

微波辐照稳定化处理小麦籽粒及其品质变化的研究

任国宝¹, 邹美丽¹, 陈佳佳¹, 曾维鹏², 魏晓明¹, 顾娟¹, 任晨刚^{1,3,*}

- (1. 中粮营养健康研究院有限公司, 营养健康与食品安全北京市重点实验室,
老年营养食品研究北京市工程实验室, 北京 102209;
2. 深圳市深粮质量检测有限公司, 广东深圳 518000;
3. 江苏省现代粮食流通与安全协同创新中心, 江苏南京 210023)

摘要:以河北优质白麦为原料,研究了微波辐照功率、辐照时间、润麦水分、润麦时间等参数对全麦粉脂肪酶活动度、湿面筋含量的影响,考察了适度微波辐照对面粉粉质特性和糊化特性的影响。结果表明微波辐照能够显著降低($p < 0.05$)全麦粉的脂肪酶活动度和湿面筋含量。适度的微波辐照(微波功率 420 W,辐照时间 90 s,润麦水分 14%,润麦时间 25 min)能够大幅降低全麦粉脂肪酶活动度,同时对其湿面筋含量损伤较小,并提高面粉粉质稳定时间,降低弱化度,增加了面糊峰值粘度和回生值,改善了面筋强度和面糊稳定性,延缓了全麦粉脂肪酸值的升高。

关键词:微波辐照,脂肪酸值,湿面筋,脂肪酶活动度

Study on Microwave Irradiation Stabilization of Wheat Grain and Its Quality Change

REN Guo-bao¹, HUAN Mei-li¹, CHEN Jia-jia¹, ZENG Wei-peng²,
WEI Xiao-ming¹, GU Juan¹, REN Chen-gang^{1,3,*}

- (1. COFCO Nutrition & Health Research Institute, Beijing Key Laboratory of Nutrition & Health and Food Safety,
Beijing Engineering Laboratory for Geriatric Nutrition Food Research, Beijing 102209, China;
2. Shenzhen Shenliang Quality Testing Co., Ltd., Shenzhen 518000, China;

3. The Jiangsu Province Center of Cooperative Innovation for Modern Grain Circulation and Security, Nanjing 210023, China)

Abstract: With Hebei white wheat used as experimental material to research the influence of microwave irradiation on quality of whole wheat flour like lipase activity, wet gluten content. The effects of moderate microwave irradiation on farinograph and gelatinization properties of flour were investigated. The result showed that microwave irradiation could significantly reduce ($p < 0.05$) whole wheat flour lipase activity and wet gluten content. Moderate intensity of microwave irradiation (microwave power 420 W, irradiation time 90 s, conditioning moisture content 14%, conditioning moisture time 25 min) could significantly reduce whole wheat flour lipase activity, at the same time, small damage for the content of wet gluten, prolong dough stability time, reduce the weakening degree, increase the peak viscosity and setback value of gelatinization, improve the gluten strength and stability of batter, and delay the increase of the fatty acid value of whole wheat flour.

Key words: microwave irradiation; fatty acid value; wet gluten; lipase activity

中图分类号: TS213.2

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2019)11-0007-05

doi:10.13386/j.issn1002-0306.2019.11.002

引文格式:任国宝,邹美丽,陈佳佳,等.微波辐照稳定化处理小麦籽粒及其品质变化的研究[J].食品工业科技,2019,40(11):7-11.

小麦籽粒主要是由麸皮、胚芽和胚乳三部分组成,全麦粉则包含了整个小麦籽粒的全部营养成分,含有丰富的蛋白质、矿物质、维生素、酚类化合物以及活性多糖(小麦膳食纤维)等营养成分,不仅可以

满足人体的营养需求,而且对降低糖尿病、便秘、高血脂、冠心病和高血压等的发病率有良好的促进作用,因此越来越受到人们的关注^[1-3]。但是麸皮和胚芽含有丰富的不饱和脂肪酸和脂肪水解酶,极易出

