



韩静,陈鹏,孙冰华,等. 麦麸预处理技术应用于全麦粉及其制品品质改良的研究进展[J]. 轻工学报, 2024, 39(4): 26-33.
HAN J, CHEN P, SUN B H, et al. Research progress on the application of wheat bran pretreatment technology in the quality improvement of whole wheat flour and its products[J]. Journal of Light Industry, 2024, 39(4): 26-33.
DOI: 10.12187/2024.04.004

麦麸预处理技术应用于全麦粉及其制品品质改良的研究进展

韩静, 陈鹏, 孙冰华, 王晓曦, 马森

河南工业大学 粮油食品学院, 河南 郑州 450001

摘要: 麦麸的存在易导致全麦粉及其制品的口感、稳定性等欠佳。基于麦麸预处理技术可有效改善全麦粉及其制品的品质特性,对常见的麦麸预处理技术进行综述,分析其对全麦粉加工性能、营养特性和贮藏稳定性的影响,并探讨这些技术在改善全麦制品(如馒头、油条、面包和面条)食用品质方面的应用。认为,粉碎处理(石磨、辊磨、超微磨等)可增加营养物质的生物可及性,降低植酸等抗营养物质的含量,但不会改变其化学组成;热处理(干热处理、湿热处理和过热蒸汽处理)和挤压处理虽能使麦麸中高活性内源酶失活,进而延长其贮藏期,但会导致酚类物质降解、脂肪酸热氧化及色泽暗淡;生物处理(酶解和发酵)能增加可溶性膳食纤维含量,改善全麦粉的加工特性和营养特性,但不能满足高纤维面制品的多样化需求。未来应进一步优化麦麸预处理技术的工艺参数,联合单一预处理技术的优点,以市场需求和工业化生产为导向,精准调控联合处理的方式和顺序,提升全麦粉及其制品的品质特性,并为麦麸预处理技术的调控机制研究提供参考。

关键词: 麦麸;全麦粉;预处理技术;品质改良

中图分类号: TS213.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-1553(2024)04-0026-08

0 引言

随着我国人民生活水平的不断提升,消费者对食品营养和保健价值的重视程度日益增强。全谷物食品尤其是全麦粉及其制品,因其广泛可得且营养价值高而备受消费者青睐。研究^[1]发现,经常食用全麦制品有助于降低肥胖、糖尿病、心血管疾病等的患病风险。全麦粉通过对整粒小麦进行磨制和筛分制得,保留了与原整粒小麦相同比例的胚乳、麦麸、

胚芽等成分^[2],麦麸及胚芽的存在,使全麦粉含有比精制面粉更多的膳食纤维、脂类、蛋白质、矿物质、维生素等营养成分^[3]。但麦麸中的酶类、膳食纤维等会降低全麦粉的加工性能和贮藏稳定性,可能导致全麦制品外观、风味和感官的接受度较低^[4]。例如,脂肪酶可引起不饱和脂肪酸的水解和氧化酸败,产生不良气味,甚至产生有害物质^[5];多酚氧化酶可催化酚类物质氧化,引发酶促褐变,影响产品色泽^[6];麦麸膳食纤维会破坏面筋结构,导致面团形

收稿日期:2023-10-09;修回日期:2024-01-17;出版日期:2024-08-15

基金项目:“十四五”国家重点研发计划项目(2021YFD21009003);中国博士后科学基金项目(2023M741513);河南省科技研发计划联合基金项目(232103810066);河南省高校科技创新人才项目(23HASTIT033)

作者简介:韩静(1994—),女,河南省濮阳市人,河南工业大学讲师,博士,主要研究方向为微生物发酵技术、杂粮加工理论与技术。E-mail:dlpu_hj@163.com

通信作者:马森(1983—),男,河南省新乡市人,河南工业大学教授,博士,主要研究方向为谷物资源开发与利用。E-mail:mas-en@haut.edu.cn

成时间延长,面筋强度减弱,对面团的加工性能产生负面影响,进而造成全麦制品适口性较差、感官评分较低等问题^[7-8]。此外,麦麸中含有的抗营养物质(如植酸盐)会与矿物质形成强络合物,可能会阻碍矿物质的吸收并降低其生物利用度^[9]。因此,为了改善全麦粉的加工性能、营养特性和贮藏稳定性,对麦麸进行适当的预处理显得尤为重要。

常用的麦麸预处理技术可分为物理、化学和生物处理三大类。其中,物理处理是常用且简便的麦麸预处理技术,主要包括调节温度(热处理)^[10]和压力(挤压处理)^[11]、施加外力(粉碎处理)^[12]等方法,单独或联合使用,可有效促使麦麸中膳食纤维发生断裂、破碎等结构变化,从而提升全麦粉的营养价值和应用价值^[10,13]。化学处理主要通过添加酸、碱等化学物质使麦麸膳食纤维中的糖苷键断裂,从而提高可溶性膳食纤维(Soluble Dietary Fiber, SDF)的含量,但化学物质的添加也增加了麦麸后期处理的难度,还会产生大量废水造成环境污染^[14]。生物处理主要分为酶解和微生物发酵两类,与物理、化学处理相比,它具有作用高效、条件温和、能耗较低、安全性好等特点,更易满足消费者对食品安全健康的要求^[15]。单一预处理技术能在一定程度上改善全麦粉的品质,但无法满足不同全麦制品的品质改良需求。联合预处理技术能结合单一技术的优势,提高功能成分的提取率,更有效地改善全麦粉及其制品的理化特性和营养品质^[13]。基于此,本文拟系统综述常见麦麸预处理技术对全麦粉加工性能、营养特性和贮藏稳定性的影响及其在全麦制品中的应用现状,以为全麦粉及其制品的品质提升提供参考。

