

DOI: 10.16210/j.cnki.1007-7561.2020.02.006

我国全麦食品品质改良研究进展

张琳, 张仁堂

(山东农业大学 食品科学与工程学院, 山东 泰安 271000)

摘要: 全麦食品含有丰富的不饱和脂肪酸、膳食纤维、高活性酶以及酚类和多糖类活性物质, 使其食用价值和营养价值远高于常规面制品。因其特殊的化学组成, 若完全依照常规面制品的加工方式进行加工, 制得的全麦食品存在食用品质不佳和耐储藏性较差等问题。因此, 在尽可能保持全麦食品原有营养成分的前提下, 如何提高其食用品质和耐储藏性俨然成为我国全麦食品产业所面临的首要问题。综述近年来我国全麦食品的品质改良方法及研究进展, 为我国全麦食品的进一步研究开发提供参考依据。

关键词: 全麦食品; 食用品质改良; 耐储藏性; 进展

中图分类号: TS213.2 文献标识码: A 文章编号: 1007-7561(2020)02-0036-07

Research progress on quality improvement of whole-wheat food in China

ZHANG Lin, ZHANG Ren-tang

(College of Food Science and Engineering, Shandong Agricultural University,
Tai'an, Shandong 271000, China)

Abstract: Whole-wheat products are rich in unsaturated fatty acids, dietary fiber, high active enzymes and phenolic and polysaccharide active substances, making them much higher in edible and nutritional value than conventional flour products. At the same time, for the special chemical composition, the whole wheat food will have some problems, such as poor edible quality and poor storage resistance if it is completely processed by the conventional processing method of flour products. Therefore, how to improve the edible quality and storage resistance of whole-wheat food has become the primary problem faced by China's whole-wheat food industry on the premise of keeping the original nutrition ingredients as much as possible. In this paper, the methods and research progress on improvement of the whole-wheat food quality in recent years were reviewed, which provided reference for further research and development of whole-wheat food in China.

Key words: whole wheat food; edible quality; storage resistance; quality improvement

全麦食品是以完整小麦为主料加工而成, 近年来在国内外发展迅速。同时, 全麦食品也是全球公认的优质健康食品, 并在人类膳食结构中占据重要位置。随着我国居民消费水平的提升, 人们对食品的要求已不再仅局限于解决基本温饱, 而是提出营养、健康和美味的更高要求, 由此全麦

食品及全谷物食品也受到消费者的广泛关注。目前, 我国居民人均谷物摄入量远低于《中国居民膳食指南》^[1]中的推荐值, 而全麦食品的出现为我国居民对麦谷类营养素的需求提供了较大的便利, 并起到一定的引导作用, 同时还解决了我国传统小麦制粉业中麦麸和麦胚的资源浪费问题, 提高了小麦的综合利用率。

1 我国全麦食品存在的品质问题

目前, 我国全麦食品主要存在耐储藏性较差、食用品质不佳和食用安全性不高等问题。而这些

收稿日期: 2019-09-26

作者简介: 张琳, 1997年出生, 男, 在读本科生, 研究方向为食品科学与工程。

通讯作者: 张仁堂, 1978年出生, 男, 副教授, 研究方向为食品科学。

问题主要与麦麸和麦胚的化学组成、内源性高活性酶和外源性污染物有较大关系。麦麸的加入对全麦食品的食用品质和食用安全性有较大影响,而麦胚的加入对全麦食品储藏性有较大影响。

由于麦麸含有大量的不溶性膳食纤维(IDF),使得全麦食品口感更加粗硬,色泽偏暗,从而导致其感官品质下降明显。同时,麦麸的添加将增大面团的形成、稳定时间,破坏面筋蛋白的稳定性和空间结构^[2],从而降低面团的理化性能和加工性能,最终导致其食用品质的降低。此外,麦麸表面易残留虫卵、化学药剂、重金属离子、外源性微生物及其毒素等污染物,从而导致全麦食品受到污染,不仅会缩短产品的储藏期,还存在巨大食用安全隐患。

而全麦食品中的麦胚组分,因存在较高含量的不饱和脂肪酸(DHA)、内源性脂肪酶(LPS)和脂肪氧化酶(LOX),使得其化学稳定性较差,在加工、运输、储存过程中饱和和脂肪酸极易受高活性酶和环境的影响而氧化变质,从而使产品品质下降、储藏期缩短。

2 我国全麦食品的品质改良研究

全麦食品的品质改良是生产优质全麦食品的重要环节。国内外对全麦食品的品质改良主要是通过通过对原料中麦麸和麦胚进行改良(改性)优化和稳定处理,以及将全麦食品原料(全麦粉、麦麸粉等)粒度进一步细微化。国外对全麦食品的研究较早,特别是以美国、德国和丹麦等为代表的西方国家对全麦食品已有较深入地研究^[3-4]。同时,国外对全麦食品原料的品质稳定及改良主要采用热处理技术^[5-7],对全麦面包等主食则多采用酶制剂处理^[8-9]和微生物发酵处理^[10]。目前,我国在全麦食品的品质改良研究领域也已取得较大进展,特别是在延长储藏期、改善食用品质和提高营养成分利用率方面的改良方法丰富多样,这些品质改良方法可分为物理改良法、化学改良法、生物改良法和综合改良法。