收稿日期:2018-09-18

作者简介:任国宝(1987-),男,硕士,工程师,研究方向:谷物食品开发,E-mail:renguobao@cofco.com。

* 通讯作者:任晨刚(1978-),男,博士,高级工程师,研究方向:谷物食品开发,E-mail:rengcg@cofco.com。

基金项目:国家重点研发计划(2018YFD0401002,2017YFD0401205)。

现脂肪氧化降解现象,导致全麦粉在短期内即出现哈喇味,影响其食用品质^[3-4]。目前解决全麦粉货架期的有效方法是对麸皮和胚芽先进行稳定化处理,较为流行的方法是进行挤压膨化处理,然后将稳定化后的麸皮、胚芽与面粉按比例回添复配成全麦粉^[5]。此种方法制备的全麦粉具有较长的货架期,但仍存在一些缺陷,一方面经挤压膨化的麸皮在高温、高压、高剪切条件发生了美拉德反应,整体色泽加深,导致复配后的全麦粉色泽加深^[6];另一方面复配全麦粉由复杂的传统加工工艺制备,无法满足全谷物加工的技术需求。

微波辐照加热是通过影响物料中的极性分子将交变电磁场能量转化为热能,达到对物料加热的目的^[7]。物料中极性分子的介电常数不同,使微波具有选择性加热的特性^[8]。脂肪酶和脂肪氧合酶主要存在于小麦籽粒皮层和胚芽中,通过着水润麦使小麦籽粒外部皮层的水分含量相对较高,利用微波辐照选择性加热的特性使小麦籽粒皮层温度高于胚乳部分,达到降低脂肪酶活性,而胚乳部分受损较小的效果。

本文研究了微波辐照功率、辐照时间、润麦水分、润麦时间等参数对小麦籽粒全粉脂肪酶活动度和面粉湿面筋含量的影响规律,初步探究了微波辐照后面粉品质的变化情况,并跟踪了微波辐照后小麦籽粒全粉在储藏过程中脂肪酸值的变化情况,以为全籽粒加工稳定化的全麦粉提供基础的数据支撑。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

河北优质白麦 中粮面业(秦皇岛)鹏泰有限公司;氢氧化钾、无水乙醇、无水乙醚、磷酸氢二钠、氯化钠 国药集团化学试剂有限公司。

810153 型自动粉质仪、803303 型电子粘度仪、880107 小型试验磨粉机 德国 Brabender 公司;FDV 气流式粉碎机 台湾佑崎有限公司;面筋测定系统、5200 谷物快速水分分析仪 瑞典 Perten 公司;P70D20AP-TD(WO)微波炉 广东格兰仕微波炉电器制造有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 全麦粉制备方法 采用气流式粉碎机对除去杂质后的小麦籽粒直接进行粉碎,无需在粉碎前对小麦进行润麦处理,粉碎得到的粉体即为全麦粉。

1.2.2 小麦粉制备方法 对除杂后的小麦进行润麦处理,润麦水分为 15%。准确称量小麦样品,在密闭容器里逐渐加入润麦水,加水后立即充分摇动容器以便使小麦与水均匀混合,润麦 24 h,期间不时摇动容器。润麦后采用小型实验磨粉机对小麦样品进行制粉,分别收集小麦粉和麸皮,并计算出粉率,计算公式如下:

出粉率(%) = 小麦粉质量(g)/(小麦粉质量(g) + 麸皮质量(g)) × 100

1.2.3 微波辐照处理小麦籽粒单因素试验设计 微波炉振荡频率为 2450 MHz,额定最大输出功率为

700 W,有效容积为 32 L,批处理小麦样品 150 g。微波辐照处理小麦籽粒前对小麦进行润麦处理,润麦方法按照 1.2.2 进行。每次辐照时,在转盘中央放一个直径为 10 cm 的表面皿,把按要求润麦好的样品取 150 g 均匀堆放在转盘的其他部位,并用保鲜膜覆盖整个转盘,按微波辐照试验设计要求对样品进行微波处理。每次辐照后,立即用温度计测量小麦籽粒表面的温度,并记录。辐照后的样品摊放在金属筛网上,自然冷却后入袋,密封保存备用,并测定水分。将微波辐照处理的小麦样品和未经微波辐照处理的正常小麦样品按照 1.2.1 的方法制备成全麦粉,测定其脂肪酶活动度和湿面筋含量,其中未经微波辐照处理的正常小麦样品制备成的全麦粉记为对照。