1 麦麸预处理技术

1.1 物理处理

1.1.1 粉碎处理 通常,采用不同粉碎处理技术对粗麦麸进行加工,可增大麦麸比表面积,进而增加其营养物质的生物可及性^[16]。一方面,减小麦麸粒径(180~4000 μm)可降低膳食纤维对面筋蛋白网络的空间阻隔作用,使全麦粉的湿面筋含量、拉伸曲线面积、延伸度和最大拉伸阻力均增加,稳定性增强^[17];另一方面,减小麦麸粒径(355~900 μm)也可

使麦麸抗氧化能力降低,尽管所提取的花青素、类胡萝卜素含量均显著增加,但仅减小粒径并不足以提高麦麸的总酚含量^[18]。因此,可将粉碎处理与其他预处理技术联合,弥补单一预处理技术的不足,获得更高品质的全麦粉^[19-20]。例如,超微磨与挤压联合处理可使麦麸中水溶性阿拉伯木聚糖(Water-soluble Arabinoxylan, WEAX)含量和游离态总酚含量均显著增加,且WEAX的结构改性更明显^[21];超微粉碎与蒸汽爆破联合处理不仅可增加麦麸中脂肪、淀粉、蛋白质、SDF、总酚和总黄酮的含量,还可增加麦麸的孔隙度、持水力和膨胀能力,提高全麦粉的水化性能,提升面筋蛋白的发育效果^[22]。粉碎处理操作简单、效率高,但其标准方法尚未建立,不同应用场景下的麦麸粒径也不同,需进一步完善其工艺参数,以更好满足消费者的多样化需求。

1.1.2 热处理 1) 干热处理。针对全麦粉贮藏性能不稳定、品质易劣化等问题,干热处理可有效降低导致酸败的内源酶活性,提高全麦粉的抗氧化能力,进而延长其贮藏时间^[23]。M. Lauková等^[24]研究发现,采用微波技术(800 W, 2 min)处理麦麸,可使全麦粉中植酸含量显著降低。张岩岩等^[25]研究发现,随着微波功率的增加及处理时间的延长,全麦粉中脂肪氧化酶的活性显著降低,菌落总数和脂肪酸含量的增加速度减缓,全麦粉具有更好的贮藏稳定性。P. J. Jacobs等^[23]研究发现,经热风烘箱干燥处理后,麦麸中的过氧化物酶和脂肪酶的活性均显著降低,且表面疏水性的增加可降低其水合性能。其他研究^[23,26]也表明,干热处理能有效提高麦麸的表面疏水性,但对其持水性和保水性无显著影响。这些研究结果的差异可能与麦麸类型和干热处理方法不同有关。干热处理过程中的加工条件(温度、水分活度等)可促使麦麸中的氨基酸和还原糖发生美拉德反应;此外,干热处理过程中还可能发生焦糖化反应,这两种反应可改善食物的色泽,增加食物的香气、风味及抗氧化活性^[27-28]。综上所述,干热处理在钝化酶的活性和杀灭微生物方面具有较好的效果,且能赋予产品一定的特殊风味。

2) 湿热处理。湿热处理主要有常压蒸汽处理和高压蒸汽处理两种方式,通常是指在较高水分含

量下对样品进行加热处理^[10]。其中,麦麸经常压蒸汽处理后,全麦粉中蛋白质含量降低,全麦面团的稳定时间延长、加工性能提升^[29]。高压蒸汽处理被广泛应用于麦麸的脱酚和纤维改性方面。经高压蒸汽处理后,麦麸的游离态总酚含量减少,结合态总酚含量增加^[30],植酸含量无变化^[31],其中游离态总酚含量的减少可能是酚类化合物对热较敏感,发生部分降解所致^[10]。然而,H. M. Zhao等^[32]研究表明,发酵麦麸经高压蒸汽处理后,其总酚和植酸含量均显著降低。这可能是因为植酸的耐热性导致单独高压蒸汽处理不足以降低麦麸中植酸的含量,而先降低麦麸基质的pH值,再进行高压蒸汽处理的方式,可增加植酸阳离子复合物的溶解度和降解性^[33]。