2.1 物理改良法

2.1.1 过热蒸汽技术

过热蒸汽技术^[11]是一种清洁高效的加热方式,近年来在食品加工领域的应用越来越广泛^[12]。由于过热蒸汽中氧气含量很少,因此在处理过程中,

能有效预防被处理物的氧化^[13]。此外,经过热蒸汽处理的食品还具有受热均匀、热效率高^[14-16]、营养流失少、风味品质高^[17-18]、安全卫生^[19]、灭菌和灭酶效果好^[20-24]等优点。过热蒸汽对全小麦及其组分有显著的改良优化效果,利用过热蒸汽处理小麦可快速有效地杀灭其携带的微生物(细菌、霉菌和芽孢杆菌等);利用过热蒸汽单独处理麦麸可改良其营养品质及储藏特性,相对于热风钝化的麦麸,过热蒸汽钝化的麦麸具有更好的色泽、更高的抗氧化活性以及较低的过氧化值,其保质期显著延长;此外,过热蒸汽处理可使全麦粉中的蛋白发生聚集反应,使其分子量增大,自由巯基含量减少,不溶性蛋白聚合物增多,蛋白二级结构向更规则的 α -螺旋、 β -折叠转变,从而造成处理后粉质特性改善,面团的流变性能提高^[12]。

2.1.2 蒸汽爆破技术

蒸汽爆破技术^[25-26]简称汽爆技术,其原理是利用高温饱和蒸气压快速渗入植物细胞组织中,并在极短时间内瞬间泄压,将热能转化为机械能,达到破坏植物组织结构的作用^[27]。利用蒸汽爆破技术对全麦食品原料及麦麸进行预处理,能将不溶性膳食纤维(insoluble dietary fiber, IDF)转化为可溶性膳食纤维(soluble dietary fiber, SDF),从而较大程度地提高SDF含量,同时对微生物、高活性酶有较好的灭活作用,对全麦食品的食用品质和耐储存性均有较好的改良作用。贺永惠等^[28]通过对麦麸进行蒸汽爆破处理,发现经蒸汽爆破处理后麦麸水溶性戊聚糖的含量得到显著提升($P<0.05$)。此外,赵梦丽等^[29]也研究蒸汽爆破处理对麦麸组分溶出效果的影响,发现经蒸汽爆破处理后麦麸中可溶性总糖、蛋白质、戊聚糖以及游离型酚酸含量均显著升高。因此,蒸汽爆破技术不仅对全麦食品的食用品质和耐储藏性有一定的改善作用,还对其营养成分的转化利用率有一定的提升作用。

2.1.3 挤压改性技术

挤压改性^[30]是通过外部加热、物料间摩擦生热以及物料与机器内壁摩擦产热,使得机器内始终维持高温高压状态,而在物料从机器口挤出的过程中,由于受到巨大的压力差使物料膨胀失水,并在膨胀过程中其内部结构发生改变。国内相关

研究发现,挤压膨化处理可提高全麦食品中的麸皮膳食纤维的溶解性^[31-32],降低全麦食品的粗糙口感,并可在一定程度上降低麸皮加入所携带的不良气味^[33],从而提高其食用品质。目前,挤压处理技术已被广泛应用到粮食加工领域,冯春露等^[34]研究了挤压处理对麸片回添粉馒头储藏的品质影响,结果显示挤压处理对短期储藏的回添粉馒头内部结构有改善作用。陶春生等^[35]研究发现,挤压改性麸皮膳食纤维会降低面条的外观,但会改善其口感,总的感官评价有所提高。此外,挤压处理对全麦食品保质期的延长有显著作用。汪丽萍等^[36]研究了麸皮和胚芽的挤压热处理对全麦粉品质的影响,结果表明挤压处理能有效降低麸皮和胚芽的脂肪酸,对全麦粉的储藏稳定性有提升作用,对麸皮组分和胚芽组分中生理活性物质的保留有积极作用,从而能够最大限度保持全麦粉的营养价值。

2.1.4 微波技术

微波^[37-38]是一种射频在 300 MHz~300 GHz、波长在 0.000 1~1m 的高频电磁波^[39]。微波技术在食品工业中的应用主要是利用其热效应和非热效应^[40],而在全麦食品的生产加工中主要是利用其电磁效应和热效应对微生物和高活性酶进行灭活、钝化,特别是对麦麸表面的外源性微生物的灭活、麦胚中高活性酶(LPS、LOX)及麦麸中的钝化,从而达到延长产品保质期的目的。