1.2.3.1 不同微波辐照功率处理小麦籽粒 小麦籽粒在微波辐照前进行润麦处理,润麦水分为 16%,润麦时间为 5 min。润麦后的小麦样品分别在功率为 140、280、420、560、700 W 下辐照处理 90 s。

1.2.3.2 不同微波辐照时间处理小麦籽粒 小麦籽粒在微波辐照前进行润麦处理,润麦水分为 16%,润麦时间为 5 min。润麦后的小麦样品在功率为 420 W 下分别辐照处理 60、90、120、150、180 s。

1.2.3.3 微波辐照前不同润麦水分处理小麦籽粒 小麦籽粒在微波辐照前进行润麦处理,润麦水分分别为 14%、16%、18%、20%,润麦时间均为 5 min。润麦后的小麦样品分别在功率为 420 W 下辐照处理 90 s。

1.2.3.4 微波辐照前不同润麦时间处理小麦籽粒 小麦籽粒在微波辐照前进行润麦处理,润麦水分为 16%,润麦时间分别为 5、15、25、35 min。润麦后的小麦样品在功率为 420 W 下辐照处理 90 s。对未经润麦处理的小麦样品进行微波辐照处理,并记为未润麦组。

1.2.4 适度微波辐照处理下小麦面粉粉质特性和糊化特性的变化 小麦籽粒在微波辐照前进行润麦处理,润麦水分为 14%,润麦时间为 25 min。润麦后的小麦样品在功率为 420 W 下辐照处理 90 s。微波辐照后的小麦样品记为微波处理,未经微波辐照处理的正常小麦样品记为对照,将两组小麦样品按照 1.2.2 的方法制备成小麦粉,并测定小麦粉的粉质特性和糊化特性。

1.2.5 全麦粉货架期测定 考察适度微波辐照(微波功率 420 W,辐照时间 90 s,润麦水分 14%,润麦时间 25 min)条件下全麦粉的货架期,其中适度微波辐照的小麦样品记为微波处理,未经微波辐照处理的正常小麦样品记为对照,将微波处理和对照组小麦样品按照 1.2.1 的方法制备成全麦粉,并在温度为 25 ℃、相对湿度为 60% 的恒温恒湿箱中进行储藏,每间隔 2 周检测全麦粉的脂肪酸值,按照全麦粉行业标准 LS/T 3244 中对全麦粉质量指标的要求,全麦粉脂肪酸值超过 116 mg/100 g(以干基 KOH 计)即不符合质量要求。

1.2.6 面粉和全麦粉理化指标测定 水分含量的测定,参照 GB/T 21305-2007 谷物及谷物制品水分的测定 常规法;脂肪酶活动度的测定,参照 GB/T 5523

-2008 粮油检验粮食、油料的脂肪酶活动度的测定；湿面筋含量的测定，参照 GB/T 5506.2-2008 小麦和小麦粉面筋含量第 2 部分：仪器法测定湿面筋；粉质特性的测定，参照 GB/T 14614-2006 小麦粉面团的物理特性吸水性和流变学特性的测定：粉质仪法；糊化特性的测定，参照 GB/T 14490-2008 谷物及淀粉糊化特性测定：粘度仪法；脂肪酸值的测定，参考 GB/T 15684-2015 谷物碾磨制品脂肪酸值的测定。

1.2.7 数据分析 所有实验数据均为两次重复试验的平均值，方差分析采用 SPSS 19 统计软件进行处理，图表绘制通过 OriginPro 2016 进行，误差线表示的是两次重复试验的标准偏差。