3) 过热蒸汽处理。过热蒸汽处理是指在恒定压力下,以过热蒸汽为传热介质,对样品进行加热的技术,其传热介质具有传热快、温度和焓值高等特点,且其温度比饱和蒸汽更高^[34]。与热风干燥相比,过热蒸汽处理能更快地灭活麦麸中过氧化物酶的活性并有效避免氧化酸败的发生,进而获得更高的可溶性酚类化合物含量和感官评分^[35]。蒸汽爆破属于高压过热蒸汽处理中的一种预处理技术,它是将原料暴露在高压饱和蒸汽中一段时间后瞬时释放压力的方法,将其应用于麦麸预处理中,可增加总酚和总黄酮含量,提高DPPH自由基清除活性,并显著增强全麦粉的抗氧化性能^[36]。此外,麦麸蒸汽爆破还可有效灭活内源性酶并减少植酸含量,提高全麦粉的贮藏稳定性和营养品质^[20,36]。

1.1.3 挤压处理 挤压处理是一种在螺旋推力的作用下,产生高温、高压和强剪切力,从而使加工产品的理化性质、营养价值和微观结构发生变化的加工技术^[37]。该技术不仅可显著增加SDF含量,还可明显改善全麦粉的可食用性、功能特性和营养特性^[38-39]。E. Aktas-Akyildiz等^[40]在135℃、水分含量16%的条件下对麦麸进行挤压处理,发现全麦粉中植酸含量显著降低,降幅达11.4%。此外,面筋蛋白和 α -淀粉酶在挤压过程中均会发生变性,弱化度显著降低,粉质质量指数显著增加,全麦粉品质大幅提升^[29]。尽管在挤压处理的操作过程中易堵料,但其生产效率较高,通用性较强。

1.2 化学处理

化学处理主要是利用酸处理、碱处理或添加改良剂等方式破坏麦麸中大分子物质的化学键,并在一定程度上抑制酶活性,进而改善麦麸的营养品质。化学处理对全麦粉及其制品的色泽、营养成分和风味均有较大的影响,经酸、碱处理后的麦麸颜色变深、香味消失,并伴有不同程度的污染,这严重影响麦麸的使用需求^[41]。由于目前尚无消除化学处理所产生不良影响的最佳方案,该方法的使用受到一定的限制。随着消费者对食品安全的日益重视,化学处理过程中会更倾向于添加绿色、无污染的天然抗氧化剂,如阿魏酸、维生素E等^[42],而添加的改良剂一般为谷朊粉和亲水胶体。谷朊粉是一种氨基酸种类丰富、蛋白质含量较高的植物性蛋白源,有助于增加面筋蛋白含量,促进面筋网络结构的形成^[43]。亲水胶体是一类具有羧基、羟基等亲水基团的大分子多糖,通过与面筋蛋白相互作用及与淀粉的络合作用使面筋空间结构更为有序,进而强化面团筋力和弹性^[44]。上述改良剂具有效果好、用量少等特点,但专一性强,无法满足麦麸不同化学处理的需求。

1.3 生物处理

1.3.1 发酵处理 发酵处理是以麦麸为底物,经微生物发酵将多糖降解为单糖,如将不溶性膳食纤维(Insoluble Dietary Fiber, IDF)降解为可溶性小分子化合物的加工技术^[45]。目前,常用发酵剂主要是酵母菌(如酿酒酵母)和乳酸菌(如鼠李糖乳杆菌、保加利亚乳杆菌、嗜热链球菌和短乳杆菌)^[32,46]。麦麸经酵母菌和乳酸菌发酵会产生多种不同类型的解聚酶(如糖苷水解酶、纤维素酶、木聚糖酶和酯酶),同时,所产生的有机酸会降低体系的pH值;在酶解和酸解的共同作用下,麦麸细胞壁被降解,IDF转化为SDF,导致发酵麦麸的IDF含量显著降低,SDF、WEAX和多酚的含量均显著增加,全麦面团的流变特性得到明显改善^[45]。其中,经乳酸菌发酵后,麦麸WEAX、总膳食纤维和SDF的含量均显著增加,蛋白质及超过20%的植酸被降解,微观结构被改变,内源性木聚糖酶活性降低^[32]。酵母菌所产生的发酵酶会降解麦麸细胞壁结构,进而释放出各种抗氧化物质^[14]。因此,发酵处理可使麦麸特定的内部

结构发生改变,是目前改善麦麸理化性质、营养特性和功能特性的一种有效方法。

1.3.2 酶解处理 生物酶制剂安全、高效、应用前景广阔,受到业界研究人员的广泛关注。常用于麦麸酶解处理的酶制剂包括植酸酶、木聚糖酶、 α -淀粉酶、脂肪酶、谷氨酸脱氢酶、 β -葡聚糖酶、 β -葡萄糖苷酶、聚半乳糖醛酸酶、纤维素酶、 β -内木聚糖酶和内葡聚糖酶,这些酶制剂具有不同的作用底物,在全麦粉品质改良中发挥着不同的作用^[20,39,47-48]。酶解处理不仅可释放麦麸中的酚酸,提高阿拉伯木聚糖的可溶性及矿物质的生物可及性,增加水溶性抗氧化剂、SDF 和游离氨基酸的含量,还可改善全麦粉的加工性能、增加产品风味、降低产品血糖指数等^[46,49]。经纤维素酶和木聚糖酶处理后,麦麸的总酚含量增加,抗氧化性能和保水能力均增强^[47]。单独或联合使用 α -淀粉酶、木聚糖酶和纤维素酶处理麦麸,均可提高全麦面团的稳定性、延展性和黏度^[50]。然而,酶解处理所用酶制剂存在价格普遍较高、不易保存、反应不均匀等问题。