李进伟等^[41]利用微波热效应钝化麦胚中的 LPS 和 LOX,并研究了麦胚在不同条件下的稳定效果、得油率和品质变化,结果表明:在微波功率 600 W、微波时间 3 min 的条件下,内源性脂肪酶活性降低至 39.91%,脂肪氧化酶活性降低至 27.48%,且在该条件下麦胚的得油率为 9.70%,总 VE 保留率为 95.24%,麦胚脂肪酸组成无明显变化,在 60 d 的加速储藏实验中酸值(KOH)仅增加 1.03 mgKOH/g。此外,国内相关研究发现微波处理不仅能降低全麦粉中的菌落总数和多酚氧化酶(PPO)活性,抑制全麦鲜湿面的褐变,还能提高全麦面团的稳定性、弹性和类固体性质以及面条煮后的拉断力^[42],同时显著增大了热诱导小麦面筋蛋白凝胶的凝胶强度和持水性^[43]。因此,利用微波技术处理全麦食品原料及单独处理某一

组分,不仅对全麦食品的耐储藏性具有显著提升,还对其理化性质的改善和营养成分的保持有较好效果。但若对全麦粉进行长时间微波处理,会导致其中的面筋受到破坏,抗剪切能力和热稳定性降低^[44],2-戊基呋喃、醛类、酸类和脂类等阈值较低的挥发性物质含量降低,从而在一定程度上降低全麦粉的风味^[45]。

2.1.5 超微粉碎技术

由于麦麸主要由综纤维素、淀粉、戊聚糖和木质素等构成,从而导致其韧性较强,加工难度较大。若使用普通面粉加工设备进行全麦粉加工,所制得的全麦粉粒度较大,不适于加工全麦食品。因此,超微粉碎技术作为一种新型粉碎法用于全麦粉及麦麸粉的生产,且在诸多超微粉碎方法中尤其以低温振动破碎法^[46]最具有代表性,其拥有生产效率高、粉碎粒度均匀和节能降耗效果好等特点,适于加工生产绝大部分全麦食品。

罗斐斐等^[47]在对紫色小麦进行超微粉碎过程中发现,随着超微成分的增多,全麦粉的面筋含量、面筋指数、流变学特性和糊化黏度都有不同程度的提高。导致这些变化的主要原因是超微粉碎改变了麸皮中不溶性膳食纤维的理化性质。因此,对全麦食品食用品质影响最大的因素为麸皮组分的粉碎度。相关研究也表明,与添加粗麦麸粉相比,添加经超微粉碎后的麦麸可显著改善面团的吸水率、峰值粘度和淀粉热凝胶稳定性,同时可改善面筋网络的连续性和致密性^[48],从而使其食用品质得到较大程度的改善。但粉碎粒度不是越小越好,赵吉凯^[49]、陈莉^[50]和刘丽娅^[51]等研究了不同粉碎粒度对全麦馒头的品质影响,结果表明:随着粉碎粒径的不断减小,其面团硬度先降低后上升,弹性先增大后减小,粉碎粒径过小会导致馒头品质劣化。因此,若以全麦粉为原料加工不同种类的全麦食品还需要选择粉粒规格合适的全麦粉。

2.1.6 超高压技术

超高压技术是指将食品物料密封于弹性容器或耐压装置系统中,在高静压(通常为 100 ~ 700 MPa)下进行处理,常以水或其他流体介质为传递压力的媒介,以达到灭菌、改变物料某些理化特性的食品非热加工技术^[52]。超高压技术对

食品原有感官风味和营养成分有高度保持作用,其通过改变全麦食品中麦麸、麦胚及小麦淀粉等组成的结构,从而实现品质的改良。

李梦琴^[53]和任顺成^[54]研究发现,经超高压处理的麦麸结构更加疏松,颗粒体积膨大,表面孔隙和层状结构增多,其性能和感官品质得到显著改善;刘伟等^[55]研究发现,瞬时高压处理麦麸膳食纤维可提高SDF的含量以及麦麸膳食纤维的持水力、膨胀率和结合水力。同时,在超高压条件下麸皮表面微生物的正常代谢功能和增殖能力会遭到破坏^[56],麦麸和麦胚中的内源性酶也会被钝化,从而起到延长全麦食品储藏期的作用。蓝琳^[57]研究发现超高压处理改变了麦胚蛋白质的高级结构,并显著提高麦胚的溶解性,从而提高机体对其吸收利用率。此外,超高压处理还会使得小麦蛋白凝胶化,蛋白凝胶的网状结构可吸收水分、糖、脂肪、风味物质以及食品中的其他成分^[52],因此对全麦食品的整体食用品质均有改善作用。王大毛等^[58]研究发现小麦蛋白质在高压(200 MPa)作用下发生断裂并组织化,淀粉颗粒破碎。而在淀粉颗粒破碎的过程中其吸湿性、溶解度和膨胀度上升,糊化特性和回升特性也发生相应改变^[52]。

因此,超高压处理不仅对全麦中的微生物和内源性酶有较好的抑制效果,还对其中的胚蛋白、麸皮和淀粉等具有一定的变性改良效果,从而使全麦食品的食用品质、营养成分利用率及储藏性得到全面提升。