2 结果与分析

2.1 微波辐照对小麦籽粒表面温度及其全麦粉脂肪酶活动度和湿面筋含量的影响

2.1.1 微波辐照功率对小麦籽粒表面温度及其全麦粉脂肪酶活动度和湿面筋含量的影响 由图 1 可以看出，微波辐照功率对全麦粉脂肪酶活动度和湿面筋含量影响显著 ($p < 0.05$)。随着微波辐照功率的增加，全麦粉的脂肪酶活动度逐渐降低，同时湿面筋含量也逐渐减少，当微波辐照功率达到 560 W 时，小麦籽粒表面温度为 83 ℃，全麦粉脂肪酶活动度从 14.1 mg/g 降至 8.4 mg/g，降低幅度达 40.4%，湿面筋含量则从 33.1% (14% wb) 降至 29.6% (14% wb)，降低幅度为 10.6%，随着微波辐照功率的继续增加，湿面筋含量大幅下降，这与 Campana^[9] 和 Błaszczak^[10] 的研究成果较为一致，他们指出微波辐照后小麦籽粒表面温度高于 79 ℃ 会导致小麦湿面筋含量大幅减少。因此，微波辐照功率不宜超过 560 W。

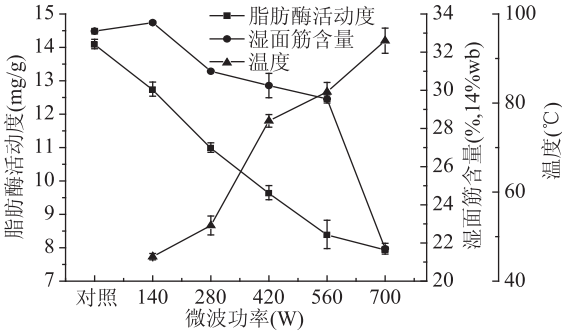


图 1 微波辐照功率对小麦籽粒表面温度及其全麦粉脂肪酶活动度和湿面筋含量的影响
Fig.1 Effects of microwave irradiation power on wheat grain surface temperature, lipase activity and wet gluten content of whole wheat flour

2.1.2 微波辐照时间对小麦籽粒表面温度及其全麦粉脂肪酶活动度和湿面筋含量的影响 微波辐照时间对小麦籽粒表面温度及其全麦粉脂肪酶活动度和湿面筋含量影响也显著 ($p < 0.05$)。从图 2 可以看出，随着微波辐照时间的增加，全麦粉脂肪酶活动度显著降低 ($p < 0.05$)，同时湿面筋含量也逐渐减少，当微波辐照时间为 120 s 时，小麦籽粒的表面温度为 80 ℃，脂肪酶活动度降至 8.8 mg/g，降低幅度为 37.6%，湿面筋含量为 29.4% (14% wb)，降低幅度为

11.2%，随着微波辐照时间的继续增加，湿面筋含量显著 ($p < 0.05$) 大幅降低。这一变化趋势与微波辐照功率一致，同时当微波辐照处理后小麦籽粒表面温度高于 80 ℃ 便会导致湿面筋含量急剧下降。所以，微波辐照时间低于 120 s 较为适宜。

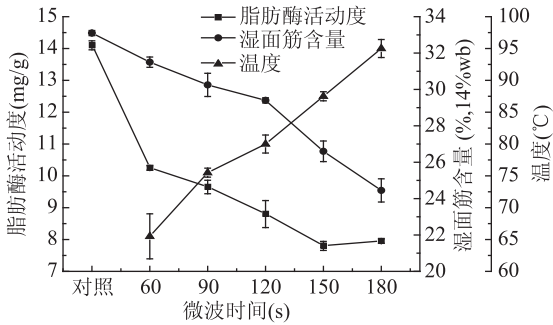


图 2 微波辐照时间对小麦籽粒表面温度及其全麦粉脂肪酶活动度和湿面筋含量的影响
Fig.2 Effects of irradiation time on wheat grain surface temperature, lipase activity and wet gluten content of whole wheat flour