1.4 联合处理

1.4.1 发酵与酶解联合处理 麦麸经发酵与酶解联合处理,可激活内源性蛋白酶的活性,增加麦麸中总酚含量、植酸降解率及蛋白质体外消化率,提高全麦粉的营养品质^[51]。E. Nordlund 等^[52]研究发现,在模拟体外消化过程中,发酵(酵母菌和乳酸菌)与酶解(木聚糖酶和淀粉酶)联合处理可促进麦麸细胞壁降解,这有助于糊粉层蛋白质的释放,增加蛋白质、膳食纤维和阿魏酸的体外消化率,并使麦麸的微观结构发生变化。研究^[53-54]发现,适当的微生物发酵(短乳杆菌和酿酒酵母)与酶解(木聚糖酶、内切葡聚糖酶、 α -淀粉酶和 β -葡聚糖酶)联合作用于不同粒径麦麸后,能显著提高全麦粉的抗氧化活性和植酸酶活性,增加肽和总游离氨基酸的含量及蛋白质的体外消化率。因此,发酵对提高全麦面团的体积和稳定性至关重要,而添加酶制剂又能进一步提高全麦面团的发酵性能。

1.4.2 物理与生物处理联合 据报道,挤压与酶解联合处理比单独处理更能提高麦麸中 SDF 的含量^[55]。与未处理麦麸相比,经挤压与发酵联合处理

后,麦麸中的真菌毒素显著降低^[56]。研磨、蒸汽爆破与酶解联合处理可提高麦麸中 WEAX 的含量,这可能是由于研磨和蒸汽爆破会导致麦麸细胞壁破裂,进而增加其比表面积及底物与酶的结合位点^[20]。微波与酶解联合处理可破坏糖苷键,使麦麸细胞壁中的纤维素、半纤维素降解生成小分子还原糖,进而改善全麦粉的食用品质^[57]。综上所述,联合处理后的全麦粉比单独处理具有更好的营养特性。

2 麦麸预处理对全麦制品品质的影响

根据生产工艺的不同,可将全麦制品分为油炸、烘焙、蒸煮三大类。其中,油炸类食品主要有全麦方便面、全麦沙琪玛、全麦油条等;烘焙类食品主要有全麦面包、全麦饼干等,是目前全麦制品的主要种类;蒸煮类食品主要是中式面制品,包括全麦馒头和全麦面条。与精制面制品相比,麦麸的加入使全麦粉的颜色加深,面筋网络结构被破坏,有可能导致全麦制品外观不佳和口感不良。下文以我国普遍消费的几种全麦制品为例,阐述麦麸预处理技术对全麦制品加工性能、营养特性、口感等品质的影响。

2.1 全麦馒头

用 100%全麦粉制作的全麦馒头,其硬度、黏附性和咀嚼性均较高,弹性、内聚性和回复性均较低,成品全麦馒头偏硬、难嚼、粘牙,并会出现塌陷的现象^[58-59]。Y. Zhang 等^[60]研究发现,粗麦麸的持水性优于细麦麸,所制全麦面团的组织结构较好,但面团的外观和光滑性较差。叶文俊等^[61]研究发现,挤压和发酵处理麦麸均会加深全麦馒头的颜色,常压蒸汽处理麦麸能显著降低全麦馒头芯的硬度,而发酵处理麦麸既能显著降低全麦馒头芯的咀嚼性,又能最大限度延缓全麦馒头的淀粉老化现象。

2.2 全麦油条

麦麸粒径越小、颗粒分布越均匀,越能有效增强面团的延展性和膨胀性,使全麦油条的质地更加酥脆^[62-63];同时,麦麸中的纤维素可对面团中的水分子起到吸附作用,延缓水分的散失,提高全麦油条的保水性和口感^[64-65]。研究^[66]发现,适量添加经烘烤和粉碎预处理的麦麸,不仅可提高全麦油条的口感,还可增加营养物质的含量。烘烤麦麸的添加可

增加全麦油条中醛类(3-甲基丁醛、戊醛、己醛等)、醇类(1-辛烯-3-醇等)的相对含量,赋予油条更加丰富、浓郁的风味^[67]。近年来,对全麦油条的研究主要集中在配方和工艺参数(面饼厚度、面团醒发时间、醒发温度、油温、炸制时间等)优化、品质改良等方面。从配方层面而言,随着全麦粉添加比例的提高,油条的水分含量增加,比容、表面含油量和结构含油量均降低,因此全麦粉可用于生产低含油量、高营养价值的全麦油条^[68]。目前,国内外有关麦麸预处理技术在全麦油条品质改良中的研究仍较少,存在较大的研究空间。