2.2 化学改良法

化学改良法在全麦食品加工过程中主要起到抑制外源性微生物,钝化高活性酶,提高SDF、优质蛋白、天然抗氧化剂阿魏酸和维生素E等营养素含量的作用,从而提高全麦食品的耐储藏性、营养价值和食用品质。常用的化学方法为添加化学试剂、改良剂、抗氧化剂和化学酶抑制剂法,添加的化学试剂一般为SO₂、O₃、酸、碱、乙醇和CaCl₂等,其中SO₂钝化酶效果最好^[59];添加的化学改良剂和抗氧化剂一般为谷朊粉、乳化剂、亲水胶体和抗坏血酸等。

2.2.1 添加化学试剂

此外,臭氧处理麦麸对细菌生长繁殖有较强的抑制作用,湿法和干法均能使麦麸中菌落总数

降低90%左右,但干法处理后会残留令人无法接受的刺激性气味,相较之下湿法处理效果更佳^[60]。王明莹等^[61]研究发现真空碱液(Na₂CO₃)润麦可延长全麦粉的稳定时间,增强面团中面筋筋力,提高全麦粉的糊化特性,增加全麦面团的黏弹性。但酸、碱处理在全麦食品加工中对产品的颜色、营养成分和特有风味具有较大影响,因此该方法在使用上会受到诸多限制。目前国内全麦食品及其组分的改良研究更倾向于添加无污染、无副作用的天然抗氧化剂^[59]和改良剂。

2.2.2 添加改良剂

陈佳佳等^[62]研究了谷朊粉(VG)、硬脂酰乳酸钠(SSL)、单甘脂(GMS)对100%全麦面条品质的影响,结果表明:VG添加量为3%时,对全麦面条的改良效果最佳,而SSL和GMS对全麦面条的改良效果不显著。张慧娟等^[63]研究发现添加VG可使麸皮面条的DPPH·清除率较小麦面条显著增加134.5%~210.7%,从而有效改善面团及面条品质。此外,国内相关研究还发现抗坏血酸的添加对麸皮面包的品质也具有一定的改善效果^[64]

2.2.3 添加抗氧化剂

王君茹等^[65]研究了抗氧化剂对麦胚贮藏稳定性的影响,分别以特丁基对苯二酚(TBHQ)、丁基羟基茴香醚(BHA)、2,6-二叔丁基-4-甲基苯酚(BHT)及壳聚糖溶液(CS)对其进行喷涂处理,并通过测定其酸值和过氧化值来评价这四种抗氧化剂的稳定效果,结果表明:引起麦胚酸败的主要因素是氧气和内源性酶,抗氧化剂可以延缓麦胚的酸败,稳定效果由低到高依次为CS、BHA、BHT和TBHQ。董丽艳等^[66]通过测定酸价、过氧化值和TBA值,比较TBHQ、BHA、L-抗坏血酸棕榈酸酯和抗坏血酸(Vc)对小麦胚芽储藏性的影响,结果发现:TBHQ的抗氧化效果最好,BHA抗氧化效果略优于L-抗坏血酸棕榈酸酯,相较之下Vc抗氧化效果稍差。因此,添加抗氧化剂对全麦食品,特别是其中的麦胚组分有一定的稳定作用,能有效防止其酸败并延长其储藏期。

2.3 生物改良法

2.3.1 酶制剂处理

酶制剂改良法主要是通过活性酶对全麦食品中的IDF大分子糖苷键断链转化为SDF,从而降

低全麦食品的粗糙口感、提高其食用品质。其中最常用的酶为纤维素酶(CE)、木聚糖酶(LXS)、葡萄糖氧化酶(GOD)和戊聚糖酶(PN)等。

刘娇等^[67]利用 LXS 对全麦粉的麸皮组分进行酶解处理,再将其制作成全麦挂面并对其品质进行分析评价,结果显示经 LXS 处理后制得的全麦挂面营养品质显著提高。刘丽娅等^[68]添加 GOD 40 mg/kg、PN 40 mg/kg 和 CE 30 mg/kg 对全麦粉进行酶解改良,并将改良后的全麦粉加工制作为全麦馒头,其比容较空白样品提高 22%,内部结构得到明显改善,气孔均匀、质地疏松、粗糙感显著降低。孙晓雪等^[69]研究发现葡萄糖氧化酶(GOD)和谷氨酰胺转胺酶(MGT)对发酵麦麸面包团均有显著改善作用,且 MGT 比 GOD 对麦麸面团的改良效果更显著,其添加量为 3.0 U/g 较适宜。李娟^[70]研究了内切木聚糖酶对全麦苏打饼干烘焙品质的影响,发现随内切木聚糖酶添加量的增加,全麦苏打饼干的堆积高度和比容值均升高。马福敏等^[71]研究多酚氧化酶漆酶(LAC)对全麦面包品质和全麦面团流变性的影响,发现 LAC 能对全麦面包质构起到显著改善作用,提高全麦面团的粘弹性,延长面包的老化时间。酶制剂处理操作方便,且对全麦食品中的粗糙口感和整体感观改善效果显著。