2.1.3 微波辐照前不同着水润麦水分含量对小麦籽粒表面温度及其全麦粉脂肪酶活动度和湿面筋含量的影响 与未经润麦处理的全麦粉相比，经着水润麦处理的全麦粉脂肪酶活动度明显降低，湿面筋含量明显提高。河北优质白麦的原麦水分含量为 12.58%，微波辐照后其籽粒温度为 72 ℃，由于小麦籽粒水分分布均匀，籽粒胚乳内部和皮层的温度比较接近，导致其胚乳部分受热影响严重，面粉湿面筋含量大幅下降。经着水润麦的小麦籽粒皮层温度均高于 72 ℃，但由于润麦时间短，水分主要分布在小麦籽粒皮层部分，因此尽管小麦籽粒皮层温度较高，但胚乳部分温度可能远低于 72 ℃，最终湿面筋含量下降幅度相对较小。由图 3 可以看出，随着着水润麦水分的增加，全麦粉的脂肪酶活动度逐渐降低，但变化不显著，湿面筋含量则先升高后降低再升高。综合考虑稳定化后小麦品质的变化情况，当水润麦水分含量为 14% 较为适宜，此时湿面筋含量最高，同时脂肪酶活动度相对较低。

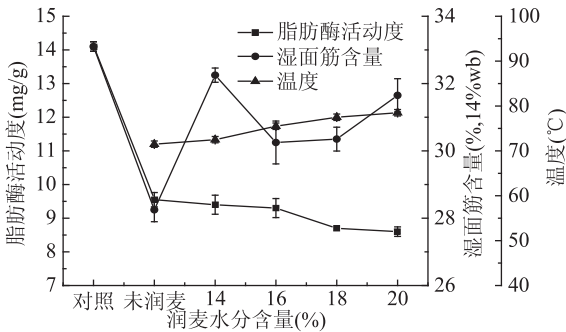


图 3 微波辐照前不同润麦水分对小麦籽粒表面温度及其全麦粉脂肪酶活动度和湿面筋含量的影响
Fig.3 Effects of tempering methods moisture content before microwave irradiation on wheat grain surface temperature, lipase activity and wet gluten content of whole wheat flour

表1 微波辐照处理前后小麦面粉的粉质特性

Table 1 Farinograph properties of wheat flour before and after microwave irradiation treatment

项目	出粉率(%)	吸水率(%)	形成时间(min)	稳定时间(min)	弱化度(FU, 12 min)
对照	66.6	54.4	6.22	8.67	84
微波处理	66.7	53.2	1.7	11.78	38

表2 微波辐照处理后小麦面粉的糊化特性

Table 2 Pasting properties of wheat flour before and after microwave irradiation treatment

项目	糊化温度(℃)	峰值粘度(BU)	崩解值(BU)	回生值(BU)
对照	60.0 ± 0.07 ^a	1796 ± 0.71 ^b	778 ± 7.07 ^a	886 ± 4.95 ^b
微波处理	60.1 ± 0.00 ^a	1832 ± 4.24 ^a	740 ± 7.78 ^b	908 ± 2.12 ^a

注:每列数据上的不同字母表示在 $p < 0.05$ 水平上存在显著差异。

2.1.4 微波辐照前不同着水润麦时间对全麦粉脂肪酶活动度和湿面筋含量的影响 不同着水润麦时间下微波辐照处理后小麦籽粒表面温度分别为 76、75、75 和 74 ℃,温度变化不大。由图 4 可以看出,随着着水润麦时间的增加,全麦粉脂肪酶活动度变化不显著,湿面筋含量则先增加后降低,着水润麦时间为 25 min 时,湿面筋含量达到最高为 31.8% (14% wb),随后逐渐降低,这可能是随着润麦时间的延长水分不断往胚乳部分迁移,小麦籽粒皮层水分降低,微波辐照后籽粒表面温度不高,同时胚乳部分迁移水分相对较少没有引起较大升温,但随着着水润麦时间的延长,胚乳部分迁移的水分增多,微波辐照后胚乳部分温度增加,从而导致湿面筋含量随之降低。因此,小麦籽粒着水润麦时间为 25 min 较为适宜,此时全麦粉的脂肪酶活动度相对较低,湿面筋含量最高。