2.3 全麦面包

研究^[69]发现,添加发酵麦麸可改善面团的稳定性和延展性,使全麦面包体积更大、霉变更少,这可能是因为发酵麦麸中的微生物也可产生一些酶,而这些酶能够分解面团中的淀粉和蛋白质,进而改善面团的性质。在全麦面包的制作过程中,增加麦麸的添加量可提高面团的吸水率^[70],这表明麦麸、面筋蛋白与水分子之间的相互作用可增强面团的保水能力,降低面筋的强度^[71]。通过回添超微粉碎麦麸的方式可改善面团的持气能力,保证所生产全麦面包的蓬松性^[72]。另外,由粗麦麸制作的全麦面包,其比容和体积均小于由超微粉碎细麦麸制作的全麦面包^[73],但粒径小于 100 μm 的细麦麸制作的全麦面包,其体积却小于粗麦麸面包^[16]。酶与蒸汽爆破联合处理的麦麸能增加全麦面包的比容和 SDF 含量,降低其硬度和植酸含量^[20]。生物处理可有效改善面包的品质特性,这可能与生物处理能降低淀粉黏度、增加 WEAX 含量、改善全麦面团流变特性、加快 CO_2 生成等有关^[74]。

2.4 全麦挂面

麦麸的添加会增加全麦挂面的黏性和弹性,使挂面更光滑和有嚼劲。此外,全麦粉中富含维生素、矿物质和抗氧化物质,这使得全麦挂面中游离酚类物质和结合酚类物质的含量均较高,且对 DPPH 自由基具有较好的清除能力,即全麦挂面具有一定的抗氧化能力^[75]。因此,用全麦粉代替精制面粉可提高挂面的营养特性和抗氧化能力。然而,全麦粉较高的纤维素含量会影响全麦挂面的口感和质地,需

根据消费者的口味对其添加量进行适当调整。王昱靖^[76]研究发现,在全麦挂面制作过程中,麦麸越细小,全麦挂面的外观越光滑、硬度越大、颜色越亮。刘姣等^[77]研究发现,采用木聚糖酶对麦麸进行预处理,再按原比例复配全麦粉后制作全麦挂面,会轻微影响全麦挂面的煮熟增重率和干物质损失率,使全麦挂面中叶酸和阿魏酸的含量均显著增加,进而显著提高全麦挂面的营养品质。因此,在全麦挂面的生产过程中,可通过添加酶制剂的方式提高其加工品质。

3 结论与展望

本文梳理了常用的麦麸预处理技术在全麦粉及其制品品质改良中的研究现状,综述了不同预处理技术对全麦粉及其制品加工性能、营养特性及贮藏稳定性的影响,得出如下结论:粉碎处理可提高营养物质的生物可及性,减少抗营养因子含量,但目前缺少研磨技术的标准方法;热处理和挤压处理均可降低内源酶活性和抗营养因子含量,进而延长产品保质期,但高温会降低酚类物质的功能活性;化学处理对全麦粉及其制品的色泽、风味均会产生不良影响,且化学物质的使用易污染环境,因而该方法的应用受到一定限制;生物处理具有安全、高效等优点,但单独使用发酵剂或酶制剂很难达到理想的品质效果。此外,麦麸预处理技术可在一定程度上解决全麦制品外观不佳、口感不良等问题,但研究多集中于馒头、油条、面包、挂面等制品,后续可深入研究在其他全麦制品中的应用,以增加全麦制品的多样性。麦麸预处理技术已成为目前的研究热潮,在未来研究中,可针对不同全麦制品的需求优化联合处理工艺,探究不同组合顺序联合处理对全麦制品品质的影响及其影响机制,在满足市场多样化和工业化生产需求的基础上实现对全麦制品更精准的调控,并针对全麦制品的功能和营养潜力进行系统评估,为麦麸预处理技术的推广提供理论支撑。

参考文献:

- [1] 牛猛,侯国泉.全麦粉及制品:营养组成、健康功效与品质改良[J].粮油食品科技,2022,30(2):8-17.
- [2] 李雪杰,张剑,郑文刚,等.小麦麸皮挤压加工对全麦