2.3.2 发酵处理

微生物发酵改良是利用微生物代谢过程中的某些酶或酶系,将改良对象特定组分转化成含有特殊功能基团产物的生物化学反应过程。在全麦食品的加工中,常用乳酸菌、酵母菌等益生菌对麸皮进行改性,从而达到对全麦食品感官品质和理化性质的改良效果。相关研究表明,以经发酵处理的麦麸制作麸皮馒头,其风味化合物种类从 68 种增加到 71 种^[72],使其风味更佳。

罗昆^[73]、张逢温^[74]和杨文丹^[75]利用马克斯克鲁维酵母(*K.marxianus*)对麦麸进行发酵,再将发酵后的麸皮回添制作麸皮面包,结果显示:马克斯克鲁维酵母发酵麦麸面包的内部面筋网络结构、比容、持气性显著提升,且发酵麸皮中水溶性阿拉伯木聚糖含量显著提高、游离酚及阿魏酸含量也有所升高,使其总体营养品质得以提升。王太军^[76]通过研究乳酸菌发酵麸皮和普通麸皮对

馒头品质的影响,发现与普通麸皮相比,发酵麸皮面团形成时间和稳定时间缩短,面团发酵速度更快,其面筋网络结构、比容和持气性也得到显著提升,从而口感得到较好地改善。因此,通过对全麦食品的原料及部分组成进行发酵处理,不仅能提高其营养品质,还能改善其食用品质,最终达到改良其整体品质的效果。

2.4 综合改良法

综合改良法一般由以上两种及以上改良方法混合使用,且改良效果较单种改良法更加显著。常见的全麦食品综合改良法有超声波辅助酸(碱)改良法、超声波辅助酶改良法、菌酶复合改良法和添加复配改良剂等。

夏秀华等^[77]、刘娅等^[78]和周玉东^[64]以复配酶制剂、复配乳化剂和抗氧化剂等添加剂制作复配型改良剂,通过正交实验确定复配型麸皮面包改良剂配方,制得的麸皮面包在食用品质上得到较大提升。熊俐等^[79]利用复合菌(酵母、乳酸菌、甜酒曲)和复合酶制剂(GOD、LXS 和 CE)进行麸皮面包品质的改良,实验发现:乳酸菌、甜酒曲能延缓麸皮面包的老化,改善其质量;而 CE 和 LXS 分别对麸皮面包的质量和老化度影响最大。张慧娟等^[80]先对麸皮进行乳酸菌和酵母菌的混合发酵,再用 LXS 对其进行水解处理,使得麸皮中 SDF 含量能达到 5.04%,可有效降低麸皮的粗糙口感。

此外,还可对全麦食品原料组分进行单独改良,改良结束后再进行回添,如麦麸和麦胚。蔡沙^[81]、吴俊男^[82]和盛慧^[83]分别利用超声波辅助碱法、超声波-酶法和超声波糖基化对麦麸进行改性研究,结果表明:改性后的膳食纤维分子量明显下降,麦麸蛋白的乳化性得到提升。

3 结论与建议

全麦食品营养丰富,但我国对于全麦食品的开发研究起步较晚,主要存在食用品质不佳、耐储藏性较差和加工方式单一等问题。唯有解决其品质改良技术这一关键性问题,才能使之在国内消费市场推广开来。而全麦食品品质改良的根本原理是提升高活性物质稳定性、降低 IDF 含量,国内相关研究也是围绕这一原理展开。但由于我国

居民饮食习惯与国外存在较大差异,全麦食品开发的侧重点和方向也有所区别,因此不能完全照搬国外的成熟改良技术。就目前而言,蒸汽爆破技术、过热蒸汽技术和微波技术等热处理技术对全麦食品改良效果最佳,同时避免营养物质的流失和添加剂的额外加入,此外国内相关研究发现热处理技术对全麦食品中麸皮组分的不良气味具有一定改善作用^[84]。

目前,国内在全麦食品及全麦食品组分的品质稳定及改良领域已有诸多研究成果,但大部分改良法都只是针对“全麦”中的单一组分,没有对其整体进行综合性的品质改良研究,从而导致这些改良法均有一定的局限性。且许多改良方法对全麦食品的营养成分具有较大损耗。因此,如何在最大限度保留全麦食品中营养成分和风味物质的情况下,改善其食用品质和提升耐储存性将是我国全麦食品产业下一步需要重点研究的内容。全麦食品的品质改良研究是我国全麦食品产业从单纯营养向营养、健康和美味转变的一个重要转折点,它将推动我国全麦食品产业的全面发展和推广。此外,加大我国全麦食品的品质改良研究和技术开发对小麦的综合利用率、改善我国居民膳食结构具有重要意义。

参考文献:

- [1] 中国营养学会. 中国居民膳食指南 2016[M]. 北京: 人民卫生出版社, 2016.
- [2] 安兆鹏, 王然, 赵文哲, 等. 麦麸对面团及面筋蛋白特性的影响[J]. 食品研究与开发, 2018, 39(9): 11-17.
- [3] SEAL C J, JONES A R. Whole grains uncovered[J]. British nutrition foundation Nutrition bulletin, 2006, 31: 129-137.
- [4] PRIMO -MARTIN C, VAN DEVENTER H. Deep -fat fried battered snacks prepared using super heated steam (SHS): Crispness and low oil content[J]. Food Research International, 2011, 44(1): 442-448.
- [5] RASHID S, RAKHA A, ANJUM F M, et al. Effects of extrusion cooking on the dietary fibre content and water solubility index of wheat bran extrudates[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2015, 50(7): 1533-1537.
- [6] LUDMILLA C O, MARCIO S, CAROLINE J S. Development of whole grain wheat flour extruded cereal and process impacts on color, expansion, and dry and bowl-life texture[J]. LWT - Food Science and Technology, 2017, 75: 261-270.
- [7] FRÉDÉRIC R, CÉDRIC D, NICOLAS P, et al. Process, structure and texture of extruded whole wheat[J]. Journal of Cereal Science, 2012, 56(2): 358-366.
- [8] BOTH J, ESTERES V P, SANTETTI G S, et al. Phenolic compounds and free sulfhydryl groups in whole grain wheat flour modified by xylanase. [J]. Journal of the science of food and agriculture, 2019, 99(12): 5392-5400.
- [9] MATSUSHITA K, TERAYAMA A, GOSHIMA D, et al. Optimization of enzymes addition to improve whole wheat bread making quality by response surface methodology and optimization technique. [J]. Journal of food science and technology, 2019, 56(3), 1454-1461.
- [10] FOIS S, CAMPUS M, PIU P P, et al. Fresh pasta manufactured with fermented whole wheat semolina: physicochemical, sensorial, and nutritional properties. [J]. Foods (Basel, Switzerland), 2019, 8(9), 422.
- [11] HU Y M, WANG L J, ZHU H, et al. Superheated steam treatment improved flour qualities of wheat in suitable conditions[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2017, 41(6).
- [12] 胡月明. 过热蒸汽处理对小麦及小麦粉品质的影响研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2018.
- [13] 唐新玥, 李再贵. 过热蒸汽处理对薏苡仁脂肪酶活性的影响[J]. 中国食品工业, 2016(6): 58-61.
- [14] PAKOWSKI Z, ADAMSKI R. On prediction of the drying rate in superheated steam drying process [J]. Drying Technology, 2011, 29(13): 1492-1498.
- [15] 王书兰, 张静林, 陶阳, 等. 过热蒸汽处理对脱水蒜片杀菌效果及品质影响[J]. 科学与财富, 2016, (3): 601-603.
- [16] 白丽青, 马晓建. 过热蒸汽干燥及其在食品干燥中的应用[J]. 农机化研究, 2008(9): 158-161.
- [17] 郭瑞, 安凤平, 宋洪波, 等. 过热蒸汽膨化青苹果组织结构的定量分析[J]. 福建农林大学学报, 2015, 44(1): 96-101.
- [18] 常盈. 过热蒸汽处理对燕麦原料贮藏及加工品质的影响[D]. 西安: 陕西师范大学, 2015.
- [19] 张康逸, 宋范范, 杨妍, 等. 过热蒸汽处理对青麦仁的减菌效果及品质的影响[J]. 现代食品科技, 2017, 33(12): 216-220+28.
- [20] CENKOWSKI S, PRONYK C, ZMIDZINSKA D, et al. Decontamination of food products with superheated steam[J]. Journal of food engineering, 2007, 83(1): 68-75.
- [21] PRONYK C, CENKOWSKI S, ABRAMSON D. Superheated steam reduction of deoxynivalenol in naturally contaminated wheat kernels[J]. Food Control, 2006, 17(10): 789-796.
- [22] KONDOJOYAN A, PORTANGUEN S. Effect of superheated steam on the inactivation of *Listeria innocua* surface-inoculated onto chicken skin[J]. Journal of food engineering, 2008, 87(2): 162-171.
- [23] BARI L, NEI D, SOTOME I, et al. Effectiveness of superheated steam and gas catalytic infrared heat treatments to inactivate *Salmonella* on raw almonds[J]. Foodborne pathogens and disease, 2010, 7(7): 845-850.
- [24] HEAD D S, CENKOWSKI S, ARNTFIELD S, et al. Superheated steam processing of oat groats[J]. LWT Food Science and Technology, 2010, 43(4): 690-694.
- [25] E. AKTAS-AKYILDIZ O, MATTILA N, SOZER K, et al. Effect of steam explosion on enzymatic hydrolysis and baking quality of wheat bran[J]. Journal of Cereal Science, 2017.
- [26] YONGSHENG C, RUITING Z, CHONG L, et al. Enhancing antioxidant activity and antiproliferation of wheat bran through steam flash explosion[J]. Journal of Food Science and Technology, 2016, 53(7): 3028-3034.
- [27] 肖俊琪, 翟爱华, 李嘉庆, 等. 蒸汽爆破预处理辅助提取米糠蛋白的工艺研究[J]. 中国食品添加剂, 2018(9): 134-141.
- [28] 贺永惠, 王清华, 黄会丽, 等. 蒸汽爆破提高小麦麸皮中水溶性戊聚糖含量及热重分析[J]. 农业工程学报, 2015, 31(13): 286-291.
- [29] 赵梦丽, 刘丽娅, 钟葵, 等. 蒸汽爆破处理对麦麸组分溶出效果的影响[J]. 中国食品学报, 2015, 15(8): 170-177.