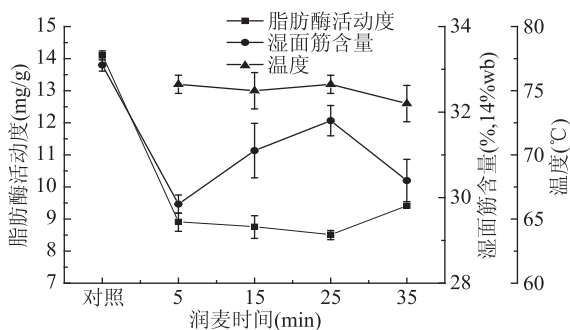


图4 微波辐照前不同润麦时间对小麦籽粒表面温度及其全麦粉脂肪酶活动度和湿面筋含量的影响

Fig.4 Effects of tempering methods moisture time before microwave irradiation on wheat grain surface temperature, lipase activity and wet gluten content of whole wheat flour

2.2 适度微波辐照对小麦面粉粉质和糊化特性的影响

初步探究了适度微波辐照处理后小麦面粉品质的变化情况(表1和表2)。小麦籽粒微波处理前后其出粉率分别为 66.6% 和 67.6%,微波辐照后小麦出粉率略有提高。从表1可以看出,微波辐照处理后小麦面粉的吸水率降低,面团形成时间缩短、稳定时间增加,弱化度降低,说明面粉的筋力被强化了,增强了面团的耐搅拌性。适度的热处理能够促进小分子蛋白发生聚合,乙酸不溶性谷蛋白含量升高,强化

面筋蛋白,改善小麦粉的食用品质和工艺品质^[11-12]。然而,过度的微波辐照会对小麦和面粉的物化特性和食用品质产生不利影响,导致面粉的粉质特性变差^[13-14]。

从表2可以看出,微波辐照处理后面粉的糊化温度变化不显著,峰值粘度和回生值显著升高($p < 0.05$),崩解值显著降低($p < 0.05$)。微波辐照能够提高其面糊的粘度,面粉糊化是由淀粉和蛋白质共同作用的结果,一方面微波辐照降低了面粉的湿面筋含量,造成面筋网络结构对淀粉颗粒的包裹能力不足,从而使淀粉颗粒充分吸水膨胀;另一方面可能是由于热效应引起淀粉分子发生交联形成更大的分子,从而在悬浮溶液受热时产生较大的粘度值^[15]。回生值升高则表明淀粉颗粒内无定形区和结晶区的直链淀粉与直链淀粉、直链淀粉与支链淀粉发生了交互作用,产生新的不同稳定性的结晶体,从而导致微波处理后淀粉产生更加有序的结晶排列^[16]。

2.3 适度微波辐照对全麦粉储藏特性的影响

脂肪酸值是目前判定面粉和全麦粉是否在保质期内的有效方法。全麦粉行业标准(LS/T 3244-2015)质量指标要求全麦粉的脂肪酸值 ≤ 116 mg/100 g (以干基 KOH 计),由图5可以看出,对照组全麦粉在室温储藏(温度为 25 ℃,相对湿度为 60%) 10~12 周其脂肪酸值即超过 116 mg/g,而经微波辐照处理的全麦粉在室温储藏 16 周的脂肪酸值为 113.2 mg/g。与对照组样品相比,微波辐照处理延缓了全麦粉脂肪酸值的升高,提高了全麦粉的货架期至少 4 周时间。

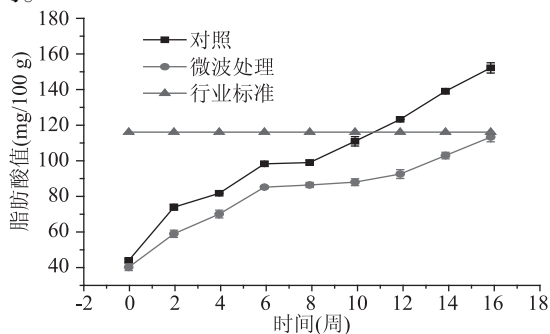


图5 微波辐照处理对全麦粉储藏期间脂肪酸值的影响
Fig.5 Effect of microwave irradiation on fatty acid value during whole wheat flour storage