- 粉面团及馒头的影响[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(5):181-187.
- [3] 董吉林,李鹏冲,景新俊,等. 全麦面粉营养特征、生理功能及产品开发现状述评[J]. 轻工学报, 2018, 33(3):45-50.
- [4] 刘阳,赵佳,邢青斌,等. 我国谷类及其制品主要成分分析[J]. 中国食物与营养, 2019, 25(10):53-57.
- [5] 吴远宁,周坚,沈汪洋,等. 全麦粉储藏稳定性的研究进展[J]. 粮食与油脂, 2021, 34(7):8-10, 23.
- [6] 蔡梦迪,熊双丽,李安林,等. 全麦粉的不足与改良技术研究进展[J]. 现代食品, 2022, 28(7):11-14.
- [7] PACKKIA-DOSS P P, CHEVALLIER S, PARE A, et al. Effect of supplementation of wheat bran on dough aeration and final bread volume[J]. Journal of Food Engineering, 2019, 252:28-35.
- [8] NIU M, HOU G G, KINDELSPIRE J, et al. Microstructural, textural, and sensory properties of whole-wheat noodle modified by enzymes and emulsifiers[J]. Food Chemistry, 2017, 223:16-24.
- [9] 崔明玉. 酵母中植酸降解酵母菌的筛选及其发酵全麦馒头面团的特性研究[D]. 郑州:河南工业大学, 2019.
- [10] 王潜,刘远晓,李萌萌,等. 热处理对麦麸及全麦制品品质改善研究进展[J]. 中国粮油学报, 2023, 38(12):235-243.
- [11] 李治. 不同处理方式对小麦麸皮理化性质影响的研究[D]. 天津:天津科技大学, 2018.
- [12] ROSA N N, BARRON C, GAIANI C, et al. Ultra-fine grinding increases the antioxidant capacity of wheat bran[J]. Journal of Cereal Science, 2013, 57(1):84-90.
- [13] 苗宇叶,刘阳星月,姚亚亚,等. 麦麸营养成分的利用及改性现状[J]. 粮食与油脂, 2020, 33(12):18-20.
- [14] 毛潋兰. 麦麸生物改性及其在全麦馒头中的应用[D]. 南京:南京农业大学, 2020.
- [15] 陈蒙慧,刘远晓,关二旗,等. 生物处理对麦麸品质及全麦制品品质改善的研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2023, 49(7):324-329.
- [16] NOORT M W J, VAN HAASTER D, HEMERY Y, et al. The effect of particle size of wheat bran fractions on bread quality-evidence for fibre-protein interactions[J]. Journal of Cereal Science, 2010, 52(1):59-64.
- [17] 朱璠. 麸皮处理和和面工艺对全麦面团及面包的影响[D]. 无锡:江南大学, 2021.
- [18] BREWER L R, KUBOLA J, SIRIAMORN PUN S, et al. Wheat bran particle size influence on phytochemical extractability and antioxidant properties [J]. Food Chemistry, 2014, 152:483-490.
- [19] CĂLINOIU L F, CĂTOI A F, VODNAR D C. Solid-state yeast fermented wheat and oat bran as a route for delivery of antioxidants[J]. Antioxidants, 2019, 8(9):372.
- [20] AKTAS-AKYILDIZ E, MATTILA O, SOZER N, et al. Effect of steam explosion on enzymatic hydrolysis and baking quality of wheat bran[J]. Journal of Cereal Science, 2017, 78:25-32.
- [21] DEMUTH T, BETSCHART J, NYSTRÖM L. Structural modifications to water-soluble wheat bran Arabinoxylan through milling and extrusion [J]. Carbohydrate Polymers, 2020, 240:116328.
- [22] KONG F, WANG L, GAO H F, et al. Process of steam explosion assisted superfine grinding on particle size, chemical composition and physico-chemical properties of wheat bran powder[J]. Powder Technology, 2020, 371:154-160.
- [23] JACOBS P J, HEMDANE S, DELCOUR J A, et al. Dry heat treatment affects wheat bran surface properties and hydration kinetics[J]. Food Chemistry, 2016, 203:513-520.
- [24] LAUKOVÁ M, KAROVIČOVÁ J, MINAROVIČOVÁ L, et al. Effect of thermal stabilization on physico-chemical parameters and functional properties of wheat bran[J]. Potravinárstvo Slovak Journal of Food Sciences, 2020, 14:170-177.
- [25] 张岩岩,李雪杰,张剑,等. 微波辐照对直接研磨法全麦粉的储藏稳定性与品质的影响[J]. 河南农业大学学报, 2020, 54(3):506-512.
- [26] DEROOVER L, TIE Y X, VERSPREET J, et al. Modifying wheat bran to improve its health benefits[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2020, 60(7):1104-1122.
- [27] VAN ROOYEN J, SIMSEK S, OYEYINKA S A, et al. Holistic view of starch chemistry, structure and functionality in dry heat-treated whole wheat kernels and flour[J]. Foods, 2022, 11(2):207.
- [28] SRUTHI N U, PREMJI Y, PANDISELVAM R, et al. An overview of conventional and emerging techniques of roasting: Effect on food bioactive signatures [J]. Food Chemistry, 2021, 348:129088.
- [29] 叶国栋,汪丽萍,沈汪洋,等. 麸皮稳定化处理方式对全麦粉品质的影响[J]. 食品工业科技, 2021, 42(6):15-21.
- [30] RICO D, VILLAVERDE A, MARTINEZ-VILLALUENGA C, et al. Application of autoclave treatment for development of a natural wheat bran antioxidant ingredient[J]. Foods, 2020, 9(6):781.
- [31] SPAGGIARI M, RICCI A, CALANI L, et al. Solid state lactic acid fermentation: A strategy to improve wheat bran functionality [J]. LWT-Food Science and Technology, 2020, 118:108668.
- [32] ZHAO H M, GUO X N, ZHU K X. Impact of solid state fermentation on nutritional, physical and flavor properties of wheat bran[J]. Food Chemistry, 2017, 217:28-36.
- [33] SERVI S, ÖZKAYA H, COLAKOĞLU A S. Dephytinization of wheat bran by fermentation with bakers' yeast, incubation with barley malt flour and autoclaving at different pH levels[J]. Journal of Cereal Science, 2008, 48(2):471-476.