- [30] MARTINEZ M, OLIVETE B, GOMEZ M. Effect of the addition of extruded wheat flours on dough rheology and bread quality[J]. *Journal of Cereal Science*, 2013, 57(3): 424-429.
- [31] 张伟博, 李鑫君, 杨立涛, 等. 双挤压膨化可提高对麦麸膳食纤维的溶解性[J]. *中国食物与营养*, 2017, 23(10): 47-49+54.
- [32] 曹哲源, 陆遥, 王鹏, 等. 全籽粒小麦挤压膨化工艺[J]. *食品工业*, 2019, 40(2): 114-117.
- [33] 张振辉. 挤压处理对麸质物料粉碎特性及全麦粉品质的影响[D]. 郑州: 河南工业大学, 2017.
- [34] 冯春露, 郭祚祥, 韩雪, 等. 挤压处理对麸皮回添馒头储藏的品质影响[J]. *食品科技*, 2018, 43(5): 163-168.
- [35] 陶春生, 陈存社, 王克俭. 挤压改性麦麸膳食纤维对面条品质的影响[J]. *食品科技*, 2017, 42(9): 132-136.
- [36] 汪丽萍, 刘宏, 田晓红, 等. 挤压处理对麸皮、胚芽及全麦粉品质的影响研究[J]. *食品工业科技*, 2012, 32(16): 141-144.
- [37] LIU C Q, MA X J. Study on the mechanism of microwave modified wheat protein fiber to improve its mechanical properties[J]. *Journal of Cereal Science*, 2016, 70: 99-107.
- [38] LAMACCHIA C, LANDRISCINA L, DAGNELLO P. Changes in wheat kernel proteins induced by microwave treatment[J]. *Food Chemistry*, 2016, 197: 634-640.
- [39] 池建伟, 魏振承, 徐志宏, 等. 微波技术在食品加工中的应用技术[J]. *中国调味品*, 2003, 3(1): 7-9.
- [40] 冯薇丽, 彭增华, 何明奕, 等. 微波技术在食品加工中的应用[J]. *昆明理工大学学报(理工报)*, 2004, 29(5): 52-55.
- [41] 李进伟, 李李, 刘元法. 麦胚微波稳定化及其对麦胚油品质的影响[J]. *中国油脂*, 2016, 41(5): 39-44.
- [42] 赵梅, 韩传武, 宋俊男, 等. 微波处理对全麦粉理化性质及全麦鲜湿面品质的影响[J]. *中国粮油学报*, 2019, 34(1): 18-23.
- [43] 陆毅, 穆冬冬, 罗水忠, 等. 微波预处理对热诱导小麦面筋蛋白凝胶性质和微观结构的影响[J]. *中国粮油学报*, 2018, 33(11): 14-19.
- [44] 王芳婷. 微波稳定化对全麦粉品质的影响[D]. 郑州: 河南工业大学, 2016.
- [45] 渠深玲, 王红亮, 王芳婷, 等. 微波处理对小麦风味的影响[J]. *粮食与油脂*, 2017, 30(9): 26-28.
- [46] 程敏, 刘保国, 王攀, 等. 小麦麸皮超微粉碎技术研究进展[J]. *河南工业大学学报(自然科学版)*, 2017, 38(6): 123-130.
- [47] 罗斐斐, 侯汉学, 董海洲, 等. 脱皮及超微粉碎对紫麦全麦粉加工品质的影响[J]. *食品工业科技*, 2012, 33(11): 130-133.
- [48] 徐小云, 徐燕, 汪春名, 等. 麦麸超微粉碎对面团流变特性与网络结构的影响[J]. *安徽农业大学学报*, 2018, 45(6): 977-982.
- [49] 赵吉凯, 王凤成, 付文军, 等. 不同粉碎度对全麦粉及其馒头品质的影响[J]. *河南工业大学(自然科学版)*, 2017, 38(1): 37-44.
- [50] 陈莉, 刘玉兰, 张平, 等. 全麦粉粒度对馒头品质的影响[J]. *河南工业大学学报(自然科学版)*, 2017, 38(6): 36-40.
- [51] 刘丽娅, 岳颖, 蔺艳君, 等. 麸皮粒径对全麦面团流变特性和馒头品质的影响[J]. *现代食品科技*, 2018, 34(18): 82-88+210.
- [52] 于勇, 潘芳, 苏光明, 等. 超高压技术在粮食产品加工中的应用[J]. *农业机械学报*, 2015, 46(10): 247-256+297.
- [53] 李梦琴, 王跃, 赵杨, 等. 麦麸超高压处理条件优化及其微观结构观察[J]. *食品与机械*, 2011, 27(4): 10-14.
- [54] 任顺成, 万毅, 李丹. 超高压对麦麸及其植酸含量变化的影响[J]. *食品研究与开发*, 2019, 40(7): 29-33.