3 结论

微波辐照能够有效钝化全麦粉的脂肪酶活动度,同时对湿面筋含量造成一定不利影响。适度的微波辐照处理(微波功率 < 560 W,辐照时间 < 120 s)能够大幅降低全麦粉脂肪酶活动度,同时对其湿面筋含量的不利影响较小。过度的微波辐照处理,湿面筋含量则大幅下降,全麦粉品质严重受损。

着水润麦处理,能够显著降低($p < 0.05$)全麦粉湿面筋的受损程度,同时不影响微波辐照钝化脂肪酶活动度的效果。润麦水分为 14%,润麦时间为 25 min 时,全麦粉湿面筋含量维持在较高水平。

适度的微波辐照处理(微波功率 420 W,辐照时间 90 s,润麦水分 14%,润麦时间 25 min)能够增加面粉的粉质稳定时间,降低弱化度,提高面糊的峰值粘度和回生值,说明微波辐照的热效应对小麦的蛋白质和淀粉均造成了一定影响,提高了面筋强度和面糊的热稳定性,改善了小麦粉的食用品质和工艺品质。同时,延缓了全麦粉脂肪酸值的升高,提升了全麦粉的货架期。

参考文献

[1] Liu R H. Whole grain phytochemicals and health[J]. Journal of Cereal Science, 2007, 46(3): 207-219.
[2] Onyencho S N, Hettiarachchy N S. Antioxidant activity of durum wheat bran [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1992, 40(9): 1496-1500.
[3] Sudha M L, Srivastava A K, Leelavathi K. Studies on pasting and structural characteristics of thermally treated wheat germ[J]. European Food Research and Technology, 2007, 225(3): 351-357.
[4] Srivastava A K, Sudha M L, Baskaran V, et al. Studies on heat stabilized wheat germ and its influence on rheological characteristics of dough [J]. European Food Research and Technology, 2007, 224(3): 365-372.

[5] 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, 33(16): 141-144.
[6] 刘艳香, 汪丽萍, 田晓红, 等. 稳定化全麦粉及其馒头加工品质评价研究[J]. 粮油食品科技, 2013, 21(6): 1-5.
[7] 左映平. 微波在食品工业中的应用进展[J]. 食品与生物, 2010(3): 9-10.
[8] Schiffmann R F. State of the Art of Microwave Applications in the Food Industry in the USA [M]// Advances in Microwave and Radio Frequency Processing. Springer Berlin Heidelberg, 2006.
[9] Campana L E, Sempe M E, Filgueira R R. Effect of microwave energy on drying wheat [J]. Cereal Chemistry, 1986, 63(3): 271-273.
[10] Błaszczak W, Gralik J, Klockiewicz-Kamińska E, et al. Effect of γ -radiation and microwave heating on endosperm microstructure in relation to some technological properties of wheat grain [J]. Food/Nahrung, 2002, 46(2): 122-129.
[11] Korablyova N V, Kasymova, T. D. Influence of a hydrothermal treatment on protein fractions of wheat [J]. Applied Biochemistry and Microbiology, 2011, 47(1): 93-102.
[12] Hansen L P, Johnston P H, Ferrel R E. Heat-moisture effects on wheat flour. I. Physical-chemical changes of flour proteins resulting from thermal processing [J]. American Association of Cereal Chemists, 1975: 459-472.
[13] Campana L E, Sempe M E, Filgueira R R. Physical, chemical, and baking properties of wheat dried with microwave energy [J]. Cereal Chemistry, 1993, 70(6): 760-762.
[14] MacArthur L A, D'Appolonia B L. Effect of microwave radiation and storage on hard red spring wheat flour [J]. Cereal Chemistry, 1981, 58(1): 53-60.
[15] 赵梅, 熊柳, 孙庆杰. 微波处理对小麦粉品质的影响[J]. 中国粮油学报, 2013, 28(6): 20-24.
[16] 罗志刚, 于淑娟, 杨连生. 微波场对小麦淀粉性质的影响[J]. 化工学报, 2007, 58(11): 2871-2875.

全国中文核心期刊
轻工行业优秀期刊