- [34] LIU C M, YAN X Y, XU X F, et al. Changes in granular swelling and rheological properties of food crop starches modified by superheated steam [J]. *Starch-Starke*, 2019, 71(3/4): 1800132.
- [35] 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.
- [36] KONG F, WANG L, CHEN H Z, et al. Improving storage property of wheat bran by steam explosion [J]. *International Journal of Food Science & Technology*, 2021, 56(1): 287-292.
- [37] 刘畅, 孟倩楠, 刘晓飞, 等. 挤压膨化技术及其应用研究进展 [J]. *饲料研究*, 2021, 44(4): 137-140.
- [38] YAN X G, YE R, CHEN Y. Blasting extrusion processing: The increase of soluble dietary fiber content and extraction of soluble-fiber polysaccharides from wheat bran [J]. *Food Chemistry*, 2015, 180: 106-115.
- [39] XUE Y M, CUI X B, ZHANG Z H, et al. Effect of β -endoxy-lanase and α -arabinoxylanase enzymatic hydrolysis on nutritional and technological properties of wheat brans [J]. *Food Chemistry*, 2020, 302: 125332.
- [40] AKTAS-AKYILDIZ E, MASATCIOGLU M T, KÖKSEL H. Effect of extrusion treatment on enzymatic hydrolysis of wheat bran [J]. *Journal of Cereal Science*, 2020, 93: 102941.
- [41] 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.
- [42] 张琳, 张仁堂. 我国全麦食品品质改良研究进展 [J]. *粮油食品科技*, 2020, 28(2): 36-42.
- [43] 张成龙. 全麦粉品质改良研究 [D]. 郑州: 河南工业大学, 2013.
- [44] 孙蓬. 亲水胶体-红薯淀粉复合物的流变特性及其应用研究 [D]. 烟台: 烟台大学, 2021.
- [45] 王赛民, 于洋, 刘金光, 等. 固态发酵麦麸对面团及面条品质的影响 [J]. *食品工业科技*, 2023, 44(2): 107-114.
- [46] CODA R, KATINA K, RIZZELLO C G. Bran bioprocessing for enhanced functional properties [J]. *Current Opinion in Food Science*, 2015, 1: 50-55.
- [47] ZHANG M Y, LIAO A M, THAKUR K, et al. Modification of wheat bran insoluble dietary fiber with carboxymethylation, complex enzymatic hydrolysis and ultrafine comminution [J]. *Food Chemistry*, 2019, 297: 124983.
- [48] ZHAO G Z, GAO Q D, HADIATULLAH H, et al. Effect of wheat bran steam explosion pretreatment on flavors of non-enzymatic browning products [J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2021, 135: 110026.
- [49] BAUER J L, HARBAUM-PIAYDA B, STÖCKMANN H, et al. Antioxidant activities of corn fiber and wheat bran and derived extracts [J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2013, 50(1): 132-138.
- [50] LIU W J, BRENNAN M A, SERVENTI L, et al. Effect of cellulase, xylanase and α -amylase combinations on the rheological properties of Chinese steamed bread dough enriched in wheat bran [J]. *Food Chemistry*, 2017, 234: 93-102.
- [51] ARTE E, RIZZELLO C G, VERNI M, et al. Impact of enzymatic and microbial bioprocessing on protein modification and nutritional properties of wheat bran [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2015, 63(39): 8685-8693.
- [52] NORDLUND E, KATINA K, AURA A M, et al. Changes in bran structure by bioprocessing with enzymes and yeast modifies the *in vitro* digestibility and fermentability of bran protein and dietary fibre complex [J]. *Journal of Cereal Science*, 2013, 58(1): 200-208.
- [53] CODA R, KÄRKI I, NORDLUND E, et al. Influence of particle size on bioprocess induced changes on technological functionality of wheat bran [J]. *Food Microbiology*, 2014, 37: 69-77.
- [54] 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.
- [55] ZHANG H W, YANG M D, FAN X F. Study on modification of dietary fiber from wheat bran [J]. *Advanced Materials Research*, 2011, 183/184/185: 1268-1272.
- [56] BARTKIENE E, ZOKAITYTE E, LELE V, et al. Combination of extrusion and fermentation with *Lactobacillus plantarum* and *L. uvarum* strains for improving the safety characteristics of wheat bran [J]. *Toxins*, 2021, 13(2): 163.
- [57] 吕春月, 杨庆余, 刘璐, 等. 微波联合酶法对小麦麸皮品质改良及结构特性影响 [J]. *食品工业科技*, 2020, 41(21): 21-28.
- [58] 刘宁. 麦麸膳食纤维对馒头发酵过程中蛋白特性及其品质的影响 [D]. 郑州: 河南工业大学, 2020.
- [59] 吕军仓, 席小艳. 质构分析仪在面制品品质评价中的应用 [J]. *粮油加工与食品机械*, 2006(3): 73-74, 77.
- [60] ZHANG Y, GAO F M, HE Z H. Effects of bran hydration and autoclaving on processing quality of Chinese steamed bread and noodles produced from whole grain wheat flour [J]. *Cereal Chemistry*, 2019, 96(1): 104-114.
- [61] 叶文俊, 汪丽萍, 叶国栋, 等. 不同改性麸皮回填全麦粉馒头品质特性的比较 [J]. *食品工业科技*, 2023, 44(10): 20-26.
- [62] 杜月红. 挤压膨化燕麦粉对油条品质的影响 [J]. *粮食与油脂*, 2020, 33(11): 61-64.
- [63] 李旭, 朱琪, 张胜来. 油条配方改良及其参数优化研究 [J]. *农产品加工(下半月)*, 2021(12): 39-41, 45.
- [64] 刘兴丽, 张菁, 吴昊, 等. 真空和面协同冻融处理对油条胚微观结构和品质的影响研究 [J]. *食品工业科技*, 2022, 43(11): 112-118.
- [65] 孟令晗, 雷思佳, 吴迪, 等. 全麦速冻油条复热加工中风味与抗氧化特性 [J]. *食品科学*, 2022, 43(4): 167-174.
- [66] 李超文. 麦麸的添加对油条品质的影响研究 [D]. 无