- [55] 刘伟, 刘成梅, 黎冬明, 等. 瞬时高压作用对麦麸膳食纤维改性的研究[J]. *食品科学*, 2006, 27(11): 82-85.
- [56] 李仁杰, 王永涛, 廖小军. 超高压对食品中微生物的影响[J]. *食品安全质量检测学报*, 2014, 5(8): 2523-2531.
- [57] 蓝琳. 麦胚蛋白提取及超高压对其特性的影响[D]. 陕西: 西北农林科技大学, 2008.
- [58] 王大毛, 张正茂, 梁灵, 等. 高压处理小麦淀粉和蛋白质显微结构研究初报[J]. *西北农业学报*, 2010, 19(7): 57-60.
- [59] 林江涛, 王君茹, 苏东民. 小麦胚芽稳定化技术研究概述[J]. *粮食与油脂*, 2018, 31(2): 1-4.
- [60] 李焕. 食用麦麸安全特性及品质改良研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2017.
- [61] 王明莹, 郭晓娜, 朱科学. 真空碱溶液润麦处理对全麦粉稳定性和品质特性的影响[J]. *食品与机械*, 2017, 33(2): 6-10.
- [62] 陈佳佳, 任国宝, 任晨刚, 等. 谷朊粉、乳化剂对全麦面条品质的影响[J]. *粮食与油脂*, 2018, 31(6): 72-75.
- [63] 张慧娟, 冯钰琳, 段雅文, 等. 谷物麸皮对面团及中式面条品质的影响[J]. *中国食品学报*, 2019, 19(2): 71-79.
- [64] 周玉东. 麸皮面包品质改良研究[J]. *江苏农业科学*, 2010, (5): 386-388.
- [65] 王君茹, 林江涛, 苏东民. 不同种类抗氧化剂对麦胚稳定化效果的影响[J]. *粮食加工*, 2017, 42(1): 11-13.
- [66] 董丽艳, 陈存社, 查梦吟, 等. 不同抗氧化剂及包装材料对烘焙小麦胚芽储藏期的影响[J]. *食品工业科技*, 2014, 35(6): 321-324+337.
- [67] 刘娇, 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.
- [68] 刘丽娅, 岳颖, 蔺艳君, 等. 复合酶制剂对全麦馒头品质的改良作用[J]. *中国粮油学报*, 2019, 34(2): 14-19.
- [69] 孙晓雪, 李蕴涵, 李柚, 等. 葡萄糖氧化酶和谷氨酰胺转氨酶对发酵麦麸面团加工品质的影响[J]. *食品工业科技*, 2019, 40(9): 85-90.
- [70] 李娟. 全麦苏打饼干烘焙品质改良以及水分迁移机制的研究[D]. 江南大学, 2013.
- [71] 马福敏, 李晓磊, 刘博. 氧化酶在全麦面包制作中的应用研究[J]. *中国粮油学报*, 2017, 32(9): 147-152+159.
- [72] 崔晨晓. 麸皮的发酵改性及其在馒头中的应用[D]. 无锡: 江南大学, 2015.
- [73] 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.
- [74] 张逢温, 杨文丹, 张宾乐, 等. 发酵麦麸对面包膳食纤维组成及烘焙特性的影响[J]. *食品工业科技*, 2019, 40(5): 1-6+11.
- [75] 杨文丹, 张宾乐, 庄靛, 等. 发酵麦麸对面包面团生化特征及烘焙学特性的影响[J]. *食品与机械*, 2018, 34(3): 6-11.
- [76] 王太军. 麸皮乳酸菌发酵改性及其在馒头中的应用[D]. 郑州: 河南工业大学, 2017.
- [77] 夏秀华, 李玉美, 严晓鹏. 复配型麸皮面包改良剂的确定[J]. *食品工业*, 2014, 35(12): 100-103.
- [78] 刘娅, 周结祥, 袁青峰, 等. 黑小麦新春 36 号麸皮面包复配改良剂研究[J]. *食品工业科技*, 2014, 35(24): 312-316.
- [79] 熊俐, 曹新志, 吕开斌, 等. 复合菌和酶制剂在麸皮面包品质改良上的应用[J]. *食品研究与开发*, 2013, 34(16): 22-25.
- [80] 张慧娟, 张小爽, 黄莲燕, 等. 麸皮生物改对面团和面筋蛋白性质的影响[J]. *食品研究与开发*, 2018, 39(3): 1-7.
- [81] 蔡沙, 施建斌, 隋勇, 等. 超声波辅助碱法提取麦麸蛋白工艺及特性研究[J]. *食品研究与开发*, 2018, 39(19): 57-62.
- [82] 吴俊男, 马森, 王晓曦, 等. 麦麸膳食纤维的超声波-酶法改性研究[J]. *粮食与油脂*, 2017, 30(6): 22-26.
- [83] 盛慧. 麦麸蛋白的提取、超声辅助糖基化改性及应用的研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2015.
- [84] 王太军, 温纪平, 王华东, 等. 热处理对小麦挥发性成分的影响[J]. *粮食与油脂*, 2016, 29(8): 68-70. 完