超高静压改性麦麸对其功能性质的影响[J]. 食品科学, 2019, 40(19): 164-171.  
MIAO Ziyue, YAO Yaya, LIU Yangxingyue, et al. Functional properties of high hydrostatic pressure modified wheat bran[J]. Food Science, 2019, 40(19): 164-171.
- [46] 孙心怡. 蒸汽爆破预处理对黑小麦麦麸的品质改良及其应用研究[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2023.  
SUN Xinyi. Study on quality improvement of black wheat bran by steam explosion pretreatment and its application[D]. Handan: Hebei University of Engineering, 2023.
- [47] ABDEL-HALEEM A M H. Influence of heat treatment for some wheat milling fractions on fino bread quality[J]. Journal of Food Science and Technology, 2019, 56(5): 2639-2650.
- [48] HU Y M, WANG L J, LI Z G. Superheated steam treatment on wheat bran: Enzymes inactivation and nutritional attributes retention[J]. LWT-Food Science and Technology, 2018, 91: 446-452.
- [49] 罗昆, 杨文丹, 马子琳, 等. 发酵麦麸及其面包面团中阿拉伯木聚糖溶解性与酚酸释放研究[J]. 食品科学, 2019, 40(4): 42-48.  
LUO Kun, YANG Wendan, MA Zilin, et al. Araboxylan solubilization and phenolic acid release from fermented wheat bran and bread dough incorporated with it[J]. Food Science, 2019, 40(4): 42-48.
- [50] FERRI M, HAPPEL A, ZANAROLI G, et al. Advances in combined enzymatic extraction of ferulic acid from wheat bran[J]. New Biotechnology, 2020, 56: 38-45.
- [51] 崔西彬. 酶处理麸皮及其在馒头中的应用[D]. 南京: 南京师范大学, 2017.  
CUI Xibin. Enzymatic treatment of bran and its application in steamed bread[D]. Nanjing: Nanjing Normal University, 2017.
- [52] ZHANG C, ZHANG C Y, DU M Y, et al. Effects of dietary supplementation with different fermented feeds on performance, nutrient digestibility, and serum biochemical indexes of fattening lambs[J]. Animal Bioscience, 2021, 34(4): 633-641.
- [53] BHANJA T, KUMARI A, BANERJEE R. Enrichment of phenolics and free radical scavenging property of wheat koji prepared with two filamentous fungi[J]. Bioresource Technology, 2009, 100(11): 2861-2866.
- [54] 王园, 杨可心, 段元宵, 等. 发酵麸皮多糖对大鼠空肠组织抗氧化能力、形态结构和紧密连接蛋白表达的影响[J]. 食品科学, 2019, 40(13): 166-170.  
WANG Yuan, YANG Kexin, DUAN Yuanxiao, et al. Effects of fermented wheat bran polysaccharides on antioxidant capacity, morphological structure and tight junction protein expression in rat jejunum[J]. Food Science, 2019, 40(13): 166-170.
- [55] WANG Y, WANG R F, HAO X R, et al. Growth performance, nutrient digestibility, immune responses and antioxidant status of lambs supplemented with humic acids and fermented wheat bran polysaccharides[J]. Animal Feed Science and Technology, 2020, 269: 114644.
- [56] 徐安民. 高效木质素降解白腐菌发酵麦麸对面条品质的影响研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2020.  
XU Anmin. Study on the effect of wheat bran fermented by white rot fungi on noodle quality by high efficiency lignin degradation[D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2020.
- [57] WANG T H, LU S. Production of xylooligosaccharide from wheat bran by microwave assisted enzymatic hydrolysis[J]. Food Chemistry, 2013, 138(2/3): 1531-1535.
- [58] 胡宏海, 刘伟, 张良, 等. 一种小麦糊粉层粉的改性方法及其产品: 202011593901.8[P]. 2022-05-24.  
HU Honghai, LIU Wei, ZHANG Liang, et al. A modification method of wheat alters layer powder and its products: 202011593901.8[P]. 2022-05-24.
- [59] 张书静, 徐丽娜, 贾喜午, 等. 半固态酶解法改性挤压麦麸的制备及其对含麸馒头品质的影响[J]. 食品工业科技, 2023, 44(1): 65-71.  
ZHANG Shujing, XU Lina, JIA Xiwu, et al. Preparation of modified extruded wheat bran by semi-solid enzymatic hydrolysis and its effect on the quality of bran-containing steamed bread[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(1): 65-71.
- [60] WANG L, PANG T R, KONG F, et al. Steam explosion pretreatment for improving wheat bran extrusion capacity[J]. Foods, 2022, 11(18): 2850.
- [61] EL-SHISHTAWY R M, MOHAMED S A, ASIRI A M, et al. Saccharification and hydrolytic enzyme production of alkali pre-treated wheat bran by *Trichoderma virens* under solid state fermentation[J]. BMC Biotechnology, 2015, 15: 37.
- [62] 郭嘉. 降低麦麸中植酸盐含量的途径及机理研究[D]. 无锡: 江南大学, 2015.  
GUO Jia. Study on the way and mechanism of reducing phytate content in wheat bran[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2015.
- [63] WANG T, SUN X H, ZHOU Z X, et al. Effects of microfluidization process on physicochemical properties of wheat bran[J]. Food Research International, 2012, 48(2): 742-747.
- [64] VAN CRAEYVELD V, HOLOPAINEN U, SELINHEIMO E, et al. Extensive dry ball milling of wheat and rye bran leads to *in situ* production of Arabinoxylan oligosaccharides through nanoscale fragmentation[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2009, 57(18): 8467-8473.