锡:江南大学,2014.

- [67] 李超文,郭晓娜,朱科学. 油条风味物质组成分析及添加麦麸对其影响的研究[J]. 中国粮油学报,2015,30(5):6-10.
- [68] 李玲,王立,钱海峰,等. 全麦粉对油条面团和油条质量的影响[J]. 现代食品科技,2016,32(1):242-249.
- [69] REZAEI S, ALI NAJAFI M, HADDADI T. Effect of fermentation process, wheat bran size and replacement level on some characteristics of wheat bran, dough, and high-fiber Tafton bread [J]. Journal of Cereal Science, 2019, 85:56-61.
- [70] JIN X X, LIN S Y, GAO J, et al. How manipulation of wheat bran by superfine-grinding affects a wide spectrum of dough rheological properties [J]. Journal of Cereal Science, 2020, 96:103081.
- [71] DE BONDT Y, HERMANS W, MOLDENAERS P, et al. Selective modification of wheat bran affects its impact on gluten-starch dough rheology, microstructure and bread volume [J]. Food Hydrocolloids, 2021, 113:106348.
- [72] LIN S Y, JIN X X, GAO J, et al. Impact of wheat bran

micronization on dough properties and bread quality: Part II-Quality, antioxidant and nutritional properties of bread [J]. Food Chemistry, 2022, 396:133631.

- [73] NAVROTSKYI S, GUO G, BAENZIGER P S, et al. Impact of wheat bran physical properties and chemical composition on whole grain flour mixing and baking properties [J]. Journal of Cereal Science, 2019, 89:102790.
- [74] MESSIA M C, REALE A, MAIURO L, et al. Effects of pre-fermented wheat bran on dough and bread characteristics [J]. Journal of Cereal Science, 2016, 69:138-144.
- [75] LIU Y M, SHIAU S Y. Rheological, antioxidative, and sensory properties of Chinese alkaline noodle prepared with regular and whole wheat flour [J]. International Journal of Food Engineering, 2018, 14(1):20170279.
- [76] 王昱靖. 麸皮粗细度对全麦粉挂面品质的影响研究 [J]. 现代食品, 2016(7):107-108.
- [77] 刘姣,汪丽萍,吴卫国,等. 麦麸木聚糖酶处理条件对全麦挂面品质的影响 [J]. 粮油食品科技, 2016, 24(3):79-85.

Research progress on the application of wheat bran pretreatment technology in the quality improvement of whole wheat flour and its products

HAN Jing, CHEN Peng, SUN Binghua, WANG Xiaoxi, MA Sen

College of Food Science and Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China

Abstract: The presence of wheat bran often leads to poor taste and stability of whole wheat flour and its products. By leveraging wheat bran pretreatment technology, the quality characteristics of whole wheat flour and its products can be effectively enhanced. This paper reviewed the common wheat bran pretreatment technologies, analyzed their effects on the processing properties, nutritional characteristics, and storage stability of whole wheat flour, and also discussed the application of these technologies in improving the eating quality of whole wheat products (such as Mantou, deep-fried dough sticks, bread and noodles). It was believed that crushing treatment such as stone mill, roller mill, ultrafine mill, etc. could increase the bioavailability of nutrients and reduce the content of anti-nutrients such as phytic acid, but did not change its chemical composition. While heat treatment (dry heat treatment, wet heat treatment, and superheated steam treatment) and extrusion treatment could inactivate highly active endogenous enzymes in wheat bran and prolong its storage period, they could lead to degradation of phenolic substances, thermal oxidation of fatty acids, and dull color. Biological treatment (enzymatic hydrolysis and fermentation) could increase the contents of soluble dietary fiber and improve the processing and nutritional properties of whole wheat flour, but it could not meet the diverse needs of high fiber flour products. In the future, combining with the advantages of a single pretreatment technology, guided by market demand and industrial production, the process parameters of wheat bran pretreatment technology should be further optimized, to accurately regulate the method and sequence of combined treatment, improve the quality of whole wheat flour and its products. This will provide reference for the study of the regulation mechanism of wheat bran pretreatment technology.

Key words: wheat bran; whole wheat flour; pretreatment technology; quality improvement